

ارائه یک روش جامع جهت طراحی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی با مورد مطالعاتی قسمت سرد واحد اولفین مجتمع پتروشیمی تبریز

| مصطفی مافی | مجید عمیدپور | امیر ایمان زاده |
|--|--|--|
| استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) | دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی | مری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول |
| mostafa.mafi@ikiu.ac.ir | amidpour@kntu.ac.ir | a.imanzadeh@iaud.ac.ir |

* دریافت: اسفند ماه ۹۰، * اصلاح: اردیبهشت ماه ۹۱، * تایید: شهریور ماه ۹۱

صفحه‌های: ۲۸ تا ۱۹
چکیده

۱- مقدمه

افزایش بهای انرژی، محدودیت منابع تولید و حفظ محیط زیست، لزوم کاهش مصرف انرژی و بهینه سازی مصرف آن را در صنایع انرژی‌بر، نمایان می‌سازد. در سال‌های اخیر، افزایش آگاهی از محدودیت منابع انرژی در دنیا سبب شده است که بسیاری از دولت‌ها در مورد سیاست‌های خود در استفاده از منابع انرژی، تجدید نظر نمایند و از هدر رفتن و اتلاف انرژی جلوگیری نمایند.

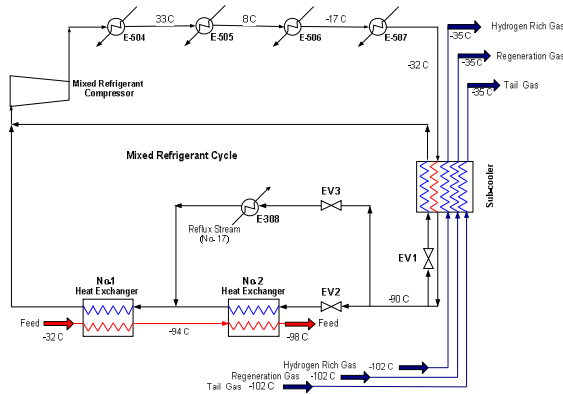
واحد اولفین از جمله صنایع پتروشیمی است که مصرف انرژی در آن بسیار بالا می‌باشد. اهمیت اولفین‌ها در صنایع پتروشیمی به علت آمادگی آنها برای انجام فعالیت‌های مختلف شیمیایی بر روی مولکول‌های آنها و تبدیل آنها به مواد با ارزش افزوده بالا است که این ویژگی ناشی از وجود پیوند دوگانه کربن-کربن (C=C) در مولکول‌های آن می‌باشد.

اتیلن و پروپیلن - ماده اولیه اغلب صنایع پائین دستی پتروشیمی - طی فرایند شکست حرارتی (کراکینگ) هیدروکربن‌ها در کوره‌های واحد اولفین تولید می‌گردد. جهت جداسازی این محصولات، مخلوط گازهای حاصل از شکست حرارتی ابتدا وارد قسمت فشرده‌سازی واحد اولفین شده و پس از افزایش فشار تا حدود ۴۰ bar، به قسمت جداسازی ارسال شده و نهایتاً محصولات اصلی در برج‌های جداسازی از یکدیگر جدا می‌گردند. فرایند جداسازی برخی از گازها در دماهای بسیار پائین انجام می‌شود، لذا در این قسمت، از سیستم سرمازای دمپائین که برودت لازم را در سطوح دمایی بسیار پائین (حدود ۱۵۰°C-) برای فرایندهای جداسازی تامین می‌کنند، استفاده می‌گردد.

طراحی فرایندهای جداسازی دمپائین بیش از هر چیز تحت تاثیر میزان کار محوری یا توان مصرفی سیستم سرمازای آن قرار دارد. امروزه تحقیقات بسیاری در راستای کاهش کار محوری در سیستم‌های سرمازای دمپائین در حال انجام است و سیستم‌های متنوعی جهت تامین برودت در فرایندهای دمپائین ارائه شده‌اند [۱]. به طور کلی سیستم‌های سرمازای دمپائین که در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند را می‌توان به سه دسته طبقه‌بندی، اکسپاندی و مبرد چندجزئی تقسیم نمود. علی‌رغم وجود سه سیستم فوق‌الذکر، فقط سیستم‌های طبقه‌ای با مبردهای خالص در واحدهای جداسازی دمپائین صنایع پتروشیمی مورد استفاده قرار گرفته است و استفاده از دو سیستم اکسپاندی و مبرد چندجزئی در حد ارائه و معرفی باقیمانده است و

در صنایع فرایندی دمپائین، هنگامی که برودت مورد نیاز در یک گستره دمایی وسیع توزیع شده باشد، معمولاً از یک سیستم سرمازای طبقه‌ای جهت تامین این برودت استفاده می‌شود. به‌علت بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و مصرفی سیستم‌های سرمازای طبقه‌ای، استفاده از آنها جهت تامین برودت در سطوح دمایی پائین، باعث افزایش هزینه‌های کل واحد شده و لذا ارائه یک سیستم سرمازا با هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی پائین، همواره از موضوعات قابل تامل و چالش‌برانگیز در طراحی و توسعه صنایع فرایندی دمپائین بوده است. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر روی عملی کردن ایده استفاده از مبردهای چندجزئی به‌جای مبردهای خالص در سیستم‌های سرمازا با کاربری‌های مختلف متمرکز شده‌اند. علی‌رغم مزایای اقتصادی فراوان استفاده از سیستم‌های سرمازای مبرد چندجزئی، تاکنون روشی جامع جهت طراحی این نوع سیستم‌ها ارائه نشده است. علت اصلی عدم وجود یک روش جامع جهت طراحی سیستم‌های سرمازای مبرد چندجزئی را باید در پیچیدگی‌های ناشی از پیش‌بینی دقیق خواص ترمودینامیکی مبرد چندجزئی به‌علت ناچیز بودن حداقل اختلاف دما بین جریان‌های سرد و گرم در مبدل‌های چندجریانی، محاسبات تعادل فازی مخلوط‌های چندجزئی و غیرخطی بودن مسئله بهینه‌سازی پارامترهای چرخه سرمازا جستجو نمود. در تحقیق حاضر بسط و توسعه چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی به منظور استفاده در قسمت سرد واحد اولفین مورد مطالعه قرار گرفته و یک روش طراحی جامع برپایه تلفیق روش‌های ریاضی و دیدگاه‌های ترمودینامیکی به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای چرخه مبرد چندجزئی ارائه شده است. نتایج طراحی نشان می‌دهند که با انتخاب مناسب آرایش چرخه سرمازا و بهینه‌سازی پارامترهای آن، توان مصرفی کل سیستم سرمازا واحد اولفین تبریز حدود ۱۸.۹٪ کاهش و راندمان اگزرتیک آن حدود ۸٪ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: فرایند دمپائین، چرخه سرمازا، مبردهای طبیعی و چندجزئی، آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرتی، طراحی جامع



شکل ۳: چرخه سرمازای مبرد چندجزئی (آرایش ب)

