نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۹۶، جلد ۵۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۱۶۵-۱۷۴ – پژوهشی کامل - DOI: 10.22034/jmeut.2021.11062

مقایسه فنی و اقتصادی اثر پیش‌سرمایش جذبی بر واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی به منظور تامین سوخت نیروگاه شهید رجائی

امیرفرشاد کلوانی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، amirfarshadkalvani@gmail.com

مصطفی مافی * استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، mostafa.mafi@gmail.com

منصور خانکی دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، khanaki.m@gmail.com

چکیده

ایران از گاز به عنوان حامل اصلی انرژی در مصارف مختلفی بهره می‌برد. برقراری واحدهای مایع‌سازی قله سایی با توجه به کاهش حجم گاز طبیعی، مطلوب-ترین شیوه برای ذخیره‌سازی گاز مازاد در فصول گرم سال و استفاده از آن در ایام سرد است. با توجه به هزینه‌های کارکردی و نگهداری بالای چرخه‌های مایع-سازی، ابداع راهکارهایی با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود اقتصاد این واحدها، حائز اهمیت است. در این پژوهش ضمن انتخاب نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی قزوین ، چرخه مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی با هدف تامین سوخت مورد نیاز کل واحدهای این نیروگاه برای ۶۰ روز کارکرد، شبیه‌سازی گردید و مورد تحلیل فنی و اقتصادی قرار گرفت و به لحاظ عملکردی با چرخه مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای رایج (بدون پیش سردکن) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نسبت به چرخه مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای بدون پیش‌سردکن، میزان توان مصرفی ویژه ۴۳ ٪، قیمت تمام شده خرید تجهیزات چرخه مایع سازی ۱۵ ٪ و میزان دبی مبرد چندجزئی ۶۹ ٪ کاهش و عدد شایستگی به میزان ۲۸/۳۶ ٪ افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: گاز طبیعی مایع، پیش‌سرمایش جذبی، بخش نیروگاهی، تحلیل فنی و اقتصادی، عدد شایستگی.

Technical and Economic Comparison of the Effect of Absorption Pre-cooling on Natural Gas Liquefaction Plants for Supplying the Fuel of Shahid Rajaee Power Plant

A. Farshad Kalvani Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University , Qazvin, Iran

M. Mafi Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University , Qazvin, Iran

M. Khanaki Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University , Qazvin, Iran

Abstract

Iran is using natural gas as the main energy carrier in many sectors. Establishing peak-shaving liquefaction units due to reduction in volume of natural gas, is the most desirable way to store surplus natural gas in the warm seasons and using it in cold seasons of the year. Due to the high cost of operating and maintenance of liquefaction cycles, inventing solutions aimed at reducing energy consumption and improving the economy of these units, is really important. In this research, along with selecting Shahid Rajaee power plant in Qazvin as case study, the natural gas liquefaction cycle with mixed refrigerant and absorption refrigeration pre-cooling with the purpose of supplying the fuel of total unit of this power plant for 60 days was established. Then, it was subjected to technical and economic analysis and in terms of operational parameters was compared with common single mixed refrigerant cycle (without precooling). Results show that in comparison to common single mixed refrigerant cycle the specific power consumption %43, the cost of liquefaction plant equipment %15, the flow rate of mixed refrigerant %69 decreased and the figure of merit %28.36 increased.

Keywords: Liquefied Natural Gas, Absorption Precooling, Power Plant Sector, Technical and Economic Analysis, Figure of Merit.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، تقاضای رو به رشد بازار انرژی منجر به افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. با این وجود، پیش‌بینی می‌شود که در دو دهه آینده، سوخت‌های فسیلی همچنان به عنوان حامل‌های اصلی انرژی مطرح باشند. با توجه به آلایندگی اندک و قیمت مناسب گاز طبیعی نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی این پیش-بینی که گاز طبیعی همچنان نقش کلیدی خود را در بازار انرژی در دهه‌های آینده حفظ نماید خارج از تصور نیست. یکی از راه‌های انتقال گاز طبیعی از محل استخراج و فرآوری آن به محل مصرف، استفاده از خطوط انتقال گاز است. در حال حاضر، ایران به عنوان دومین دارنده منابع عظیم گاز طبیعی جهان در بخش‌های مختلف مصرف اعم از بخش خانگی، حمل و نقل، صنایع و نیروگاه‌ها از گاز به عنوان حامل اصلی انرژی بهره می‌برد. با توجه به اینکه انتقال گاز از طریق خطوط لوله در فاصله‌های کمتر از ۳۰۰۰ کیلومتر، نسبت به سایر روش‌های انتقال (نظیر مایع کردن گاز طبیعی و انتقال به صورت مایع) هزینه-های سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین‌تری را طلب می‌کند و از پیچیدگی و دانش فنی کمتری برخوردار است، استفاده از این روش در بسیاری از

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mostafa.mafi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۱۰

کشورهای دنیا از جمله ایران، مرسوم شده است. بنا بر اعلام روابط عمومی شرکت ملی گاز ایران، در سطح استان قزوین در سال ۱۳۹۷ در مجموع ۵ میلیارد و ۲۳۸ میلیون مترمکعب گاز در بخش های مختلف خانگی، تجاری، صنعتی و نیروگاهی استان مصرف شده است که از این مقدار، سهم نیروگاه شهید رجایی ۲ میلیارد و ۶۳۴ میلیون متر مکعب بوده که معادل ۵۱ درصد مصرف کل استان است[۱]. در ایران پس از بخش خانگی، واحدهای صنعتی و نیروگاه‌های حرارتی، مصرف‌کنندگان عمده گاز طبیعی هستند و از آنجا که اولویت اصلی شرکت ملی گاز ایران تامین گاز مورد نیاز بخش خانگی است، درفصول سرد سال در صورت کاهش فشار در خطوط توزیع گاز، نیروگاه‌ها و واحدهای صنعتی از شبکه توزیع سراسری گاز منفصل شده و با سوخت‌های ثانویه نظیر گازوئیل یا مازوت به فعالیت خود ادامه می‌دهند.شایان ذکر است بنا بر اعلام سازمان حفاظت از محیط زیست در بهمن ماه سال ۱۳۹۷، روزانه ۴۴۰ هزار بشکه مازوت در نیروگاه‌های کشور سوزانده می‌شود که این امر در فصل زمستان به علت پدیده وارونگی هوا بسیار زیان‌آور است[۲].

