

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

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ه)</sup>، قزوین، ایران،  
 amirfarshadkalvani@gmail.com

**امیرفرشاد کلوانی**

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ه)</sup>، قزوین، ایران،  
 mostafa.mafi@gmail.com

**مصطفی مافی\***

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ه)</sup>، قزوین، ایران،  
 khanaki.m@gmail.com

**منصور خانکی**

## 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 مایع‌سازی، 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 پیش‌سردکن) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نسبت به چرخه مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای بدون پیش‌سردکن، میزان توان مصرفی ویژه ۴۳٪، قیمت تمام‌شده خرید تجهیزات چرخه مایع‌سازی 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 Rajaei Power Plant

**A. Farshad Kalvani**  
**M. Mafi**  
**M. Khanaki**

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

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) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین‌تری را طلب می‌کند و از پیچیدگی و دانش فنی کمتری برخوردار است، استفاده از این روش در بسیاری از

### 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 آلاینده‌گی اندک و قیمت مناسب گاز طبیعی نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی این پیش‌بینی که گاز طبیعی همچنان نقش کلیدی خود را در بازار انرژی در دهه‌های آینده حفظ نماید خارج از تصور نیست. یکی از راه‌های انتقال

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

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 نیروگاه های حرارتی، مصرف کنندگان عمده گاز طبیعی هستند و از آنجا که اولویت اصلی شرکت ملی گاز ایران تامین گاز مورد نیاز بخش خانگی است، در فصول سرد سال در صورت کاهش فشار در خطوط توزیع گاز، نیروگاه ها و واحدهای صنعتی از شبکه توزیع سراسری گاز منفصل شده و با سوخت های ثانویه نظیر گازوئیل یا مازوت به فعالیت خود ادامه می دهند. شایان ذکر است بنا بر اعلام سازمان حفاظت از محیط زیست در بهمن ماه سال ۱۳۹۷، روزانه ۴۴۰ هزار بشکه مازوت در نیروگاه های کشور سوزانده می شود که این امر در فصل زمستان به علت پدیده وارونگی هوا بسیار زیان آور است [۲]. نسبت انرژی به حجم گاز طبیعی در فشار و دمای محیط، بسیار پایین است، از این رو ذخیره سازی گاز طبیعی به صورت عادی و گازی شکل در فصول گرم سال به منظور جبران کسری سوخت در فصول سرد، حجم زیادی را اشغال می کند 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 می دهند که در نتیجه حجم آن تقریباً به یک شصدم حجم اولیه در فشار یک اتمسفر می رسد [۳ و ۴]. لذا می توان با احداث واحدهای مایع سازی کوچک مقیاس در مجاورت واحدهای صنعتی و نیروگاه ها در فصول گرم سال، گاز طبیعی را با قیمتی منطبق بر سیاست های حمایتی دولت در اختیار این واحدها قرار داد تا با مایع سازی 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. مهم ترین مشکلی که در توسعه واحدهای مایع سازی گاز طبیعی<sup>۱</sup> وجود دارد، مصرف انرژی بالای این واحدهاست. به همین دلیل بهره گیری از روش هایی که منجر به کاهش مصرف انرژی این سیستم ها شود حائز اهمیت است. با توجه به این که در بسیاری از واحدهای صنعتی و نیروگاه های کشور بخش قابل توجهی از انرژی ورودی، به صورت گرما اتلاف می گردد لذا به عنوان راهکاری مناسب می توان با توجه به مشخصات انرژی اتلافی و با به کارگیری چرخه تبرید جذبی آمونیاکی تولید برودت نموده و از برودت تولیدی جهت پیش سرمایش گاز خوراکی ورودی به چرخه مایع ساز استفاده کرده و ضمن کاهش توان مصرفی، کارایی واحد مایع سازی را بهبود بخشید.