جدول ۱: درصد ترکیب و شرایط دمایی و فشاری جریان‌ها

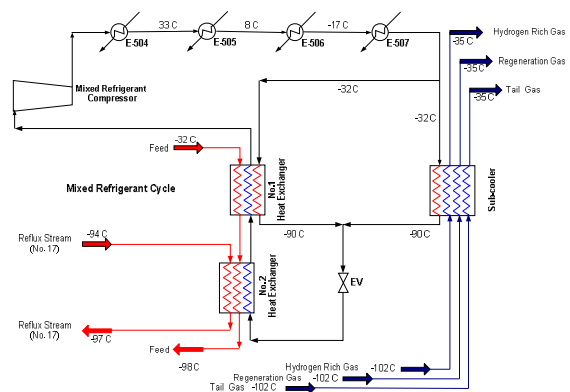
| Composition and Condition | Feed Steam | Composition and Condition | Hydrogen Gas | Regeneration Gas | Tail Gas |
|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|------------------|----------|
| CH ₄ (mol%) | 39.97 | CH ₄ (mol%) | 31.73 | 100 | 100 |
| C ₂ H ₆ (mol%) | 3.36 | C ₂ H ₆ (mol%) | 0 | 0 | 0 |
| H ₂ (mol%) | 24.80 | H ₂ (mol%) | 68.27 | 0 | 0 |
| C ₃ H ₆ (mol%) | 2.39 | C ₃ H ₆ (mol%) | 0 | 0 | 0 |
| C ₃ H ₈ (mol%) | 0.16 | C ₃ H ₈ (mol%) | 0 | 0 | 0 |
| C ₂ H ₄ (mol%) | 28.83 | C ₂ H ₄ (mol%) | 0 | 0 | 0 |
| CO (mol%) | 0.49 | CO (mol%) | 0 | 0 | 0 |
| T _{in} (°C) | -32 | T _{in} (°C) | -102 | -102 | -102 |
| T _{out} (°C) | -98 | T _{out} (°C) | -35 | -35 | -35 |
| P _{in} (kPa) | 3480 | P _{in} (kPa) | 3430 | 760 | 550 |
| P _{out} (kPa) | 3450 | P _{out} (kPa) | 3430 | 760 | 550 |
| Flow Rate (kmole h ⁻¹) | 1239.3 | Flow Rate (kmole h ⁻¹) | 414.1 | 389.5 | 70.8 |

۳- پارامترهای کلیدی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی

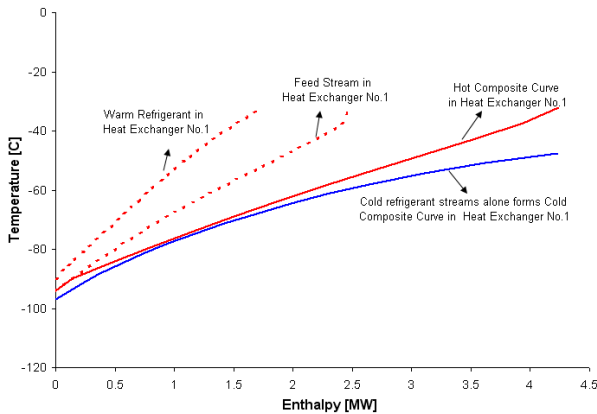
همانطور که در مقدمه مقاله حاضر بدان اشاره شد، با طراحی و بهینه‌سازی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی و یکپارچه‌سازی آنها با هسته فرایندی می‌توان انتظار داشت که این نوع چرخه‌ها در تامین بارهای برودتی توزیع شده در یک گستره دمایی، بازگشت‌پذیرتر عمل کنند، درحالی‌که آرایش و چیدمان ساده‌تری نسبت به سیستم‌های با مبرد خالص دارند. دستیابی به یک

شکل‌های ۲ و ۳، دو چرخه سرمازای مبرد چندجزئی که در تحقیق حاضر، جهت جایگزینی با سیکل اتیلن خالص واحد اولفین تبریز، پیشنهاد و شبیه‌سازی شده‌اند را نشان می‌دهند. در این دو چرخه، مبرد چندجزئی پس از خروج از کمپرسور تا دمای ۳۳°C توسط مبدل آب خنک و تا دمای -۳۲°C توسط چرخه سرمازای خارجی پروپیلن، سرد و تا حدی چگالیده می‌شود و در ادامه با استفاده از پتانسیل جریان‌های سرد منبسط شده حاصل از بالای برج متان‌زدا تا دمای -۹۰°C مادون سرد شده و پس از انبساط در شیر خفگی، برودت لازم برای جریان‌های Feed و Reflux را تامین می‌کند.

شرایط عملیاتی جریان‌های نشان داده شده در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ و همچنین درصد ترکیب اجزاء آنها در جدول ۱ ارائه شده است. چرخه پروپیلن در نظر گرفته شده برای چرخه‌های سرمازا با مبرد چندجزئی، از لحاظ آرایش چرخه و سطوح دمایی آن کاملاً مشابه چرخه پروپیلن در نظر گرفته شده برای چرخه اتیلن خالص است. همانطور که در مقدمه ذکر گردید، چرخه سرمازای مبرد چندجزئی جهت تامین بار برودتی جریان‌هایی مفید است که بار برودتی آنها در یک گستره دمایی پخش شده باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد که جریان Feed و همچنین جریان‌های گازهای سبک ناشی از انبساط محصولات بالاسری برج متان‌زدا در شیر خفگی، دارای تغییرات دمایی بزرگی ضمن تبادل حرارت هستند. لذا در این تحقیق، جهت بررسی پتانسیل مبردهای چندجزئی در راستای کاهش کار محوری سیستم سرمازا، چرخه اتیلن سیستم موجود (شکل ۱) را حذف می‌کنیم و چرخه‌های مبرد چندجزئی (شکل‌های ۲ و ۳) را جایگزین آن می‌نمائیم، بدون اینکه در ساختار شبکه سایر مبدل‌های حرارتی واحد اولفین به غیر از مبدل‌های چرخه اتیلن تغییری ایجاد نمائیم.



شکل ۲: چرخه سرمازای مبرد چندجزئی (آرایش الف)



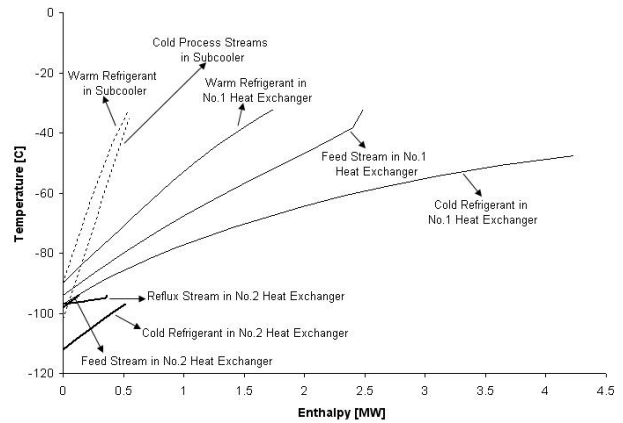
شکل ۵: نمودار ترکیبی مبدل حرارتی No.1 در چرخه سرمازای مبرد چندجزئی با آرایش الف

نتایج تحقیق حاضر نشان از این موضوع دارد که در طراحی چرخه‌های سرمازا، دو پارامتر فشارهای عملیاتی و درصد ترکیب مبرد نقش اساسی دارند که در ادامه به بررسی خصوصیات و همچنین تاثیرگذاری آنها بر روی عملکرد چرخه‌های سرمازا می‌پردازیم. چگونگی تعیین پارامترهای کلیدی چرخه سرمازا از موضوعات اصلی مورد مطالعه در تحقیق حاضر است که در ادامه به آن نیز خواهیم پرداخت.