نسبت انرژی به حجم گاز طبیعی در فشار و دمای محیط، بسیار پایین است، از این‌رو ذخیره‌سازی گاز طبیعی به صورت عادی و گازی شکل در فصول گرم سال به منظور جبران کسری سوخت در فصول سرد، حجم زیادی را اشغال می‌کند و اقتصادی نیست. روش اقتصادی و رایج در دنیا این است که دمای گاز طبیعی را تا مایع شدن آن (حدود منهای ۱۶۱ درجه سلسیوس) کاهش می‌دهند که در نتیجه حجم آن تقریبا به یک ششصدم حجم اولیه در فشار یک اتمسفر می‌رسد [۳و۴]. لذا می‌توان با احداث واحدهای مایع سازی کوچک مقیاس در مجاورت واحدهای صنعتی و نیروگاه‌ها در فصول گرم سال،گاز طبیعی را با قیمتی منطبق بر سیاست‌های حمایتی دولت در اختیار این واحدها قرار داد تا با مایع‌سازی و ذخیره آن، با آغاز فصل سرما و قطع ارتباط این صنایع با شبکه سراسری توزیع گاز طبیعی، بدون مشکل کمبود سوخت، به کار خود ادامه دهند. مهم‌ترین مشکلی که در توسعه واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی[1] وجود دارد، مصرف انرژی بالای این واحدهاست. به همین دلیل بهره‌گیری از روش‌هایی که منجر به کاهش مصرف انرژی این سیستم‌ها شود حائز اهمیت است. با توجه به این‌که در بسیاری از واحدهای صنعتی و نیروگاه‌های کشور بخش قابل توجهی از انرژی ورودی، به صورت گرما اتلاف می‌گردد لذا به عنوان راهکاری مناسب می‌توان با توجه به مشخصات انرژی اتلافی و با به‌کارگیری چرخه تبرید جذبی آمونیاکی تولید برودت نموده و از برودت تولیدی جهت پیش‌سرمایش گاز خوراک ورودی به چرخه مایع‌ساز استفاده کرده و ضمن کاهش توان مصرفی، کارایی واحد مایع‌سازی را بهبود بخشید.

در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در راستای بهبود عملکرد چرخه‌های مایع‌سازی گاز طبیعی انجام گرفته است. معین و همکاران [۵] یک چرخه مبرد چندجزئی ساده متداول را به جهت محاسبه بهینه‌ترین شرایط عملکردی مورد تحلیل قرار دادند. از ابزار الگوریتم ژنتیک به جهت کمینه‌سازی کل توان مورد نیاز از طریق بهینه‌سازی یازده متغیر شامل فشارهای خروجی تمامی کمپرسورها و شیرهای فشارشکن و نرخ جریان مولی اجزاء مبرد چندجزئی استفاده شده است. موروسوک و همکاران [۶] چرخه مایع سازی پریکو[2] را به لحاظ اگزرژی محیطی و اگزرژی اقتصادی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. هدف آن ها شناسایی گزینه‌هایی برای بهبود فرآیند پریکو و نشان دادن کاربرد روش‌های مبتنی بر اگزرژی برای بهبود یک واحد مایع‌سازی گاز طبیعی بود. کائو و همکاران [۷] درصد ترکیب مبرد چندجزئی را به منظور بهینه‌سازی فرایند مایع‌سازی مورد مطالعه قرار دادند و یک روش جدید برای تنظیم مبرد چندجزئی به جهت دست یافتن به بازده بالاتر در سیستم های مبرد چندجزئی ساده پیشنهاد کردند. تیانبیو و جو [۸] مدل دینامیکی فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی برای واحدهای مایع‌سازی کوچک مقیاس مدولار را طراحی کردند و رفتارهای دینامیکی این فرآیند را بررسی نمودند. به جهت آزمایش پایداری و بررسی پاسخ‌های دینامیکی فرآیند مواردی نظیر تغییرات دمای گاز طبیعی، ترکیب، فشار، نرخ جریان و دمای آب خنک کن به عنوان بی‌نظمی‌ها انتخاب شدند. پاسخ‌های دینامیکی دمای گاز طبیعی مایع و کل انرژی مصرفی کمپرسور معیار بررسی تاثیر اختلالات روی فرآیند بود. قربانی و همکاران [۹] جایگزینی چرخه تبرید جذبی به جای چرخه‌های پیش‌سرمایش پروپانی در فرآیندهای مایع‌سازی مبرد چندجزئی دو طبقه‌ای (آبشاری) که با واحدهای تولید میعانات گازی و نیتروژن‌زدایی یکپارچه شده‌اند را مطالعه کردند. نگوین و همکاران[۱۰] روی سه چیدمان مناسب برای کاربردهای کوچک مقیاس که به علت سادگی و جمع و جور بودن در صنعت مایع‌سازی کاربرد دارند مطالعه-ای را انجام دادند. این سه چیدمان عبارتند از: ۱- چرخه مبرد چندجزئی ساده ۲- چرخه برایتون معکوس ساده ۳- چرخه برایتون معکوس دو طبقه‌ای. تاثیر ترکیب‌های مختلف گاز خوراک و خواص مبرد مورد تحلیل قرار گرفت و با به کارگیری روش بهینه‌سازی چند هدفه، مناسب‌ترین طرح چرخه مشخص گردید. مهرپویا و همکاران[۱۱] فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی مبرد چندجزئی با چرخه پیش سرمایش جذبی تک اثره را معرفی کرده و مورد تحلیل قرار دادند و آن را به لحاظ کار مصرفی ویژه و توان موردنیاز با مدل پایه مقایسه کردند. تیراندازی و همکاران [۱۲] چرخه تبرید پروپان برای یک واحد بازیابی هیدروکربن را با روش متداول اگزرژی مورد تحلیل قرار دادند. مهرپویا و انصاری‌نسب [۱۳] دو فرآیند مبرد چندجزئی ساده را مورد تحلیل اگزرژی و اگزرژی‌اکونومیک قراردادند و ضمن معرفی رابطه‌ای بین هزینه‌های اقتصادی و سرمایه‌گذاری، تجهیزات دارای بیشترین هزینه تخریب اگزرژی معرفی شدند. در پایان راه‌های ممکن برای بهینه‌سازی اقتصادی مبتنی بر آنالیز حساسیت برای فاکتور اگزرژی‌اکونومیک و هزینه‌ی تخریب اگزرژی معرفی شدند. صیادی و باباالهی [۱۴] ضمن مطالعه روی سیستم مایع‌سازی مجدد بخارات گاز طبیعی، با هدف کمینه‌سازی هزینه واحد محصول، اقدام به بهینه‌سازی ترمواکونومیکی کردند. ابتدا یک مدل ترمواکونومیکی مبتنی بر آنالیز ترمودینامیکی شامل تحلیل‌های انرژی و اگزرژی و مدلی اقتصادی بر پایه‌ی روش نیازمندی‌های درآمدی کل توسعه یافت و سپس تابع هدف ترمواکونومیکی به‌دست آمده از تحلیل ترمواکونومیکی با استفاده از

[1] Liquefied Natural Gas (LNG)