در سال های اخیر تحقیقات فراوانی در راستای بهبود عملکرد چرخه های مایع سازی گاز طبیعی انجام گرفته است. معین و همکاران [۵] یک چرخه مبرد چندجزئی ساده متداول را به جهت محاسبه بهینه ترین شرایط عملکردی مورد تحلیل قرار دادند. از ابزار الگوریتم ژنتیک به جهت کمینه سازی کل توان مورد نیاز از طریق بهینه سازی 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<sup>۲</sup> را به لحاظ انرژی محیطی و انرژی اقتصادی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. هدف آن ها شناسایی گزینه هایی برای بهبود فرآیند پریکو و نشان دادن کاربرد روش های مبتنی بر انرژی برای بهبود یک واحد مایع سازی گاز طبیعی بود. کائو و همکاران [۷] درصد ترکیب مبرد چندجزئی را به منظور بهینه سازی فرآیند مایع سازی 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 مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی برای واحدهای مایع سازی کوچک مقیاس مدولار را طراحی کردند و رفتارهای دینامیکی این فرآیند را بررسی نمودند. به جهت آزمایش پایداری و بررسی پاسخ های دینامیکی فرآیند مواردی نظیر تغییرات دمای گاز طبیعی، ترکیب، فشار، نرخ جریان و دمای آب خنک کن به عنوان بی نظمی ها انتخاب شدند. پاسخ های 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 چرخه های پیش سرمایش پروپانی در فرآیندهای مایع سازی مبرد چندجزئی دو طبقه ای (آبشاری) که با واحدهای تولید میعانات گازی و نیتروژن زدایی یکپارچه شده اند 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 مایع سازی 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 طبقه ای. تاثیر ترکیب های مختلف گاز خوراکی و خواص مبرد مورد تحلیل قرار گرفت و با به کارگیری روش بهینه سازی چند هدفه، مناسب ترین طرح چرخه مشخص گردید. مهرپویا و همکاران [۱۱] فرآیند مایع سازی 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 مورد نیاز با مدل پایه مقایسه کردند. تیراندازی و همکاران [۱۲] چرخه تبرید پروپان برای یک واحد بازیابی هیدروکربن را با روش متداول انرژی مورد تحلیل قرار دادند. مهرپویا و انصاری نسب [۱۳] دو فرآیند مبرد چندجزئی ساده را مورد تحلیل انرژی و انرژی اکنومیک قرار دادند و ضمن معرفی رابطه ای بین هزینه های اقتصادی و سرمایه گذاری، تجهیزات دارای بیشترین هزینه تخریب انرژی معرفی شدند. در پایان راه های ممکن برای بهینه سازی اقتصادی مبتنی بر آنالیز حساسیت برای فاکتور انرژی اکنومیک و هزینه تخریب انرژی معرفی شدند. صیادی و بابالهی [۱۴] ضمن مطالعه روی سیستم مایع سازی مجدد بخارات گاز طبیعی، با هدف کمینه سازی هزینه واحد محصول، اقدام به بهینه سازی ترمو اکنومیکی کردند. ابتدا یک مدل ترمو اکنومیکی مبتنی بر آنالیز ترمودینامیکی شامل تحلیل های انرژی و انرژی و مدلی اقتصادی بر پایه ی روش نیازمندی های درآمدی کل توسعه یافت و سپس تابع هدف ترمو اکنومیکی به دست آمده از تحلیل ترمو اکنومیکی با استفاده از

<sup>1</sup> Liquefied Natural Gas (LNG)

<sup>2</sup> PRICO

پرفشار<sup>۱</sup> همراه با واحد جداسازی کرایوژنیک 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 تأثیرات 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 بهره‌گیری از این گرمای اتلافی هستند و همچنین ارائه تحلیل‌های 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 مایع‌سازی جدید با شاخص‌های عملکردی چرخه مبرد چندجزئی ساده (به عنوان رایج‌ترین چرخه در حوزه مایع‌سازی گاز طبیعی) 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

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 اگزوزی اکونومیک 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 شبیه‌سازی 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 تأثیر 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 اگزوزی 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

<sup>1</sup> Cascade PLNG

ظرفیت کل واحد مایع	۱۱۵۸۱۲
سازی $\left(\frac{kg}{hr}\right)$	

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 مورد نیاز 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.