الف) فشارهای عملیاتی: در یک چرخه سرمازای مبرد چندجزئی، مبرد در فشارهای ثابت معینی تبخیر و چگالیده می‌شود در حالی که دماهای تبخیر و چگالش مبرد ثابت نبوده و گستره وسیعی را شامل می‌شود. برای بررسی واضح‌تر نقش فشارهای عملیاتی، چرخه شکل ۲ را در نظر بگیرید. شکل ۶ الف منحنی‌های سرد و گرم را در مبدل حرارتی No.1 چرخه فوق‌الذکر به‌آزاء درصد ترکیب مشخص و در فشارهای چگالش و تبخیر ۱۶۰۰kPa و ۱۵۰kPa نشان می‌دهد. متان، اتان، پروپان و نیترژن اجزاء مبرد چندجزئی در تحقیق حاضر می‌باشند. همان‌طور که در شکل مشخص است، در مبدل حرارتی تقاطع دمائی رخ داده است. جهت رفع این مشکل می‌توان اختلاف بین فشارهای عملیاتی را افزایش داد. شکل ۶ ب، منحنی‌های سرد و گرم در مبدل را با همان درصد ترکیب قبلی اما به‌آزاء فشارهای چگالش و تبخیر ۲۰۰۰kPa و ۱۵۰kPa نشان می‌دهد. واضح است که مسئله تقاطع دمائی رفع شده اما به علت افزایش اختلاف فشارهای عملیاتی، توان مصرفی چرخه افزایش یافته است (از ۱۸۲۵kW به ۱۹۱۰kW رسیده است). فشار چگالش در این نمونه مورد بررسی می‌تواند تا مقدار ۲۵۰۰kPa افزایش یابد (همراه با افزایش توان مصرفی). افزایش فشار بیش از این مقدار، منجر به ورود مبرد مایع به کمپرسور خواهد شد. به‌جای افزایش فشار چگالش، افزایش فشار تبخیر مبرد نیز می‌تواند بررسی شود (شکل ۶ ج). در این حالت، کاهش اختلاف بین فشارهای عملیاتی منجر به کاهش توان مصرفی چرخه شده است (از ۱۸۲۵kW به ۱۶۹۱kW کاهش یافته است). فشار تبخیر مبرد در این نمونه مورد بررسی می‌تواند تا مقدار ۱۸۰kPa افزایش یابد. افزایش فشار بیش از این مقدار، منجر به ورود مبرد مایع به کمپرسور خواهد شد.

ب) درصد ترکیب اجزاء مبرد: در مورد تعداد اجزاء مبرد چندجزئی با توجه به قانون فازی گیبس می‌توان بیان کرد که افزایش تعداد اجزاء مبرد باعث

چرخه سرمازای مبرد چندجزئی کارآمد^۴ با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی شامل درصد ترکیب مبرد، فشارهای عملیاتی (فشار مکش و تخلیه کمپرسور^۵) و آرایش چرخه امکان‌پذیر می‌باشد. به‌عنوان مثال چرخه سرمازای شکل ۲ را در نظر بگیرید. شکل ۴، نمودار دما-بار حرارتی مبدل‌های حرارتی این چرخه را به‌آزاء درصد ترکیب و فشارهای عملیاتی بهینه شده، نشان می‌دهد.

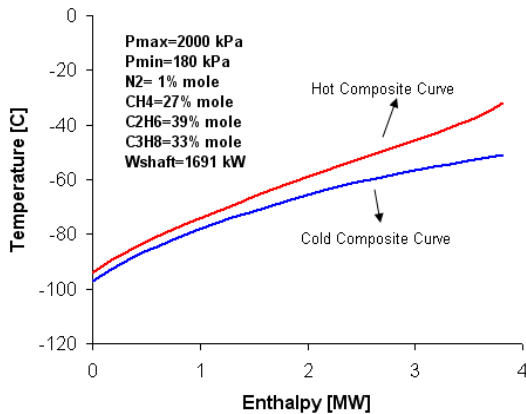


شکل ۴: نمودار دما-بار حرارتی مبدل‌های حرارتی چرخه سرمازای مبرد چندجزئی با آرایش الف

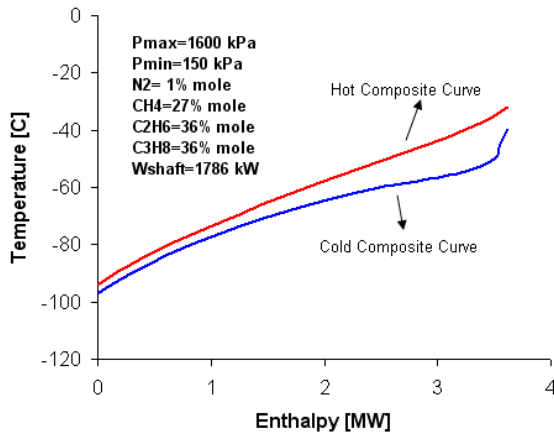
در هر یک از مبدل‌های حرارتی نشان داده شده در شکل فوق، جریان‌های گرم می‌توانند با هم ترکیب شوند و منحنی مرکب گرم را بوجود آورند و به همین ترتیب جریان‌های سرد می‌توانند با هم ترکیب شده و منحنی مرکب سرد را تشکیل دهند. به‌عنوان نمونه، شکل ۵ نمودار ترکیبی مبدل حرارتی No.1 چرخه فوق‌الذکر را نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی مرکب گرم از ترکیب جریان‌های خوراک و مبرد گرم (شکل ۴) به‌دست آمده است درحالی‌که، منحنی مرکب سرد، همان منحنی جریان مبرد سرد می‌باشد.

تطابق مناسب بین منحنی‌های مرکب گرم و سرد باعث کاهش بازگشت-ناپذیری در مبدل‌های حرارتی شده و شرایط دستیابی به چرخه‌ای با کارایی بالاتر را فراهم می‌کند. به‌عنوان یک نمونه کاربردی می‌توان به سیستم‌های سرمازای مبرد چندجزئی مورد استفاده در واحدهای موجود مایع‌سازی گاز طبیعی اشاره نمود که تطابق ضعیف بین منحنی‌های سرد و گرم باعث شده است که توان مصرفی آنها نسبت به سیستم‌های متداول سرمازای طبقه-ای^۶، بیشتر گزارش شود [۳ و ۴]. علت اصلی تطابق نامناسب در تحقیقات پیشین انجام شده، بهینه‌سازی نامناسب پارامترهای طراحی به‌خاطر غیرخطی بودن پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی مبرد و اختلاف دمای محدود ناچیز بین جریان‌های سرد و گرم است که این موضوع، اهمیت ارائه یک روش جامع را جهت یکپارچه‌سازی و بهینه‌سازی، بیش از پیش نمایان می‌سازد.