[2] PRICO

الگوریتم ژنتیک کمینه‌سازی شد. انصاری نسب و مهرپویا [۱۵] فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی را که در آن از چرخه تبرید جذبی برای چرخه پیش‌سرمایش استفاده می‌شود معرفی کردند و عملکرد آن را با چرخه مبرد چندجزئی با پیش‌سرمایش پروپانی مقایسه کردند و پس از آن، چرخه جدید را با روش‌های تحلیل اگزرژی‌اکونومیک متداول و پیشرفته مورد ارزیابی قرار دادند . قربانی و همکاران [۱۶] روش‌های جایگزینی تبرید جذبی به جای چرخه تبرید تراکمی را مورد بررسی قرار دادند و ضمن امکان‌سنجی استفاده از تبرید جذبی در ساختار یکپارچه مایع-سازی گاز طبیعی و میعانات گازی به جای تبرید تراکمی، فرآیند جدیدی برای مایع‌سازی گاز طبیعی معرفی کردند و مورد ارزیابی انرژی و اقتصادی قرار دادند. خدایی و همکاران [۱۷] ضمن معرفی تاسیسات مایع‌سازی گازهای پروپان و بوتان یک پالایشگاه گاز، اقدام به شبیه-سازی آن در نرم افزار Aspen HYSYS نموده و از طریق اتصال این نرم افزار به نرم افزار MATLAB و به روش الگوریتم ژنتیک اقدام به کمینه‌سازی توان مصرفی چرخه مایع‌ساز نمودند. قربانی و همکاران [۱۸] مدل‌سازی چرخه‌های مبرد چند جزئی با استفاده از روشی سیستماتیک مبتنی بر تلفیق دیدگاه‌های ترمودینامیکی و روش‌های ریاضی را برای مشخص کردن مزایا و معایب چیدمان‌های مختلف ارائه کردند. همچنین امکان استفاده از تبرید جذبی به جای سیستم پیش-سرمایش تبرید تراکمی با هدف کاهش در مصرف انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. کرملو و همکاران [۱۹] با بررسی سیستم مایع‌ساز گاز طبیعی دو طبقه‌ای مبرد چندجزئی عملکرد این سیستم را تحت تاثیر تغییرات شرایط عملیاتی و محیطی نظیر دما، فشار و ترکیب گاز خوراک مورد مطالعه قرار دادند. مرادی و همکاران [۲۰] در ابتدا به معرفی چرخه‌های مطرح در حوزه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مجاورت نیروگاه‌ها پرداختند و سپس ضمن تعیین ظرفیت موردنیاز این چرخه‌ها با توجه به مشخصات نیروگاه‌های رایج تولید برق در کشور، با استفاده از روش آنالیز اغتشاشات، رفتار پارامترهای عملکردی آنان را نسبت به تغییرات محیطی و عملیاتی خطوط توزیع گاز کشور، مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. پرپینچی و همکاران [۲۱] با در نظر گرفتن چرخه تبرید مبرد چندجزئی دو طبقه‌ای با هدف کاهش توان مصرفی اقدام به بهینه‌سازی پارامترهایی مانند ترکیب مبرد و فشار ورودی و خروجی کمپرسور با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات کردند و در پایان سیستم بهینه شده را مورد تحلیل اگزرژی قرار دادند. منافی و همکاران [۲۲] روی نشت مبرد در سیستم دو طبقه‌ای مایع‌ساز گاز طبیعی با مبرد چندجزئی مطالعه‌ای انجام دادند. به دلیل عدم وجود یک روش معین برای بررسی نشتی اجزاء مبرد، یک روش ابتکاری شبیه‌سازی نشتی اجزاء مبرد در نقاط پرفشار انجام شد و صحت روش استفاده شده با مقایسه‌ی داده‌های تجربی مورد سنجش قرار گرفت. اسلم بخش و همکاران [۲۳] به شبیه‌سازی و تحلیل یک واحد مایع‌سازی کوچک-مقیاس گاز طبیعی با ظرفیت ۵۰ تن در روز پرداختند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به کمینه نمودن توان مصرفی کل و سطح تبادل گرما و بیشینه سازی تابع سود کلی اقدام کردند. لین و همکاران [۲۴] روی چرخه جدیدی مطالعه انجام دادند که در آن چرخه آبشاری گاز طبیعی پرفشار[1] همراه با واحد جداسازی کرایوژنیکی کربن دی اکسید است. در چرخه جدید به جای استفاده از سیستم رایج سه طبقه‌ای از یک سیستم آبشاری دو طبقه‌ای و همچنین از سه ترکیب مبرد جدید با هدف کاهش مصرف انرژی ویژه استفاده شد و در نهایت مورد تحلیل و بهینه‌سازی ترمودینامیکی قرار گرفت. وانگ و همکاران [۲۵] روی چهار چیدمان فرآیندهای مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی به همراه برج جداساز مطالعه انجام دادند. آن‌ها در شبیه‌سازی‌ها تاثیرات فشار کارکردی، ترکیبات مبرد و چیدمان فرآیند را روی شاخصه‌های عملکردی سیستم نظیر مصرف انرژی ویژه و دمای خروجی مورد مطالعه قرار دادند. واتسون و همکاران [۲۶] روی چرخه‌های مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای مطالعه انجام دادند. آن‌ها با استفاده از قیدهایی در روابط بهینه‌سازی به راهکارهای اطمینان‌بخشی در مورد استفاده بهینه از سطوح تبادل گرما در مبادله‌کن‌های گرمایی چندجریانی با هدف کاهش بازگشت ناپذیری رسیدند. سونگ و همکاران [۲۷] روی یک چرخه مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی مطالعه تجربی انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها با هدف بررسی اثر فشارهای کارکردی و ترکیبات جریان مبرد بر عملکرد چرخه بود.

مطالعه پیرامون برآورد میزان نیاز به گاز طبیعی مایع جهت تامین سوخت نیروگاه‌های برق حرارتی کشور در فصول سرد، که از صنایع انرژی‌بر و در عین حال دارای گرمای اتلافی قابل توجه و پتانسیل بالا جهت بهره گیری از این گرمای اتلافی هستند و همچنین ارائه تحلیل-های فنی و اقتصادی احداث واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی در مجاورت نیروگاه‌های حرارتی، مهم‌ترین موضوعاتی هستند که در مطالعات و تحقیقات پیشین مغفول مانده است. در این پژوهش، ضمن استخراج میزان نیاز به گاز طبیعی مایع برای تامین سوخت کل واحدهای نیروگاه شهید رجایی قزوین (به عنوان نمونه مورد مطالعه) در مدت ۶۰ روز اوج مصرف، فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش‌سرمایش جذبی آمونیاکی شبیه‌سازی می‌گردد و ضمن اعتبارسنجی خروجی شبیه‌سازی با اطلاعات مندرج در پژوهش انصاری نسب و مهرپویا [۱۵] ، شاخص‌های عملکردی این چرخه نظیر عدد شایستگی، نرخ جریان مبرد، کار مصرفی به ازای واحد جرم گاز طبیعی مایع تولیدی و قیمت تمام شده خرید تجهیزات چرخه مایع سازی جدید با شاخص‌های عملکردی چرخه مبرد چندجزئی ساده (به عنوان رایج‌ترین چرخه در حوزه مایع‌سازی گازطبیعی) مقایسه می‌شود.

۲- تعیین ظرفیت واحد مایع‌سازی گاز طبیعی جهت تامین سوخت موردنیاز نیروگاه‌های حرارتی

اولین گام در مطالعات احداث واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی جهت تامین سوخت موردنیاز نیروگاه‌های حرارتی در بازه ۶۰ روزه اوج مصرف گاز در کشور، تعیین ظرفیت این واحدها است. جزئیات تعیین ظرفیت در جدول ۱ برای نیروگاه شهید رجایی (به عنوان نمونه مورد مطالعه) ارائه شده است. نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی، شامل نیروگاه بخار و چرخه ترکیبی با مجموع ظرفیت تولید ۲۰۴۲ مگاوات است. نیروگاه بخار شامل ۴ واحد ۲۵۰ مگاواتی با

[1] Cascade PLNG

ظرفیت تولید ۱۰۰۰ مگاوات و نیروگاه چرخه ترکیبی شامل ۶ واحد گازی ۱۲۳٫۴مگاواتی و ۳ واحد بخار ۱۰۰٫۶ مگاواتی جمعا با ظرفیت تولید ۱۰۴۲٫۲ مگاوات است. ظرفیت مایع‌سازی این فرآیند با توجه به میزان نیاز نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی قزوین با ظرفیت تولید ۲۰۴۲ مگاوات محاسبه شده است.