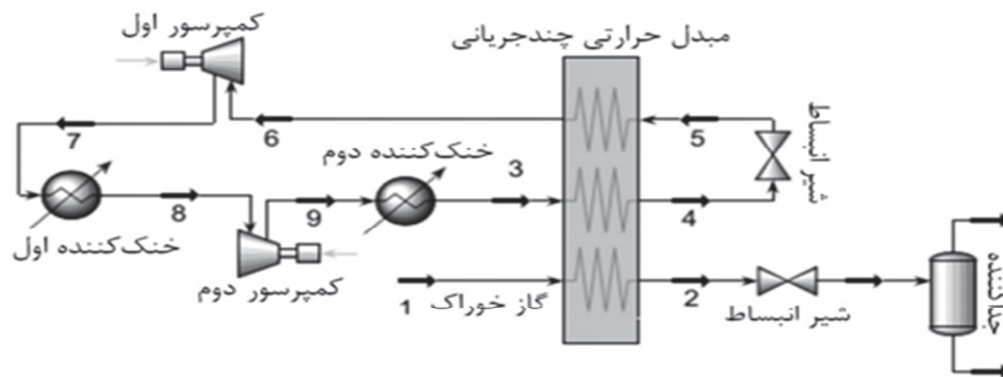
#### ۳-۱- فرآیند مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای

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 مقبول تر 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 در نتیجه تولید سرمایش به سبب انبساط آنتالپی ثابت مبرد خروجی از مبادله‌کن گرمای چند جریانی در شیر اختناق صورت می‌پذیرد.

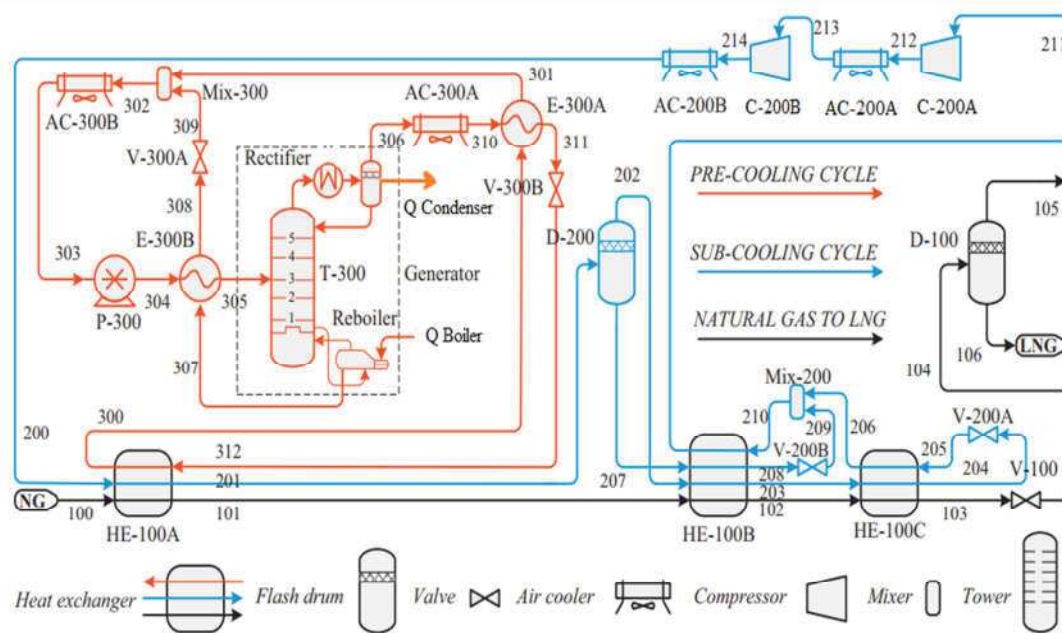
ظرفیت تولید ۱۰۰۰ مگاوات و نیروگاه چرخه ترکیبی شامل ۶ واحد گازی ۱۲۳،۴ مگاواتی و ۳ واحد بخار ۱۰۰،۶ مگاواتی جمعا با ظرفیت تولید ۱۰۴۲،۲ مگاوات است. ظرفیت مایع‌سازی این فرآیند با توجه به میزان نیاز نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی قزوین با ظرفیت تولید ۲۰۴۲ مگاوات محاسبه شده است.