^۴ Efficient Cycle
^۵ Suction and Discharge Pressures
^۶ Cascade Refrigeration System

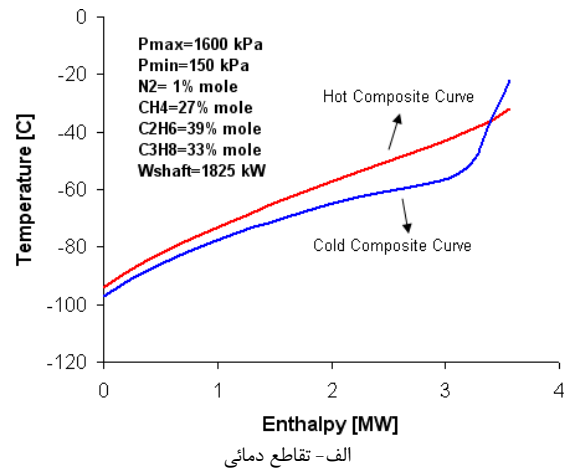


ج- رفع تقاطع دمائی با افزایش فشار مکش
 شکل ۶: بررسی تاثیر فشارهای عملیاتی



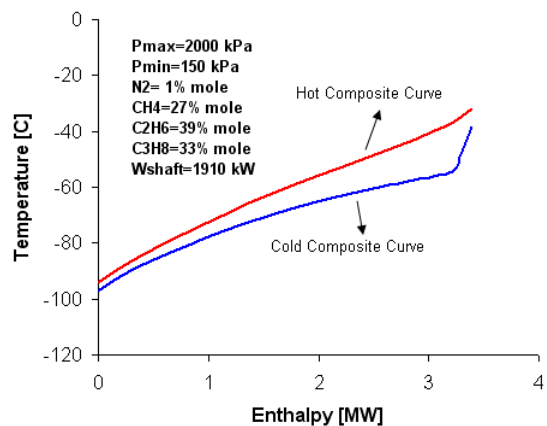
شکل ۷: بررسی تاثیر درصد ترکیب اجزاء مبرد

افزایش درجات آزادی چرخه سرمازا خواهد شد که این موضوع به نوبه خود پتانسیل دستیابی به چرخه‌های با کارایی بالاتر را افزایش خواهد داد. اما برای یک تعداد معین از اجزاء، در مورد تغییرات مقادیر درصد اجزاء ترکیب نمی‌توان نتیجه‌گیری خاصی را بیان نمود. به عنوان مثال، شکل ۶ الف را که مسئله تقاطع دمائی در مبدل No.1 را نشان می‌دهد، در نظر بگیرید. با بهینه‌سازی درصد ترکیب با روش جامع ارائه شده در این تحقیق که در ادامه آنرا کاملاً تشریح می‌کنیم، می‌توان درصد ترکیب مبرد را به نحوی تنظیم نمود که تقاطع دمائی در مبدل رخ ندهد درحالی‌که توان مصرفی چرخه نیز کاهش یابد (شکل ۷).



۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی

در این تحقیق، یک مدل کامپیوتری جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی مبرد چندجزئی توسعه داده شده است. این مدل ترمودینامیکی، از معادله حالت پنگ-رابینسون (Peng-Robinson) برای تحلیل تعادل فازها و از معادله حالت لی-کسلا (Lee-Kesler) برای محاسبه انتالپی و انتروپی استفاده می‌کند. معادلات مذکور برای محاسبات خواص ترمودینامیکی مخلوط هیدروکربن‌ها و نیتروژن نتایج خوبی بدست می‌دهد [۵] و [۶]. همانطور که در قسمت قبل مفصلاً توضیح داده شد، فشار ماکزیمم و مینیمم عملیاتی مبرد در چرخه (فشارهای مکش و تخلیه کمپرسور) و همچنین درصد ترکیب اجزاء مبرد، پارامترهای مؤثر در توان مصرفی چرخه‌های مبرد چندجزئی می‌باشند. در کدهای عددی که در تحقیق حاضر جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی چرخه سرمازای مبرد چندجزئی توسعه داده شده‌اند، درصد ترکیب مبرد و همچنین فشارهای عملیاتی چرخه به عنوان ورودی‌های برنامه محسوب می‌شوند که با استفاده از روشی سیستماتیک، ورودی‌های کد (درصد ترکیب و فشارهای عملیاتی) در راستای دستیابی به کمترین توان مصرفی



ب- رفع تقاطع دمائی با افزایش فشار تخلیه

چرخه (خروجی کد)، بهینه می‌شوند. قیدهای در نظر گرفته شده در بهینه-سازی چرخه سرمایه‌ی مبرد چند جزئی، عبارتند از:

- (۱) مجموع درصد ترکیب اجزاء مبرد برابر واحد است.
- (۲) حداقل اختلاف درجه حرارت جریان‌های گرم و سرد در مبدل‌ها بیشتر از 5°C باشد.
- (۳) مبرد به صورت بخار وارد کمپرسور می‌شود.

۵- روش جامع طراحی چرخه‌های سرمایه‌ی مبرد چندجزئی

دیدگاه‌های طراحی توسعه‌یافته برپایه آنالیز ترکیبی پینچ و آگرژی یک درک تصویری مناسب از اندرکنش پارامترهای طراحی در اختیار طراح قرار می‌دهد، اما عدم ارائه جزئیات پارامترهای بهینه طراحی و همچنین عدم پیش‌بینی دقیق توان مصرفی را می‌توان از موارد عمده ضعف این روش‌ها برشمرد. از طرفی، دیدگاه‌های توسعه‌یافته برپایه روش‌های ریاضی با استفاده از ابزارهای مناسبی که در اختیار طراح قرار می‌دهد، توانائی بهینه‌سازی دقیق پارامترهای طراحی و پیش‌بینی دقیق توان مصرفی را دارند اما ضعف عمده آنها، عدم ارائه یک درک تصویری از مسائلی است که طراح با آن سروکار دارد. این ضعف در طراحی سیستم‌هایی با متغیرهای زیاد بیشتر نمایان می‌شود و طراح قادر به ارائه راهکارهایی مناسب جهت بهبود روش طراحی سیستم نخواهد بود. لذا هیچ یک از روش‌های فوق نمی‌تواند جوابگوی نیازهای طراحی در سیستم‌های صنعتی که با طیف وسیعی از متغیرها و قیدهای عملی مواجه هستند، باشند. در این تحقیق یک روش جدید طراحی، برپایه تلفیق روش‌های فوق‌الذکر ارائه شده است. در این روش با استفاده از تکنولوژی پینچ و آنالیز آگرژی می‌توان اندرکنش بین متغیرهای مختلف طراحی را در قالب نمودارهای مرکب سرد و گرم نمایش داد و با استفاده از روش‌های ریاضی، مقادیر بهینه پارامترهای طراحی را به‌دست آورد. در ادامه، چگونگی شیوه طراحی بهینه یک چرخه سرمایه‌ی مبرد چندجزئی را با استفاده از روش مذکور تشریح خواهیم کرد.