جدول ۱- محاسبات مربوط به میزان نیاز نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجائی به سوخت گاز طبیعی مایع

ردیف	عنوان	چرخه ترکیبی	چرخه بخار	مرجع محل اقتباس
۱	توان نیروگاه (MW)	۱۰۴۲/۲	۱۰۰۰	[۲۸]
۲	راندمان حرارتی (%)	۴۵/۴	۳۷/۱	[۲۹]
۳	توان حرارتی مورد نیاز (MW)	۲۲۹۵/۶	۲۶۹۵/۴۲	
۴	تعداد روزهای کارکرد نیروگاه	۶۰ روز	۶۰ روز	
۵	ارزش حرارتی گاز طبیعی $(\frac{MJ}{m^3})$	۳۶/۶۶۴	۳۶/۶۶۴	[۳]
۶	گاز طبیعی موردنیاز دوره اوج مصرف $(\times 10^6 m^3)$	۳۲۴/۵۷	۳۸۱/۸۵	
۷	ضریب تغییر حجم گاز طبیعی مایع	۶۰۰	۶۰۰	[۳]
۸	حجم گاز طبیعی مایع مورد نیاز دوره اوج (m^3)	۵۴۰۹۵۰	۶۳۶۴۱۷	
۹	چگالی گاز طبیعی مایع $(\frac{kg}{m^3})$	۴۷۰	۴۷۰	[۳]
۱۰	جرم گاز طبیعی مایع مورد نیاز دوره اوج (ton)	۲۵۴۲۴۶/۵	۲۹۹۱۱۶	
۱۱	تعداد روز مد نظر برای تولید گاز طبیعی مایع	۲۰۰ روز	۲۰۰ روز	[۴]
۱۲	ظرفیت واحد مایع سازی $(\frac{kg}{hr})$	۵۳۱۶۹	۶۲۶۴۳	
	ظرفیت کل واحد مایع سازی $(\frac{kg}{hr})$	۱۱۵۸۱۲		

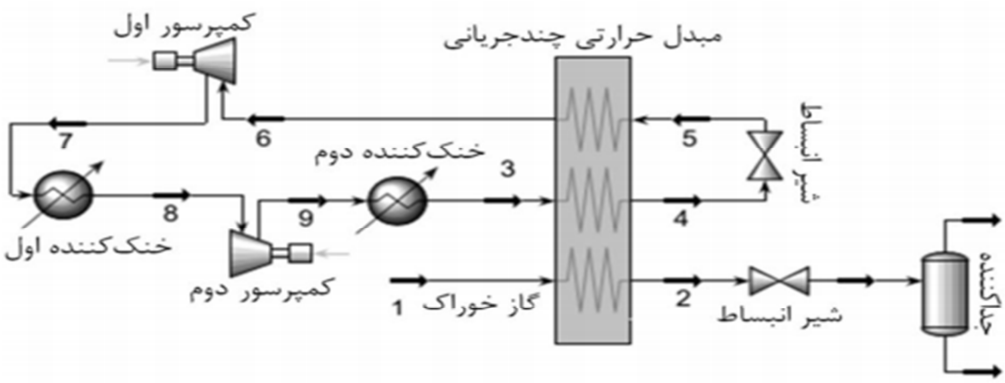
با توجه به ارقام حاصل از جدول ۱ ، واحد مایع‌سازی بایستی دارای ظرفیت تولید ۱۱۵۸۱۲ کیلوگرم بر ساعت گاز طبیعی مایع باشد تا بتواند در طی ۲۰۰ روز کاری (روزهای غیر اوج مصرف در شبکه توزیع گاز کشور)، گاز موردنیاز نیروگاه را تامین کند.

۳- توصیف فرآیندهای مایع‌سازی مورد مطالعه

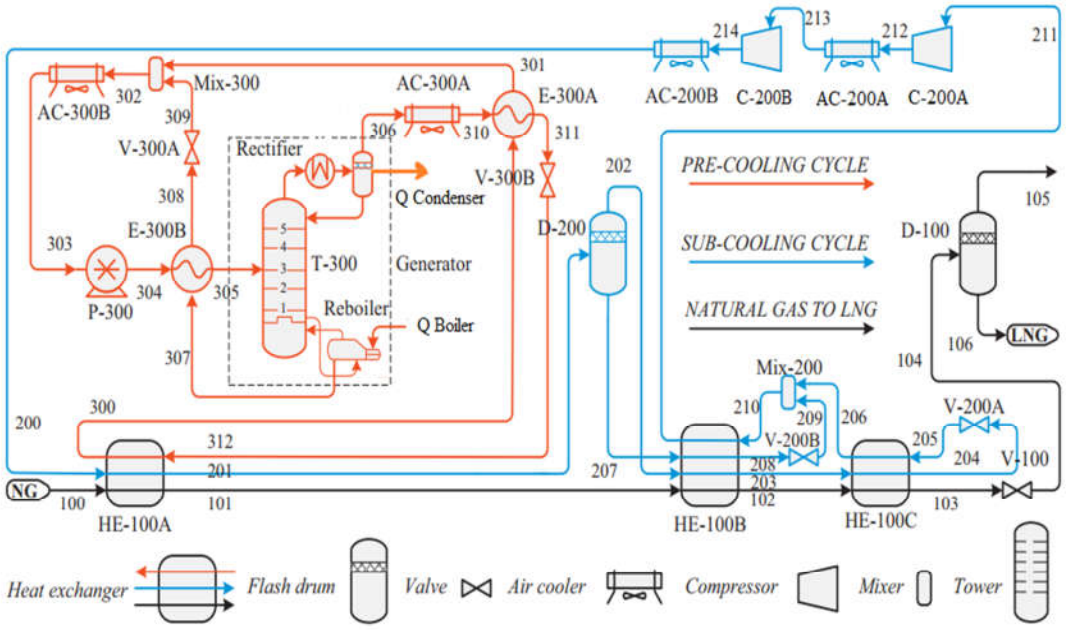
در این بخش، فرآیندهای مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای(ساده) و فرآیند مبرد چندجزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی توصیف می‌شوند.

۳-۱- فرآیند مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای

فرآیند مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای یا رانکین معکوس، ساده‌ترین نوع فرآیندهای مبرد چندجزئی است. در این فرآیند، گاز طبیعی در یک مبادله‌کن گرمایی توسط مبرد چندجزئی (که مخلوطی از نیتروژن به همراه هیدروکربن‌های با نقطه جوشش پایین است) خنک شده و مایع می‌شود. ترکیب مبردها به عواملی نظیر فشار و ترکیب گاز خوراک و دمای محیط وابسته است [۲۰]. شکل ۱، شمای کلی فرآیند مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای را نشان می‌دهد. توان مصرفی و کارایی این چرخه در مقایسه با فرآیند انبساطی-نیتروژنی مقبول‌تر است. بالا بودن ضریب انتقال گرمای مربوط به مبرد چندجزئی موجب کاهش دبی مبرد نسبت به فرآیند انبساطی- نیتروژنی و کاهش توان مصرفی چرخه می‌گردد. استفاده از مبردهای هیدروکربنی و مخازن حاوی هیدروکربن(برای تامین نشت مبرد احتمالی)، از معایب اصلی این فرآیند است و کاهش ایمنی را در پی دارد. استفاده از مبرد دو فازی موجب افزایش پیچیدگی فرآیند و تجهیزات شده و زمان آغاز به کار این فرآیند را افزایش می‌دهد[۲۰]. در این فرآیند، کاهش دما و درنتیجه تولید سرمایش به سبب انبساط آنتالپی ثابت مبرد خروجی از مبادله‌کن گرمای چند جریانی در شیر اختناق صورت می‌پذیرد.