جدول ۱- محاسبات مربوط به میزان نیاز نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی 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 $\left(\frac{MJ}{m^3}\right)$	۳۶/۶۶۴	۳۶/۶۶۴	[۳]
۶	گاز طبیعی مورد نیاز 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 $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	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 مایع‌سازی $\left(\frac{kg}{hr}\right)$	۵۳۱۶۹	۶۲۶۴۳	



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



شکل ۱- دیاگرام جریان فرآیند چرخه مایع‌سازی مبرد چند جزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی [۱۵]

### ۲-۳- فرآیند مبرد چند جزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی

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

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] کاملاً 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.

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 چند 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 ۸.۴ استفاده شده است. نرم افزار Aspen HYSYS به دلیل داشتن معادله حالت‌های مناسب برای کاربردهای گوناگون، تعریف اغلب المان‌های مورد نیاز شبیه‌سازی، وجود واحد‌های 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 بهینه‌سازی 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<sup>۱</sup> استفاده شده است. در جدول ۲ 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، در نتیجه 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	۱۰۶	۲۰۰	۳۰۳	۳۱۲
گاز طبیعی خوراک	گاز طبیعی مایع	گاز طبیعی مایع	مبرد چند جزئی	مخلوط آمونیاک و آب	مبرد آمونیاک
۱۲۵۶۰۴	۱۱۵۸۱۲	۲۷۹۱۴۴	۷۳۸۰۰۰	۸۸۸۸۴	
دبی ( $\frac{kg}{hr}$ )					
۲۶/۸۵	-۱۶۶/۰۹	۳۱/۸۵	۳۱/۹۱	-۲۹/۵۵	
دما ( $^{\circ}C$ )					
۶۵/۰۰	۱/۰۰	۴۸/۶۰	۱/۲۰	۱/۲۰	
فشار (bar)					
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:
- از افت فشار در تمامی مبادله‌کن‌های گرما، صرف‌نظر شده است.
  - کارایی آیزنتروپیک کمپرسورها ۸۰٪ در نظر گرفته شده است.
  - مایع وارد کمپرسور نمی‌شود.
  - تقاطع دمایی در مبادله‌کن گرما رخ نمی‌دهد.
  - تلفات گرما در مبادله‌کن گرما ناچیز است.

#### ۴-۲- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

جهت اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی چرخه‌ی مبرد چند جزئی با پیش‌سرمایش 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.

<sup>1</sup> Peng- Robinson

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:

$$COP = \frac{\text{Evaporator Refrigeration Load}}{\text{Generator Heat Duty} + \text{Pump Power}} \quad (1)$$

$$= \frac{29328.2 \text{ kW}}{53150 + 368 \text{ kW}} = 0.548$$

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

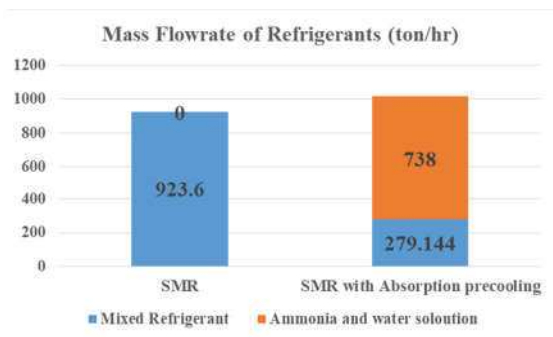
مقایسه‌ی بین نرخ جریان مبرد در چرخه دارای پیش‌سرمایش تبرید جذبی با چرخه‌ی مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای نشان دهنده‌ی کاهش در حدود ۷۰٪ مطابق با رابطه (۲) است:

$$\text{Mixed Refrigerant in Absorption} + \text{SMR cycle} \quad (2)$$

$$\text{Mixed Refrigerant in SMR cycle}$$

$$= \frac{279144}{923600} \times 100 = 30\%$$

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:

$$SPC \left( \frac{\text{kWh}}{\text{kg LNG}} \right) = \frac{\text{Power consumption of the plant (kW)}}{\text{LNG product flowrate} \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)} \quad (3)$$

