نقش مبردهای خالص و مخلوط در کمینه سازی توان مصرفی سیستم های تبرید تراکمی مورد استفاده در صنایع نفت و گاز

مصطفی مافی[1]، امیرحسین مرادی [2]

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی، m.mafi@eng.ikiu.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی، en.amirhossein@hotmail.com

چکیده

سیستم‌های تبرید مورد استفاده در صنعت نفت و گاز از جمله صنایع انرژی بر محسوب می‌گردند. این فرایندها به منظور تامین سرمایش مورد نیاز واحدهای فرایندی در بخش‌های مختلفی از جمله سیستم‌های جداسازی و مایع‌سازی گاز طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در دهه های اخیر تلاش گسترده‌ای در راستای کمینه‌سازی توان مصرفی و بهبود کارایی واحدهای تبرید صورت گرفته است. در این میان، استفاده از چرخه‌های تبرید با مبردهای چندجزیی و جایگزینی آن‌ها با فرایندهای مرسوم مبرد خالص، از جمله مهمترین اقداماتی از که تا کنون در این حوزه مطرح شده اند. استفاده از مبرد چند جزیی در این چرخه‌ها، ضمن کاهش فاصله بین جریان‌های سرد (مبرد) و گرم (فرایند) در مبدل‌های حرارتی، باعث کاهش توان مصرفی فرایند شده و همچنین، در تعدیل هزینه‌های ناشی از استفاده از فرایندهای پیچیده چند طبقه‌ای مبرد خالص موثر است. در این تحقیق دو فرایند مبرد چندجزیی و اکسپاندری نیتروژنی ساده، که از جمله فرایندهای پرکاربرد در حوزه مایع‌سازی گاز طبیعی می‌باشند، انتخاب و ضمن مقایسه منحنی‌های سرمایشی و گرمایشی این دو فرایند، میزان بهبود توان مصرفی، در صورت استفاده از مبرد چند جزیی بررسی گردید. نتایج نشان دهنده کاهش ۴۰ درصدی توان مصرفی در صورت جایگزینی فرایند مبرد چندجزیی می‌باشد.

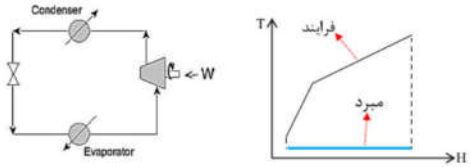
کلیدواژگان: مبرد چندجزیی، مبرد خالص، مایع‌سازی گاز طبیعی، فرایند مبرد چندجزیی ساده، فرایند اکسپاندری نیتروژنی ساده.

۱- مقدمه

فرایندهای بسیاری درصنایع نفت و گاز وجود دارند که تمام یا بخشی از آن‌ها، در زیر دمای محیط انجام می‌گیرد. در فرایندهای متداول دما پایین، هنگامی که برودت مورد نیاز در یک گستره دمایی وسیع توزیع شده باشد، معمولا از یک سیستم سرمازای طبقه‌ای جهت تامین این برودت استفاده می‌شود. به علت بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و مصرفی سیستم‌های سرمازای طبقه‌ای، استفاده از آنها جهت تامین برودت در سطوح دمایی پایین، باعث افزایش هزینه‌های کل واحد شده، لذا ارائه سیستم‌های سرمازایی با هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین، همواره از موضوعات قابل تامل و چالش‌برانگیز در طراحی و توسعه صنایع فرایندی دماپایین می‌باشد.

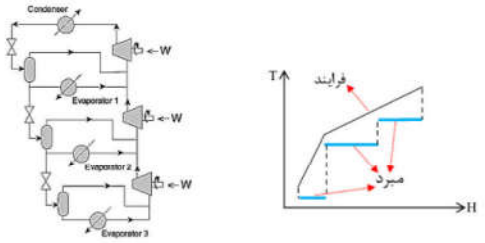
به منظور بهبود عملکرد چرخه‌های سرمازای دماپایین مورد استفاده در صنایع شیمیایی و تطبیق بیش‌تر آن‌ها با شرایط برودت موردنیاز، می‌توان به جای مبرد خالص[1] در این چرخه‌ها از مبردهای چندجزیی[2] یا مخلوط استفاده کرد [۱]. این امر موجب کاهش تجهیزات فرایندی نظیر کمپرسورها، جدا کننده‌ها و مبدل‌های حرارتی شده و کاهش هزینه اولیه را در پی دارد. مبردهای چندجزیی می‌توانند در تمامی سیستم‌های سرمازا اعم از ساده[3]، آبشاری[4] و چندمرحله‌ای[5] به‌کار گرفته شوند. مبردهای چندجزیی برتری‌های فراوانی نسبت به مبردهای خالص دارند که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