شکل ۲- فرآیند مایع‌سازی مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای [۲۰]



شکل ۱- دیاگرام جریان فرآیند چرخه مایع سازی مبرد چند جزئی با پیش سرمایش تبرید جذبی [۱۵]

۳-۲- فرآیند مبرد چند جزئی با پیش سرمایش تبرید جذبی

نمایی از چرخه مبرد چندجزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی آمونیاکی در شکل ۲ نشان داده شده است که این جیدمان تجهیزات چرخه با مرجع [۱۵] کاملا یکسان است. مبرد آمونیاک بعد از رسیدن به دمای ۳۰- درجه‌ی سلسیوس در چرخه تبرید جذبی وارد مبادله‌کن گرمای HE-100A شده و جریان‌های گاز طبیعی و مبرد چندجزئی را تا دمایی در حدود ۲۶- درجه سلسیوس سرد می‌سازد.

جریان گاز طبیعی بعد از عبور از مرحله‌ی پیش‌سرمایش در مبادله‌کن گرمای HE-100A به ترتیب وارد مبادله‌کن‌های گرمایی HE-100B و HE-100C می‌شود و دمایش تا ۱۶۰- درجه‌ی سلسیوس می‌رسد. سپس جریان ۱۰۳ وارد شیر اختناق V-100 شده و فشار آن تا فشار جو کاهش می‌یابد. در نهایت، جریان ۱۰۴ با دمای ۱۶۶- درجه‌ی سلسیوس و فشار یک بار وارد درام D-100 می‌شود. جریان

مبرد چندجزئی خروجی از مرحله‌ی پیش‌سرمایش، دو فازی می‌شود. فازهای مایع و بخار در جداکننده‌ی فاز D-200 جدا شده و به طور جداگانه به مبادله‌کن گرمای HE-100B هدایت می‌شود. فشار محصول بخار (جریان ۲۰۲) پس از عبور از مبادله‌کن‌های گرمای HE-100B و HE-100C به ۳ بار و دمای ۱۶۶- درجه‌ی سلسیوس می‌رسد که سرمایش مورد نیاز را در مبادله‌کن‌های گرمایی HE-100B و HE-100C فراهم می‌سازد. فشار فاز مایع مبرد جند جزئی (جریان ۲۰۷) ، پس از عبور از مبادله‌کن گرمای HE-100B به ۳ بار کاسته می‌شود و دمایش به ۱۳۳- درجه‌ی سلسیوس می‌رسد و بخشی از سرمایش مورد نیاز در مبادله‌کن گرمای HE-100B را فراهم می‌سازد. مبردهای کاهش فشار یافته (جریان های ۲۰۵ و ۲۱۰) سرمایش موردنیاز برای مایع‌سازی و فوق سرد سازی گاز طبیعی را فراهم می‌سازد. مبرد چندجزئی فشار پایین به فرآیند تراکم دو مرحله‌ای هدایت می‌شود و به مبادله‌کن گرمای HE-100A باز می‌گردد [۱۵].

۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند

در این پژوهش جهت شبیه‌سازی چرخه مورد مطالعه از نرم افزار Aspen HYSYS نسخه ۴. ۸ استفاده شده است. نرم افزار Aspen HYSYS به دلیل داشتن معادله حالت‌های مناسب برای کاربردهای گوناگون، تعریف اغلب المان‌های مورد نیاز شبیه‌سازی، وجود واحد-های کنترلی برای کنترل قسمت‌های مختلف، افزایش سرعت عملیات مدل‌سازی و بهینه‌سازی به دلیل انجام محاسبات مربوط به قانون اول ترمودینامیک، از نرم‌افزارهای مطرح در حوزه‌ی شبیه‌سازی و بهینه-سازی فرآیندهای صنعتی و شیمیایی است. در این پژوهش برای پیش‌بینی خواص ترموفیزیکی مخلوط هیدروکربن‌ها و همچنین محاسبات تعادل فازهای بخار- مایع از معادله حالت پینگ- رابینسون[1] استفاده شده است. در جدول۲ مشخصات جریان خوراک، مبردها و محصول گاز طبیعی مایع نشان داده شده است. در مورد درصد ترکیب گاز خوراک ورودی به واحد مایع‌سازی ذکر این نکته حائز اهمیت است که تاکنون واحد مایع‌سازی در ایران احداث و راه اندازی نشده است، درنتیجه دسترسی مستقیم به اطلاعات دقیق در رابطه با ترکیب گاز طبیعی بعد از عملیات پالایش اولیه، مقدور نیست. در این تحقیق با دسته بندی اطلاعات ارائه شده در منابع مختلف داخلی و خارجی، درصد ترکیب گاز خوراک در ورود به واحد مایع‌ساز براساس اطلاعات مندرج در مرجع [۴] فرض شده است که این مقادیر در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات فرآیندی و عملیاتی و ترکیبات جریان خوراک، مبردها و محصول گاز طبیعی مایع

نام جریان	۱۰۰ گاز طبیعی خوراک	۱۰۶ گاز طبیعی مایع	۲۰۰ مبرد چند جزئی	۳۰۳ مخلوط آمونیاک و آب	۳۱۲ مبرد آمونیاک
دبی $(\frac{kg}{hr})$	۱۲۵۶۰۴	۱۱۵۸۱۲	۲۷۹۱۴۴	۷۳۸۰۰۰	۸۸۸۸۴
دما $(^{\circ}C)$	۲۶/۸۵	-۱۶۶/۰۹	۳۱/۸۵	۳۱/۹۱	-۲۹/۵۵
فشار (bar)	۶۵/۰۰	۱/۰۰	۴۸/۶۰	۱/۲۰	۱/۲۰
ترکیبات (درصد مول)					
نیتروژن	۴/۰۰	۱/۵۴	۷/۰۰	-	-
متان	۸۷/۵۰	۸۹/۳۳	۴۱/۸۰	-	-
اتان	۵/۵۰	۵/۹۱	۲۹/۹۰	-	-
پروپان	۲/۱۰	۲/۲۶	۲۱/۳۰	-	-
نرمال-بوتان	۰/۵۰	۰/۵۴	-	-	-
ایزو- بوتان	۰/۳۰	۰/۳۲	-	-	-
ایزو-پنتان	۰/۱۰	۰/۱۱	-	-	-
آب	-	-	-	۷۵/۰۰	۰/۰۹
آمونیاک	-	-	-	۲۵/۰۰	۹۹/۹۱

۴-۱- قیدهای مدل‌سازی

قیدها و ساده‌سازی در نظر گرفته شده در مدل توسعه داده شده برای فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی در این تحقیق مطابق با مرجع [۲۰] بوده و عبارتند از :

۱. از افت فشار در تمامی مبادله‌کن‌های گرما، صرف‌نظر شده است.