در قسمت پیشین، چگونگی شبیه‌سازی یک چرخه سرمازا با آرایش مشخص را در قالب یک تابع^۷ در محیط برنامه‌نویسی MATLAB توضیح دادیم. همان‌طور که ذکر شد، در توابع توسعه داده شده برای شبیه‌سازی چرخه‌ها، فشارهای عملیاتی و درصد ترکیب اجزاء مبرد، ورودی‌های تابع^۸ در نظر گرفته شده‌اند که با وارد کردن مقادیر آنها، توان مصرفی چرخه سرمازا و همچنین آنتالپی، آنتروپی، دبی و دمای مبرد در تمامی نقاط چرخه محاسبه می‌شود. با محاسبه خواص ترمودینامیکی مبرد در تمامی نقاط چرخه و همچنین مشخص بودن خواص ترمودینامیکی سایر جریان‌های فرایندی، منحنی‌های مرکب سرد و گرم تمامی مبدل‌های حرارتی به‌دست می‌آیند. لازم به‌ذکر است که پیش از هرگونه بهینه‌سازی، ابتدا لازم است هدف اصلی از بهینه‌سازی مشخص شود. از آنجائی که در یک چرخه سرمازا برای تولید برودت، کار محوری مصرف می‌شود، لذا چرخه‌ای ایده‌ال است که کمترین میزان مصرف انرژی را داشته باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که هدف اصلی از بهینه‌سازی چرخه‌های سرمازا، به حداقل رساندن توان مصرفی آنهاست.

شکل ۸ روش جامع ارائه شده در این تحقیق جهت طراحی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی را نشان می‌دهد. در این روش، پس از شبیه‌سازی چرخه و تعیین طیف مجاز تغییرات فشارهای عملیاتی توسط طراح، ابتدا یک فضای گسسته دوبعدی که یک ضلع آن فشار مکش و ضلع دیگر آن فشار تخلیه کمپرسور است، ایجاد می‌شود. با مشخص شدن فشارهای عملیاتی، جستجو جهت یافتن درصد ترکیب بهینه بدین‌صورت انجام می‌شود که کل دامنه درصدهای ترکیب اجزاء مبرد با گام‌های مساوی و با این قید که مجموع درصد مولی ترکیب اجزاء مبرد برابر با یک می‌باشد، مورد کاوش قرار می‌گیرد. در این مرحله از بهینه‌سازی از روش جستجوی شمارشی^۹ استفاده شده است. در این مرحله برای هر درصد ترکیبی، ابتدا قید عدم ورود مایع به کمپرسور بررسی می‌شود و پس از مطمئن شدن از اینکه مبرد در مقطع ورودی به کمپرسور به‌صورت بخار داغ می‌باشد، نمودار ترکیبی تمامی مبدل‌های حرارتی ترسیم شده و شرط عدم تقاطع حرارتی در آنها بررسی می‌شود. جهت بررسی شرط عدم تقاطع حرارتی، منحنی‌های مرکب سرد و گرم به بازه‌های کوچکی تقسیم شده و در هر بازه اختلاف بین منحنی مرکب گرم با سرد محاسبه می‌شود. اگر این تفاوت در بازه‌ای کمتر از ΔT_{\min} (حداقل اختلاف دمای محدود در نظر گرفته توسط طراح) باشد، درصد ترکیب مفروض، مناسب تشخیص داده نمی‌شود و جستجوی جهت یافتن درصد ترکیب دیگری آغاز می‌شود و در پایان با به‌دست آمدن درصد ترکیب‌هایی که کلیه قیود را ارضاء نموده‌اند، به‌راحتی درصد ترکیبی که توان مصرفی چرخه را به-حداقل می‌کند، تعیین می‌شود. با به‌دست آمدن درصد ترکیب‌های بهینه به‌ازاء فشارهای عملیاتی مشخص، پایگاه داده‌ای از درصدهای ترکیب بهینه در فشارهای عملیاتی مختلف تشکیل می‌شود که رفتار کلیه پارامترهای اساسی چرخه را در خود دارد و با استفاده از آن، به‌سهولت می‌توان مقادیر بهینه مطلق درصد ترکیب و همچنین فشارهای مکش و تخلیه را برای چرخه سرمازا تعیین نمود. در ادامه و در مرحله دوم بهینه‌سازی، با مشخص شدن مقادیر بهینه مطلق فشارهای عملیاتی چرخه و با استفاده از روش جستجوی مستقیم Pattern Search که روشی مناسب در بهینه‌سازی مسائل با توابع هدف غیرخطی، ناپیوسته و مشتق‌ناپذیر^{۱۰} است [۷]، و با فرض استفاده از درصد ترکیب بهینه به‌دست آمده از مرحله کاوش^{۱۱} به‌عنوان حدس اولیه، درصد ترکیب اجزاء مبرد تا دقت دلخواه، تصحیح می‌شود^{۱۲}.

^۹ Enumerative Method
^{۱۰} Nonlinear, Not-differential and Not-Continues
^{۱۱} Objective Function
^{۱۲} Explorative Phase
^{۱۳} Exploitative Phase

^۷ Function
^۸ Input Arguments

دستیابی به حدس اولیه مناسب را می‌توان با بکارگیری روش شمارشی تضمین نمود [۸]. در واقع گسسته‌سازی مناسب دامنه جواب‌های احتمالی و استفاده از روش جستجوی شمارشی در مرحله اول عملیات بهینه‌سازی باعث می‌شود یک حدس اولیه مناسب از پارامترهای طراحی نزدیک به نقطه بهینه مطلق^{۱۵} به دست آید که این امر از گرفتار شدن مرحله دوم عملیات بهینه‌سازی در دام بهینه‌های موضعی جلوگیری می‌کند و دستیابی به مقدار مطلق را تضمین می‌نماید [۸]. در ادامه جهت بررسی قابلیت‌های روش سیستماتیک ارائه شده در بهینه‌سازی و یکپارچه‌سازی چرخه‌های سرمزای میرد چندجزئی، پارامترهای طراحی چرخه‌های پیشنهاد شده در شکل‌های ۲ و ۳ را با استفاده از روش مذکور بهینه‌سازی می‌کنیم.

۶- نتایج طراحی و بحث

در این بخش به نتایج طراحی چرخه‌های سرمزای شکل‌های ۲ و ۳ با استفاده از روش جامع ارائه شده در شکل ۸ می‌پردازیم. لازم به ذکر است که راندمان ایزونتروپیک کمپرسورها برابر با $\eta_s = 0.75$ فرض شده است. جداول ۲ و ۳ نتایج بهینه‌سازی درصد ترکیب میرد و فشارهای عملیاتی در چرخه‌های آرایش الف و ب و با استفاده از روش شمارشی (مرحله اول عملیات بهینه‌سازی) که منجر به شناسایی پارامترهای بهینه به ازاء نقطه‌ای نزدیک به بهینه مطلق می‌شود را نشان می‌دهد.