یک محدودیت بزرگ در سیستم‌های سرمازا با مبرد خالص، این است که هنگامی که مبرد تبخیر می‌شود، سرمایش در یک دمای ثابت رخ می‌دهد که همان دمای اشباع در فشار تبخیرکننده است، (شکل ۱).



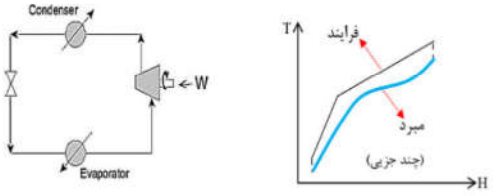
شکل ۱ شماتیک و نمودار ترکیبی چرخه سرمازا با مبرد خالص [۲]

اگر جریان‌های گرم فرایندی نیاز به سرمایش در یک محدوده گسترده دمایی داشته باشند، مشابه آن‌چه که در سرمایش کرایوژنیکی[6] و مایع‌سازی گازها رخ می‌دهد، فراهم کردن تمامی سرمایش تنها در یک سطح دمایی، منجر به عملکرد ضعیف سیستم می‌شود. این امر به این خاطر است که وجود اختلاف دمای زیاد در مبدل، سیستم را از بازگشت‌پذیری[7] و در نتیجه کارایی مناسب ترمودینامیکی دور می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، تنها راه راه مرتفع نمودن این محدودیت، آبشاری کردن سیستم سرمازا است (استفاده از چند چرخه سرمازای پشت سرهم). با این حال طبق شکل (۲) هنوز برگشت ناپذیری[8] سیستم قابل توجه می‌باشد. از سوی دیگر افزایش بیش از حد طبقات، پیچیدگی و هزینه سیستم را بسیار افزایش می‌دهد [۲].



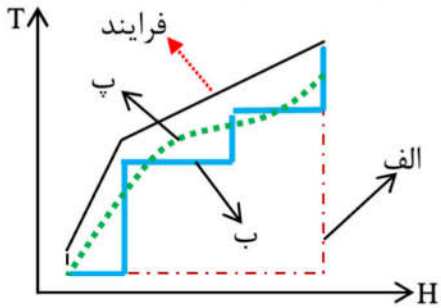
شکل ۲ شماتیک و نمودار ترکیبی چرخه چند طبقه سرمازا با مبرد خالص [۲]

تغییر فاز مبردهای چندجزیی در فشار ثابت، بر خلاف مبردهای خالص نه در دمای ثابت، که در یک محدوده دمایی بین نقطه حباب تا شبنم مخلوط رخ می‌دهد. بنابراین همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در این حالت تطبیق خوبی بین جریان‌های گرم (فرایند) و سرد (مبرد) حاصل می‌گردد.



شکل ۳ شماتیک و نمودار ترکیبی چرخه ساده سرمازا با مبرد چندجزیی [۲]

برای درک بهتر موضوع می‌توان تفاوت توان مصرفی چرخه‌های آبشاری و چرخه‌های مبرد چندجزیی را به تفاوت انتگرال‌گیری عددی از طریق تقسیم نمودار به فواصل گسسته معین، با انتگرال‌گیری پیوسته دانست. یا به عبارتی دیگری با مقایسه سطوح بین منحنی فرایندی و منحنی سرمایشی می‌توان میزان کاهش تلفات اگزرژی و توان مصرفی را مشاهده نمود [۲]. در شکل (۴) یک مقایسه کیفی بین نمودار ترکیبی چرخه‌های فوق‌الذکر صورت گرفته است. همانگونه که از شکل مشخص است، کمتر بودن سطح بین منحنی **(پ)**، (چرخه ساده با مبرد چندجزیی) با منحنی فرایندی در مقایسه با دو منحنی دیگر، نشان دهنده برتری این چرخه از لحاظ کاهش تلفات اگزرژی و در نتیجه کاهش توان مصرفی در این چرخه است.