۲. کارایی آیزنتروپیک کمپرسورها ۸۰ ٪ در نظر گرفته شده است.

۳. مایع وارد کمپرسور نمی‌شود.

۴. تقاطع دمایی در مبادله‌کن گرما رخ نمی‌دهد.

۵. تلفات گرما در مبادله‌کن گرما ناچیز است.

۴-۲- اعتبارسنجی شبیه سازی

جهت اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی چرخه‌ی مبرد چند جزئی با پیش سرمایش تبرید جذبی در تحقیق حاضر با مرجع شماره ۱۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که چرخه مورد استفاده در تحقیق حاضر از مرجع شماره ۱۵، اقتباس شده است.

[1] Peng- Robinson

جدول ۳- اعتبارسنجی شبیه‌سازی تحقیق حاضر با مرجع شماره [۱۵]

		تحقیق حاضر	مرجع شماره [۱۵]
توان مصرفی کمپرسورهای چرخه (MW)		۲۲/۸۶	۲۲/۶۴۴
دبی گاز طبیعی مایع $(\frac{ton}{hr})$		۱۱۵/۸	۱۱۴/۱۵۶
توان مصرفی ویژه کمپرسور ها $(\frac{MWh}{tonLNG})$		۰/۱۹۷	۰/۱۹۸
حداقل اختلاف دمای جریان سرد و گرم مبادله‌کن چند جریانی $(^{\circ}C)$ (Min. Approach)	HE-100A	۳/۱۸	۳/۱۸
	HE-100B	۵/۵۷۲	۶/۲۲
	HE-100C	۳/۳۹۹	۳/۶۹

با توجه به اعداد و ارقام مشخص می‌گردد که شبیه‌سازی انجام گرفته صحیح است و از تطابق خوبی با مقاله انصاری نسب و مهرپویا [۱۵] برخوردار است. در جدول ۴ مقایسه توان مصرفی ویژه کمپرسورهای چرخه مورد مطالعه در این پژوهش با چهار مورد پژوهش قبلی که بیشترین شباهت را به لحاظ چیدمان تجهیزات چرخه مایع‌سازی دارند، آورده شده است. کاهش حدود ۵۰٪ توان مصرفی ویژه نسبت به اغلب تحقیقات پیشین، بیانگر اهمیت و ضرورت انجام تحقیق حاضر است.

جدول ۴- توان مصرفی ویژه کمپرسورهای تحقیق حاضر و پژوهش های پیشین

	توان مصرفی ویژه کمپرسور ها $(\frac{MWh}{tonLNG})$	درصد اختلاف (٪)
تحقیق حاضر	۰/۱۹۷	---
انصاری نسب و مهرپویا [۱۵]	۰/۱۹۸	۰/۵
شیر محمدی و همکاران [۹]	۰/۴۲	۵۳
حامدی و همکاران [۱۶]	۰/۳۵۹	۴۵
مهرپویا و همکاران [۳۰]	۰/۳۹۱	۴۹/۶

۵- نتایج و بحث

در این بخش، شاخص‌های چرخه‌ی مبرد چندجزئی با پیش-سرمایش تبرید جذبی با چرخه‌ی مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای ساده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. ضریب عملکرد پارامتر مهمی است که برای ارزیابی عملکرد چرخه‌های تبرید مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ضریب عملکرد سیستم‌های تبرید جذبی تک اثره تا ۰/۶ می‌تواند افزایش یابد اما در اغلب کاربردهای تبرید این عدد کمتر از ۰/۵۵ خواهد بود. [۱۵] ضریب عملکرد چرخه تبرید جذبی در این فرآیند مطابق با رابطه (۱) قابل محاسبه است:

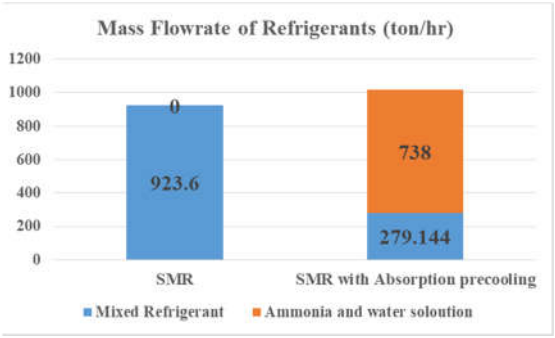
$$COP = \frac{\text{Evaporator Refrigeration Load}}{\text{Generator Heat Duty+Pump Power}} = \frac{29328.2\ \text{kW}}{53150 + 368\ \text{kW}} = 0.548 \quad (۱)$$

۵-۱- مقایسه بین میزان مبرد چرخه ی مبرد چندجزئی با پیش سرمایش تبرید جذبی با چرخه‌ی مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای

مقایسه‌ی بین نرخ جریان مبرد در چرخه دارای پیش‌سرمایش تبرید جذبی با چرخه‌ی مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای نشان دهنده‌ی کاهشی در حدود ۷۰ ٪ مطابق با رابطه (۲) است :

$$\frac{\text{Mixed Refrigerant in Absorption + SMR cycle}}{\text{Mixed Refrigerant in SMR cycle}} = \frac{279144}{923600} \times 100 = 30\% \quad (۲)$$

در شکل ۳ میزان دبی مبردهای مختلف چرخه‌ها به جهت مقایسه بهتر نشان داده شده است.



شکل ۳- میزان دبی مبردها در چرخه‌های مبرد چندجزئی با پیش سرمایش جذبی و بدون پیش سردکن

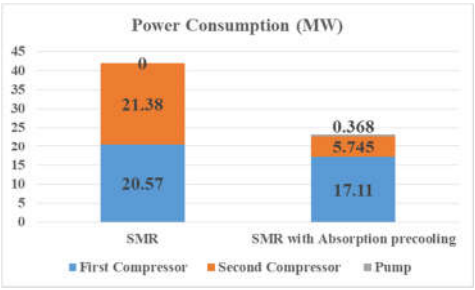
۵-۲- میزان کاهش مصرف انرژی در چرخه ی مبرد چند جزئی با پیش سرمایش تبرید جذبی

پارامتر مهمی که برای بررسی بازده مایع‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد توان مصرفی ویژه است که از رابطه (۳) به دست می‌آید :

$$\text{SPC}(\frac{\text{kWh}}{\text{kg LNG}}) = \frac{\text{Power consumption of the plant (kW)}}{\text{LNG product flowrate } (\frac{\text{kg}}{\text{hr}})} \quad (۳)$$

پس از انجام شبیه‌سازی در نرم افزار Aspen HYSYS با توجه به اطلاعات ورودی به نرم افزار و قیود تعریف شده، مقدار توان مصرفی کل واحد که از جمع مقادیر توان مصرفی تک تک تجهیزات به‌دست می‌آید برای چرخه دارای پیش‌سرمایش تبرید جذبی و چرخه‌ی مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای محاسبه شده است که این مقادیر در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به اطلاعات شکل ۴ و رابطه (۳) میزان توان

مصرفی ویژه چرخه مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چند جزئی و پیش سرمایش تبرید جذبی $\frac{kWh}{kg\ LNG}$ ۰/۲۰۶۸ است، در حالی که میزان توان مصرفی ویژه چرخه مبرد چند جزئی یک طبقه‌ای $\frac{kWh}{kg\ LNG}$ ۰/۳۶۱ است. استفاده از سیستم تبرید جذبی میزان توان مصرفی تجهیزات و به طور ویژه کمپرسورها را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر اضافه کردن چرخه پیش سرمایشی با تبرید جذبی آمونیاکی منجر به کاهش ۴۲/۷ ٪ در توان مصرفی ویژه می‌گردد.