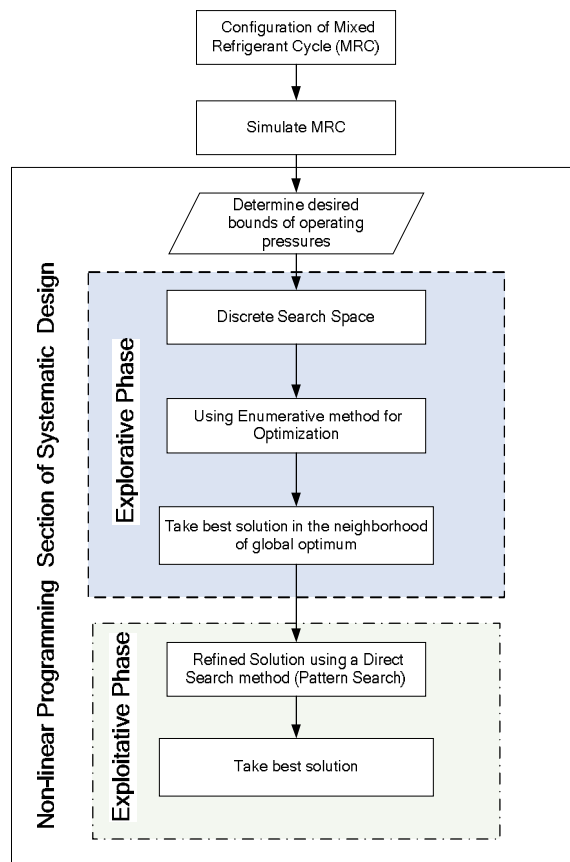
جدول ۲: درصد ترکیب بهینه اجزاء میرد با استفاده از روش شمارشی

| چرخه سرمازا | درصد ترکیب اجزاء میرد (mol%) | | | |
|----------------|------------------------------|------|------|--------|
| | نیترژن | متان | اتان | پروپان |
| آرایش الف | ۱ | ۲۹ | ۳۴ | ۳۶ |
| آرایش ب | ۱ | ۳۲ | ۳۵ | ۳۲ |

جدول ۳: فشارهای عملیاتی و توان مصرفی بهینه شده با استفاده از روش شمارشی

| چرخه سرمازا | فشارهای عملیاتی چرخه (kPa) | | توان مصرفی چرخه سرمازا (kW) |
|----------------|-------------------------------|-----|-----------------------------------|
| | تخلیه | مکش | |
| آرایش الف | ۱۲۵۰ | ۲۰۰ | ۱۵۲۸.۰ |
| آرایش ب | ۱۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۸۷۶.۳ |

همان‌طور که در بخش پیشین اشاره گردید، یکی از مزایای استفاده از روش بهینه‌سازی شمارشی، ایجاد پایگاه داده‌ای است که اطلاعات لازم را جهت مطالعه و بررسی رفتار چرخه‌ها به‌ازاء تغییرات پارامترهای اساسی، در اختیار طراح قرار می‌دهد. بهترین معیار جهت مقایسه کارایی چرخه‌های سرمازا، استفاده از ضریب عملکرد چرخه (COP) می‌باشد. ضریب عملکرد در چرخه-



شکل ۸: روش طراحی سیستماتیک چرخه‌های سرمزای میرد چندجزئی

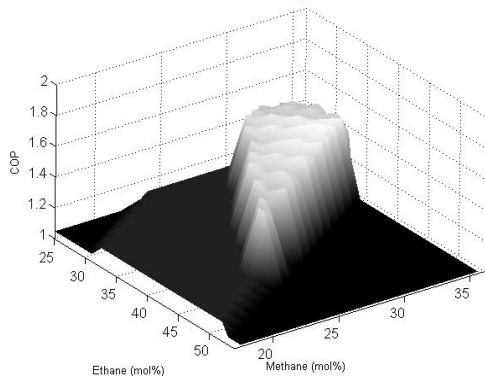
عموما در مسائل بهینه‌سازی غیرخطی با دامنه جواب‌های وسیع، فرایند بهینه‌سازی را به دو مرحله جستجوی عمومی^{۱۳} و موضعی^{۱۴} تقسیم می‌کنند. هدف از مرحله جستجوی عمومی (مرحله اول)، جستجو و کاوش تمامی گستره دامنه جواب‌های احتمالی می‌باشد. در این مرحله که قسمت زمان‌بر فرایند بهینه‌سازی است، تعدادی حدس اولیه مناسب برای مرحله دوم بهینه‌سازی تولید می‌شود. هدف از مرحله جستجوی موضعی، دستیابی به نقطه بهینه مطلق با دقت دلخواه بر پایه حدس‌های اولیه مناسب به دست آمده از مرحله جستجوی عمومی است. در این مرحله با انتخاب مناسب یک روش جستجوی تصادفی و همچنین در اختیار داشتن حدس‌های اولیه مناسب، می‌توان دستیابی به نقطه بهینه مطلق را تضمین نمود. [۷ و ۸].

به علت وسیع بودن دامنه جواب‌های احتمالی مسئله بهینه‌سازی که در تحقیق حاضر با آن سروکار داریم و همچنین ماهیت غیر خطی آن تصمیم بر این گرفته شد که از ترکیب روش‌های جستجوی عمومی و موضعی جهت دستیابی به پارامترهای بهینه مطلق استفاده شود. روش‌های شمارشی و جستجوی مستقیم به ترتیب روش‌های بکارگرفته شده در مرحله جستجوی عمومی و موضعی می‌باشند. علت استفاده از روش جستجوی مستقیم، تضمین دستیابی این روش به بهینه مطلق در صورت حدس اولیه مناسب است.

های سرمزای مبرد چندجزئی توسعه داده شده در این تحقیق، بدین صورت تعریف شده است:

$$COP_{MRC} = \frac{Q_{feed\ Stream} + Q_{reflux\ Stream}}{W_{actual}} \quad (1)$$

شکل های ۹ و ۱۰ تغییرات ضریب عملکرد را به ازاء تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد برای چرخه های سرمزای آرایش الف و ب نشان می دهند. لازم به توضیح است که در مورد هر درصد ترکیب، ضریب عملکرد به ازاء فشارهای عملیاتی بهینه مربوط به آن درصد ترکیب (فشارهای که به ازاء آنها، توان مصرفی چرخه حداقل می شود) ارائه شده است. در این نمودارها، درصد مولی نیتروژن، ثابت و برابر با ۱% فرض شده است و درصد پروپان را با استفاده از این قید که مجموع درصد ترکیب اجزاء مبرد برابر یک است، محاسبه شده است. در شکل های فوق مقدار ضریب عملکرد برابر با 1.125 درصد ترکیب-هائی از مبرد را نشان می دهد که نتوانسته اند تمامی قیدهائی در نظر گرفته شده برای بهینه سازی را برآورده کنند. با بررسی دقیق تر شکل های ۹ و ۱۰ مشخص است که چرخه سرمزا با آرایش الف از نقطه نظر ترمودینامیکی نسبت به چرخه با آرایش ب، بهتر عمل می کند. نکته مهم دیگری که از بررسی شکل های فوق قابل استنتاج است، محدود نمودن بازه تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد است. همان طور که در این نمودارها مشخص است به ازاء طیف وسیعی از درصدهای ترکیب، چرخه سرمزا نمی تواند کلیه قیدهائی الزامی در نظر گرفته شده در مسئله بهینه سازی را تامین نماید. لذا با محدود نمودن بازه تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد می توان هزینه محاسباتی مرحله اول بهینه سازی را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش داد. به-عنوان مثال در الگوریتم بهینه سازی برای چرخه های فوق الذکر می توان محدوده تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد را به صورت زیر تنظیم نمود:



شکل ۱۰: تغییرات ضریب عملکرد چرخه آرایش ب با تغییرات درصد ترکیب مبرد

جدول ۵، مقایسه ای بین توان مصرفی چرخه های سرمزای مبرد چندجزئی که فشارهای عملیاتی و درصد ترکیب اجزاء مبرد آن بهینه شده اند، با توان مصرفی چرخه سرمزای اتیلن واحد اولفین تبریز را ارائه می دهد. همان-طور که در شکل های ۲ و ۳ مشخص است، چگالنده های چرخه های سرمزا بخش عمده ای از حرارت دریافتی از جریان های Feed و Reflux را به تبخیرکننده های چرخه پروپیلنی دفع می کنند، لذا توان مصرفی چرخه سرمزای پروپیلنی نیز متأثر از تغییرات چرخه سرمزای پائین دستی (طبقه دوم) خواهد بود. نتایج نشان می دهند که با انتخاب آرایش مناسب چرخه سرمزا (آرایش الف) و بهینه سازی پارامترهای آن، توان مصرفی کل سیستم سرمزا واحد اولفین تبریز حدود ۱۸.۹% کاهش و راندمان آگزرژیک آن حدود ۸% افزایش می یابد.

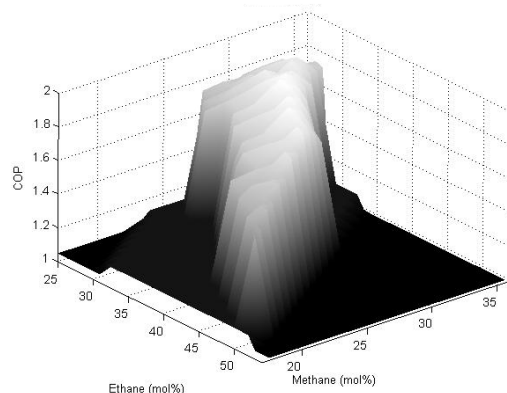
جدول ۵: مقایسه توان مصرفی سیستم های مبرد چندجزئی و خالص

| راندمان آگزرژیک کل سیستم | توان مصرفی (kW) | | | چرخه سرمزای تحتانی |
|--------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | کل سیستم سرمزا | چرخه سرمزای پروپیلنی | چرخه سرمزای تحتانی | |
| ۳۰.۸۸% | ۶۹۶۳ | ۵۲۹۹ | ۱۶۶۴ | چرخه اتیلن خالص |
| ۳۸.۰۸% | ۵۶۴۶ | ۴۱۱۸ | ۱۵۲۸ | آرایش الف |
| ۳۶.۰۴% | ۵۹۶۵ | ۴۰۸۹ | ۱۸۷۶ | آرایش ب |

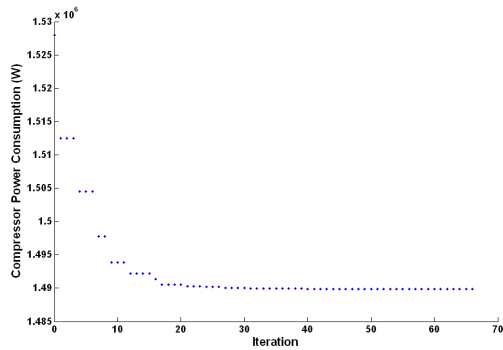
از آنجائی که در روش طراحی ارائه شده از تلفیق دیدگاه های ترمودینامیکی (نمودارهای مرکب) و روش های ریاضی استفاده شده است، لذا به سهولت می توان جریان های سرد و گرم در تمامی مبدل های حرارتی ترسیم و انطباق بین آنها را بررسی نمود. شکل های ۴ و ۵ به ترتیب، نمودار دما-بار حرارتی مبدل های حرارتی و نمودار ترکیبی مبدل حرارتی No.1 را به ازاء پارامترهای بهینه جداول ۲ و ۳ در چرخه سرمزا با آرایش الف نشان می دهند

جدول ۴: درصد ترکیب اجزاء مبرد چندجزئی

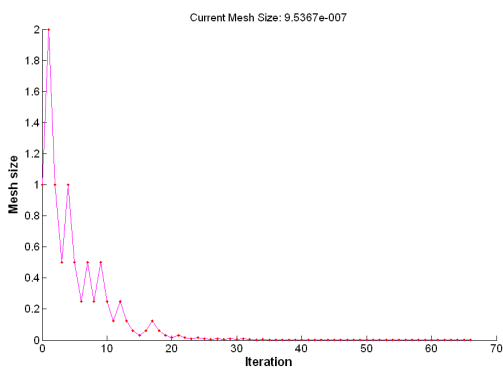
| اجزاء مبرد | محدوده تغییرات (mol %) |
|------------|------------------------|
| Nitrogen | <3 |
| Methane | 17-35 |
| Ethane | 25-55 |
| Propane | 30-50 |



شکل ۹: تغییرات ضریب عملکرد چرخه آرایش الف با تغییرات درصد ترکیب مبرد



شکل ۱۳: تغییرات مقدار تابع هدف در تکرارهای الگوریتم Pattern Search



شکل ۱۴: تغییرات اندازه شبکه بندی در تکرارهای الگوریتم Pattern Search

جدول ۶ و ۷، مقادیر بهینه پارامترهای کلیدی چرخه های سرمازا را که با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم Pattern Search به دست آمده اند را ارائه می کند. تطابق بیشتر بین نمودارهای سرد و گرم باعث کاهش توان مصرفی چرخه ها نسبت به مقادیر ارائه شده در جدول ۳ شده است.

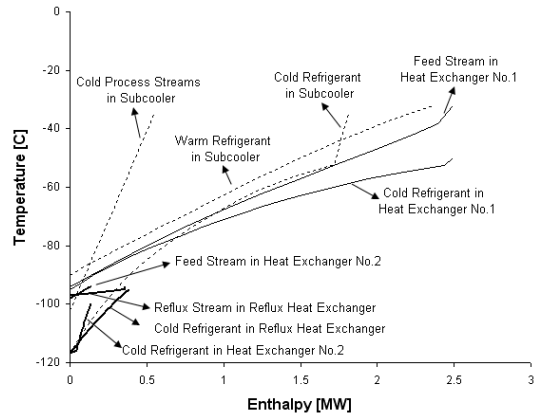
جدول ۶: درصد ترکیب بهینه اجزاء مبرد با استفاده از الگوریتم Pattern Search

| چرخه سرمازا | درصد ترکیب اجزاء مبرد (mol%) | | | |
|-------------|------------------------------|-----------|-----------|----------|
| | نیترژن | متان | اتان | پروپان |
| آرایش الف | ۰.۶۵۲۷۵ | ۲۸.۷۷۶۵۶۳ | ۳۳.۸۴۸۹۳۵ | ۳۶.۷۲۱۷۴ |
| آرایش ب | ۰.۰۱۰۱۴ | ۳۲.۴۹۸۹۶۲ | ۳۵.۱۹۴۴۴۹ | ۳۲.۲۹۶۲۴ |
| | ۸ | | | ۵ |
| | ۲ | | | |