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 به دست 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

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

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

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

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

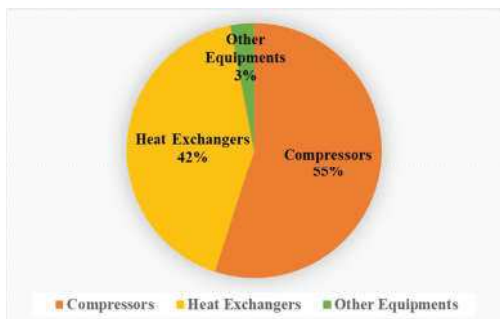
### ۵- نتایج و بحث

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.

### ۵-۳- محاسبات هزینه سرمایه گذاری خرید تجهیزات

#### واحد مایع سازی

هزینه ایجاد یک واحد مایع سازی گاز طبیعی عمدتاً 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 [۱۵ و ۲۳].



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

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

$$PEC_{Compressor} = 142.12(\text{Power})^{0.47} \quad (5)$$

$$PEC_{HeatExchanger} = 30000 + 1900(A)^{0.83} \quad (6)$$

با توجه به روابط فوق، هزینه خرید تجهیزات برای چرخه مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی چیزی در حدود چهار میلیون دلار است این در حالی است که این هزینه برای چرخه مایع سازی مبرد چندجزئی یک طبقه ای ساده ( بدون پیش سردکن) در حدود چهار 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 مبادله کن‌های گرما) دو چرخه در شکل ۶ آورده شده است.



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

مصرفی ویژه چرخه مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چند جزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی  $\frac{kWh}{kg \text{ LNG}}$  ۰/۲۰۶۸ است، در حالی که میزان

توان مصرفی ویژه چرخه مبرد چند جزئی یک طبقه‌ای  $\frac{kWh}{kg \text{ LNG}}$  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 پیش‌سرمایشی 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 پیش‌سرمایش جذبی و بدون پیش سردکن

پارامتری بعد دیگری که برای ارزیابی عملکرد چرخه تبرید به کار می‌رود عدد شایستگی<sup>۱</sup> نام دارد که به صورت کمینه کار لازم بخش بر کار خالص انجام شده تعریف می‌شود [۴].

$$FOM = \frac{W_{rev}}{W_{total}} = \frac{14429 \text{ kW}}{23954 \text{ kW}} = 0.602 \quad (4)$$

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 پیش‌سرمایش تبرید جذبی و چرخه مبرد چند جزئی ساده

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

<sup>1</sup> Figure of Merit (FOM)

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، °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., Hamed, 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 Elmgaard, 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 Ansarinassab, 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., Thermo-economic 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] Ansarinassab 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.

در جدول ۶ مجموع هزینه سرمایه گذاری اولیه مورد نیاز 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 (MS)
۶/۹۵	-	حلقه تبرید با مبرد چندجزئی (MS)
۲۲/۹۱	۲۷/۸۲	خط مایع سازی گاز طبیعی (MS)
۴۰/۰۵	۴۷/۱۲	مجموع قیمت تجهیزات چرخه (MS)

## 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 محدودکننده تعداد چرخه‌ها، هزینه‌های کل فرآیند است. اساساً هر چه تعداد چرخه‌ها بیشتر باشد، از آن‌جا که تعداد تجهیزات 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  $\frac{\text{kWh}}{\text{kg LNG}}$  ۰/۲۰۶۸ است، در حالی که میزان توان

مصرفی ویژه چرخه مبرد چندجزئی یک طبقه ای  $\frac{\text{kWh}}{\text{kg LNG}}$  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 پیش‌سرمایش 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 در حدود چهار میلیون دلار است این در حالی است که این هزینه برای چرخه مایع سازی مبرد چندجزئی یک طبقه ای در حدود چهار و

- [16] Ghorbani B., Mehrpooya M., Shirmohammadi R., and Hamed 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., Hamed 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 CO<sub>2</sub> 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/ContactForUs.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.