شکل ۴ مقایسه فرایندهای سرمایش جهت سرد سازی یک جریان فرایندی: الف)چرخه ساده با مبرد خالص ب) چرخه چند طبقه با مبرد خاص پ) چرخه ساده بامبرد چند جزیی.

مقایسه بین چرخه ساده مبرد چندجزیی و چرخه آبشاری پیچیده و پرهزینه مبرد خالص، و در عین حال برتری آشکار چرخه سرمازا با مبرد

1. Pure Refrigerant
2. Mixed Refrigerant
3. Single Compression Refrigeration Cycle
4. Cascade
5. Multistage Refrigeration Cycle
6. Cryogenic Cooling
7. Reversibility
8. Irreversibility

چندجزیی، از دیدگاه ترمودینامیکی و انرژی، اهمیت استفاده از مبردهای چندجزیی در سیستم‌های سرمازای کرایوژنیکی را دو چندان می‌کند [۲].

مزیت مهم دیگر سیستم‌های سرمازا با مبرد چندجزیی، انعطاف‌پذیری آن‌ها در مقابل تغییر شرایط عملیاتی نظیر دمای محیط، فشار قسمت‌های مختلف چرخه و حتی ظرفیت سرمازایی سیستم می‌باشد [۳]. همچنین در برخی از فرایندهای دماپایین نظیر مایع‌سازی گازطبیعی، اجزای خوراک فرایند در طول زمان تغییر می‌کند. حال اگر در این نوع فرایندها، از سیستم‌های سرمازا با مبرد خالص استفاده شوند، اصلاح کردن این سیستم با شرایط جدید خوراک، کاری بس پیچیده و در بعضی مواقع، نشدنی است [۱]. علت اصلی پیچیدگی یک‌پارچه‌سازی بین فرایند و سیستم‌های سرمازا با مبردهای خالص، پایین بودن درجه آزادی این‌گونه سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های مبرد چندجزیی می‌باشد. مطابق قانون فازی گیبس[1]، درجه آزادی یک سیستم که شامل C جزء مختلف، M واکنش مستقل و Q فاز می‌باشد، برابر است با:

$$F=C-M-Q+2 \qquad (۱)$$

مطابق رابطه (۱)، درجه آزادی در سیستم‌های سرمازا ساده با یک مبرد خالص برابر است با:

$$F=C-M-Q+2=1-0-2+2=1 \qquad (۲)$$

لذا، در این‌گونه سیستم‌ها یک درجه آزادی وجود دارد که همان انتخاب فشار یا دمای جوشش مبرد می‌باشد. حال اگر به‌جای استفاده از مبرد خالص در سیستم سرمازای ساده، از یک مبرد چندجزئی با C جزء متفاوت استفاده کنیم، درجه آزادی سیستم برابر خواهد شد با:

$$F=C-M-Q+2=C-0-2+2=C \qquad (۳)$$

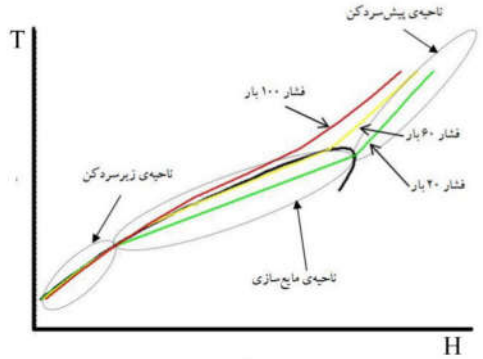
لذا در این حالت، در یک فشار مشخص، دمای جوشش مبرد تابعی از درصد اجزاء می‌باشد و می‌توان با تغییر درصد اجزاء مبرد در یک فشار یکسان، نقطه جوشش مبرد را مطابق با شرایط جدید اصلاح نمود [۱].