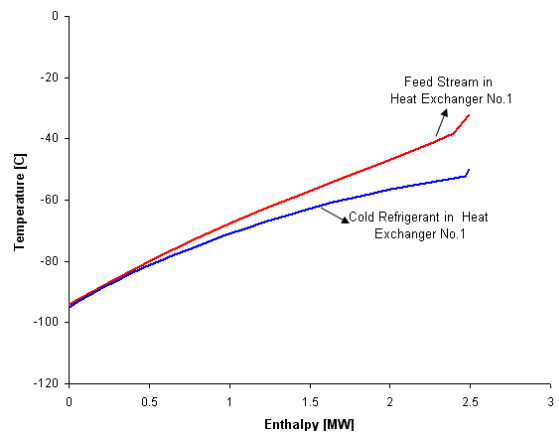
جدول ۷: توان مصرفی بهینه شده با استفاده از الگوریتم Pattern Search

| چرخه سرمازا | فشارهای عملیاتی چرخه (kPa) | | توان مصرفی چرخه سرمازا (kW) |
|-------------|----------------------------|-----|-----------------------------|
| | تخلیه | مکش | |
| آرایش الف | ۱۲۵۰ | ۲۰۰ | ۱۴۸۹.۸۹۴۴۸۴ |
| آرایش ب | ۱۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۸۴۲.۶۳۹۰۰۹ |

و شکل های ۱۱ و ۱۲ نیز همین مشخصه ها را در چرخه سرمازا با آرایش ب، نمایش می دهند.



شکل ۱۱: نمودار دما-انرژی مبدل های حرارتی چرخه سرمازای مبرد چندجزئی با آرایش ب



شکل ۱۲: نمودار ترکیبی مبدل حرارتی No.1 در چرخه سرمازای مبرد چندجزئی با آرایش ب

جدول ۲، درصد ترکیب بهینه اجزاء مبرد را با دقت یک صدم جزء مولی (اندازه گام استفاده شده در روش بهینه سازی شمارشی در این تحقیق) ارائه می کند. همان طور که توضیح داده شد، با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم (مرحله دوم بهینه سازی)، می توان درصد ترکیب بهینه اجزاء مبرد را تا دقت دلخواه تصحیح نمود. شکل های ۱۳ و ۱۴، تغییرات مقدار تابع هدف (توان مصرفی چرخه) و اندازه شبکه بندی در تکرارهای الگوریتم Pattern Search را برای چرخه سرمازای مبرد چندجزئی آرایش الف در جهت تصحیح درصد ترکیب های ارائه شده در جدول ۲ تا دستیابی به دقت 10^{-6} را نشان می دهند.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، در ابتدا دو چرخه سرمازای دمپائین با مبرد چندجزئی برای واحد اولفین مجتمع پتروشیمی تبریز جهت جایگزینی با چرخه اتیلن خالص آن پیشنهاد شد. در ادامه، ضمن شناسائی و مطالعه پارامترهای کلیدی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی، یک روش توانمند برپایه تلفیق روش‌های ریاضی و دیدگاه‌های ترمودینامیکی جهت طراحی و بهینه‌سازی چرخه سرمازا و پارامترهای عملیاتی آن ارائه شد. قابلیت‌های روش ارائه شده بر روی چرخه‌های مبرد چندجزئی پیشنهاد شده، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج طراحی نشان می‌دهند که هر چرخه سرمازای مبرد چندجزئی با آرایش مشخص، درصد ترکیب و فشارهای عملیاتی بهینه مختص به خود دارد که به ازاء آنها، توان مصرفی چرخه کمینه خواهد شد. دلیل اصلی کاهش توان مصرفی در چرخه‌هایی با مبرد چندجزئی، کاهش اختلاف دمای محدود بین جریان‌های گرم و سرد در مبدل‌ها می‌باشد.

در مطالعه حاضر، از یک مخلوط چهار جزئی به عنوان مبرد چندجزئی استفاده شده است. با افزایش اجزاء ترکیب مبرد، می‌توان میزان درجه آزادی را در بهینه‌سازی درصد ترکیب مبرد چرخه افزایش داده و در نتیجه، مبرد مناسب‌تری را به دست آورد که به تبع آن، فرآیند انتقال حرارت در مبدل‌های چرخه، بازگشت‌پذیری بیشتری داشته و توان مصرفی سیستم را به مقدار بیشتری کاهش داد. همچنین نتایج بهینه‌سازی بیانگر این موضوع است که یکی از پارامترهای موثر در توان مصرفی چرخه‌ها، آرایش چرخه می‌باشد که این موضوع، ضرورت بررسی آرایش چرخه‌ها و توسعه روشی جهت دستیابی به آرایش بهینه را در تحقیقات آتی، نمایان می‌سازد.

تشکر و قدردانی

از اعضای تیم پژوهشی اولفین شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی و همچنین پرسنل بخش تحقیق و توسعه مجتمع پتروشیمی تبریز که ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند، کمال تشکر را داریم.

فهرست علائم

| | |
|----------------------|--|
| <i>COP</i> | ضریب عملکرد چرخه |
| <i>MRC</i> | چرخه سرمازای مبرد چندجزئی |
| <i>Q</i> | حرارت گرفته شده از اواپراتور چرخه سرمازا |
| <i>W</i> | توان مصرفی چرخه سرمازا |
| <i>T</i> | دما |
| <i>P</i> | فشار |
| mol% | درصد مولی |
| kmol h ⁻¹ | کیلو مول بر ساعت |
| زیر نویس‌ها | |
| <i>in</i> | ورودی |
| <i>out</i> | خروجی |

مراجع

- 1- Cao W., Lu X., Lin W., Gu A., 2006, "Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction processes in skid-mounted packages", Journal of Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 898-904.
- 2- Becdeliever C., Kaiser V., Paradowski H., 1978, "Method of and arrangement for processing through low temperature heat exchanges and in particular for treating natural gases and cracked gases", US patent, No. 4072485.
- 3- Finn A.J., Johnson G. L., Tomlinson T.R., 1999, "Development in natural gas liquefaction", Hydrocarbon Processing, pp. 47-59.
- 4- Costain Oil, Gas & Process Ltd., 2002, "Development in natural gas liquefaction", England.
- 5- Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E., 1987. The properties of gases and liquids. Fourth edition, McGraw Hill.
- 6- Tarek A., 2007. Equation of state and PVT analysis. First edition, Gulf Publishing Company.
- 7- Meza J.C., Judson R.S., Faulkner T.R., Treasurwala A.M., 1995, "A comparison of a direct search method and a genetic algorithm for conformational searching", Sandia National Laboratories.
- 8- Wetter M., Wright J., 2003, "Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method", Eight International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands