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

مصطفی مافی
استادیار گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
mostafa.mafi@ikiu.ac.ir

مجید عمیدپور
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
amidpour@kntu.ac.ir

امیر ایمان زاده
مربی دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول
a.imanzadeh@iaud.ac.ir

* *دریافت:* اسفند ماه ۹۰ ،* *اصلاح:* اردیبهشت ماه ۹۱، *تایید:* شهریور ماه ۹۱
صفحه های: ۱۹تا۲۸

چکیده

در صنایع فرایندی دماپائین، هنگامی که برودت مورد نیاز در یک گستره دمائی وسیع توزیع شده باشد، معمولا 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 دمائی 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 دماپائین 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 اگزرژیک آن حدود ۸٪ افزایش می‌یابد.

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

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. درسال‌های 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 شیمیائی 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 ۴۰bar، به قسمت جداسازی ارسال شده و نهایتا 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 دماپائین که برودت لازم را در سطوح دمائی بسیار پائین (حدود ۱۵۰°C-) برای فرایندهای جداسازی تامین می‌کنند، استفاده می‌گردد.

طراحی فرآیندهای جداسازی دماپایین 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 دماپائین در حال انجام است و سیستم‌های متنوعی جهت تامین برودت در فرایندهای دماپائین ارائه شده‌اند[۱]. به طور کلی سیستم‌های سرمازای دماپائین که در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند را می‌توان به سه دسته طبقه‌ای، اکسپاندری و مبرد چندجزئی تقسیم نمود. علی‌رغم وجود سه سیستم فوق‌الذکر، فقط سیستم‌های طبقه‌ای با مبردهای خالص در واحدهای جداسازی دماپائین صنایع پتروشیمی مورد استفاده قرار گرفته است و استفاده از دو سیستم اکسپاندری و مبرد چندجزئی در حد ارائه و معرفی باقیمانده است و

Archive of SID
www.SID.ir

تحقیق و مطالعه جدی در زمینه بسط و توسعه این سیستم‌ها در صنایع پتروشیمی انجام نشده است[۲].

در سیستم‌های سرمازای طبقه‌ای دماپائین متداول در صنایع پتروشیمی، برودت لازم برای فرایندهای مختلف جداسازی، توسط سه چرخه سرمازای جداگانه پشت سرهم که عموما سیال عامل استفاده شونده در آنها، پروپان یا پروپیلن، اتان یا اتیلن و متان است، تامین می‌شود. هر یک از مبردهای خالص فوق الذکر (پروپیلن، اتیلن و متان) در چرخه‌های جداگانه‌ای جریان دارند که هریک، تجهیزات جداگانه مربوط به خود را دارند. در سیستم‌های طبقه‌ای، طبقه اول سیستم (پروپیلن)، برودت لازم را برای فرایندهائی که دمای جریان فرایند در آنها تا ۳۵°C- است، تامین می کند. طبقه دوم (اتیلن)، بار برودتی را برای فرایندهائی با دمای جریان بین ۳۵°C- الی ۱۰۰°C- تامین می‌کند و از چرخه متان برای تامین بار برودتی برای فرایندهائی با دمای جریان ۱۰۰°C- تا حدود ۱۶۰°C- استفاده می‌شود. البته در بعضی از این نوع سیستم‌ها، طبقه آخر (متان) به صورت چرخه باز می‌باشد که در این صورت، برای تامین بار برودتی فرایندهائی با دماهای جریان پائین‌تر ۱۰۰°C- ، از انبساط گازهای سبک تولید شونده در قسمت‌های مختلف واحد، در شیرخفگی یا توربواکسپاندر استفاده می‌شود (مانند گازهای سبک به دست آمده از بالای برج متان‌زدا در واحدهای اولفین)[۲].

در سیستم‌های سرمازا با مبرد چندجزئی برخلاف چرخه‌هایی که از یک مبرد خالص به عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند، تبخیر مبرد در فشار ثابت در یک گستره دمایی روی می‌دهد. از این‌رو اینگونه سیستم‌ها برای تامین بار برودتی در فرآیندهایی که در حین سرد شدن، دمای فرآیند ثابت نیست و در طول مبدل تغییر می‌کند مناسب بوده و با انتخاب مناسب ترکیب مبرد می‌توان یک اختلاف دمای معقول و تقریبا ثابتی را در طول مبدل بوجود آورد.

از دیگر مزایای سیستم‌های مبرد چندجزئی می‌توان به آرایش ساده‌تر این نوع سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های طبقه‌ای مبرد خالص اشاره نمود. عموما از مواد طبیعی نظیر هیدروکربن‌ها، نیتروژن، آرگون و سایر گازهای طبیعی خنثی به‌عنوان اجزاء مبرد چندجزئی استفاده می‌شود. لذا مطمئنا به‌علت بی‌خطر بودن مواد طبیعی فوق‌الذکر از جهت تخریب لایه ازن و گرمایش کره زمین و از طرفی کارائی بالاتر سیستم‌های مبرد چندجزئی نسبت به سیستم‌های مبرد خالص، در آینده‌ای نزدیک، استفاده از سیستم‌های سرمازا با مبردهای طبیعی چندجزئی، شتاب بیشتری خواهد گرفت.

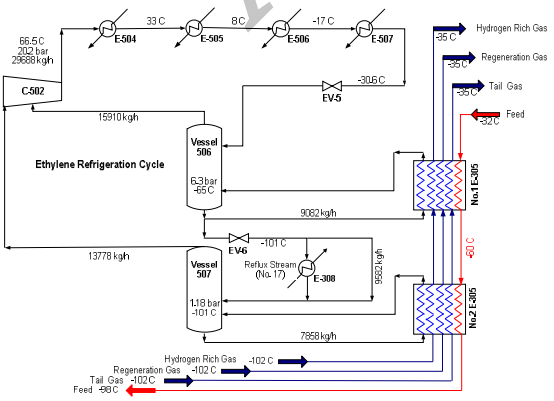
یکی از نواقص سیستم‌های طبقه‌ای متداول در صنایع مختلف پتروشیمی، اختلاف دمای محدود زیاد بین سیال عامل خالص سیستم سرمازا و جریان‌های سرد شونده واحد در اواپراتورهای سیستم سرمازا است که می‌توان با استفاده مناسب از مبرد چندجزئی تا حد زیادی این نقص را رفع نمود. در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری جهت توسعه سیستم‌های سرمازا با مبرد چندجزئی بر روی واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی متمرکز شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که در صورت استفاده مناسب از مبرد چندجزئی می‌توان کار محوری سیستم‌های سرمازای طبقه‌ای مورد استفاده در واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی را کاهش داد[۱].

متاسفانه علی‌رغم تحقیقات بسیار در مورد چگونگی عملکرد سیستم‌های مبرد چندجزئی در واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی، مطالعه‌ای بر روی چگونگی توسعه و همچنین عملکرد این نوع سیستم‌ها بر روی واحدهای جداسازی دماپائین پیچیده به‌مانند قسمت سرد واحد اولفین گزارش نشده است. لذا در تحقیق حاضر و در راستای بسط و توسعه استفاده از مبردهای چندجزئی در سیستم‌های سرمازای دماپائین صنایع پتروشیمی، پس از معرفی سیستم سرمازای طبقه‌ای واحد اولفین مجتمع پتروشیمی تبریز، دو چرخه دماپائین با مبرد چندجزئی جهت جایگزینی با چرخه سرمازای مبرد خالص، پیشنهاد و شبیه‌سازی شده‌اند. بررسی و مطالعه پارامترهای طراحی و عملیاتی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی از دیگر اهداف تحقیق حاضر می‌باشد. همچنین پس از شناسائی پارامترهای موثر بر رفتار چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی، یک روش جامع جهت طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای چنین چرخه‌هائی پیشنهاد شده است. قابلیت و توانائی‌های روش ارائه شده در یکپارچه‌سازی حرارتی و بهینه‌سازی، بر روی چرخه‌های سرمازای مبردچندجزئی پیشنهاد شده، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۲- توصیف چرخه‌های سرمازای دماپائین

سیستم سرمازای دماپائین واحد اولفین تبریز از دو چرخه سرمازای بسته جداگانه با مبردهای خالص پروپیلن (طبقه اول) و اتیلن (طبقه دوم) و همچنین یک چرخه حلقه باز متان تشکیل شده است. چرخه پروپیلن ضمن تامین برودت برای جریان‌های فرایندی واحد اولفین تا ۳۵°C- ، نقش خنک‌کاری خارجی (کندانسور) را نیز برای چرخه اتیلن (چرخه طبقه دوم) دارد.

شکل ۱، چرخه طبقه دوم سیستم سرمازای واحد اولفین تبریز را نشان می‌دهد. در این چرخه، اتیلن خالص تا فشار ۲۰.۲bar متراکم می‌شود. بخار مافوق گرم اتیلن، پس از خروج از کمپرسور ابتدا در مبدل حرارتی آب‌خنک (E504)، سرد شده و نهایتاً توسط چرخه سرمازای طبقه اول (چرخه پروپیلن) در سه مبدل E505، E506 و E507 چگالیده می‌شود. اتیلن چگالیده شده پس از عبور از شیر خفگی و کاهش فشار شدید آن تا ۱.۰۸bar و در نتیجه کاهش شدید دما، برودت لازم را برای جریان‌های Feed و Reflux تامین می‌کند. در واحد اولفین تبریز، جهت کمک به تامین برودت لازم برای جریان‌های فوق الذکر، از پتانسیل سردسازی سه جریان Tail Gas، Regeneration Gas و Hydrogen Rich Gas که از انبساط محصولات بالاسری برج متان‌زدا در شیر خفگی حاصل می‌شوند، نیز استفاده می‌شود (چرخه حلقه باز).

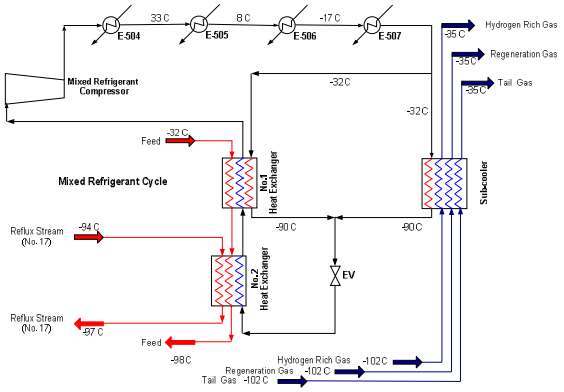


شکل ۱: چرخه سرمازای طبقه دوم واحد اولفین تبریز (چرخه اتیلن)

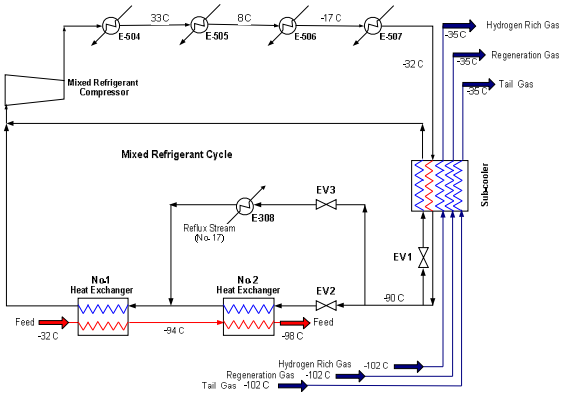
Archive of SID
www.SID.ir

شکل‌های ۲ و ۳، دو چرخه سرمازای مبرد چندجزئی که در تحقیق حاضر، جهت جایگزینی با سیکل اتیلن خالص واحد اولفین تبریز، پیشنهاد و شبیه-سازی 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 کاملا مشابه چرخه پروپیلن در نظرگرفته 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 دمائی 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.



شکل۲: چرخه سرمازای مبرد چندجزئی (آرایش الف)



شکل۳: چرخه سرمازای مبرد چندجزئی (آرایش ب)

جدول۱: درصد ترکیب و شرایط دمائی و فشاری جریان‌ها

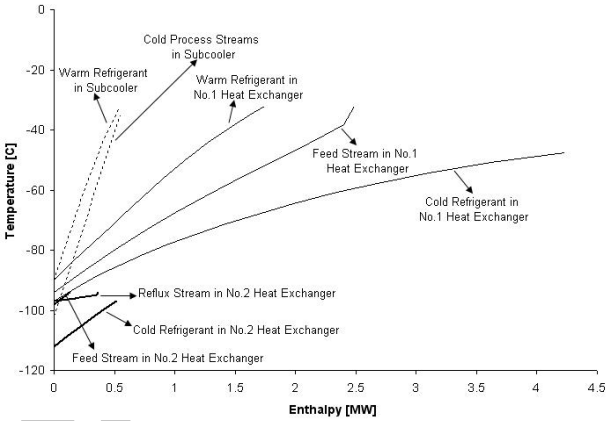
Composition and Condition	Feed Steam	Composition and Condition	Hydrogen Gas	Regeneration Gas	Tail Gas
CH4 (mol%)	39.97	CH4 (mol%)	31.73	100	100
C2H6 (mol%)	3.36	C2H6 (mol%)	0	0	0
H2 (mol%)	24.80	H2 (mol%)	68.27	0	0
C3H6 (mol%)	2.39	C3H6 (mol%)	0	0	0
C3H8 (mol%)	0.16	C3H8 (mol%)	0	0	0
C2H4 (mol%)	28.83	C2H4 (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 دمائی، بازگشت‌پذیرتر عمل کنند، درحالی‌که آرایش و چیدمان ساده‌تری نسبت به سیستم‌های با مبرد خالص دارند. دستیابی به یک

Archive of SID
www.SID.ir

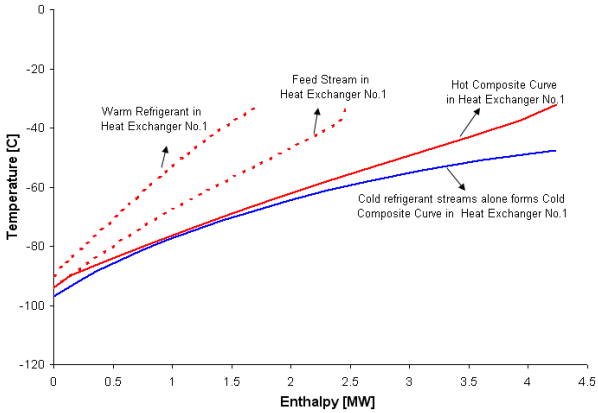
چرخه سرمازای مبرد چندجزئی کارآمد[۴] با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی شامل درصد ترکیب مبرد، فشارهای عملیاتی (فشار مکش و تخلیه کمپرسور[۵]) و آرایش چرخه امکان‌پذیر می‌باشد. به‌عنوان مثال چرخه سرمازای شکل ۲ را درنظر بگیرید. شکل۴، نمودار دما- بار حرارتی مبدل‌های حرارتی این چرخه را به‌ازاء درصد ترکیب و فشارهای عملیاتی بهینه شده، نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمودار دما- بارحرارتی 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 به‌همین 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 (شکل۴) به‌دست آمده است درحالی‌که، منحنی مرکب سرد، همان منحنی جریان مبرد سرد می‌باشد.

تطابق مناسب بین منحنی‌های مرکب گرم و سرد باعث کاهش بازگشت‌ناپذیری در مبدل‌های حرارتی شده و شرایط دستیابی به چرخه‌ای با کارائی بالاتر را فراهم می‌کند. به عنوان یک نمونه کاربردی می‌توان به سیستم‌های سرمازای مبرد چندجزئی مورد استفاده در واحدهای موجود مایع‌سازی گازطبیعی اشاره نمود که تطابق ضعیف بین منحنی‌های سرد و گرم باعث شده است که توان مصرفی آنها نسبت به سیستم‌های متداول سرمازای طبقه‌ای[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.



شکل۵: 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 درادامه 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 حالی‌که دماهای تبخیر و چگالش مبرد ثابت نبوده و گستره وسیعی را شامل می‌شود. برای بررسی واضح‌تر نقش فشارهای عملیاتی، چرخه شکل ۲ را درنظر بگیرید. شکل۶ الف منحنی‌های سرد و گرم را در مبدل حرارتی No.1 چرخه فوق‌الذکر به‌ازاء درصد ترکیب مشخص و در فشارهای چگالش و تبخیر ۱۶۰۰kPa و ۱۵۰kPa نشان می‌دهد. متان، اتان، پروپان و نیتروژن 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. شکل۶ ب، منحنی‌های سرد و گرم در مبدل را با همان درصد ترکیب قبلی اما به ازاء 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 (شکل۶ ج). در این حالت، کاهش اختلاف بین فشارهای عملیاتی منجربه 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.

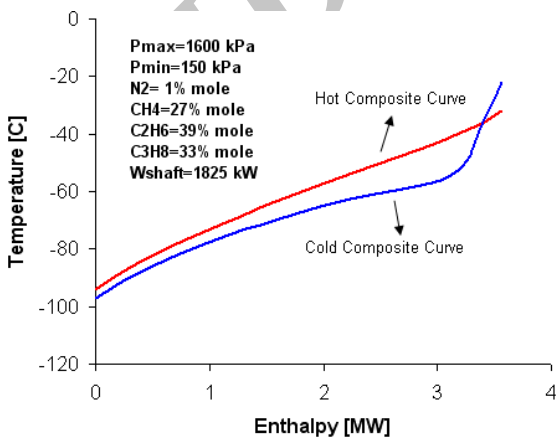
ب) درصد ترکیب اجزاء مبرد: در مورد تعداد اجزاء مبرد چندجزئی با توجه به قانون فازی گیبس می‌توان بیان کرد که افزایش تعداد اجزاء مبرد باعث

---

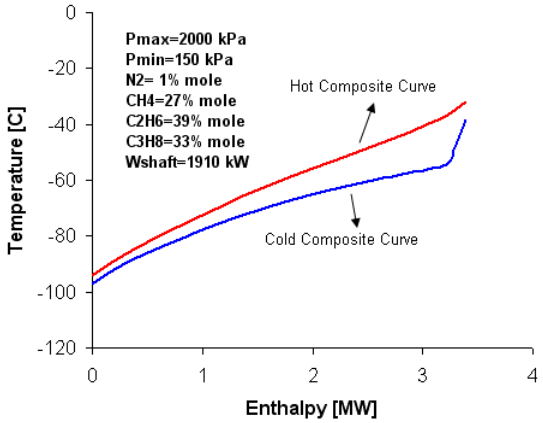
[۴] Efficient Cycle
[۵] Suction and Discharge Pressures
[۶] Cascade Refrigeration System

Archive of SID
www.SID.ir

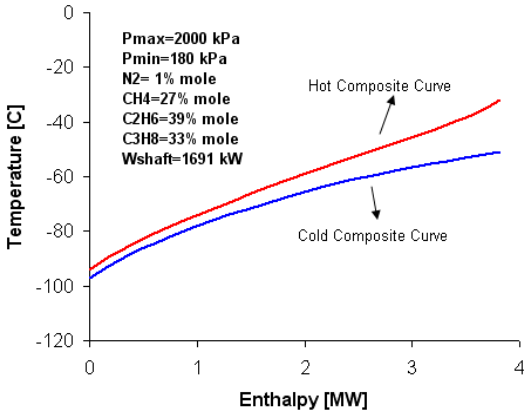
افزایش درجات آزادی چرخه سرمازا خواهد شد که این موضوع به‌نوبه خود پتانسیل دستیابی به چرخه‌ای با کارائی بالاتر را افزایش خواهد داد. اما برای یک تعداد معین از اجزاء، در مورد تغییرات مقادیر درصد اجزاء ترکیب نمی‌توان نتیجه‌گیری خاصی را بیان نمود. به‌عنوان مثال، شکل۶ الف را که مسئله تقاطع دمائی در مبدل No.1 را نشان می‌دهد، درنظر بگیرید. با بهینه‌سازی درصد ترکیب با روش جامع ارائه شده در این تحقیق که در ادامه آنرا کاملا 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 (شکل۷).



الف- تقاطع دمائی

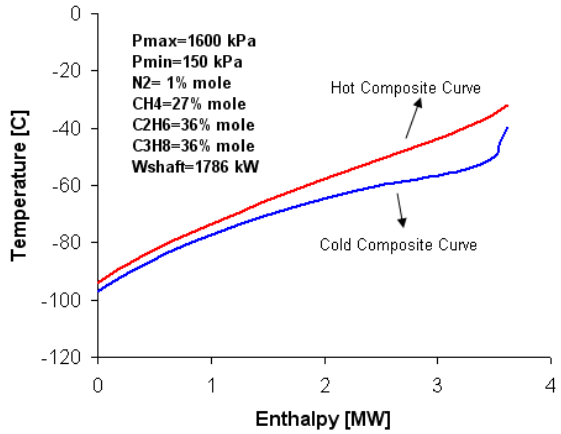


ب- رفع تقاطع دمائی با افزایش فشار تخلیه



ج- رفع تقاطع دمائی با افزایش فشار مکش

شکل۶: بررسی تاثیر فشارهای عملیاتی



شکل۷: بررسی تاثیر درصد ترکیب اجزاء مبرد

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- کسلر (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 مفصلا توضیح داده شد، فشار ماکزیمم و مینیمم عملیاتی مبرد در چرخه (فشارهای مکش و تخلیه کمپرسور) و همچنین درصد ترکیب اجزاء مبرد، پارامترهای موثر 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 به‌عنوان ورودی‌های برنامه محسوب می‌شوند که با استفاده از روشی سیستماتیک، ورودی‌های کد (درصد ترکیب و فشارهای عملیاتی) در راستای دست‌یابی به کمترین توان مصرفی

Archive of SID
www.SID.ir

چرخه (خروجی کد)، بهینه می‌شوند. قیدهای در نظر گرفته شده در بهینه-سازی چرخه سرمازای 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 $0.5^{\circ}C$ باشد.
۳) مبرد به صورت بخار وارد کمپرسور می‌شود.

۵- روش جامع طراحی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی

دیدگاه‌های طراحی توسعه‌یافته برپایه آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرژی 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 برشمارد. 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 سیستم‌هائی با متغیرهای زیاد بیشتر نمایان می‌شود و طراح قادر به ارائه راهکارهائی 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 روش-های فوق‌الذکر ارائه شده است. در این روش با استفاده از تکنولوژی پینچ و آنالیز اگزرژی 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 سرمازای مبرد چندجزئی را با استفاده از روش مذکور تشریح خواهیم کرد.

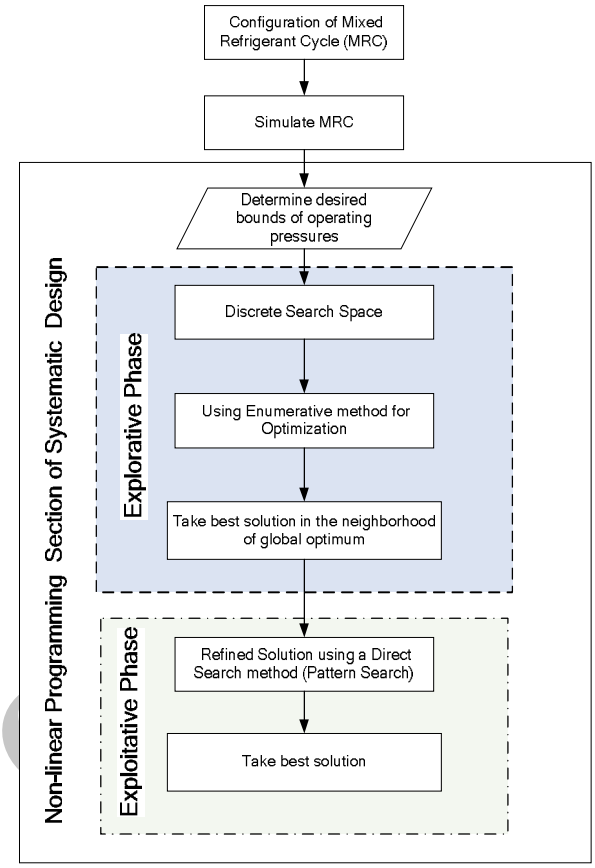
در قسمت پیشین، چگونگی شبیه‌سازی یک چرخه سرمازا با آرایش مشخص را در قالب یک تابع[۷] در محیط برنامه‌نویسی MATLAB توضیح دادیم. همان‌طور که ذکر شد، در توابع توسعه داده شده برای شبیه‌سازی چرخه‌ها، فشارهای عملیاتی و درصد ترکیب اجزاء مبرد، ورودی‌های تابع[۸] درنظر گرفته شده‌اند که با وارد کردن مقادیر آنها، توان 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. ازآنجائی 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 $\Delta T_{\min}$ (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 ترکیب‌هائی 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 به ازاء 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].

---

۷ Function
۸ Input Arguments
۹ Enumerative Method
۱۰ Nonlinear, Not-differential and Not-Continues Objective Function
۱۱ Explorative Phase
۱۲ Exploitative Phase

Archive of SID
www.SID.ir



شکل۸: روش طراحی سیستماتیک چرخه‌های سرمازای مبرد 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 بهینه-سازی تولید می‌شود. هدف از مرحله جستجوی موضعی، دستیابی به نقطه بهینه مطلق با دقت دلخواه برپایه حدس‌های اولیه مناسب به‌دست 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].

به‌علت 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 به‌ترتیب روش‌های بکارگرفته شده در مرحله جستجوی عمومی و موضعی می‌باشند. علت استفاده از روش جستجوی مستقیم، تضمین دستیابی این روش به بهینه مطلق درصورت حدس اولیه مناسب است.

[۱۳] Global Search Space
[۱۴] Local Search Space

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] به‌دست آید که این امر از گرفتار شدن مرحله دوم عملیات بهینه-سازی 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 سرمازای مبرد 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 سرمازای 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 مبرد و فشارهای عملیاتی در چرخه‌های آرایش الف و ب و با استفاده از روش شمارشی (مرحله اول عملیات بهینه-سازی) که منجر به شناسائی پارامترهای بهینه به ازاء نقطه‌ای نزدیک به بهینه مطلق می‌شود را نشان می‌دهد.

جدول۲: درصد ترکیب بهینه اجزاء مبرد با استفاده از روش شمارشی

چرخه سرمازا	درصد ترکیب اجزاء مبرد (mol%)			
	نیتروژن	متان	اتان	پروپان
آرایش الف	۱	۲۹	۳٤	۳٦
آرایش ب	۱	۳۲	۳۵	۳۲

جدول۳: 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	۱٤۵۰	۱۸۰	۱۸۷٦.۳

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 کارائی چرخه‌های سرمازا، استفاده از ضریب عملکرد چرخه (COP) می‌باشد. ضریب عملکرد در چرخه-

[۱۵] Solution in the neighborhood of global optimum

Archive of SID
www.SID.ir

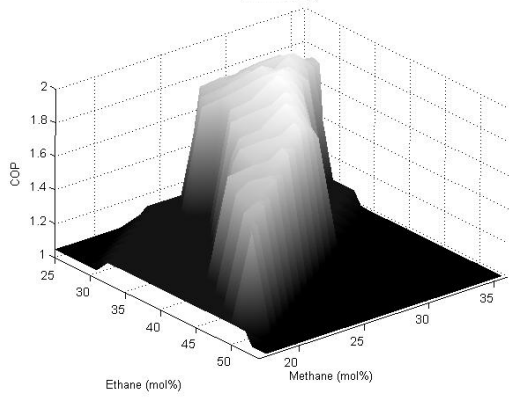
های سرمازای مبرد چندجزئی توسعه داده شده در این تحقیق، بدین‌صورت تعریف شده است:

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

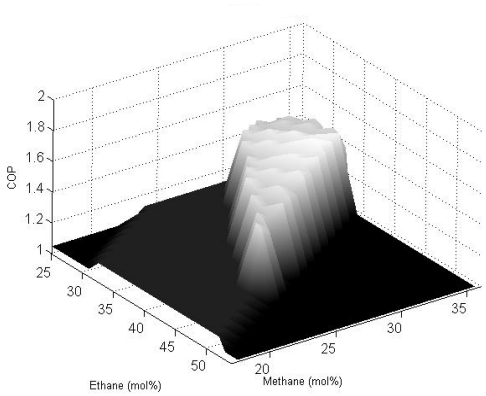
شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات ضریب عملکرد را به‌ازاء تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد برای چرخه‌های سرمازای آرایش الف و ب نشان می‌دهند. لازم به توضیح است که در مورد هر درصد ترکیب، ضریب عملکرد به ازاء فشارهای عملیاتی بهینه مربوط به آن درصد ترکیب (فشارهای که به ازاء آنها، توان مصرفی چرخه حداقل می‌شود) ارائه شده است. در این نمودارها، درصد مولی نیتروژن، ثابت و برابر با 1% 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 شکل‌های فوق مقدار ضریب عملکرد برابر با 1.125 درصد ترکیب-هائی از مبرد را نشان می‌دهد که نتوانسته‌اند تمامی قیدهای در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی را برآورده کنند. با بررسی دقیق‌تر شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است که چرخه سرمازا با آرایش الف از نقطه‌نظر ترمودینامیکی نسبت به چرخه با آرایش ب، بهتر عمل می‌کند. نکته مهم دیگری که از بررسی شکل‌های فوق قابل استنتاج است، محدود نمودن بازه تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد است. همان‌طورکه در این نمودارها مشخص است به‌ازاء طیف وسیعی از درصدهای ترکیب، چرخه سرمازا نمی‌تواند کلیه قیدهای الزامی درنظر گرفته شده در مسئله بهینه‌سازی را تامین نماید. لذا با محدود نمودن بازه تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد می‌توان هزینه محاسباتی مرحله اول بهینه‌سازی را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. به-عنوان مثال در الگوریتم بهینه‌سازی برای چرخه‌های فوق‌الذکر می‌توان محدوده تغییرات درصد ترکیب اجزاء مبرد را به‌صورت زیر تنظیم نمود:

جدول۴: درصد ترکیب اجزاء مبرد چندجزئی

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



شکل۹: تغییرات ضریب عملکرد چرخه آرایش الف با تغییرات درصد ترکیب مبرد



شکل۱۰: تغییرات ضریب عملکرد چرخه آرایش ب با تغییرات درصد ترکیب مبرد

جدول۵، مقایسه‌ای بین توان مصرفی چرخه‌های سرمازای مبرد چندجزئی که فشارهای عملیاتی و درصد ترکیب اجزاء مبرد آن بهینه شده‌اند، با توان مصرفی چرخه سرمازای اتیلن واحد اولفین تبریز را ارائه می‌دهد. همان-طورکه در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است، چگالنده‌های چرخه‌های سرمازا بخش عمده‌ای از حرارت دریافتی از جریان‌های Feed و Reflux را به تبخیرکننده‌های چرخه پروپیلنی دفع می‌کنند، لذا توان مصرفی چرخه سرمازای پروپیلنی نیز متاثر از تغییرات چرخه سرمازای پائین‌دستی (طبقه دوم) خواهد بود. نتایج نشان می‌دهند که با انتخاب آرایش مناسب چرخه سرمازا (آرایش الف) و بهینه‌سازی پارامترهای آن، توان مصرفی کل سیستم سرمازا واحد اولفین تبریز حدود ۱۸.۹٪ کاهش و راندمان اگزرژیک آن حدود ۸٪ افزایش می‌یابد.

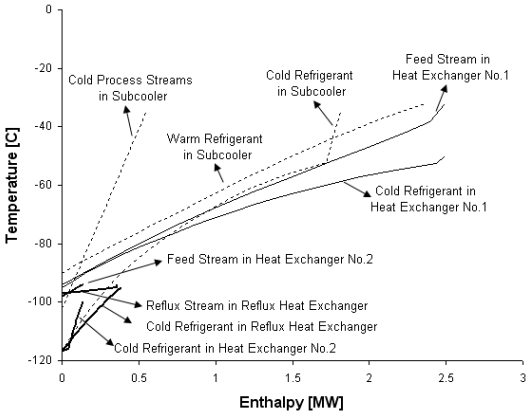
جدول۵: مقایسه توان مصرفی سیستم‌های مبرد چندجزئی و خالص

چرخه سرمازای تحتانی	توان مصرفی(kW)			راندمان اگزرژیک کل سیستم
	چرخه سرمازای تحتانی	چرخه سرمازای پروپیلنی	کل سیستم سرمازا	
چرخه اتیلن خالص	**۱۶۶٤**	**۵۲۹۹**	**٦۹٦۳**	**%۳۰.۸۸**
آرایش الف	**۱۵۲۸**	**٤۱۱۸**	**۵٦٤٦**	**%۳۸.۰۸**
آرایش ب	**۱۸۷٦**	**٤۰۸۹**	**۵۹٦۵**	**%۳٦.۰٤**

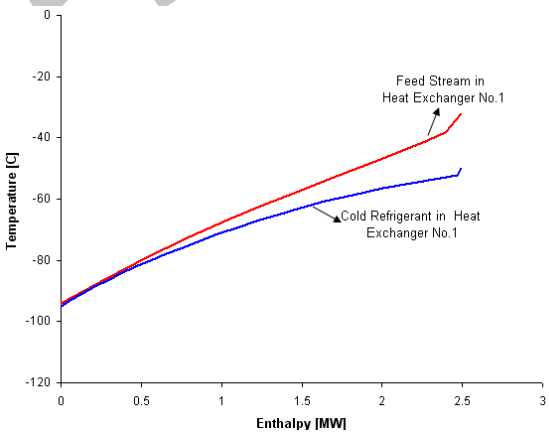
از آنجائی‌که در روش طراحی ارائه شده از تلفیق دیدگاه‌های ترمودینامیکی (نمودارهای مرکب) و روش‌های ریاضی استفاده شده است، لذا به سهولت می‌توان جریان‌های سرد و گرم در تمامی مبدل‌های حرارتی ترسیم و انطباق بین آنها را بررسی نمود. شکل‌های ۴ و ۵ به‌ترتیب، نمودار دما- بار حرارتی مبدل‌های حرارتی و نمودار ترکیبی مبدل حرارتی No.1 را به ازاء پارامترهای بهینه جداول ۲ و ۳ در چرخه سرمازا با آرایش الف نشان می‌دهند

Archive of SID
www.SID.ir

و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز همین مشخصه‌ها را در چرخه سرمازا با آرایش ب، نمایش می‌دهند.

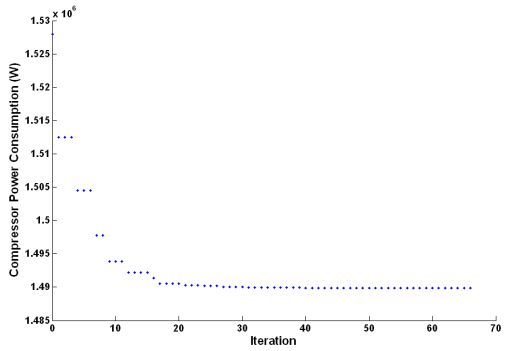


شکل۱۱: نمودار دما- بارحرارتی مبدل‌های حرارتی چرخه سرمازای مبرد چندجزئی با آرایش ب

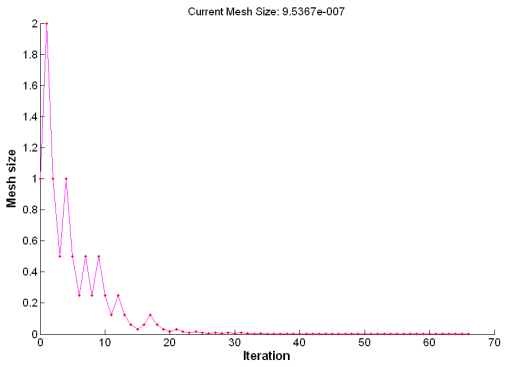


شکل۱۲: نمودار ترکیبی مبدل حرارتی No.1 در چرخه سرمازای مبرد چندجزئی با آرایش ب

جدول۲، درصد ترکیب بهینه اجزاء مبرد را با دقت یک صدم جزء مولی (اندازه گام استفاده شده در روش بهینه‌سازی شمارشی در این تحقیق) ارائه می‌کند. همان‌طور که توضیح داده شد، با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم (مرحله دوم بهینه‌سازی)، می‌توان درصد ترکیب بهینه اجزاء مبرد را تا دقت دلخواه تصحیح نمود. شکل‌های ۱۳ و ۱۴، تغییرات مقدار تابع هدف (توان مصرفی چرخه) و اندازه شبکه‌بندی در تکرارهای الگوریتم Pattern Search را برای چرخه سرمازای مبرد چندجزئی آرایش الف در جهت تصحیح درصد ترکیب‌های ارائه شده در جدول ۲ تا دستیابی به دقت 10^{-6} را نشان می‌دهند.



شکل۱۳: تغییرات مقدار تابع هدف در تکرارهای الگوریتم Pattern Search



شکل۱۴: تغییرات اندازه شبکه‌بندی در تکرارهای الگوریتم Pattern Search

جداول ۶ و ۷، مقادیر بهینه پارامترهای کلیدی چرخه‌های سرمازا را که با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم Pattern Search بدست آمده‌اند را ارائه می‌کند. تطابق بیشتر بین نمودارهای سرد و گرم باعث کاهش توان مصرفی چرخه‌ها نسبت به مقادیر ارائه شده در جدول ۳ شده است.

جدول۶: درصد ترکیب بهینه اجزاء مبرد با استفاده از الگوریتم Pattern Search

چرخه سرمازا	درصد ترکیب اجزاء مبرد (mol%)			
	نیتروژن	متان	اتان	پروپان
آرایش الف	۰.۶۵۲۷۵ ۸	۲۸.۷۷۶۵۶۳	۳۳.۸۴۸۹۳۵	۳۶.۷۲۱۷۴ ۸
آرایش ب	۰.۰۱۰۱۴ ۲	۳۲.۴۹۸۹۶۲	۳۵.۱۹۴۴۴۹	۳۲.۲۹۶۳۴ ۵

جدول۷: 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

Archive of SID
www.SID.ir

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، در ابتدا دو چرخه سرمازای دماپائین 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 روش-های 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 چرخه‌هائی 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 به‌دست 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

ضریب عملکرد چرخه	COP
چرخه سرمازای مبرد چندجزئی	MRC
حرارت گرفته شده از اواپراتور چرخه سرمازا	Q
توان مصرفی چرخه سرمازا	W
دما	T
فشار	P
درصد مولی	mol%
کیلو مول بر ساعت	kmol h^{-1}

زیرنویس‌ها

ورودی	in
خروجی	out

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 Proceesing, 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., Treasurvwala A.M., 1995, "A comparision of a direct search method and a genetic algorithm for comformational 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

Archive of SID
www.SID.ir