با توجه به مطالب ارائه شده، مشخص می‌شود که تعیین اجزای تشکیل دهنده مبرد چندجزیی (مخلوط) و سهم هریک از این اجزا در مبرد، از مهمترین پارامترهای چرخه‌های مبرد چندجزیی محسوب می‌گردد. به طور کلی روش تخمین اجزای تشکیل دهنده چرخه‌های سرمازا به این صورت است: اولین ماده مبرد باید در فشار ۱/۵ بار، نقطه جوشی پایین‌تر یا مساوی نقطه جوش ماده سردشونده داشته باشد. به عنوان مثال با توجه به اینکه نقطه‌ی جوش نیتروژن برابر با ۷۷ درجه کلوین است، این ماده می‌تواند در مایع‌سازی موادی که نقطه‌ی جوش آن‌ها بین ۷۷ تا ۱۰۵ درجه کلوین است به کار گرفته شود. ماده مبرد دوم می‌تواند دمای جوشی بین ۳۰ تا ۶۰ درجه کلوین بالاتر از ماده‌ی اولیه داشته باشد. همچنین این ماده نباید در دماهای پایین با ماده مبرد اولیه واکنش نشان داده یا مخلوط شود. ماده مبرد سوم می‌تواند دمای جوشی در حدود ۳۰ درجه‌کلوین بالاتر از ماده‌ی مبرد دوم داشته باشد و باید به راحتی با ماده‌ی مبرد اول در فاز مایع- مایع قرار گیرد. به همین ترتیب می‌توان برای مواد مبرد بعدی عمل کرد [۴]. عموما اجزای مخلوط را ترکیبی از چند مبرد سبک و چند مبرد سنگین‌تر انتخاب می‌کنند تا بتوان با درصدهای ترکیب مختلف، گستره دمایی وسیعی را پوشش داد. هر قدر حداقل سطح دمایی موردنیاز فرایند کاهش یابد، باید از مخلوطی با اجزای سبک‌تر، استفاده شود. معمولا مبردهای چندجزیی مورد استفاده در فرایندهای دماپایین، مخلوطی از هیدروکربن‌ها (متان تا پنتان) و نیتروژن هستند [۵]. معمولا هیدروکربن‌های سنگین‌تر دارای اثر ژول- تامپسون و سرمایش بیش‌تر پس از فرایند خفگی و انبساط هستند که امری مطلوب می‌باشد [۵]. از سوی دیگر، نقاط جوش آن‌ها نسبت به هیدروکربن‌های سبک‌تر، بالاتر است و در دماهای خیلی پایین احتمال انجماد آن‌ها وجود دارد که این یک نقطه ضعف برای این مواد محسوب می‌شود. تحقیقات محققین نشان داد که مبردهای مخلوط آرگون و هیدروکربن‌ها برای بازه دمایی ۱۲۰ الی ۱۵۰ درجه کلوین مناسب می‌باشد. مبردهای مخلوط نیتروژن و هیدروکربن‌ها در بازه دمایی ۹۰ الی ۱۲۰ درجه‌ی کلوین و مبردهای مخلوط نیتروژن- نئون- هیدروکربن‌ها نیز برای بازه دمایی ۷۰ الی ۱۲۰ درجه کلوین عملکرد مناسب را دارا می‌باشند. بنابراین، استفاده از مبردهای نیتروژن- هیدروکربنی با توجه به ارزان و در دسترس بودن بیش‌تر، و نیز تناسب با سطوح دمایی کرایوژنیکی، انتخاب مناسبی می‌باشد [۴].

همه موارد فوق‌الذکر سبب شده است که جایگزینی مبردهای چند جزیی به جای مبردهای خالص مورد توجه محققین قرار گیرد [۹-۶]. در ادامه، برای درک بهتر موضوع، توان مصرفی چرخه مبرد چندجزیی ساده[2] را با توان مصرفی فرایند اکسپاندری-نیتروژنی[3] (که یک چرخه یک طبقه‌ای با مبرد خالص گازی است) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این فرایندها برای تامین سرمایش مورد نیاز به منظور مایع‌سازی گاز طبیعی طراحی شده‌اند.

۲- مایع‌سازی گاز طبیعی

گاز طبیعی مایع[4] (LNG) با توجه به پالایش‌های صورت گرفته بر روی آن (که قبل از مرحله مایع‌سازی، بر روی آن صورت می‌گیرد) پاک‌ترین حالت گاز طبیعی است و بیش از ٪۹۸ آن را متان تشکیل می‌دهد [۱۰]. LNG زمانی حاصل می‌گردد که دمای گاز طبیعی در فشار اتمسفر به زیر ۱۶۱- درجه سانتیگراد برسد، این امر موجب کاهش حجم آن به ۱/۶۰۰ حجم اولیه (در حالت گازی) می‌شود [۱۱،۱۲]. با توجه به مطالبی که پیش‌تر در مورد فرایندهای دما پایین ارائه گردید، فرایندهای مایع‌سازی گاز طبیعی نیز جزء فرایندهای انرژی‌بر محسوب می‌گردند [۱۲]. شکل (۵) منحنی دما-آنتالپی مربوط به چگالش گاز طبیعی در سه فشار مختلف را نشان می‌دهد.

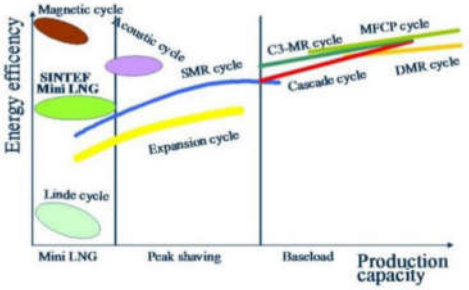


شکل ۵ منحنی دما-آنتالپی مربوط به چگالش گاز طبیعی در فشارهای مختلف

1. Gibbs Phase Rule

2 . Single Mixed Refrigerant (SMR)
3 . N2-Expander
4. Liquid Natural Gas (LNG)

مایع‌سازی گاز طبیعی یک روش مناسب برای گاز رسانی به مناطق مسکونی دور از شبکه توزیع، تنظیم فشار شبکه توزیع و بر طرف کردن کمبود گاز طبیعی در دوره‌های اوج مصرف می‌باشد. این کار در واحدهای قله‌سایی[1] صورت می‌پذیرد [۱۲،۱۳]. فرایندهای مختلفی برای مایع‌سازی گاز طبیعی وجود دارد که بسته به نوع استفاده باید مناسب‌ترین آنها انتخاب شود. در این میان بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد. که فرایندهای مبرد چندجزیی و اکسپاندری-نیتروژنی در واحدهای قله‌سایی کاربرد بیشتری دارند، این مطلب با توجه به شکل (۶) نیز کاملا قابل درک می‌باشد [۱۴-۱۱].

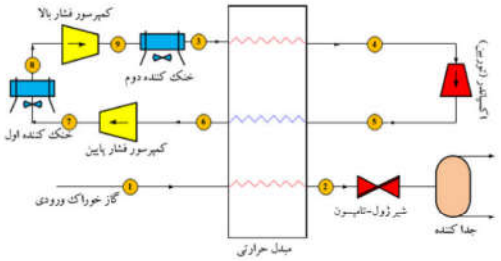


شکل ۶ فرایندهای منلسب مایع‌سازی با توجه به توان مصرفی، ظرفیت تولیدی و نوع کاربری [۱۴]

فرایندهای مایع‌سازی اکسپاندری-نیتروژنی به دلیل سادگی، راه اندازی سریع و تعمیر و نگهداری راحت به عنوان فرایندهای مناسب برای واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی در مقیاس کوچک[2] پیشنهاد شده‌اند. با این حال، نقص این فرایندها مصرف بالای انرژی آن‌ها نسبت به فرایندهای مبرد چندجزیی ساده می‌باشد. دلیل آن کاهش تولید آنتروپی به دلیل کاهش تفاوت دمایی بین جریان گاز خوراک (جریان فرایندی) و جریان مبرد در مبدل حرارتی در فرایندهای مبرد چندجزیی است [۱۱،۱۲]. در ادامه این دو فرایند با توجه به شرایط تعریف شده برای گاز خوراک و به منظور تامین گاز طبیعی یک واحد تولید توان مدل‌سازی شده و توان مصرفی آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

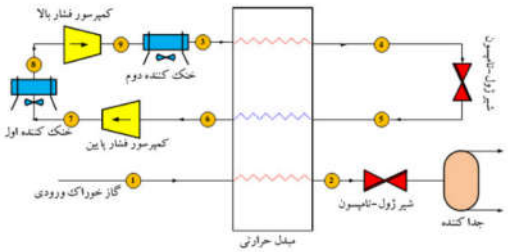
۳- مدل سازی و شبیه‌سازی

همانگونه که اشاره شد، دو چرخه مورد مطالعه در این تحقیق فرایندهای اکسپاندری-نیتروژنی ساده و فرایند مبرد چندجزیی ساده می‌باشند که شمای کلی آن‌ها به تر تیب در شکل (۷) و (۸) آورده شده است.



شکل۷ شمای کلی فرایند اکسپاندری-نیتروژنی ساده

1. Peak-shaving plant
2. Small scale



شکل ۸ شمای کلی فرایند مبرد چندجزیی

این فرایندها باتوجه به داده‌های موجود در جدول (۱)، برای تامین سوخت دو ماه یک واحد گازی سیکل ترکیبی ۳۳۲ مگاواتی طراحی و توسط نرم‌افزار آسپن‌هایسیس ۷،۲[3] مدل‌سازی شده‌اند. ظرفیت واحد مایع‌سازی پس محاسبات، ۱۴۷ هزار تن LNG در سال محاسبه شد.

جدول۱ مشخصات عملکردی فرایندهای مایع سازی:

مشخصات فرایند	اکسپاندری-نیتروژنی	مبرد چندجزیی
فشار گازخوراک (۱)	۶۰ bar	۶۰ bar
فشار تخلیه (۹)	۱۲۰ bar	۲۴ bar
فشار مکش (۶)	۶/۳ bar	۴ bar
دمای گازخوراک(۱)	۳۲ C	۳۲ C
دمای مبرد بعد از مبدل حرارتی (۴)	-۴۵ C	-۱۶۰ C
دمای مبرد بعد از خنک‌کننده اول (۸)	۳۶ C	۳۶ C
دمای مبرد بعد از خنک‌کننده دوم (۳)	۲۷ C	۲۷ C
دبی گاز خوراک ورودی	۲۰۴۵ kg/h	۲۰۴۵۴ kg/h

در جدول (۲)، مقادیر مربوط به درصد ترکیب گازخوراک و مبرد بکار گرفته شده در فرایند مبرد چندجزیی آورده شده است. با توجه به خالص بودن مبرد استفاده شده در فرایند اکسپاندری-نیتروژنی (نیتروژن گازی)، از آوردن مقادیر مربوط به آن در جدول خودداری شده است.

جدول۲ درصد ترکیب مولی اجزای گاز خوراک و مبرد چندجزیی[۱۱]

ترکیبات	گازخوراک	مبرد چندجزیی
نیتروژن	۴٪	۱۱/۵٪
متان	۸۷٪	۲۸/۵٪
اتان	۵/۵٪	۳۰/۵٪
پروپان	۲٪	۱۴٪
n-بوتان	۰/۵٪	۶٪
i-بوتان	۰/۵٪	-
i-پنتان	۰/۵٪	۹/۵٪

3. Aspen HYSYS 7.2

۳-۱- فرضیات مدل‌سازی

۱- از معادله حالت پینگ-رابینسون جهت پیش بینی خواص ترمودینامیکی و محاسبات تعادل فازها استفاده شده است [۱۱،۱۵].

۲- از افت فشار درمبدل‌های حرارتی وخنک‌کننده‌ها صرف نظر شده است [۱۱].

۳- کارایی ایزنتروپیک کمپرسورها و اکسپاندرها ٪ ۸۰ می‌باشد [۱۵].

۴- ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل حراتی ثابت در نظر گرفته شده است [۱۶].

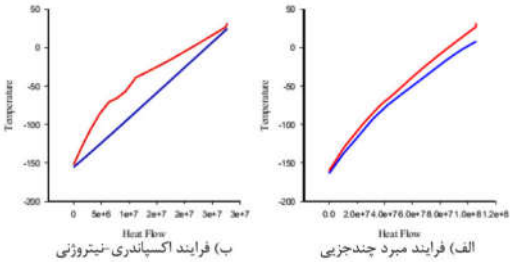
۵- مایع وارد کمپرسور نمی‌شود.

۶- تداخل دمایی[1] در مبدل حرارتی اتفاق نمی‌افتد.

۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

پس از مدل‌سازی فرایندهای مبرد چندجزیی و اکسپاندری-نیتروژنی، در این بخش توان مصرفی، کار ویژه (نسبت توان مصرفی به مایع تولیدی) و نسبت توان واحد مایع‌سازی به واحد تولید توان برای دو فرایند فوق‌الذکر با یکدیگر مقایسه می‌گردد. اما قبل از آن، منحنی حرارتی فرایند که در شکل (۹) آورده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همانگونه که انتظار می‌رفت، با نزدیک‌شدن منحنی حرارتی مجموعه سرد فرایندی به منحنی گرم فرایندی در مبدل حرارتی و همچنین یکنواخت بودن فاصله این دو منحنی، میزان کار مصرفی کاهش پیدا می‌کند، به عبارتی دیگر کاهش سطح ایجاد شده بین منحنی‌های گرم و سرد فرایندی موجب کاهش تلاف اگزرژی شده و در نتیجه توان مصرفی را کاهش می‌دهد. از آنجایی که منحنی‌های حرارتی مربوط به فرایند مبرد چندجزیی فاصله کمتری نسبت به یکدیگر دارند و این فاصله به صورت یکنواخت می‌باشد، درنتیجه، این فرایند در مقایسه با فرایند اکسپاندری-نیتروژنی توان کمتری را برای تولید میزان مشخصی LNG مصرف می‌کند.



الف) فرایند مبرد چندجزیی ب) فرایند اکسپاندری-نیتروژنی

شکل ۹ منحنی حرارتی مربوط به جریان مبرد و جریان فرایندی در مبدل حرارتی

با محاسبه توان مصرفی دو فرایند، مقادیر ۶/۹۶ و ۱۱/۹ مگاوات به ترتیب برای فرایندهای مبرد چندجزیی و اکسپاندری-نیتروژنی بدست می‌آید، این مقادیر، نتایج حاصل از بررسی منحنی‌ها را تصدیق می‌نماید. در جدول (۳) مقایسه کاملی بین فرایندها فوق صورت گرفته است.

جدول ۳ مقایسه فرایندهای اکسپاندری-نیتروژنی و مبرد چندجزیی

فرایند	اکسپاندری-نیتروژنی	مبرد چندجزیی
توان مصرفی	۱۱/۹ MW	۶/۹۶ MW
کار ویژه	۰/۶۹	۰/۳۵
نسبت توان واحد مایع‌سازی به نیروگاه	۳/۵٪	۲٪

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق نقش مبردهای مخلوط (چندجزیی) در کاهش توان مصرفی در فرایندهای نفت گاز مورد بررسی قرار گرفت و به عنوان نمونه مورد مطالعه، فرایندهای مبرد چندجزیی و اکسپاندری-نیتروژنی ساده، به نمایندگی از چرخه‌های با مبرد چندجزیی و یک‌طبقه‌ای با مبرد خالص مورد بررسی قرارگرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از مبرد چندجزیی به عنوان مبرد چرخه سرمازایی، به دلیل درجه آزادی بیشتر موجب کاهش فاصله منحنی‌های گرم و سرد فرایندی می‌گردد. این امر ضمن کاهش تلفات اگزرژی، عملکرد سیستم را بهبود داده و توان مصرفی را تا حد زیادی نسبت به چرخه‌های ساده مبرد خالص کاهش می‌دهد. برای نمونه جایگزینی فرایندهای مبردچندجزیی با فرایندهای اکسپاندری-نیتروژنی در یک واحد مایع‌سازی ۱۴۷ هزار تنی تولید گاز طبیعی مایع (ظرفیت واحد مایع سازی برای تامین سوخت دوماه یک واحد تولید توان ۳۳۲ مگاواتی)، توان مصرفی را تقریبا ۵ مگاوات کاهش می‌دهد. در صورت افزایش ظرفیت واحد مایع‌سازی این اختلاف افزایش بیشتری می‌یابد؛ به این علت، استفاده از فرایندهای اکسپاندری-نیتروژنی برای واحدهای با ظرفیت بالا منطقی نبوده و بیشتر واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی از فرایند مبرد چندجزیی یا فرایندهای مشتق شده از آن برای مایع‌سازی گاز استفاده می‌نمایند[۱۲]. کاهش توان مصرفی در فرایند مبرد چند جزیی هزینه عملیاتی واحدهای قله‌سایی را که از این فرایندها استفاده می‌کنند، کاهش داده و مصرف توان کمتر در این فرایند موجب می‌شود که نسبت به فرایندهای مبرد خالص آلایندهای زیست محیطی حاصل از تولید توان در این فرایندها کمتر باشد.

لازم به ذکر است که اگر کارایی ملاک انتخاب یک فرایند باشد، هیچ شکی نیست که فرایندهای مایع‌سازی با مبرد چندجزیی کارایی بهتری نسبت به فرایندهای اکسپاندری با مبرد گازی دارند. با این وجود فرایندهای اکسپاندری با مبرد گازی، برای استفاده در واحدهای دور از ساحل[2] و واحدهای قله‌سایی در مقیاس کوچک دارای مزایای زیادی از جمله فشردگی، ایمنی و عملکرد آسان‌ترمی‌باشند که علاقه‌مندی برای بکارگیری این فرایندها را افزایش می‌دهد [۱۷].

1. Temperature Cross

2. Offshore

۶- علایم، نشانه‌ها و ارقام

C	تعداد اجزا
F	درجه آزادی
M	تعداد واکنش مستقل
Q	تعداد فاز
LNG	گاز طبیعی مایع
n-بوتان	*n-Butane*
i-بوتان	*i-Butane*
i-پنتان	*i- Pantane*

مراجع

[1] مصطفی مافی، توسعه‌ی مدل مناسب خنک‌کاری در سیستم‌های جداسازی صنایع پتروشیمی و بهینه‌سازی ترمودینامیکی- اقتصادی آن با آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرژی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، رساله‌ی دکتری، ۱۳۸۸.

[2] F.D. Nogal, Optimal design of mixed refrigerant cycles, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, pp. 8724–8740, 2008.

[3] N. Churi, L. Achenie, The optimal design of refrigerant mixtures for a two evaporator refrigeration system, *Computer and Chemical Engineering*, Vol. 21, pp. 49-54, 1997.

[4] G. Venkatarathnam, Liquefaction of nitrogen using mixed refrigerant processes, 2009.

[5] احسان سلطانی، توسعه‌ی سیستم مایع‌سازی گاز نیتروژن با استفاده از مبردهای کرایوژنیکی چندجزیی و بهینه‌سازی آن با استفاده از آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرژی، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، ۱۳۹۰.

[6] M. Wang, J. Zhang, Q. Xu, Optimal design and operation of a C3MR refrigeration system for natural gas liquefaction, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 39, pp. 84-95, 2012.

[7] M. Wang, R. Khlilpour, A. Abbas, Thermodynamic and economic optimization of LNG mixed refrigerant processes, *Energy Conversion and Management*, Vol. 88, pp. 947-961, 2014.

[8] M.S. Khan, M. Lee, Design optimization of single mixed refrigerant natural gas liquefaction process using the particle swarm paradigm with nonlinear constraints, *Energy*, Vol. 49, pp. 146-155, 2013

[9] M. Mafi, M. Amidpour, S.M. Mousavi Naeynian, Development in Mixed Refrigerant Cycles Used in Olefin Plants, *In Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium*, Vol. 1, pp. 154-161, 2009.

[10] S. Kumar,H. Kwon,K. Choi, W. Lim,J.H. Cho,K. Tak, LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development. *Appl Energy*, pp. 4264–73, 2011.

[11] G. Venkatarathnam, *Cryogenic mixed refrigerant processes*, New York: Springer, 2008.

[12] S. Mokhatab,J.H. Mak, J.V. Valappil, D.A. Wood, *Handbook of Liquefied Natural Gas.*, New York: Gulf Professional Publishing, 2013.

[13] A.J. Kidnay, W.R. Parrish, *Fundamentals of natural gas processing*, New York: CRC Press, 2006.

[14] S. Kunert,B. Larsen, Small is Beautiful –Mini LNG Concept, Hamworthy Gas Systems As, Norway, 2008.

[15] H. Mokarizadeh Haghighi Shirazi,D. Mowla, Energy optimization for liquefaction process of natural gas in peak shaving plant, *Energy*, Vol. 35 No. 7, pp. 2878–2885, 2010.

[16] S.S. Pwaga, Sensitivity Analysis of Proposed LNG liquefaction Processes for LNG FPSO, , University of Science and Technology, Norwegian, MS Thesis, 2011; http://www .ntnu.edu.

[17] H. Chang, J. Park, S.L. Choe, Thermodynamic design of natural gas liquefaction cycles for offshore application, *Cryogenics*, Vol. 63, Sep, pp. 114–121, 2013.