

بررسی عملکرد ترمودینامیکی جفت سیال عامل سیکل تبرید تراکمی آبشاری دومرحله‌ای جهت سرمایه‌ش تجهیزات مخابراتی با رویکرد کاهش حجم تجهیزات

محمد مهدی کشتکار*، الهه غلامیان

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:
بازنگری:
پذیرش:
ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

تحلیل ترمودینامیکی
تبرید تراکمی آبشاری
دومرحله‌ای، جفت سیال
کاهش حجم

خلاصه: در این تحقیق یک سیکل تبرید تراکمی آبشاری دومرحله‌ای با مبردهای مختلف به صورت ترمودینامیکی بررسی شده و سپس تک تک اجزاء سیکل با رویکرد دستیابی به حجم کمتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. متغیرهای عملکردی شامل دمای تبخیر، نسبت فشار کمپرسور و مقدار کار ورودی در هر دو سیکل دما بالا و دما پایین بوده و ظرفیت سرمایشی به عنوان قید مسئله در نظر گرفته شده است. با تغییر مبردهای سیکل دما بالا و دما پایین، تغییر حجم اجزاء مورد استفاده و تغییر ضریب عملکرد سیستم بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که کمترین حجم سیستم با استفاده از مبرد آر-۱۳۴، در سیکل دما بالا و مبردهای آر-۵۰۸ بی و آر-۲۳ در سیکل دما پایین به دست می‌آید. همچنین در دماهای تبخیر پایین حجم کمپرسور مورد استفاده به شدت وابسته به مقدار ظرفیت سرمایشی است. به نحوی که در دمای تبخیر ۱۷۳ کلون، با دو برابر شدن ظرفیت سرمایشی از ۱۰۰ تا ۲۰۰ وات، حجم کمپرسور از ۹۱۰۰ سانتی‌مترمکعب به میزان ۳/۲ برابر افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید با افزایش دمای تبخیر، حجم کندانسور هوایی کاهش می‌یابد و در دمای تبخیر ۱۷۳ کلون، با دو برابر شدن ظرفیت سرمایش از ۱۰۰ تا ۲۰۰ وات، حجم کندانسور هوایی در سیستم دومرحله‌ای آبشاری از ۴۵۰۰ به ۱۳۰۰۰ سانتی‌مترمکعب افزایش می‌یابد و با افزایش دمای تبخیر تغییر در افزایش حجم به واسطه تغییر ظرفیت سرمایشی کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

طی دهه گذشته ساختار کامپیوترهای سرور به واسطه کوچک شدن حجم نیمه‌رساناهای اکسید فلزات^۱ بسیار پیشرفت کرده است اما با وجود کاهش حجم، گرمای تولیدی در واحد حجم این سیستم‌ها نیز افزایش یافته است. انسیتوی مطالعات نیمه‌رساناها تخمین می‌زند که بیشترین مقدار انرژی که ریزپردازنده‌ها بدون استفاده از وسایل سرمایش، قابلیت انجام کار عادی را دارند برابر ۱۹۸ وات می‌باشد [۱]. همچنین مشخص شده است که عملکرد ریزپردازنده‌ها با کمتر شدن دمای محیط کاری بهتر می‌شود. اخیراً نشان داده شده است که در کارکردهای با دمای پایین، چپ نیمه‌رسانای اکسید فلزات توانایی

رسیدن به عملکرد ۳/۴ برابری را در دمای ۱۰۰°C- در مقایسه با زمانی که با توان بالا در دمای ۸۵°C کار می‌کند، دارد [۲]. در مواردی که به تبرید در دماهای پایین نیاز است، استفاده از سیستم‌های تبرید تک مرحله‌ای مقرون به صرفه نیست چرا که نسبت فشار بالا در کمپرسور، افزایش دمای خروجی روغن و کاهش بازده حجمی و ضریب عملکرد سیکل را به همراه دارد [۳].

یکی از روش‌های موثر و مرسوم جهت کاهش دمای محیط کاری تجهیزات مخابراتی و سرورها استفاده از سیستم تبرید آبشاری می‌باشد. در سیستم‌های تبرید آبشاری، از دو سیکل تبرید معمولی به طور موازی (سیکل دما بالا و سیکل دما پایین) استفاده می‌شود به طوری که کندانسور سیکل دما پایین به عنوان اواپراتور سیکل دما بالا عمل می‌کند. سیکل‌های تبرید تراکمی آبشاری یک روش موثر برای افزایش کارایی و ایجاد محیط مناسب برای تجهیزات الکترونیکی

- 1 - Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS)
- 2 - International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: keshtkar@iauk.ac.ir

و اختلاف دما در کندانسور آبخاری کاهش می‌یابد. هاتاچاریا در تحلیلی دیگر [۱۲]، سیکل آبخاری دومرحله‌ای بازگشت‌پذیر داخلی را به منظور تعیین دمای بهینه میانی برای اگزرژی و بار تبرید بیشینه مورد بررسی قرار داده است. مافی و همکاران [۱۳]، سیستم تبرید آبخاری در واحدهای الفین را از لحاظ ترمودینامیکی و اگزرژی تحلیل کردند. در این کار، از دو روش پینچ و اگزرژی به منظور بهبود بازده اگزرتیک کل سیستم تبرید استفاده شده است. گتو و بانسال [۱۴]، به تحلیل ترمودینامیکی سیستم آبخاری آمونیاک-دی‌اکسیدکربن به منظور بهینه‌سازی پارامترهای طراحی و عملیاتی آن پرداختند. بانسال و جین [۱۵]، دمای تقطیر بهینه دی‌اکسیدکربن را در سامانه آبخاری برای مبردهای آمونیاک (آر-۷۱۷^۳)، پروپان (آر-۲۹۰^۴)، پروپیلن (آر-۱۲۷^۵) و آر-۴۰۴^۶، که در مدار دما بالا مورد استفاده قرار می‌گرفت، را ارزیابی کردند. در تحقیقی که توسط مسینو [۱۶] صورت گرفته، مقایسه‌ای بین سیستم تبرید آبخاری آمونیاک-دی‌اکسیدکربن و سیستم‌های دومرحله‌ای هیدروفلئورکربنی^۷ انجام شد. پارخ و تیلور [۱۷]، به بهینه‌سازی سیکل تبرید آبخاری آر-۲۳/آر-۱۵۰۷^۸ با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. این سیکل تبرید آبخاری با هدف بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی سیستم از جمله ضریب عملکرد، حداقل کار مورد نیاز، اثر تبرید و راندمان اگزرتیک بررسی شده است. دینگچ و ایلری [۱۸]، بهینه‌سازی ترمودینامیکی-اقتصادی یک نمونه سیکل تبرید یک مرحله‌ای را بررسی کردند. در این تحقیق مساحت انتقال حرارت در اواپراتور، کندانسور و راندمان کمپرسور به عنوان متغیرهای مستقل طراحی اجزاء سیستم انتخاب شد. همچنین آن‌ها تحلیل اگزرژی را جهت محاسبه بازگشت‌ناپذیری‌های سیستم انجام دادند. صنایع و ملک‌محمدی [۱۹]، یک روش جدید بهینه‌سازی جهت طراحی اقتصادی و حرارتی واحدهای تهویه مطبوع با سیستم تبرید تراکمی بخار را ارائه دادند. در تحقیقی دیگر، ایلماز و همکاران [۲۰]، تحلیل ترمودینامیکی سیستم تبرید آبخاری آر-۴۰۴/آر-۷۴۴^۹ را جهت یافتن دمای تقطیر آبخاری بهینه انجام دادند. سلباس و همکاران [۲۱]، بهینه‌سازی ترمودینامیکی-اقتصادی یک

و مخابراتی می‌باشند. پس از دهه‌ها توسعه و استفاده روزافزون، این سیستم‌ها بسیار قابل اعتماد بوده و می‌توانند در ابعاد بسیار کوچک، مناسب برای سیستم‌های سرور طراحی و ساخته شوند [۴]. شرکت آی.بی.ام^۱ اولین شرکتی بود که از سیستم سرمایه‌گذاری برای کامپیوترهای خود استفاده کرد و توانست ۱۳۵۰ وات گرما را در دمای ۳۵°C دفع کند [۵].

محققان متعددی در زمینه سیستم‌های سرمایه‌گذاری آبخاری تحقیق کرده‌اند. یاری و رونقی [۶] به شناسایی محل ناکارآمدی سیستم تبرید آبخاری جهت کاهش تلفات و بهبود عملکرد سیکل تبرید پرداختند و با تحلیل اگزرژی پیشرفته، نتایجی جهت بهبود طراحی و عملکرد سیستم آبخاری به دست آوردند. ایندلی و همکاران [۷] به تعیین دمای تقطیر بهینه در کندانسور آبخاری که باعث کاهش حجم و افزایش ضریب عملکرد آن می‌شد پرداختند. همچنین آن‌ها بهینه‌سازی ضریب عملکرد و کمینه‌سازی تخریب اگزرژی سیستم با متغیرهای دمای تبخیر مبرد سیکل دما پایین، دمای تقطیر مبرد سیکل دما بالا و اختلاف دما در کندانسور آبخاری را بررسی کردند. گنگ و همکاران [۸] سیکل آبخاری دومرحله‌ای را به منظور تعیین دمای بهینه میانی برای اگزرژی و بار تبرید بیشینه مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکاران [۹] به بررسی یک سیکل دومرحله‌ای آبخاری که دو جداکننده مایع-بخار داشت و با شش زوج مبرد دوست‌دار محیط زیست کار می‌کرد، پرداختند و نشان دادند که نسبت فشار دو سیکل و کیفیت مخلوط مبردها از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر ضریب عملکرد^۲ سیستم می‌باشند. هاتاچاریا و همکاران [۱۰]، نتایج بهینه‌سازی یک سیستم آبخاری پروپان-دی‌اکسیدکربن را برای سیستم‌های تبرید سرمایشی و گرمایشی را به طور همزمان، نشان دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که ضریب عملکرد سیستم آبخاری با افزایش دمای فضای سرد افزایش می‌یابد. لی و همکاران [۱۱]، به تعیین دمای تقطیر بهینه در کندانسور آبخاری، بهینه‌سازی ضریب عملکرد و کمینه‌سازی تخریب اگزرژی سیستم با متغیرهای تصمیم دمای تبخیر دی‌اکسیدکربن، دمای تقطیر آمونیاک و اختلاف دما در کندانسور آبخاری پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دمای تقطیر بهینه کندانسور آبخاری با افزایش دمای تقطیر و دمای تبخیر افزایش می‌یابد و ضریب عملکرد سیستم با افزایش دمای تقطیر

3 R-717
4 R-290
5 R-1270
6 R-404A
7 Hydrofluorocarbon (HFC)
8 R-507A/R-23
9 R-404A/R-744

1 IBM
2 Coefficient of Performance (COP)

۲- تحلیل ترمودینامیکی سیستم تبرید آبشاری

۱-۲ بیان مساله

شکل ۱ شماتیک یک سیکل تبرید آبشاری دو مرحله‌ای به همراه دیاگرام فشار-انتالپی مربوطه را نشان می‌دهد. این سیستم تبرید شامل دو مدار جداگانه یعنی مدار دما بالا^۱ و دیگری مدار دما پایین^۲ می‌باشد. این دو مدار توسط یک مبدل حرارتی به نام کندانسور آبشاری که به عنوان اواپراتور مدار دما بالا و کندانسور مدار دما پایین عمل می‌کند، به هم کوپل حرارتی شده‌اند. کندانسور حرارت \dot{Q}_h را در دمای تقطیر T_C به محیط در دمای T_O دفع می‌کند. اواپراتور نیز توان تبرید \dot{Q}_c را در دمای تبخیر T_E از فضای سرد در دمای T_{CL} جذب می‌کند. $T_{cas,C}$ و $T_{cas,E}$ به ترتیب نشان‌دهنده دمای تبخیر مبرد سیکل دما بالا و تقطیر مبرد سیکل دما پایین بوده و $\Delta T_{cas} = T_{cas,C} - T_{cas,E}$ ، اختلاف دما در کندانسور آبشاری می‌باشد. در کار حاضر تحلیل ترمودینامیکی سیستم تبرید آبشاری بر اساس فرضیات زیر انجام شده است [۲۶]:

- تراکم آیزنتروپیک با بازده 0.84 در کمپرسورهای مدار دما بالا و مدار دما پایین
- چشم‌پوشی از افت فشار و تلفات حرارت در شبکه لوله‌ها و اجزای سیکل
- انبساط آیزنتالپیک مبردها در شیر انبساط
- چشم‌پوشی از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل
- اگر \dot{m}_H دبی جرمی مبرد در مدار بالا و \dot{m}_L دبی جرمی مبرد در مدار پایین باشد، با فرض حجم کنترل حول هر یک از اجزای سیکل، تحلیل انرژی سیستم به صورت زیر خواهد بود.

۲-۲ تحلیل انرژی سیستم آبشاری دو مرحله‌ای

مطابق شکل ۱ معادلات حاکم جهت تحلیل انرژی سیکل مورد نظر به صورت زیر می‌باشند [۲۵]:

ظرفیت سرمایی تبخیر کننده:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L (h_1 - h_4) \quad (1)$$

مصرف توان کمپرسور مدار دما بالا:

سیکل تک مرحله‌ای تبرید تراکمی بخار را روی سه مبرد، آر-۲۲، آر-۱۳۴آ و آر-۴۰۷سی انجام دادند. در تحقیقی دیگر، دویی و کومار [۲۲]، تجزیه و تحلیل یک سیستم تبرید آبشاری دوگانه با مبردهای پروپیلن-دی‌اکسیدکربن را انجام دادند. پروپیلن به عنوان مبرد سیکل دما پایین و دی‌اکسیدکربن به عنوان مبرد سیکل دما بالا انتخاب شده است. در این تحقیق، تغییرات سه پارامتر مهم طراحی از جمله، دمای کندانسور، دمای اواپراتور و اختلاف دما در مبدل حرارتی آبشاری جهت دست یافتن به بیشترین ضریب عملکرد، بررسی شده است. شهریاری و سرحدی [۲۳] در سال ۲۰۱۷ به بررسی پتانسیل استفاده از انرژی خورشیدی توسط گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی^۱ به عنوان منبع حرارت ورودی به سیستم تبرید جذبی تک اثره لیتیموم برماید-آب پرداختند. در این تحقیق آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلف عملکردی شامل تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی ، دمای ژنراتور، دمای اواپراتور، دمای کندانسور و دمای ایزوربر بر ضریب عملکرد روزانه سیکل تبرید خورشیدی را بررسی کردند. کشتکار و طالبی‌زاده در سال ۲۰۱۷ [۲۴] برای سیکل تولید آب سرد واحد ۱۳۲ پالایشگاه دوم پارس جنوبی، اهداف ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست محیطی را بهینه‌سازی کردند. در ابتدا سیکل موجود و در حال کار پالایشگاه، در نرم افزار ای.ای.اس^۲ مدل‌سازی شد و سپس نتایج خروجی آن با داده‌های واقعی از واحد مربوطه مقایسه گردید. در تحقیق دیگری، کشتکار و ظهیری در سال ۲۰۱۸ [۲۵] شبیه‌سازی ترمودینامیکی یک سیستم تبرید جریان متغیر را انجام دادند. در این کار آن‌ها پاسخ ترمودینامیکی سیستم به شرایط مختلف را از قبیل تغییر دمای تبخیر و تقطیر را بررسی کردند.

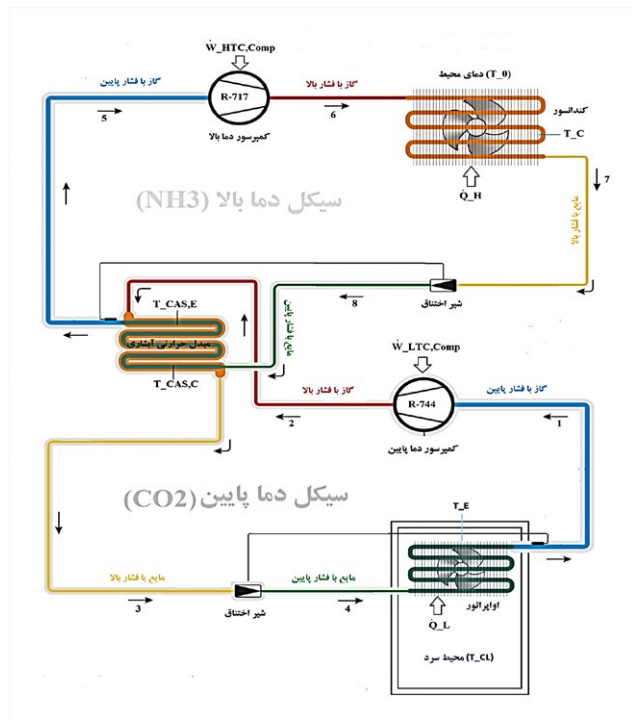
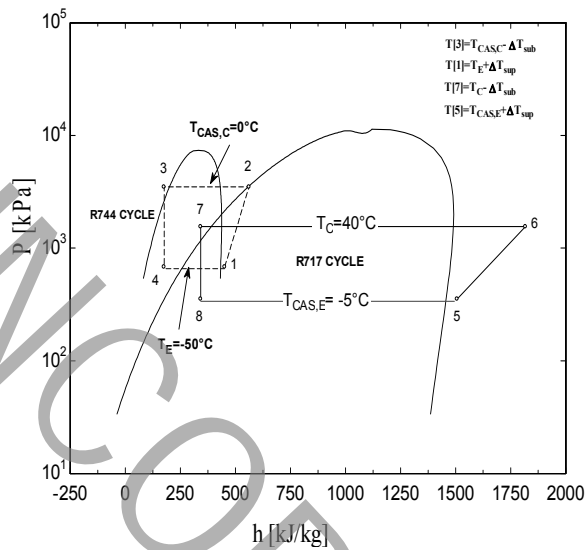
با بررسی مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل سیستم‌های تبرید آبشاری تاکنون تحقیقی در زمینه مساله کاهش حجم تجهیزات مورد استفاده در سیستم آبشاری مشاهده نگردیده است. لذا در مطالعه حاضر یک سیکل تبرید تراکمی آبشاری دو مرحله‌ای در شرایط مشخص با هدف کاربرد در تجهیزات مخابراتی و الکترونیکی تحلیل پارامتری شده و سپس با استفاده از معادلات ترمودینامیکی حاکم بر تک تک اجزاء سیکل و با تغییر مبردهای سیکل بالا و پایین، کمینه شدن حجم اجزاء مورد استفاده و بیشینه شدن کارایی سیستم، بررسی می‌گردد.

3 -High Temperature Circuit (HTC)

4 ³- Low Temperature Circuit (LTC)

1 PV/T

2 - Engineering Equation System (EES)



شکل ۱: شماتیک سیکل تبرید آبشاری دومرحله‌ای و نمودار فشار-آنتالپی مربوطه

و نهایتاً ضریب عملکرد کلی سامانه نیز توسط رابطه زیر به دست

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{HTC} + \dot{W}_{LTC}} \quad (7)$$

همچنین ضریب عملکرد (COP) به عنوان تابعی از آنتالپی‌های ویژه توسط جایگزینی معادلات (۱) تا (۴) در معادله (۷) به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$COP = \frac{(h_5 - h_8)(h_1 - h_4)}{(h_6 - h_5)(h_2 - h_3) + (h_5 - h_8)(h_2 - h_1)} \quad (8)$$

با توجه به نقاط موجود در سیکل و مشخص کردن خواص ترمودینامیکی مبردهای هر دو سیکل مانند فشار، دما، آنتالپی و آنترופی با استفاده از نرم افزار ای.ای.اس، می‌توان جدولی مانند جدول ۱ ترتیب داد. روابط نوشته شده در این جدول با فرض معلوم بودن مقادیر، دمای تبخیر (T_E)، دمای تقطیر (T_C)، میزان فوق گرم شدن (ΔT_{sup})، میزان زیر سرد شدن (ΔT_{sub})، دمای تبخیر کندانسور آبشاری ($T_{cas,E}$)، دمای تقطیر کندانسور آبشاری ($T_{cas,C}$)، دمای محیط (T_O)، دمای فضای سرد (T_{CL}) و استفاده از فرضیات ذکر شده انجام می‌گردد. در این تحقیق مبردهای آر-۲۳،

$$\dot{W}_{comp,HTC} = \frac{\dot{m}_H (h_{6S} - h_5)}{\eta_s \eta_m \eta_e} = \frac{\dot{m}_H (h_6 - h_5)}{\eta_m \eta_e} \quad (2)$$

مصرف توان کمپرسور مدار دما پایین:

$$\dot{W}_{comp,LTC} = \frac{\dot{m}_L (h_{2S} - h_1)}{\eta_s \eta_m \eta_e} = \frac{\dot{m}_L (h_2 - h_1)}{\eta_m \eta_e} \quad (3)$$

در روابط بالا η_m و η_e به ترتیب راندمان مکانیکی و الکتریکی موتور کمپرسور می‌باشند که برابر با ۰/۹۳ در نظر گرفته شده اند.

نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی آبشاری:

$$\dot{Q}_{cas} = \dot{m}_L (h_2 - h_3) = \dot{m}_H (h_5 - h_8) \quad (4)$$

نسبت جرمی جریان در دو مدار:

$$\frac{\dot{m}_H}{\dot{m}_L} = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8} \quad (5)$$

نرخ دفع حرارت توسط کندانسور:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_H (h_6 - h_7) \quad (6)$$

جدول ۱: نحوه تعیین خواص ترمودینامیکی سیستم آبخاری دومرحله‌ای با استفاده از نرم افزار ای.ای.اس برای جفت سیال آر-۱۱۳۴/آر-۵۰۸ بی

شیر انبساط	خروجی کندانسور	خروجی کمپرسور	خروجی اواپراتور
سیکل دما پایین			
$P_4 = P_1$	$P_2 = P_3$	$P_2 = P_{sat}(R508B, T = T_{CAS,C})$	$P_1 = f(R508B, T = T_E, x = 1)$
$T_4 = T_E$	$T_3 = T_{CAS,C} - \Delta T_{sub}$	$h_2 = f(R508B, P = P_2, T = T_2)$	$T_1 = T_E + \Delta T_{SUP}$
$h_4 = h_3$	$h_3 = f(R508B, T = T_3, P = P_3)$	$h_2 = f(R508B, P = P_2, s = s_1)$	$h_1 = f(R508B, T = T_1, P = P_1)$
-	-	$\eta_{isen} = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1)$	$s_1 = (R508B, T = T_1, P = P_1)$
سیکل دما بالا			
$P_8 = P_5$	$P_7 = P_6$	$P_6 = P_{sat}(R134a, T = T_C)$	$P_5 = f(R134a, T = T_{CAS-E}, x = 1)$
$T_8 = T_{CAS-E}$	$T_7 = T_C - \Delta T_{sub}$	$h_6 = f(R134a, P = P_6, T = T_6)$	$T_5 = T_{CAS-E} + \Delta T_{SUP}$
$h_8 = h_7$	$h_7 = f(R134a, T = T_7, P = P_7)$	$h_{6s} = f(R134a, P = P_6, S = S_5)$	$h_5 = f(R134a, T = T_5, P = P_5)$
-	-	$\eta_{isen} = (h_{6s} - h_5) / (h_6 - h_5)$	$s_5 = (R134a, T = T_5, P = P_5)$

حجم کمپرسور (V_{comp}) در مدار دما بالا و مدار دما پایین با استفاده از دبی جرمی و حجم ویژه مبرد ورودی به کمپرسور (v_{in}) و با در نظر گرفتن سرعت کاری کمپرسور (N) برابر با ۳۶۰۰ rpm و کارایی حجمی (η_{vol}) معادل ۵۰٪ از روابط زیر به دست آورده می‌شود [۲۹]:

$$V_{comp,HTC} = \frac{v_5 \dot{m}_{HTC}}{N \cdot \eta_{vol}} \quad (11)$$

$$V_{comp,LTC} = \frac{v_1 \dot{m}_{LTC}}{N \cdot \eta_{vol}} \quad (12)$$

جهت محاسبه حجم کندانسور هوایی از یک مبدل حرارتی با پره‌های پیوسته به شکل لوله گرد در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. با استفاده از روش NTU جهت تعیین مساحت مورد نیاز انتقال گرما در سمت گاز (A_h) با در نظر گرفتن قطر خارجی لوله (D_o)، قطر داخلی لوله (D_i)، قطر هیدرولیکی مجرای جریان (D_h)، ضخامت پره (t)، مساحت سطح انتقال گرما بر واحد حجم (α)، نسبت سطح مقطع جریان آزاد به مقطع جریان ورودی (σ)، نسبت حداقل مساحت مقطع جریان آزاد مجرای پره دار در جهت عمود بر جهت جریان (A_{ff})، مساحت سطح مقطع ورودی مبدل (A_{fr})، نسبت مساحت سطح پره‌ها به سطح کل ($\frac{A_f}{A}$) و با علم به اینکه سطح

آر-۱۶۰۰ و آر-۵۰۸ بی در سیکل دما پایین و آر-۱۱۳۴، آر-۲۲، آر-۲۹۰ و آر-۱۲ در سیکل دما بالا در نظر گرفته شده‌اند زیرا استفاده از این مبردها در سیستم‌های تبرید آبخاری مرسوم‌تر می‌باشد [۲۷]. شرایط کاری سیکل مورد بررسی به صورت دمای تبخیر اواپراتور $T_E = 173 K$ ، دمای تقطیر کندانسور $T_C = 312 K$ ، دمای محیط $T_O = 30.5 K$ ، اختلاف دما در مبدل آبخاری $\Delta T_{cas} = 5 K$ ، میزان فوق گرم شدن $\Delta T_{sup} = 5 K$ ، میزان زیر سرد شدن $\Delta T_{sub} = 3 K$ ، ظرفیت سرمایشی اواپراتور برابر $Q_L = 100 W$ می‌باشد.

۳- معادلات حاکم بر محاسبه حجم هر یک از اجزاء سیکل

در این تحلیل، کمپرسورهای پیستونی به علت قیمت پایین و در دسترس بودن در نظر گرفته شده‌اند. حجم موتور الکتریکی (V_{motor}) توسط توان ورودی به کمپرسور (\dot{W}_{in}) و چگالی قدرت در دسترس (P_d) برای موتورهای ۴ قطبی سه‌فاز از رابطه زیر تخمین زده می‌شود [۲۸]:

$$P_d = 1.76 \dot{W}_{in} + 208000 \quad (9)$$

$$V_{motor} = \frac{\dot{W}_{in}}{P_d} \quad (10)$$

آورده می‌شود. با توجه به این‌که:

$$C_c = \dot{m}_c C_{p,c} \quad (19)$$

$$C_h = \dot{m}_h C_{p,h} \quad (20)$$

مبدل حرارتی بایستی به اندازه‌ای باشد که نرخ انتقال گرمای زیر را تامین کند:

$$q = C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (21)$$

حداکثر نرخ انتقال گرمای مجاز برابر است با:

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (22)$$

که C_{min} ، کمترین مقدار بین C_c و C_h می‌باشد. در نتیجه [۳۰]:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (23)$$

بنابراین برای مبدل حرارتی جریان عمود بر هم با هر دو سیال غیرمخلوط مقدار NTU به دست می‌آید. در نهایت مساحت سطح سمت گاز برابر است با:

$$A_h = \frac{NTU \cdot C_{min}}{U_h} \quad (24)$$

با توجه به نسبت سطح انتقال گرمای سمت گاز به حجم کل (α) حجم کل کندانسور برابر است با [۳۱]:

$$V_{condenser} = \frac{A_h}{\alpha} \quad (25)$$

در طراحی اوپراتور، انتقال گرما را با افزایش ضریب سطح انتقال گرما و افزایش مسیر عبور مبرد بهینه می‌کنند. اندازه اوپراتور با استفاده از ضریب انتقال گرمای جوششی که توسط لی و مودارا [۳۲] محاسبه شده، به دست می‌آید. این مدل شار گرمایی $98/3 \text{ W/cm}^2$ را برای اوپراتورهای هوایی پیشنهاد می‌کند. از آنجاکه طبق این مدل سطح انتقال حرارت اوپراتور به صورت خطی با ظرفیت سرمایشی سیستم متناسب است لذا سطح و حجم اوپراتور سیستم مورد مطالعه از روابط زیر به دست می‌آیند:

داخل لوله‌ها پرده‌دار نیست ($\eta_{oc} = 1$)، ضریب انتقال گرمای کلی بر مبنای سطح سمت گاز داغ به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۳۰]:

$$\frac{1}{U_h} = \frac{1}{h_c \left(\frac{A_c}{A_h} \right)} + A_h R_W + \frac{1}{\eta_{oh} h_h} \quad (13)$$

که در آن A_c, A_h به ترتیب مساحت سطح کل انتقال گرمای سمت گرم و سرد می‌باشند. اگر ضخامت پره ناچیز در نظر گرفته شود می‌توان نشان داد [۳۰]:

$$\frac{A_c}{A_h} = \frac{D_i}{D_o} \left(1 - \frac{A_{f,h}}{A_h} \right) \quad (14)$$

که در آن $A_{f,h}$ مساحت سطح پره‌های سمت گاز است. خطای ناشی از این تقریب کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. مقاومت هدایتی جدار لوله نیز از معادله زیر به دست می‌آید:

$$A_h R_W = \frac{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2\pi l k / A_h} = \frac{D_i \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2k \left(\frac{A_c}{A_h} \right)} \quad (15)$$

برای تعیین ضریب جابه‌جایی سمت گاز ابتدا بایست سرعت جرمی را از معادله زیر به دست آورد:

$$G = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}} \quad (16)$$

سپس با استفاده از عدد رینولدز جریان و نمودار ضرایب انتقال گرما و اصطکاک برای مبدل حرارتی با لوله‌های با پره‌های دایره‌ای ضریب j_H و در نهایت ضریب سمت گاز به دست آورده می‌شود [۳۱]:

$$h_h = j_H \left(\frac{G \cdot C_p}{Pr^{2/3}} \right) \quad (17)$$

برای تعیین بازده سمت گرم ابتدا بایستی راندمان پره را به دست آورد [۳۲]:

$$\eta_{oh} = 1 - \left[\frac{A_f}{A} (1 - \eta) \right] \quad (18)$$

اکنون با جانشینی مقادیر فوق در معادله (۱۳)، U_h به دست

که μ ویسکوزیته جریان و k ضریب هدایت سمت گاز می‌باشد. مقدار گرمای منتقل شده از مبرد سیکل دما پایین به مبرد سیکل دما بالا از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (32)$$

در نهایت حجم کندانسور آبشاری به صورت زیر محاسبه می‌شود: [۳۴]:

$$V_{cas} = 2(2L_{cas})(3W_{cold\ plate})(4H_{ch}) \quad (33)$$

لازم به ذکر است در کار حاضر، حجم لوله‌های سیستم، شیرهای انبساط و عایق‌ها در محاسبات در نظر گرفته نشده‌اند.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- صحت سنجی

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی انجام شده، ضریب عملکرد سیکل تبرید آبشاری ساده با نتایج مرجع [۳۰] مقایسه شده است. مرجع [۲۶] با استفاده از مبردهای دی‌اکسیدکربن-آمونیاک (آر-۷۱۷/آر-۷۴۴) به بهینه‌سازی ترمودینامیکی-اقتصادی-زیست محیطی سامانه تبرید آبشاری پرداخته است.

به این منظور شرایط کاری سیکل آبشاری مرجع [۲۶] شامل دمای تبخیر در سیکل دما بالا، دمای تبخیر در سیکل دما پایین، اختلاف دمای دو مبرد در کندانسور آبشاری و دمای تقطیر به سیکل آبشاری مورد بررسی، اعمال شده است. شکل‌های ۲ (a) و ۲ (b) نشان می‌دهند که روند تغییر ضریب عملکرد کار حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع [۲۶] یکسان می‌باشد که نشان‌دهنده صحت عملکرد کد محاسباتی نوشته شده توسط نویسندگان می‌باشد. همان‌گونه که از شکل‌های مشخص است خطای متوسط نسبی برابر با ۱۶٪ در این مقایسه وجود دارد. مقدار اختلاف ضریب عملکرد در کار حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع [۲۶] ناشی از طراحی متفاوت مبدل‌های حرارتی مورد استفاده می‌باشد.

پس از اطمینان از صحت حل مساله می‌توان ضریب عملکرد سیستم و حجم اجزا مختلف و حجم کل سیستم را با تغییر مبردهای سیکل دما بالا و سیکل دما پایین، دمای کاری تبخیرکن سیکل دما بالا و سیکل دما پایین و پارامترهای موثر دیگر را مشخص نمود. شرایط کاری سیکل مورد بررسی به صورت دمای تبخیر اواپراتور

$$A_h = \frac{\dot{Q}_{in}}{q_{flux}} \quad (26)$$

$$V_{evap} = 2(1 + A_h^2)^2 \quad (27)$$

کندانسور آبشاری مورد نظر نیز از یک اواپراتور میکروچنل و یک کندانسور چندکاناله تشکیل شده است. ضریب انتقال گرمای چگالش که با استفاده از ضریب تصحیحی که توسط کولیر و تامس [۳۰] به دست آمده کمتر از ضریب انتقال گرمای جوششی است. بنابراین حجم کندانسور آبشاری با مساحت سطح مورد نیاز برای چگالش سیال تخمین زده می‌شود. اخیراً تصحیح جدیدی برای ضریب انتقال گرما توسط پندهور و همکاران [۳۳] ارائه شده است ولی نتایج را تغییر چندانی نمی‌دهد. در مناطق مادون سرد و مافوق گرم انتقال حرارت جابه‌جایی برای گاز و مخلوط دو فازی محاسبه می‌شود. محاسبات در ناحیه دو فازی کاملاً مجزاست و انتقال گرما با توجه به کیفیت مبرد در هر سلول اندازه‌گیری می‌شود. جهت اندازه‌گیری حجم کندانسور آبشاری با در نظر گرفتن ابعاد هندسه مبدل به صورت ارتفاع کانال (H_{ch})، عرض کانال (W_{ch})، عرض مفید کانال (W_w)، محیط کانال (P)، مساحت سطح مقطع جریان آزاد (A_{flow})، نسبت سطح مقطع جریان آزاد (β) داریم:

$$W_w = \frac{W_{ch}}{2}, \quad N_{ch} = \frac{W_{cold\ plate}}{2W_{ch}}, \quad \beta = \frac{W_{ch}}{H_{ch}} \quad (28)$$

که N_{ch} تعداد کانال‌ها در مبدل حرارتی و $W_{cold\ plate}$ عرض صفحه مبدل می‌باشد [۳۳]. مساحت سطح مقطع ورودی جریان و قطر هیدرولیکی از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$A_{flow} = H_{ch} W_{ch}, \quad d_h = \frac{2A_{flow}}{H_{ch} + W_{ch}} \quad (29)$$

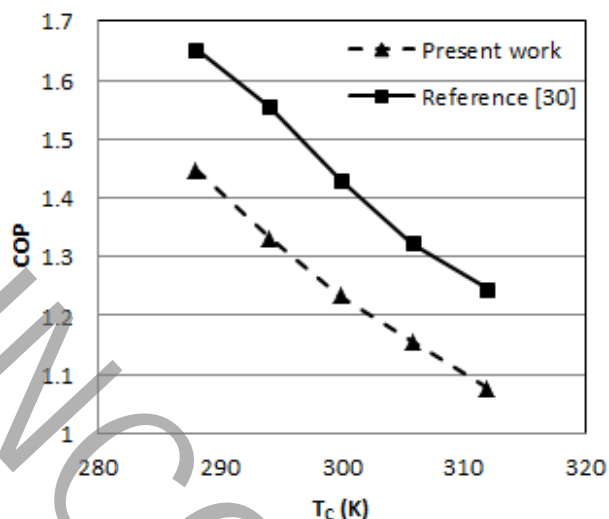
برای تعیین ضریب جابه‌جایی سمت گاز ابتدا سرعت جرمی از معادله زیر به دست آورده می‌شود [۳۳]:

$$G = \frac{\dot{m}}{N_{ch} A_{flow}} \quad (30)$$

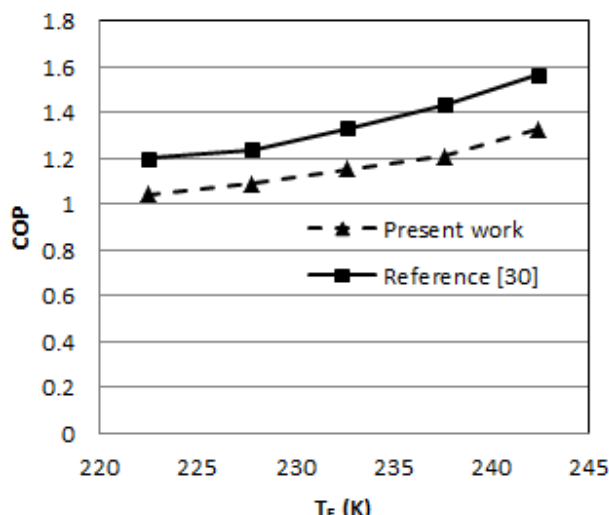
سیس با استفاده از عدد رینولدز و عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت سمت گاز و طول کانال‌ها محاسبه می‌شود:

$$Re = \frac{d_h G}{\mu}, \quad Nu_D = 0.23 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3}, \quad h_h = \frac{Nu_D \cdot k}{d_h} \quad (31)$$

$$L_{cas} = \frac{\dot{m}}{N_{ch}} \cdot \frac{\Delta h}{h_h \cdot P \cdot \Delta T}$$

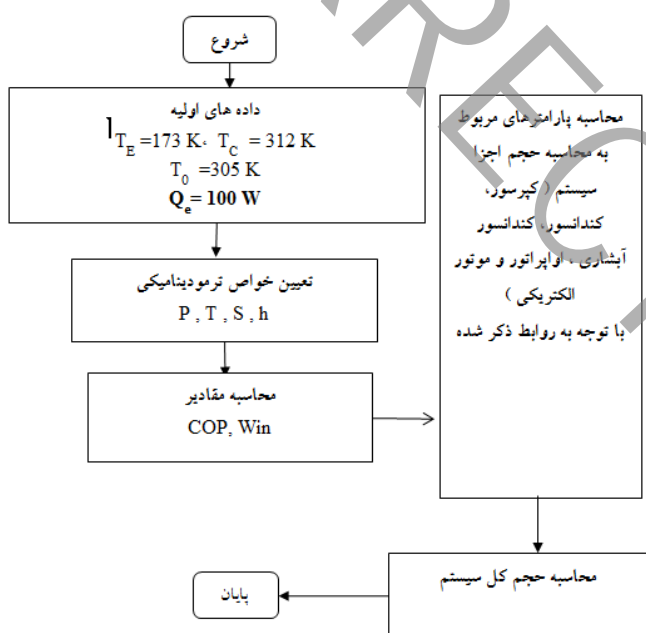


(b)



(a)

شکل ۲: صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده جهت بررسی تغییرات ضریب عملکرد سیستم بر حسب (a) تغییر دمای تبخیر در سیکل دما پایین (b) تغییر دمای تقطیر در سیکل دما بالا

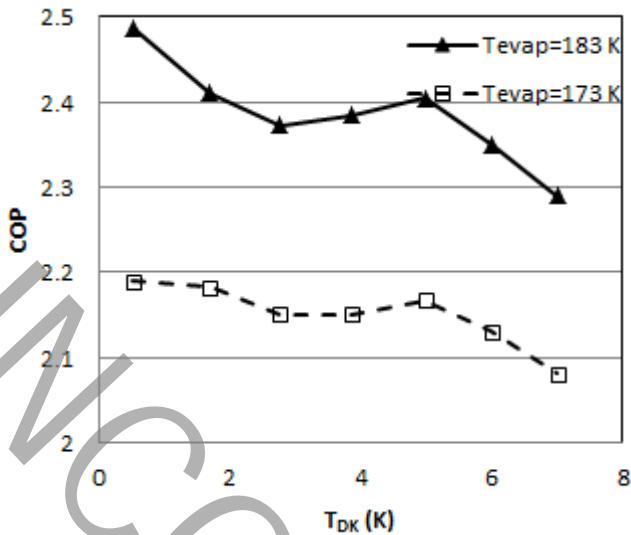


شکل ۳: الگوریتم حل مساله

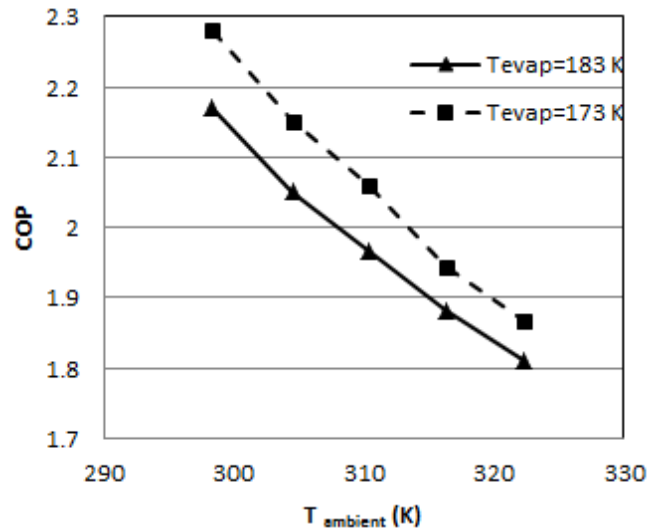
$T_E = 173\text{ K}$ ، دمای تقطیر کندانسور $T_C = 312\text{ K}$ ، دمای محیط $T_0 = 305\text{ K}$ ، اختلاف دما در مبدل آبشاری $\Delta T_{cas} = 5\text{ K}$ ، ظرفیت سرمایشی اواپراتور برابر $Q_L = 100\text{ W}$ می‌باشد و اثر این پارامترها در بخش زیر بررسی می‌گردد. با تکمیل شدن روابط حاکم بر مساله، یک کد محاسباتی در نرم‌افزار محاسباتی ای.ای.اس-۹/۴۷۸ برای تحلیل ترمودینامیکی تمامی اجزای سیستم به کار گرفته شده و از پایگاه داده‌های نرم‌افزار در محاسبه مشخصات ترمودینامیکی مبردها جهت حل دستگاه معادلات جبری استفاده شده است. روند حل مساله در نمودار گردش شکل ۳ نشان داده شده است. پس از وارد کردن داده‌های مساله مورد نظر و تعیین خواص ترمودینامیکی سیکل دما بالا و دما پایین، مقادیر ضریب عملکرد و توان کمپرسورها، با توجه به روابط ذکر شده در بخش‌های قبل پارامترهای مربوط به هر جز در جهت محاسبه حجم سیستم، محاسبه می‌گردند.

با توجه به معادلات ذکر شده در بخش‌های قبل و الگوریتم حل مساله، در کار حاضر یک سیکل تبرید تراکمی آبشاری دومرحله‌ای در شرایط عملکرد مشخص با هدف کاربرد در تجهیزات مخابراتی در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از معادلات ترمودینامیکی حاکم بر تک تک اجزاء سیکل و با تغییر مبردهای سیکل بالا و پایین، کمینه شدن حجم اجزاء مورد استفاده، بررسی می‌گردد.

۲-۴ بررسی تغییر ضریب عملکرد سیستم با تغییر پارامترهای مختلف در شکل ۴ تغییر ضریب عملکرد سیستم آبشاری آر-۱۱۳۴/آر-۵۰۸ بی^۱ بر حسب دمای محیط برای دو دمای تبخیر متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش دمای تبخیر سیکل دما پایین، در دمای محیط ثابت ضریب عملکرد سیستم افزایش



شکل ۵: تغییر ضریب عملکرد بر حسب اختلاف دما در مبدل میانی در دو دمای تبخیر متفاوت



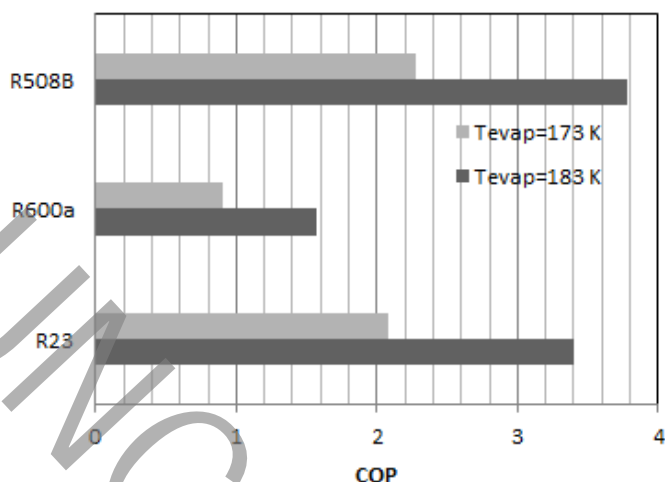
شکل ۴: تغییر ضریب عملکرد بر حسب دمای محیط در دو دمای تبخیر متفاوت

مشکل می‌باشد. لذا برای شرایط مورد بررسی، بالاترین ضریب عملکرد قابل حصول در اختلاف دمای ۵ درجه کلوین به دست می‌آید که در این تحقیق از این اختلاف دما در شبیه‌سازی استفاده شده است.

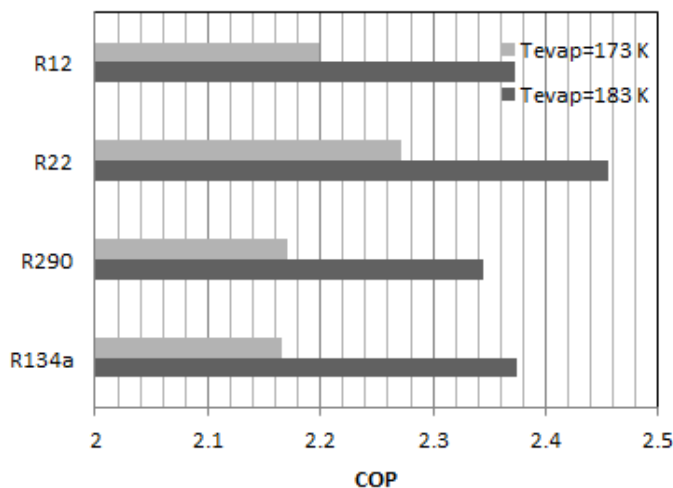
شکل ۶ (a) نشان‌دهنده تغییر ضریب عملکرد سیستم با تغییر میرد سیکل دما بالا و استفاده از میرد آر-۵۰۸ بی در مدار سیکل پایین در دو دمای کاری مختلف اواپراتور می‌باشد. مشاهده می‌شود ضریب عملکرد میرد آر-۲۲ نسبت به میردهای دیگر بیشتر است. علت این موضوع را می‌توان بیشتر بودن حرارت نهان تبخیر این میرد، نسبت به میردهای دیگر دانست که باعث بیشتر شدن اثر تبرید در دمای یکسان نسبت به سایر میردها می‌گردد. مشاهده می‌شود با افزایش دمای تبخیر از ۱۷۳ K تا ۱۸۳ K ضریب عملکرد سیستم با میرد آر-۲۲ از ۲/۲۸ به ۲/۴۵ به میزان ۱۰٪ افزایش یافته است. البته به دلیل آن که پتانسیل تخریب لایه اوزون^۱ میرد آر-۲۲ برابر با ۰/۰۵ و میزان پتانسیل گرمایش کره زمین^۲ آن برابر با ۱۷۰۰ و بسیار بالا می‌باشد به همین دلیل استفاده از آر-۲۲ در اکثر نقاط دنیا ممنوع شده است. مقدار ضریب عملکرد میرد آر-۱۲ کمی بالاتر از آر-۱۳۴ است ولی با توجه به اختلاف بسیار زیاد پتانسیل گرمایش کره زمین این میرد نسبت به آر-۱۳۴ (GWP_{R-134a} = ۱۴۳۰، GWP_{R-12} = ۱۰۰) (۱)

می‌یابد. شکل ۴ نشان می‌دهد که هر چه دمای محیط کاری وسایل الکترونیک بالاتر برود کارایی سیستم خنک‌کننده کاهش می‌یابد و گرمای کمتری را دفع می‌نماید. برای رفع این مشکل می‌بایست یا تعداد سیکل‌های تبرید را بیشتر کرده و یا تغییراتی در اجزاء سیستم مثل اضافه کردن فن‌های دمنده روی کندانسور یا بزرگ‌تر کردن اواپراتور انجام داد که این کار باعث بالارفتن حجم و هزینه سیستم می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود در دمای تبخیر $T_E = 183 K$ با افزایش دمای محیط از ۳۰۰ تا ۳۲۰ کلوین، ضریب عملکرد از ۲/۱۶ به ۱/۸ به میزان ۴۳٪ کاهش می‌یابد. با کاهش دمای تبخیر نرخ دفع حرارت در کندانسور آبشاری افزایش و دمای تقطیر سیکل دما بالا کاهش می‌یابد در نتیجه ضریب عملکرد سیستم افزایش خواهد یافت. اختلاف دما در کندانسور آبشاری یکی از مهم‌ترین فاکتورها در طراحی سیستم‌های تبرید می‌باشد که تاثیر بسیار زیادی روی ضریب عملکرد سیستم دارد. در تئوری هرچه این اختلاف دما کمتر باشد کار کمپرسور کمتر می‌شود و در نتیجه ضریب عملکرد سیستم به دلیل افزایش اثر تبرید در مدار دما بالا و کاهش کار کمپرسور مدار دما بالا و دما پایین بالاتر می‌رود ولی در طراحی سیستم واقعی گاهی این اختلاف دما تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد هم می‌رسد. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد سیستم با ۱ درجه کلوین اختلاف دما ضریب عملکرد بالاتری دارد ولی در عمل ساخت چنین سیستمی بسیار

1 Ozone Depletion Potential (ODP)
2 Global Warming Potential (GWP)



(b)



(a)

شکل ۶: تغییر ضریب عملکرد سیستم با تغییر مبرد (a) سیکل دما بالا (b) سیکل دما پایین در دو دمای متفاوت کاری اواپراتور

۱۱۳۴ بازگشت‌ناپذیری کمتری نسبت به زوج آر-۱۱۳۴/آر-۵۰۸ بی دارد [۳۴].

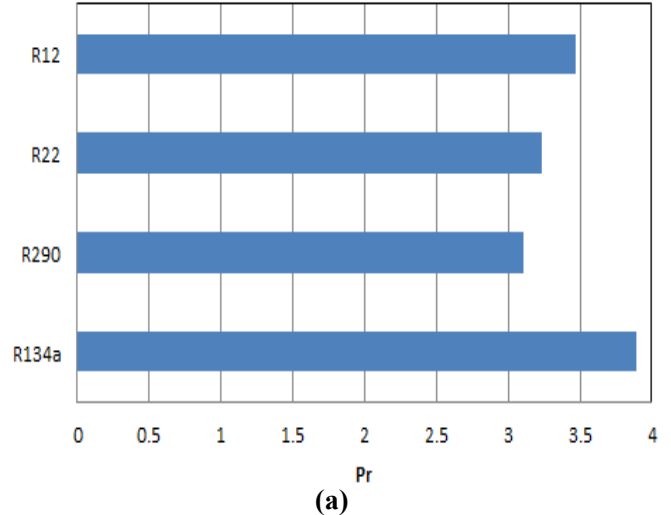
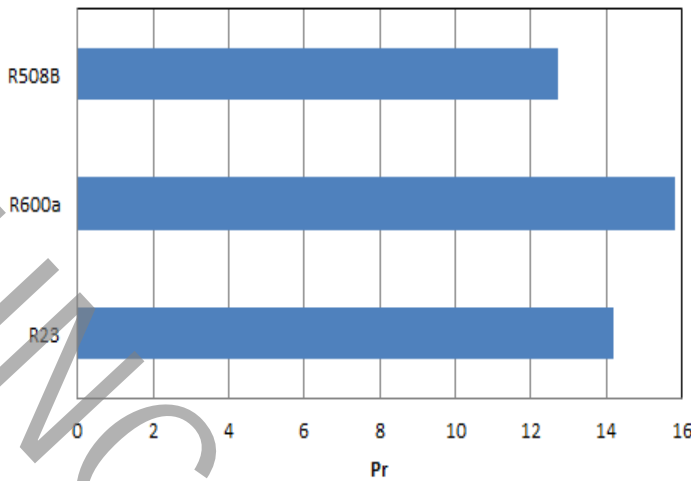
۳-۴ بررسی تغییر نسبت فشار با تغییر مبرد

یکی از مسائل مهم در مورد کارکرد کمپرسورها، بالا بودن نسبت تراکم آن‌ها می‌باشد لذا هر چه نسبت تراکم بالاتر باشد راندمان حجمی کمپرسور کاهش می‌یابد. شکل ۷ (a) نشان‌دهنده تغییر نسبت فشار کمپرسور (P_r) با تغییر مبرد سیکل دما بالا و استفاده از مبرد آر-۵۰۸ در مدار سیکل پایین می‌باشد. مشاهده می‌شود با استفاده از مبردهای آر-۱۱۳۴، آر-۲۹۰، آر-۲۲ و آر-۱۲، نسبت فشار به ترتیب $۳/۹$ ، $۳/۱$ ، $۳/۲۲$ ، $۳/۴۵$ می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ بیشترین نسبت تراکم کمپرسور به دست می‌آید. علت این موضوع مربوط به خصوصیات ترمودینامیکی مبردها و دمای متناظر با فشار مکش و رانش کمپرسور برای هر مبرد می‌باشد.

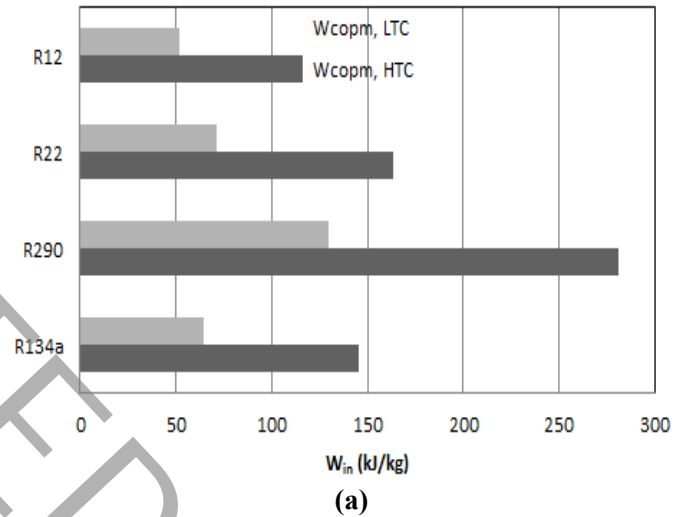
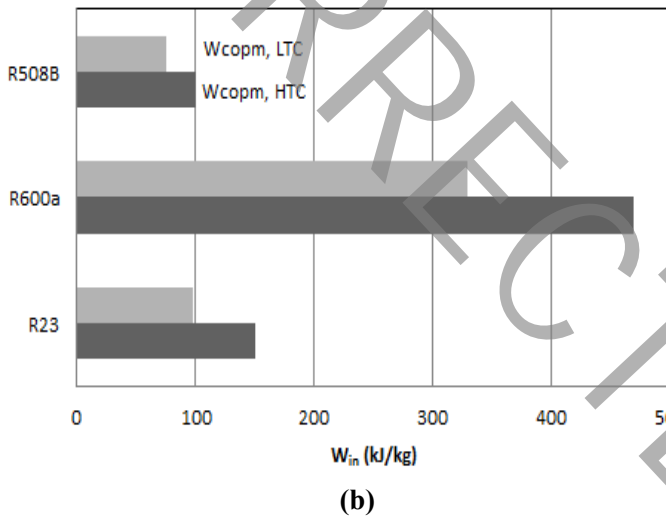
شکل ۷ (b) نشان‌دهنده تغییر نسبت فشار کمپرسور ها برای سه مبرد آر-۲۳، آر-۶۰۰ و آر-۵۰۸ در سیکل دما پایین و استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ در مدار سیکل دما بالا می‌باشد. مشاهده می‌شود نسبت فشار سیستم آشپزی دومارحله‌ای زمانی که از مبرد آر-۶۰۰ استفاده می‌شود بیشتر از سایر مبردها و برای آر-۵۰۸ کمتر از سایر مبردها است. مشاهده می‌گردد در صورت استفاده از مبرد آر-

(۱۰۹۰۰=۱۳، استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ در سیکل دما بالا به لحاظ زیست محیطی مناسب‌تر می‌باشد. [۳۲].

شکل ۶ (b) نشانگر تغییر ضریب عملکرد سیستم با تغییر مبرد سیکل دما پایین و استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ در مدار سیکل دما بالا در دو دمای متفاوت کاری اواپراتور می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مبرد آر-۶۰۰، دارای ضریب عملکرد کمتری نسبت به مبردهای آر-۲۳ و آر-۵۰۸ می‌باشد و علت آن را می‌توان کمتر بودن حرارت نهان تبخیر این مبرد، نسبت به مبردهای دیگر دانست که باعث کاهش اثر تبرید در دمای یکسان نسبت به سایر مبردها می‌گردد. در نتیجه کار کمپرسور با استفاده از مبرد آر-۶۰۰ بیشتر از سایر مبردها می‌شود و این موضوع باعث افزایش حجم کمپرسور و در نتیجه حجم سیستم می‌شود. همچنین این مبرد پتانسیل گرمایش کره زمین نسبتا بالایی دارد که این موضوع باعث کاهش استفاده از آن می‌شود. مبرد آر-۲۳ و آر-۵۰۸ دارای ضریب عملکرد تقریبا یکسانی می‌باشند. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش دمای تبخیر از ۱۷۳ K تا ۱۸۳ K ضریب عملکرد سیستم با مبرد آر-۵۰۸ از $۲/۲۱$ به $۳/۸$ به میزان ۷۵% افزایش می‌یابد. همچنین مقدار پتانسیل گرمایش زمین و تخریب لایه اوزون تقریبا یکسانی هم دارند و با توجه به شرایط دسترسی و قیمت می‌توانند برای سیکل دما پایین استفاده شوند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که زوج آر-۲۳/آر-



شکل ۷: تغییر نسبت فشار با تغییر مبرد (a) سیکل دما بالا (b) سیکل دما پایین



شکل ۸: تغییر کار کمپرسورها با تغییر مبرد در (a) سیکل دما بالا (b) سیکل دما پایین

و آر-۱۲ در مدار بالا و استفاده از مبرد آر-۵۰۸ بی در مدار سیکل پایین در شکل ۸ (a) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین کار مصرفی کمپرسورهای مدار بالا و پایین مربوط به مبرد آر-۲۹۰، به ترتیب برابر $287/4 \text{ kJ/kg}$ و $132/9 \text{ kJ/kg}$ می‌باشد. کار مصرفی کمپرسورهای مدار بالا و پایین مربوط به مبرد آر-۱۳۴، به ترتیب برابر $148/4 \text{ kJ/kg}$ و $70/65 \text{ kJ/kg}$ می‌باشد. در بین مبردهای مورد بررسی، مشاهده می‌گردد سیکل استفاده‌کننده از مبرد آر-۱۳۴ با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی کمترین مجموع کار کمپرسور را به میزان $219/05 \text{ kJ/kg}$ را دارا است. علت این موضوع

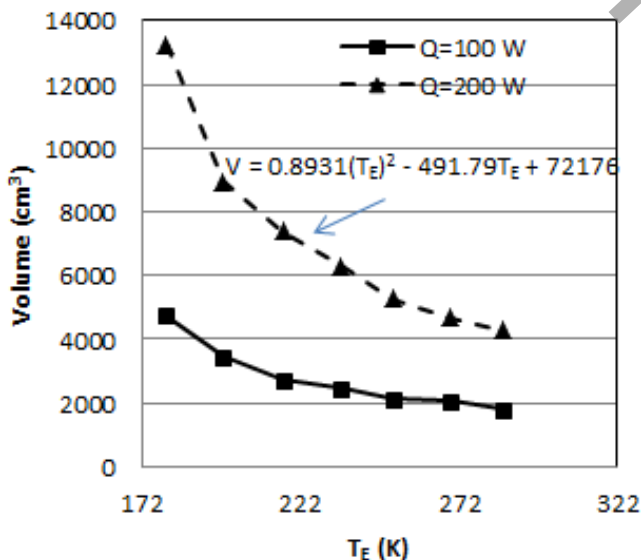
۵۰۸ بی نسبت فشار کمپرسور مدار دما پایین به میزان ۱۲٪ نسبت به مبرد آر-۲۳ و ۲۸٪ نسبت به مبرد آر-۶۰۰ کمتر است که این موضوع باعث می‌شود در هر سیکل تراکم حجم بیشتری از مبرد وارد سیلندر کمپرسور گردد و در نتیجه راندمان حجمی کمپرسور با مبرد آر-۵۰۸ بی افزایش می‌یابد.

۴-۴ بررسی تغییر مقدار کار ورودی کمپرسور با تغییر مبرد

تغییر کار کمپرسورهای مدار دما بالا (W_{HTC}) و مدار دما پایین (W_{LTC})، در صورت استفاده از چهار مبرد آر-۱۳۴، آر-۲۹۰، آر-۲۲

اجزا محاسبه می‌شود و سپس حجم کلی سیستم محاسبه می‌شود. در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییر حجم کمپرسور و کندانسور در دماهای کاری متفاوت اواپراتور در دو ظرفیت سرمایشی متفاوت نشان داده شده است. همچنین حجم کل سیستم شامل حجم موتور الکتریکی، کمپرسور، کندانسور، کندانسور آبشاری و اواپراتور در دماهای کاری متفاوت اواپراتور در دو ظرفیت سرمایشی متفاوت محاسبه و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای تبخیر در اواپراتور، حجم و ابعاد کمپرسور به شدت کاهش می‌یابد. به طوری که در دمای تبخیر ۲۹۰K، حجم کمپرسور مستقل از ظرفیت سرمایشی می‌گردد. مشاهده می‌گردد با کاهش دمای تبخیر از ۲۹۰K تا ۱۷۳K برای ظرفیت سرمایشی ۲۰۰ W، حجم کمپرسور از ۲۲۰۰ cm³ به ۲۷۰۰۰ cm³ افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان به افزایش حجم سیلندرهای کمپرسور جهت تغذیه اواپراتور در دمای پایین‌تر مرتبط دانست. همچنین مشاهده می‌گردد در دماهای تبخیر پایین حجم کمپرسور مورد استفاده به شدت وابسته به مقدار ظرفیت سرمایشی است. به طور مثال در دمای تبخیر ۱۷۳ K، با دو برابر شدن ظرفیت سرمایشی از ۱۰۰W تا ۲۰۰W، حجم کمپرسور از ۹۱۰۰ cm³ به میزان ۳/۲ برابر افزایش می‌یابد.

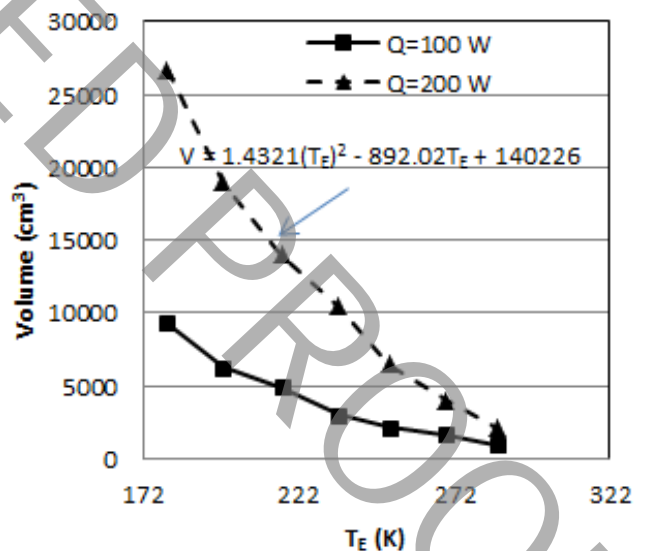


شکل ۱۰: تغییر حجم کندانسور سیستم مورد بررسی در دماهای کاری متفاوت اواپراتور در دو ظرفیت سرمایشی متفاوت

مربوط به خصوصیات ترمودینامیکی مبردها و مقادیر آنتالپی متناظر با فشار اواپراتور و کندانسور برای هر مبرد می‌باشد.

در شکل ۸ (b) تغییر کار کمپرسورهای مدار بالا (W_{HTC}) و مدار پایین (W_{LTC}) در نتیجه استفاده از سه مبرد آر-۲۳، آر-۶۰۰ و آر-۵۰۸ در سیکل دما پایین و استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ در مدار سیکل دما بالا، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بیشترین کار کمپرسور مدار بالا و پایین مربوط به مبرد آر-۶۰۰ و به ترتیب برابر $۴۶۰/۷$ kJ/kg و $۳۳۹/۴$ kJ/kg می‌باشد. همچنین کمترین کار در مدار بالا و پایین متعلق به مبرد آر-۵۰۸ است که به ترتیب برابر $۹۱/۹۶$ kJ/kg و $۷۵/۴۴$ kJ/kg می‌باشد. شایان ذکر است در کار حاضر عامل بازگشت‌ناپذیری در نظر گرفته نشده است. اخیراً گنگ و همکاران [۸] در تحلیلی دیگر، سیکل آبشاری دومرحله‌ای بازگشت‌پذیر داخلی را به منظور تعیین دمای بهینه میانی برای اگزرژی و بار تبرید بیشینه مورد بررسی قرار داده و مشاهده کرده‌اند که آر-۲۳ بازگشت‌پذیری بیشتری نسبت به آر-۵۰۸ بی‌دارد.

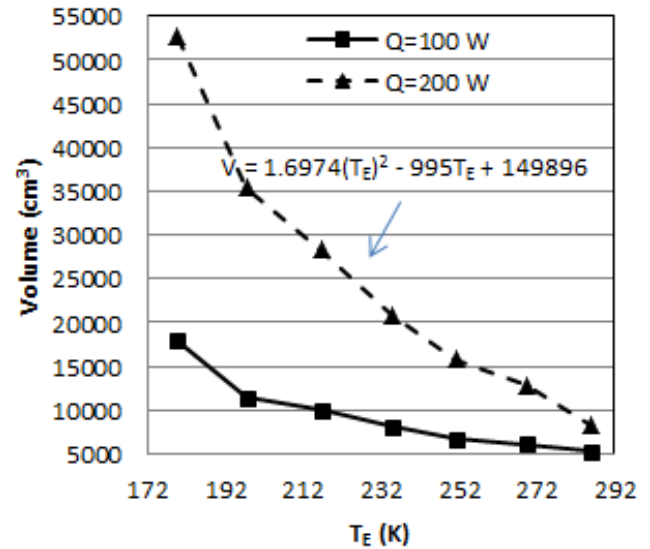
۵-۴ بررسی تغییر حجم اجزاء سیستم با تغییر پارامترهای مختلف با توجه به نتایج بخش قبل در این قسمت با استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ برای مدار بالا و آر-۵۰۸ برای مدار پایین حجم تک تک



شکل ۹: تغییر حجم کمپرسور سیستم مورد بررسی در دماهای کاری متفاوت اواپراتور در دو ظرفیت سرمایشی متفاوت

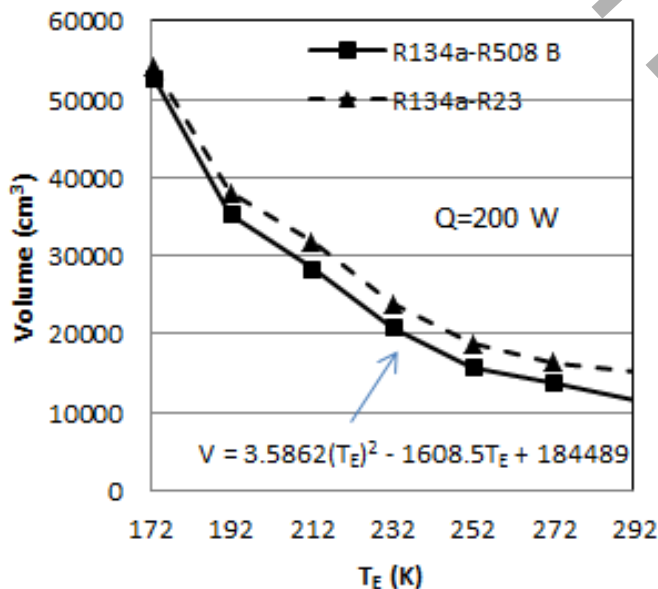
کندانسور از 4000 cm^3 به 13000 cm^3 افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود در دمای تبخیر 173 K ، با دو برابر شدن ظرفیت سرمایش از 100 W تا 200 W ، حجم کندانسور هوایی سیستم دو مرحله‌ای آبخاری از 4500 cm^3 به 13000 cm^3 افزایش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان به افزایش میزان حرارت جذب شده توسط مبرد در اواپراتور و در کمپرسور به دلیل کاهش فشار مکش کمپرسور در دمای تبخیر پایین‌تر مرتبط دانست. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش دمای تبخیر تغییر در افزایش حجم به واسطه تغییر ظرفیت سرمایشی کاهش می‌یابد.

شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییر حجم کل سیستم آبخاری دو مرحله‌ای با استفاده از مبرد آر-۱۳۴ برای مدار بالا و آر-۵۰۸ بی برای مدار پایین می‌باشد. مشاهده می‌شود حجم کل سیستم با افزایش ظرفیت سرمایشی سیستم، افزایش می‌یابد. به طور مثال در دمای 173 K ، با دو برابر شدن ظرفیت سرمایشی از 100 W تا 200 W ، حجم سیستم از 17940 cm^3 به 52650 cm^3 افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که در دماهای تبخیر پایین حجم سیستم مورد استفاده به شدت وابسته به مقدار ظرفیت سرمایشی است. به طوری که با کاهش دمای تبخیر از 290 K تا 173 K برای ظرفیت سرمایشی 200 W ، حجم سیستم از 8200 cm^3 به 52650 cm^3 افزایش می‌یابد. دلیل

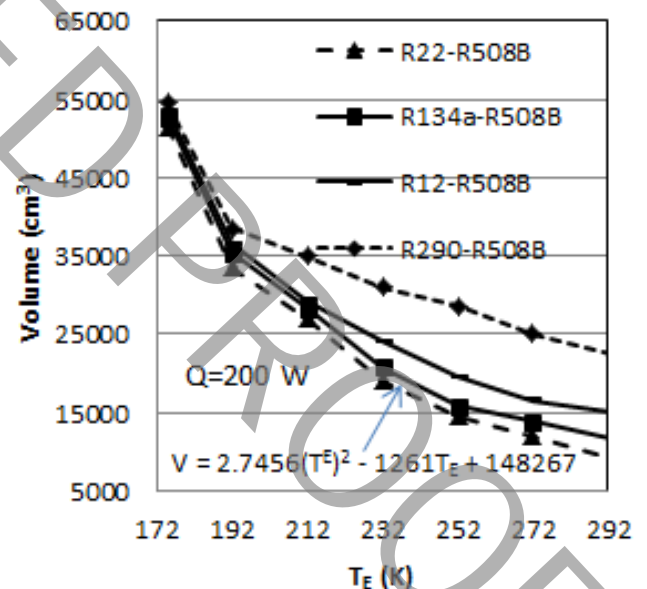


شکل ۱۱: تغییر حجم کلی سیستم مورد بررسی در دماهای کاری متفاوت اواپراتور با دو ظرفیت سرمایشی متفاوت

در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دمای تبخیر، حجم کندانسور هوایی کاهش می‌یابد اما تغییر حجم کندانسور به اندازه کاهش در حجم کمپرسور نمی‌باشد. مشاهده می‌گردد با کاهش دمای تبخیر از 290 K تا 173 K برای ظرفیت سرمایشی 200 W ، حجم



(b)



(a)

شکل ۱۲: مقایسه حجم کلی سیستم با مبردهای متفاوت (a) سیکل دما بالا (b) سیکل دما پایین در دماهای کاری متفاوت اواپراتور

با استفاده از نرم افزار ای.ای.اس و حل سیکل و تغییر پارامترهای مختلف نتایج زیر به دست آمد.

۱- با کاهش دمای محیط کاری سیستم، ضریب کارایی سیستم بالاتر و حجم آن کوچک تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهند در دمای تبخیر $T_E = 183\text{K}$ با افزایش دمای محیط از ۳۰۰ تا ۳۲۰ کلوین، ضریب عملکرد از ۲/۱۶ به ۱/۸ به میزان ۴۳٪ کاهش می‌یابد.

۲- بیشترین ضریب کارایی با استفاده از آر-۲۲ در سیکل دما بالا و آر-۱۶۰۰ در سیکل دما پایین به دست می‌آید اما هر دوی این مبردها به دلیل پتانسیل بالای گرمای زمین مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند با افزایش دمای تبخیر از ۱۷۳ K تا ۱۸۳ K ضریب عملکرد سیستم با مبرد آر-۲۲ از ۲/۲۸ به ۲/۴۵ به میزان ۱۰٪ افزایش یافته است.

۳- کمترین حجم سیستم با استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ در سیکل دما بالا و مبردهای آر-۲۳ و آر-۵۰۸ بی در سیکل دما پایین به دست می‌آید. مشاهده گردید با کاهش دمای تبخیر از ۲۹۰K تا ۱۷۳K برای ظرفیت سرمایشی ۲۰۰W، حجم کمپرسور از 2200 cm^3 به 27000 cm^3 افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که با کاهش دمای تبخیر از ۲۹۰K تا ۱۷۳K برای ظرفیت سرمایشی ۲۰۰W، حجم کندانسور از 4000 cm^3 به 13000 cm^3 افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که در دمای تبخیر ۱۷۳ K، با دو برابر شدن ظرفیت سرمایش از ۱۰۰W تا ۲۰۰W، حجم کندانسور هوایی سیستم دومرحله‌ای آبشاری از 4500 cm^3 به 13000 cm^3 افزایش می‌یابد.

۴- نتایج نشان دادند که استفاده از مبرد آر-۵۰۸ بی، در مدار پایین حجم کمتری نسبت به سیستم با مبرد آر-۲۳ در مدار پایین دارد. نتایج نشان دادند در دماهای تبخیر متفاوت اختلاف حجم تقریباً برابر ۳۰ درصد می‌باشد لذا در سیستم‌های معمول آبشاری با توجه به عامل هزینه و دسترسی می‌توان یکی از این دو مبرد را انتخاب کرد. با توجه به اهمیت پایین بودن حجم سیستم تبرید در صنایع مخابراتی و الکترونیک استفاده از مبرد آر-۵۰۸ بی مناسب تر است.

فهرست علائم

T دما ($^{\circ}\text{C}$, K)

\dot{W}_{in} کار ورودی به کمپرسور (W)

کاهش حجم سیستم، کاهش حجم اجزا سیستم به ویژه کاهش حجم دو جز اصلی آن یعنی کمپرسور و کندانسور می‌باشد.

در شکل ۱۲ (a) تغییرات حجم سیستم با ثابت بودن مبرد مدار پایین (آر-۵۰۸ بی)، و استفاده از مبردهای آر-۱۱۳۴، آر-۲۲، آر-۲۹۰ و آر-۱۲ در مدار بالا بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود که با استفاده از مبرد آر-۵۰۸ بی B در مدار پایین و مبرد آر-۲۲ در مدار بالا کمترین حجم سیستم به دست می‌آید. در بخش قبل بیان شد که به دلیل ملاحظات زیست محیطی استفاده از مبرد آر-۲۲ تقریباً منسوخ شده است. مشاهده می‌شود پس از مبرد آر-۲۲، سیستم با استفاده از مبرد آر-۱۱۳۴ کمترین حجم را دارد. همچنین مشاهده می‌شود در دماهای پایین کارکرد اواپراتور، حجم سیستم با استفاده از کلیه مبرد تقریباً یکسان می‌باشد اما با بالاتر رفتن دمای اواپراتور اختلاف حجم بیشتر می‌گردد. مشاهده می‌گردد با کاهش دمای تبخیر از ۲۹۰K تا ۱۷۳K برای مبرد آر-۱۱۳۴ و ظرفیت سرمایش ۲۰۰W حجم سیستم از 11500 cm^3 به 52650 cm^3 افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود در دمای تبخیر بالاتر، اختلاف حجم سیستم با مبرد آر-۲۹۰ از حجم سایر سیستم‌ها فاصله بیشتری می‌گیرد. در شکل ۱۲ (b) تغییرات حجم سیستم با ثابت بودن مبرد دما بالا (آر-۱۱۳۴)، و تغییر مبرد دما پایین (آر-۵۰۸ بی و آر-۲۳) بررسی شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از مبرد آر-۵۰۸ بی، در مدار پایین حجم کمتری نسبت به سیستم با مبرد آر-۲۳ در مدار پایین دارد. مشاهده می‌شود در دماهای تبخیر متفاوت اختلاف حجم تقریباً برابر ۳۰ درصد می‌باشد لذا در سیستم‌های معمول آبشاری با توجه به عامل هزینه و دسترسی می‌توان یکی از این دو مبرد را انتخاب کرد. با توجه به اهمیت پایین بودن حجم سیستم تبرید در صنایع الکترونیک استفاده از مبرد آر-۵۰۸ بی مناسب تر است.

۵- بحث و نتیجه گیری

با توجه به استفاده روز افزون از کامپیوترها در سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی و کاهش حجم آن‌ها، نیاز بسیاری برای ساختن سیستم‌های تبرید با حجم کم و کارایی بالا به وجود آمده است. یکی از سیستم‌های تبرید تراکمی که کارایی بالایی هم دارد سیستم تبرید آبشاری می‌باشد. در این تحقیق نخست با مدل‌سازی سیستم آبشاری تحلیل ترمودینامیکی و انرژی آن انجام شد. سپس

- [7] Indlee H., Gulshah S., Vaibhav J., Kachhawaha S.S., “Performance Study of Cascade Refrigeration System Using Alternative Refrigerants”, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. Vol. 18(3), pp. 52-68, 2014
- [8] Gang Y., Jianlin Y., Jiaheng C., “Energy and exergy analysis of a new ejector enhanced auto-cascade refrigeration cycle”, Int. J. Refrigeration, 65, pp. 69-79, 2015
- [9] Wang Q., Sun, X.H., Han G.M., “Numerical investigation on the performance of a single-stage cascade refrigerator operating with two vapor-liquid separators and environmentally benign binary key laboratory of clean energy”, MS.C. Thesis, Zhejiang University, China, 2013.
- [10] Bhattacharyya S., Mukhopadhyay S. A., Kumar R.K. Khuruna J., “optimization of CO₂-C₃H₈ cascade system for refrigeration and heating”, Int. J. Refrigeration, Vol. 28, pp. 1284-1292, 2005.
- [11] Lee T., Liu C.H., Chen T.W., “Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration system”, Int. J. Refrigeration, Vol. 65, pp. 1142-1153, 2006.
- [12] Bhattacharyya S., Bose S., Sarkar J., “Exergy maximization of cascade refrigeration cycles and its numerical verification for transcritical CO₂-C₃H₈ system”, Int. J. Refrigeration, Vol. 45, pp. 624-632, 2008.
- [13] Mafi M., Mousavi Naeynian S.M., Amidpour M., “Exergy analysis of multistage cascade low temperature refrigeration systems used in olefin plants”, Int. J. Refrigeration, Vol. 61, pp. 734-742, 2008.
- [14] Getu H.M., Bansal P. K., “Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system”, Int. J. Refrigeration, Vol. 32, pp. 45-54, 2008.
- [15] Bansal P.K, Jain S., “Cascade systems: past, present,

علائم یونانی

α	مساحت سطح انتقال حرارت بر حجم کلی مبدل (m^2m^{-3})
β	نسبت سطح مقطع جریان آزاد
ε	ضریب تاثیر انتقال حرارت
A_h	مساحت سطح انتقال حرارت در سمت گاز
\dot{m}	دبی جرمی مبرد ($kg s^{-1}$)
P	فشار (bar)
P_d	چگالی قدرت موتور (Wm^{-3})
\dot{Q}_{in}	گرمای ورودی (W)
q_{in}	گرمای مخصوص ورودی (J/kg)

مراجع

- [1] Semi-conductor Industry Association, International Technology Roadmap for Semiconductors, 2012.
- [2] Phelan P., Chiriack V., lee T., “Current and Future Miniature Refrigeration Cooling Technologies for High Power Microelectronics”, Proceedings of the Seventeenth SEMI-THERM Symposium, IEEE, pp.158-167, 2014.
- [3] Naeemi A., Meindl J.D., “An upper limit for aggregate I/O interconnect bandwidth of GSI chips constrained by power dissipation”, Proceeding of the international interconnect Technology Conference, IEEE, pp.157-159, 2014.
- [4] Wadell R., “Experimental Investigation of Compact Evaporators for ultra-Low Temperature Refrigeration of microprocessors”, MS.C. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2012.
- [5] Schmidt R.R., Notohardjono B.D., “High-end Server Low-Temperature Cooling”, IBM Journal of Research and Development, Vol. 46 (6), pp. 739-751, 2009.
- [6] Yari M., Ronaghi Sh., “Analysis of an Ejector-Expansion TRCC (Transcritical CO₂) Cascade Refrigeration System”, MS.C. Thesis, Tabriz University of Mechanical Engineering, 2013.

- [24] Keshtkar M.M., Talebizadeh P., "Multi-objective optimization of cooling water package based on 3E analysis: A case study", *Energy*, Vol. 134, pp. 840-849, 2017.
- [25] Keshtkar M.M., Zahiri R., "Thermoeconomic Analysis of a Variable Refrigerant Flow System", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, DOI: 10.22060/mej.2018.13550.5664, 2018. (In Persian)
- [26] Keshtkar M.M., "Effect of subcooling and superheating on performance of a cascade refrigeration system with considering thermo-economic analysis and multi-objective optimization", *Journal of Advanced Computer Science & Technology*, Vol.5 (2), pp. 42-47, 2016.
- [27] Sozen A., Arcaklioglu E., Ozalp M., "Calculation of thermodynamic properties of an alternative refrigerant (R-508B) using artificial neural network", *Applied Thermal Engineering*, Vol.27 (3), pp.551-559, 2007.
- [28] Patterson D.J., Brice C.W., Dougal R.A., Kovuri D., "The 'goodness' of small contemporary permanent magnet electric machines", *Proceedings of the International Electric Machines and Drives Conference, IEEE*, pp.1195-2000, 1-4 June 2003.
- [29] Phelan P.E., Swanson J., Chiriac F., Chiriac V., "Designing a mesoscale vapor- compression refrigerator for cooling high-power microelectronics", *Proceedings of the Inter Society Conference on Thermal Phenomena, IEEE*, pp. 218-232, 2004.
- [30] Collier J., Thome J., "Convective Boiling and Condensation", 3rd ed, Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [31] Bandhauer M., Agarwal A., Garimella S., "Measurement and Modeling of Condensation Heat Transfer Coefficients in Circular Microchannels", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, pp. 1050-1059, 2008.
- [32] Lee J., Mudawar I., "Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part II - heat transfer characteristics", *and future*", *ASHRAE Trans.*, Vol. 113(1), pp. 245-252, 2008.
- [16] Messineo A., "R744-R717 Cascade refrigeration system: performance evaluation compared with a HFC two-stage system", *Energy Proc.*, Vol. 3, pp.1456-65, 2012.
- [17] Parekh A.D, Tailor P. R, Jivanramajiwala H.R, "Optimization of R507A-R-23 Cascade Refrigeration System using Genetic Algorithm", *International Science Index, Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol.4(10), pp. 52-60, 2010..
- [18] Dingeç H., İleri A., "Thermo economic optimization of simple refrigerator", *Int. J. Energy Res*, Vol. 4, pp. 949-962, 1999.
- [19] Sanaye S., Malekmohammadi H.R., "Thermal and economical optimization of air conditioning units with vapor compression refrigeration system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 56, pp. 1807-1825, 2004.
- [20] Yilmaz B., Erdonmez N., Sevindir M. K., Mancuhan E., "Thermodynamic Analysis and Optimization of Cascade Condensing Temperature of a CO₂(R744)/R-404 ACascade Refrigeration System", *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, 2014.
- [21] Selbas R., Kızılkın O., Sencan A., "Thermo economic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle", *Energy*, Vol. 5, pp. 2108-2128, 2015.
- [22] Dubey A.M., Kumar S., Agrawal G.D., "Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂/propylene (R744-R-1270) cascade system for cooling and heating applications", *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp.774-783, 2015.
- [23] Shahryari Zanganeh O., Sarhaddi F., "Performance Investigation of a Single Effect (LiBr-H₂O) Absorption Cooling System connected to Photovoltaic Thermal Collectors", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, DOI:10.22060/mej.2017.11728.5168, 2017. (In Persian)

- 2014.
- [34] Ponsakar C., Balasuthagar A., Sathish K.,
“Performance and Irreversibility analysis of two stage
cascade refrigeration system for different refrigerant
pairs”, Department of Mechanical Engineering, SRM
University, Kattankulatur, Tamil Nadu-603203, 2017.
- International Journal of Heat and Mass Transfer
Vol.48, pp.941-955, 2015.
- [33] Bandhauer M., Agarwal A., Garimella S.,
“Measurement and Modeling of Condensation Heat
Transfer Coefficients in Circular Micro channels”,
Journal of Heat Transfer, Vol.128, pp. 1050-1059,