شکل ۴- میزان توان مصرفی در تجهیزات مختلف چرخه‌های مبرد چندجزئی با پیش سرمایش جذبی و بدون پیش سردکن

پارامتر بی بعد دیگری که برای ارزیابی عملکرد چرخه تبرید به کار می‌رود عدد شایستگی[1] نام دارد که به صورت کمینه کار لازم بخش بر کار خالص انجام شده تعریف می‌شود[۴] .

$$FOM = \frac{W_{rev}}{W_{total}} = \frac{14429\ kW}{23954\ kW} = 0.602 \qquad (۴)$$

در جدول ۵ به مقایسه‌ی شاخص‌های عملکردی بین چرخه مبرد چندجزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی و چرخه مبرد چندجزئی ساده پرداخته شده است.

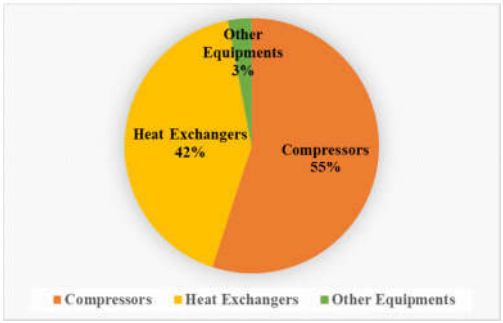
جدول ۵- شاخص‌های عملکردی بین چرخه مبرد چندجزئی با پیش-سرمایش تبرید جذبی و چرخه مبرد چند جزئی ساده

	مبرد چندجزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی	مبرد چندجزئی ساده
توان مصرفی کل چرخه (MW)	۲۳/۹۵	۴۱/۹۵
نسبت توان واحد مایع‌سازی به نیروگاه (٪)	۱/۱۷	۲/۰۵
عدد شایستگی (FOM)	۰/۶۰۲	۰/۳۴۴
میزان دبی مبرد چندجزئی $(\frac{kg}{hr})$	۲۷۹'۱۴۴	۹۲۳'۶۰۰

[1] Figure of Merit (FOM)

۵-۳- محاسبات هزینه سرمایه گذاری خرید تجهیزات واحد مایع سازی

هزینه ایجاد یک واحد مایع‌سازی گاز طبیعی عمدتا مبتنی بر قیمت تجهیزات آن چرخه است؛ با توجه به تجهیزات و ساختمان چرخه های مبرد چندجزئی ، این هزینه از مجموع قیمت کمپرسورها، مبادله کن‌های گرمای چندجریانی و سایر تجهیزات به دست می‌آید که کمپرسورها و مبادله کن‌های گرما جزء گران‌قیمت‌ترین تجهیزات هستند در نمودار دایره‌ای شکل ۵ توزیع درصدی قیمت تجهیزات چرخه‌های مایع‌سازی نشان داده شده است[۱۵و ۲۳].



شکل ۵- قیمت تجهیزات چرخه‌های مایع‌سازی گاز طبیعی به صورت درصدی

روابط محاسبه قیمت کمپرسورها و مبادله‌کن‌های گرما به شرح روابط (۵) و (۶) است [۱۵] .

$$PEC\ Compressor = 142.12(\text{Power})^{0.47} \qquad (۵)$$

$$PEC\ HeatExchanger = 30000 + 1900(A)^{0.83} \qquad (۶)$$

با توجه به روابط فوق، هزینه خرید تجهیزات برای چرخه مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی چیزی درحدود چهل میلیون دلار است این در حالی است که این هزینه برای چرخه مایع سازی مبرد چندجزئی یک طبقه ای ساده (بدون پیش سردکن) درحدود چهل و هفت میلیون دلار است که علت این اختلاف قیمت تفاوت در نسبت فشار کمپرسورهای دو چرخه مذکور است. مقایسه قیمت تجهیزات اساسی(کمپرسورها و مبادله‌کن‌های گرما) دو چرخه در شکل ۶ آورده شده است.

شکل ۶- قیمت تجهیزات اساسی در چرخه‌های مبرد چندجزئی با پیش سرمایش جذبی و بدون پیش سردکن

در جدول ۶ مجموع هزینه سرمایه گذاری اولیه موردنیاز برای هر دو سیستم مورد مطالعه به تفکیک آورده شده است.

جدول ۶- هزینه سرمایه گذاری اولیه چرخه مبرد چندجزئی با پیش-سرمایش تبرید جذبی و چرخه مبرد چند جزئی ساده

	مبرد چندجزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی	مبرد چندجزئی ساده (فاقد پیش سرد کن)
حلقه پیش‌سرمایش با تبرید جذبی آمونیاکی (M$)	۶/۹۵	-
حلقه تبرید با مبرد چندجزئی (M$)	۲۲/۹۱	۲۷/۸۲
خط مایع سازی گاز طبیعی (M$)	۱۰/۱۹	۱۹/۳
مجموع قیمت تجهیزات چرخه (M$)	۴۰/۰۵	۴۷/۱۲

۶- جمع‌بندی

مهم ترین مشکلی که در فناوری‌های ارائه شده جهت تولید گاز طبیعی مایع وجود دارد، مصرف انرژی بالای این واحدها است. به همین دلیل بهره‌گیری از روش‌هایی که منجر به کاهش مصرف انرژی این سیستم‌ها یا به عبارتی افزایش کارایی ترمودینامیکی آن‌ها شود، حائز اهمیت است. استفاده از چرخه پیش‌سرمایش (افزایش تعداد چرخه‌های یک فرآیند مایع‌سازی)، یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش کارایی ترمودینامیکی آن‌ها است. هرچه تعداد چرخه‌های ترمودینامیکی در فرآیند بیشتر باشد، کارایی نیز بالاتر خواهد بود. عامل محدودکننده‌ی تعداد چرخه‌ها، هزینه‌های کل فرآیند است. اساسا هر چه تعداد چرخه‌ها بیشتر باشد، از آن‌جا که تعداد تجهیزهای فرآیندی نیز بیشتر است، هزینه‌های ثابت نیز افزایش می‌یابد و به همین دلیل نمی‌توان به هر میزانی این تعداد را افزایش داد.

با توجه به اطلاعات مندرج در بخش پنجم، میزان توان مصرفی ویژه چرخه مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی $\frac{kWh}{kg\ LNG}$ ۰/۲۰۶۸ است، در حالی که میزان توان مصرفی ویژه چرخه مبرد چندجزئی یک طبقه ای $\frac{kWh}{kg\ LNG}$ ۰/۳۶۱ است. به عبارت دیگر اضافه کردن چرخه پیش‌سرمایشی با تبرید جذبی منجر به کاهش ۴۲/۷ ٪ در توان مصرفی ویژه می‌گردد؛ همچنین عدد شایستگی برای چرخه مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش سرمایش تبرید جذبی ۰/۶۰۲۳ است، در حالی که این میزان برای چرخه مبرد چندجزئی یک طبقه ای ۰/۳۴۴ است. به جهت مقایسه هزینه‌ای، هزینه خرید تجهیزات برای چرخه مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی چیزی درحدود چهل میلیون دلار است این در حالی است که این هزینه برای چرخه مایع سازی مبرد چندجزئی یک طبقه ای درحدود چهل و هفت میلیون دلار است که علت این اختلاف قیمت تفاوت در نسبت فشار کمپرسورهای دو چرخه مذکور است و موجب کاهش ۱۵ درصدی در هزینه خرید تجهیزات چرخه می‌شود.

۷- نمادها

علائم انگلیسی

COP	ضریب عملکرد
FOM	عدد شایستگی
SPC	توان مصرفی ویژه ، kWh/kg LNG
T	دما ، $^{\circ}C$

۸- مراجع

[1] https://nigc.ir.

[2] https://khabarfarsi.com.

[3] Mokhatab S., Mak J. Y., Valappil J. V. and Wood D. A., Handbook of liquefied natural gas. *Gulf Professional Publishing*, 2013.

[4]Venkatarathnam G. and Timmerhaus K. D. , Cryogenic mixed refrigerant processes. Springer, New York, 2008.

[5] Moein P., Sarmad M., Ebrahimi H., Zare M., Pakseresht S., & Vakili S. Z., APCI-LNG single mixed refrigerant process for natural gas liquefaction cycle: analysis and optimization. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol.26, pp.470-479, 2015.

[6] Morosuk T., Tesch S., Hiemann A., Tsatsaronis G. & Omar N. B., Evaluation of the PRICO liquefaction process using exergy-based methods. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol.27, pp.23-31, 2015.

[7] Cao L., Liu J., and Xu X., Robustness analysis of the mixed refrigerant composition employed in the single mixed refrigerant (SMR) liquefied natural gas (LNG) process. *Applied Thermal Engineering*, Vol.93, pp.1155-1163, 2016.

[8] He T. and Ju Y., Dynamic simulation of mixed refrigerant process for small-scale LNG plant in skid mount packages. *Energy*, Vol.97, pp.350-358, 2016.

[9] Ghorbani, B., Hamedi, M. H., Amidpour, M., and Shirmohammadi, R., Implementing absorption refrigeration cycle in lieu of DMR and C3MR cycles in the integrated NGL, LNG and NRU unit. *International Journal of Refrigeration*, Vol.77, pp.20-38, 2017.

[10] Nguyen, T. V., Rothuizen, E. D., Markussen, W. B., and Elmegaard, B. , Thermodynamic comparison of three small-scale gas liquefaction systems. *Applied Thermal Engineering*, Vol.128, pp.712-724, 2018.

[11] Mehrpooya M., Omidi M., and Vatani A., Novel mixed fluid cascade natural gas liquefaction process configuration using absorption refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, Vol.98, pp.591-604, 2016.

[12] Tirandazi B., Mehrpooya M., Vatani A., & Moosavian S. A. Exergy analysis of C2+ recovery plants refrigeration cycles. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol.89, No.6, pp.676-689, 2011.

[13] Mehrpooya, M., and Ansarinasab, H., Exergoeconomic evaluation of single mixed refrigerant natural gas liquefaction processes. *Energy conversion and management*, Vol.99, pp.400-413, 2015.

[14] Sayyaadi H., and Babaelahi M., Thermoeconomic optimization of a cryogenic refrigeration cycle for re-liquefaction of the LNG boil-off gas. *International Journal of Refrigeration*, Vol.33, No.6, pp.1197-1207, 2010.

[15] Ansarinasab H., & Mehrpooya M., Advanced exergoeconomic analysis of a novel process for production of LNG by using a single effect absorption refrigeration cycle. *Applied Thermal Engineering*, Vol.114, pp.719-732, 2017.

[16] Ghorbani B., Mehrpooya M., Shirmohammadi R., and Hamedi M. H., A comprehensive approach toward utilizing mixed refrigerant and absorption refrigeration systems in an integrated cryogenic refrigeration process. *Journal of cleaner production*, Vol.179, pp.495-514, 2018.

[17] Khodaee M., Ashrafizadeh A., Mafi M. , Optimization of propane and butane gas liquefaction cycle considering compressor technical limitations using genetic algorithm. *Modares Mechanical Engineering*, Vol.17, No.2, pp. 315-324, 2017. (In Persian)

[18] Ghorbani B., Hamedi M. H., Amidpour M. and Mehrpooya M., Cascade refrigeration systems in integrated cryogenic natural gas process (natural gas liquids (NGL), liquefied natural gas (LNG) and nitrogen rejection unit (NRU)). *Energy*, Vol.115, pp.88-106, 2016.

[19] Karamloo B., Khanaki M., Mafi M., Sadatsakkak S. A, Effect of feed conditions on the performance of double stage mixed refrigerant LNG system. *Modares Mechanical Engineering*, Vol.16, No.10, pp. 103-114, 2016. (In Persian)

[20] Moradi A., Mafi M., Khanaki M., Sensitivity analysis of peak-shaving natural gas liquefaction cycles to environmental and operational parameters. *Modares Mechanical Engineering*, Vol.15, No.6, pp.287-298, 2015. (In Persian)

[21] Parpinchi M.K, Sadeghi A., Khanaki M., Sadatsakkak S. A., Optimization and thermodynamic analysis of the dual mixed refrigerant process of natural gas liquefaction. *Amirkabir Mechanical Engineering*,(Online Available) , 2018. (In Persian).

[22] Karamloo B., Sadatsakkak S. A., Mafi M.,.Manafi H., Effect of refrigerant component leakage on the performance of double stage mixed refrigerant LNG process. *Journal of Mechanical Engineering Tabriz University*, Vol.47, No.4, pp.267-276, 2016. (In Persian)

[23] Aslambakhsh A. H., Moosavian M.A., Amidpour M., Hosseini M. and AmirAfshar S., Global cost optimization of a mini-scale liquefied natural gas plant. *Energy*, Vol.148, pp.1191-1200, 2018.

[24] Lin W., Xiong X. and Gu A., Optimization and thermodynamic analysis of a cascade PLNG (pressurized liquefied natural gas) process with CO2 cryogenic removal. Energy, Vol.161, pp.870-877, 2018.

[25] Wang Q., Song Q., Zhang J., Liu R. Zhang S. and Chen G., Performance analyses on four configurations of natural gas liquefaction process operating with mixed refrigerants and a rectifying column. Cryogenics, Vol.97, pp.13-21, 2019.

[26] Watson H. A., Vikse M., Gundersen T., and Barton, P. I., Optimization of single mixed-refrigerant natural gas liquefaction processes described by nondifferentiable models. Energy, Vol.150, pp.860-876, 2018.

[27] Wang Q., Song Q., Zhang J., Liu R., Zhang S. and Chen G., Experimental studies on a natural gas liquefaction process operating with mixed refrigerants and a rectifying column. Cryogenics, Vol.99, pp.7-17,2019.

[28] http://rajaei.tpph.ir/SitePages/Tamas/CantactForUs.aspx

[29] Human Resources and Research Office of Information Technology and Statistics, Detailed statistics of Iranian power industry especially for strategic management, Tavanir Company, 2016. (In Persian)

[30] Mehrpooya, M., Hosseini, M., and Vatani A., Novel LNG-based integrated process configuration alternatives for coproduction of LNG and NGL, *Industrial & Engineering Chemistry Research* Vol.53, pp.17705-17721, 2014.