

## شبیه‌سازی و بهبود عملکرد چرخه مبرد تک‌مرحله‌ای جهت تولید گاز طبیعی مایع شده

مرتضی زیودار<sup>۱\*</sup>، الهه مهدوی<sup>۲</sup>، کیانوش رزاقی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹

### چکیده

گاز طبیعی مایع شده توسط کاهش دمای گاز طبیعی تا دمای ۱۶۰- درجه سلسیوس به دست می‌آید، در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ASPEN HYSYS، چرخه مایع‌سازی PRICO که شامل دو کمپرسور و یک مبدل حرارتی است، شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی در دو حالت فشار بالا (۷۹۴۵ Kpa) و فشار پایین گاز طبیعی (۲۸۶۱ Kpa) انجام شد. تابع هدف کمینه کردن مصرف ویژه انرژی فرایند است. در بهترین حالت مصرف انرژی  $0.316 \frac{Kwh}{KgLNG}$  به دست آمد که در مقایسه با مقدار مرجع ۲۲٪ کاهش را نشان می‌دهد. با تحلیل آنالیز حساسیت نتیجه گرفته شد که هر چه دبی مولی متان، اتان، پروپان و نیتروژن در ترکیب مبرد افزایش یابد مصرف ویژه انرژی هم افزایش می‌یابد. علاوه بر آن بهتر است درصد ایزوپنتان در مبرد بالا باشد تا بتوان به کم‌ترین مصرف ویژه انرژی رسید. علاوه بر آن ضریب عملکرد هم مورد بررسی قرار گرفت که در فشار بالا به ۳/۱۲ رسید.

**کلمات کلیدی:** مایع‌سازی گاز طبیعی، انرژی، اکسرژی، شبیه‌سازی، PRICO

\* mzivdar@eng.usb.ac.ir

## مقدمه

گاز طبیعی در دمای حدوداً ۱۶۰- درجه سلسیوس و فشار یک اتمسفر مایع می‌شود [۱]. گاز طبیعی مایع شده (LNG)<sup>۱</sup> حدوداً دارای بیش از ۹۵٪ متان و مقدار کمی اتان، پروپان، ایزو و نرمال بوتان، ایزو و نرمال پنتان، نیتروژن و ناخالصی است. از خواص گاز طبیعی مایع شده می‌توان گفت که بو و رنگ ندارد، سمی نیست و نسبت به فلزات یا دیگر مواد خورنده نیست. این سوخت در محیط و فضای باز ایمن است و کلیه آزمایش‌های انجام شده و ویژگی‌های گاز طبیعی مایع شده ایمنی آن را کاملاً تأیید می‌کند [۲]. الصبحی و همکاران به شبیه‌سازی و ادغام حرارت در یک کارخانه LNG پرداختند. ابتدا یک فرآیند LNG معمولی سنتز شد. بسته شبیه‌سازی ASPEN PLUS برای مدل‌سازی فرآیند و تعیین دما و بار حرارتی برای جریان‌های مختلف گرم و سرد استفاده شد. سپس، تجزیه و تحلیل پینچ حرارتی برای کاهش تأسیسات گرمایش و سرمایش انجام شد. مشخص شد که از طریق یکپارچه‌سازی گرما، می‌توان میزان گرمایش را تا ۱۵٪ و ابزار سرمایش را تا ۲۹٪ کاهش داد [۴].

اسپلوند<sup>۲</sup> و همکاران بهینه‌سازی و شبیه‌سازی این فرآیند با نرم‌افزار هایسیس را گزارش کردند [۵]. ژو و همکاران بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل ترکیب مبرد مخلوط برای فرآیند مایع‌سازی PRICO را توسط نرم‌افزار اسپن پلاس مورد بررسی قرار دادند [۶]. تیم فنی پدکو شبیه‌سازی این فرآیند مایع‌سازی را توسط نرم‌افزار هایسیس انجام دادند. دما و فشار گاز، مقدار استفاده از مبرد و شرایط عملیاتی جریان حاوی آن در هر مرحله، میزان افزایش فشار به وسیله کمپرسورها در هر مرحله و نحوه تولید حلقه جریان برگشتی از جمله موارد مهم در این پژوهش بود [۷]. جین و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک چرخه MR3 را بدون پروپان با انبساط نیتروژن برای فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی برای واحدهای دریایی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزارهای MATLAB و ASPEN HYSYS پیشنهاد دادند که منجر به افزایش راندمان فرآیند گردید [۸]. نیلوفری در سال ۲۰۲۱ یک واحد تولید گاز مایع با سردسازی توسط یک مبرد آمیخته با استفاده از نرم‌افزار اسپن پلاس شبیه‌سازی انجام داد و یک ساختار کنترلی مناسب برای آن در نظر گرفته شد. پس از تنظیم حلقه‌های کنترلی تناسبی انتگرالی، عملکرد ساختار کنترلی مورد ارزیابی واقع شد. نتایج آن نشان دهنده عملکرد پایدار واحد تولیدی در برابر اغتشاشات است [۹]؛ اما در این پژوهش، حالات فشاری بالا و پایین گاز طبیعی ورودی را جهت کاهش مصرف ویژه انرژی برای بهبود عملکرد چرخه مورد بررسی قرار داده است؛ و نتایج نشان داد که حالت فشار بالا، باعث کاهش مصرف ویژه انرژی می‌شود.

در سال ۲۰۲۱ تراسوینا و همکارانش توسعه یک چرخه مبرد مخلوط منفرد کارآمد انرژی برای تولید LNG در مقیاس کوچک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد اصلاح ساختاری پیکربندی چرخه‌های SMR می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در تقاضای کار شفت با پیچیدگی اضافه کم داشته باشد. چرخه رمان SMR توسعه یافته در این کار بر اساس چرخه CryoMan SMR است [۱۰]. سانتوس و همکاران در سال ۲۰۲۱ طراحی فرآیند روان‌سازی SMR کارآمد برای تولید LNG با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، در Aspen HYSYS و MATLAB را مورد بررسی قرار دادند که متغیرهای تصمیم‌گیری بیشتری را با الگوریتم نلدرمید سیمپلکس و فلوشیت کوچک در نظر گرفتند. تغییراتی مانند توربین‌های هیدرولیک و جداکننده‌های فلاش در بین مراحل تراکم، منجر به فرآیند

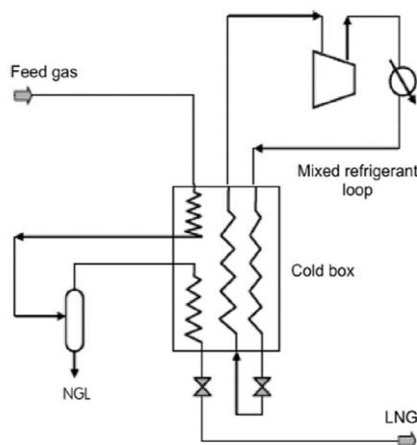
<sup>۱</sup> Liquefied Natural Gas

<sup>۲</sup> A. Aspelund

روان‌سازی با مصرف ویژه ۷۵۰/۲ کیلوژول به ازای هر کیلوگرم گاز طبیعی شد که به‌طور قابل‌توجهی کوچک‌تر از آنچه در مراجع گزارش شده است بود [۱۱]. شبیه‌سازی فرایند PRICO برای مایع‌سازی گاز طبیعی از اهداف این تحقیق است. شبیه‌سازی این سیکل توسط نرم‌افزار ASPEN HYSYS انجام شده است. در این تحقیق پس از شبیه‌سازی واحد، تأثیر پارامترهای مختلف مانند فشار گاز طبیعی ورودی، فشار خروجی از کمپرسورها و شیر فشارشکن بعد از مبدل حرارتی بررسی شد تا به کم‌ترین انرژی مصرفی در چرخه تولید گاز طبیعی دست یافت.

### شرح فرایند PRICO

شکل ۱ نمای ساده شده فرایند پریکو را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار فرایند PRICO [۱]

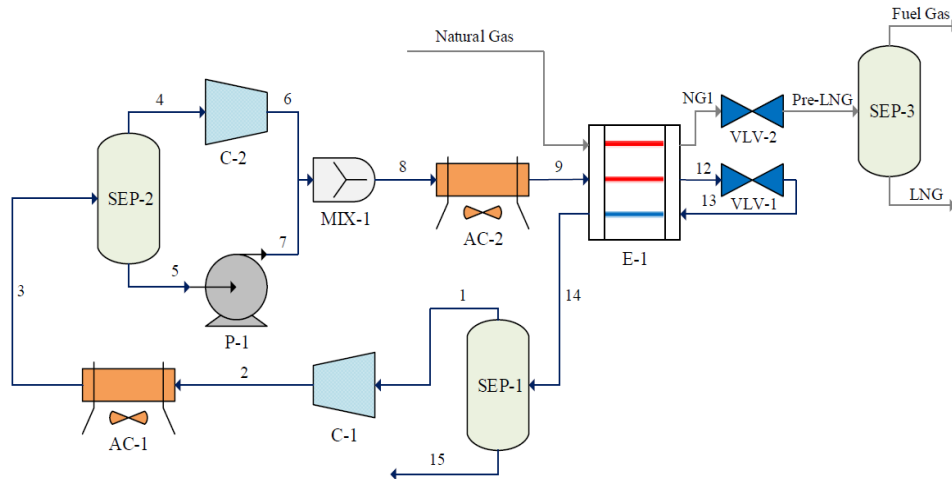
فرایند PRICO از نوع فرآیندهای تراکم بخار با مبرد آمیخته است. فرآیند مبرد آمیخته PRICO شامل یک چرخه سردسازی است و تعداد تجهیزات مورد استفاده در آن کم و تک‌مرحله‌ای است که فرآیند را ساده‌تر می‌کند. در این فرایند از مخلوط متان، اتان، پروپان و نیتروژن به‌عنوان مبرد استفاده می‌شود. به‌طور کلی ترکیب مبرد آمیخته توسط تطابق منحنی گرم مبرد با منحنی سرد گاز طبیعی تعیین می‌شود. جعبه سرد این واحد شامل مجموعه‌ای از مبدل‌های حرارتی با بازدهی بالا است که به فرآیند انتقال حرارت بین مبرد فشرده شده و گاز طبیعی کمک می‌کند. این انتقال حرارت سرمایش گاز طبیعی را تا دمای  $-160^{\circ}\text{C}$  امکان‌پذیر می‌سازد. برای سهولت در کار برای سرمایش گاز طبیعی لازم است مقدار زیادی مبرد در فرایند وجود داشته باشد که این امر باعث می‌شود کار مورد نیاز در مرحله‌ی فشرده سازی زیادتر شود.

### نوآوری پژوهش

از نوآوری این پژوهش تأثیر تغییر فشار گاز طبیعی ورودی به مبدل حرارتی، یعنی دو حالت کاهش و افزایش فشار گاز طبیعی را که مستقیماً روی کاهش مصرف ویژه انرژی تأثیر می‌گذارد می‌توان نام برد.

### شبیه‌سازی فرایند

شکل ۲ نمودار فرآیندی PRICO را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار فرایندی PRICO جهت شبیه‌سازی [۲]

در این فرایند فقط یک مبدل حرارتی سرماساز داریم که مرکز اصلی فرایند PRICO و سایر فرایندهای سردسازی است. در مبدل حرارتی سرما به وسیله جریان مبرد با فشار کم  $700 \text{ Kpa}$  (جریان خروجی از شیر فشارشکن جریان ۱۳) از گاز (جریان Natural Gas) و جریان پرفشار  $7945 \text{ Kpa}$  مبرد (جریان ۹) دریافت می‌شود تا سرمای لازم برای میعان گاز طبیعی و مبرد با فشار بالا تأمین شود. مبرد بعد از عبور از دو کمپرسور فشرده می‌شود و به بالاترین دما و فشار  $133/4^\circ\text{C}$  و  $7995 \text{ Kpa}$  می‌رسد (جریان ۶). از کولر هوایی برای کم کردن دمای مبرد و خنک‌سازی آن استفاده می‌شود، سپس مبرد تحت عنوان جریان گرم با دمای  $47^\circ\text{C}$  که در شکل به رنگ قرمز مشخص شده است (جریان ۹) وارد مبدل حرارتی شده و گرمای خود را از دست می‌دهد و به دمای  $150^\circ\text{C}$  می‌رسد (جریان ۱۲). سپس جریان مبرد خروجی از شیر فشارشکن (جریان ۱۳) وارد مبدل حرارتی می‌شود و حرارت را از دو جریان دیگر می‌گیرد و دمای آن افزایش می‌یابد. خوراک گاز طبیعی با شرایط خط لوله گاز با دمای  $43^\circ\text{C}$  و در فشار  $7945 \text{ KPa}$  (حالت فشار بالای خط لوله [۹])، وارد مبدل حرارتی می‌شود و تا دمای  $150^\circ\text{C}$  سرد می‌شود. نهایتاً در جداکننده محصول مایع تولیدی از گاز جدا می‌شود (جریان LNG). در این فرایند برای خنک کردن جریان مبرد در چرخه تبرید از کولرهای هوایی استفاده می‌شود. در این تحقیق از معادله حالت پنگ - رابینسون<sup>۳</sup> استفاده شده است، این معادله در مورد سیستم‌های آلی با پیچیدگی زیاد و همچنین در بازه‌های گسترده دمایی و فشاری ( $T > -271^\circ\text{C}$  و  $P < 15000 \text{ Psia}$ )، حالت‌های یک، دو و سه فازی قابل استفاده است. برای محاسبات تعادلی بخار-مایع خصوصاً هیدروکربن‌های سبک به خوبی جواب می‌دهد و برای محاسبه‌ی خواص فیزیکی هیدروکربن‌ها از دقت خوبی برخوردار است. برای شبیه‌سازی این فرایند از نرم‌افزار ASPEN HYSYS استفاده شده است در این تحقیق به طور کلی دو حالت بررسی شده است: حالت اول فشار بالا و حالت دوم فشار پایین گاز طبیعی ورودی به مبدل سرما ساز است.

## نتایج و بحث

در جدول ۱ مشخصات جریان‌های ورودی و خروجی آورده شده است. در این جدول مشخصات اولیه جریان خوراک، مبرد و محصول در فرایند PRICO که برگرفته از مرجع ۳ است آورده شده است و شبیه‌سازی اولیه بر اساس این اطلاعات انجام شده است.

<sup>3</sup> Peng- Robinson

### جدول ۱- مشخصات جریان خوراک، مبرد و محصول در فرایند PRICO [۳]

Parameters	NG	LNG	MR
Flow (Kmol/hr)	۷۸/۱۱	۷۳/۲۹	۲۳۶
Temperature(°C)	۱۹	-۱۵۰/۵	۴۴
Pressure (Kpa)	۲۸۶۱	۳۰۰	۲۵۰

در مبدل حرارتی سه مرحله داریم که به ترتیب: پیش سرمایش، مایع‌سازی و فوق سردسازی هستند. فشار مبرد خروجی از مبدل با عبور از شیر فشارشکن به ۷۰۰ Kpa کاهش می‌یابد تا با گذشت دوباره از مبدل بتواند جریان گاز طبیعی و خود مبرد در مرحله قبل را سرد کند و به‌این ترتیب چرخه سردسازی مبرد کامل می‌شود. در حالت فشار پایین، خوراک گاز با همان دما و فشار مرحله اول وارد شیر فشارشکن می‌شود سپس فشار به ۲۸۶۱ Kpa کاهش می‌یابد و مقداری سرمایش ایجاد می‌شود. در ادامه دما به ۲۱ °C می‌رسد و تمامی مراحل ذکر شده را طی می‌کند. جداول ۲ و ۳ مشخصات جریان خوراک، مبرد و محصول را در دو حالت فشار بالا و پایین نشان می‌دهند. در این جداول مشخصات جریان خوراک، مبرد، دما، فشار، جریان مولی و ترکیب درصد هرکدام از اجزاء در فرایند PRICO در حالت فشار بالا و پایین آورده شده است.

### جدول ۲- مشخصات جریان خوراک، مبرد و محصول در فرایند PRICO در فشار ۷۹۴۵Kpa

Parameters	NG	LNG	Mixed Refrigerant
Flow (Kmol/hr)	۷۸/۱۱	۶۴/۸۲	۲۳۶
Temperature(°C)	۴۳/۵۲	-۱۶۳	۴۴
Pressure (Kpa)	۷۹۴۵	۲۹۸	۲۵۰
% Mole			
Methane	۹۰/۸۴	۹۲/۲۵	۴۱/۰۱
Ethane	۵/۰۴	۶/۰۸	۲۴/۲۱
Propane	۰/۶۱	۰/۷۳	۱۰/۴۹
I-butane	۰/۱	۰/۱۲	۰/۲۵
n-butane	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۲۵
I-pentane	۰/۰۶	۰/۰۷	۸/۸۲
n-pentane	۰/۰۶	۰/۰۷	۸/۸۲
Nitrogen	۳/۲۳	۰/۶۱	۶/۱۴

### جدول ۳- مشخصات جریان خوراک، مبرد و محصول در فرایند PRICO در فشار ۲۸۶۱Kpa

Parameters	NG	LNG	Mixed Refrigerant
Flow (Kmol/hr)	۷۸/۱۱	۶۵/۶۶	۲۳۶
Temperature(°C)	۲۰/۳	-۱۶۳/۱	۴۴
Pressure (Kpa)	۲۸۶۱	۲۹۳/۴	۲۵۰

% Mole			
Methane	۹۰/۹۵	۹۲/۴۳	۴۱/۰۱
Ethane	۵/۰۵	۶/۰۱	۲۴/۲۱
Propane	۰/۶۱	۰/۷۳	۱۰/۴۹
I-butane	۰/۱	۰/۱۲	۰/۲۵
n-butane	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۲۵
I-pentane	۰	۰	۸/۸۲
n-pentane	۰	۰	۸/۸۲
Nitrogen	۳/۲۳	۰/۶۵	۶/۱۴

در جداول ۴ و ۵ شرایط عملیاتی جریان‌های فرایند PRICO در دو حالت فشار بالا و پایین شامل دما، فشار، جریان مولی و همچنین اکسرژی جریانات آورده شده است.

جدول ۴- شرایط عملیاتی جریان‌های فرایند PRICO در حالت فشار بالا

Stream NO.	Temperature (°C)	Pressure (Kpa)	Flow (Kmol/hr)	Mass Exergy (Kj/Kg)
۱	۴۴	۲۵۰	۲۳۶	۶۷/۴۹
۲	۱۱۱/۸	۸۷۵	۲۳۶	۱۷۷/۵
۳	۴۷	۸۲۵	۲۳۶	۱۵۳/۲
۴	۴۷	۸۲۵	۲۳۶	۱۵۳/۲
۵	۴۷	۸۲۵	۰	۱۲/۱۶
۶	۱۱۸/۸	۲۸۸۸	۲۳۶	۲۵۸/۶
۷	۴۷	۲۸۳۸	۲۳۶	۲۲۱/۴
۸	۴۷	۲۸۳۸	۱۸۹/۸	۲۸۸/۵
۹	۴۷	۲۸۳۸	۴۶/۲	۵۳/۷۱
۱۰	۴۷	۲۸۳۹	۴۶/۲	۵۳/۷۱
۱۱	۴۷	۲۸۳۸	۲۳۶	۲۲۱/۴
۱۲	-۱۴۳	۲۷۳۸	۲۳۶	۴۲۶/۵
۱۳	-۱۴۷/۶	۳۵۰	۲۳۶	۴۱۵/۵
۱۴	۴۴	۲۵۰	۲۳۶	۶۷/۴۹
۱۵	۴۴	۲۵۰	۰	۸/۸۸۲
NG	۴۳/۵۲	۷۹۴۵	۷۸/۱۱	۵۹۶/۲
NG1	-۱۴۱/۲	۲۷۶۱	۷۸/۱۱	۹۰۴
PRE LNG	-۱۶۳	۱۰۰	۷۸/۱۱	۵۹۶/۴
Fuel Gas	-۱۶۳	۱۰۰	۱۳/۲۹	۱۹۷/۷
LNG	-۱۶۳	۱۰۰	۶۴/۸۲	۱۰۰۴

جدول ۵- شرایط عملیاتی جریان‌های فرایند PRICO در حالت فشار پایین

Stream NO.	Temperature (°C)	Pressure (Kpa)	Flow (Kmol/hr)	Mass Exergy (Kj/Kg)
۱	۴۴	۲۵۰	۲۳۶	۶۷/۴۹
۲	۱۱۸	۸۷۵	۲۳۶	۱۸۰/۷
۳	۴۷	۸۲۵	۲۳۶	۱۵۳/۲
۴	۴۷	۸۲۵	۲۳۶	۱۵۳/۲
۵	۴۷	۸۲۵	۰	۱۲/۱۶
۶	۱۲۴/۴	۲۸۸۸	۲۳۶	۲۶۱/۸
۷	۴۷	۲۸۳۸	۲۳۶	۲۲۱/۴
۸	۴۷	۲۸۳۸	۱۸۹/۸	۴۶/۲
۹	۴۷	۲۸۳۸	۲۸۸/۵	۵۳/۷۱
۱۰	۴۷	۲۸۳۹	۴۶/۲	۵۳/۷۱
۱۱	۴۷	۲۸۳۸	۲۳۶	۲۲۱/۴
۱۲	-۱۴۳	۲۷۳۸	۲۳۶	۴۲۶/۵
۱۳	-۱۴۷/۶	۳۵۰	۲۳۶	۴۱۵/۵
۱۴	۴۴	۲۵۰	۲۳۶	۶۷/۴۹
۱۵	۴۴	۲۵۰	۰	۸/۸۸۲
NG	۲۰/۳	۲۸۶۱	۷۸/۱۱	۴۶۷/۳
NG1	-۱۴۲/۸	۲۷۶۱	۷۸/۱۱	۹۱۴/۵
PRE LNG	-۱۶۳/۱	۱۰۰	۱۲/۴۵	۸۸۱/۸
Fuel Gas	-۱۶۳/۱	۱۰۰	۶۵/۶۶	۱۹۶/۸
LNG	-۱۶۳/۱	۱۰۰	۷۳/۵۱	۱۰۱۰

### مصرف ویژه انرژی و ضریب عملکرد

فرایندهای مایع‌سازی گاز طبیعی انرژی زیادی به خود اختصاص می‌دهند، لذا تحقیقات به سمت بهبود کارایی متمرکز شده است. مصرف ویژه انرژی یا SEC را در کارخانه‌های LNG باید کاهش داد. مصرف ویژه انرژی همان نسبت میزان انرژی مصرفی در دستگاه‌های فرآیند مانند کمپرسورها، پمپ‌ها و کولرهای هوایی برحسب Kwh به میزان محصول LNG تولیدی برحسب Kg تعریف می‌گردد. هرچه این شاخص کوچک‌تر باشد، فرآیند بازده بالاتری دارد. برای فرایندهای تک‌مرحله‌ای مبرد آمیخته مصرف ویژه انرژی در محدوده  $(۰/۳۱-۰/۴۲)$  Kwh/kgLNG است [۱۲].

$$SEC = \frac{W_{total}}{m^0_{LNG}} \quad (۱)$$

$W_{total}$  کل انرژی فشرده‌سازی و  $m^0_{LNG}$  دبی گاز طبیعی مایع تولیدی است.

عملکرد سیستم‌های تبرید بر اساس ضریب عملکرد مشخص می‌شود. ضریب عملکرد یا COP شاخص معین و استاندارد برای تجزیه و تحلیل بازده چرخه‌های تبرید و پمپ‌های حرارتی است. این شاخص برای یک چرخه

سردسازی مورد استفاده در صنایع گاز معمولاً مقداری بین ۰/۸ تا ۴ دارد. ضریب عملکرد را می توان نسبت مجموع گرمای گرفته شده از منبع سرد به کل کار مصرفی در چرخه نامید [۳].

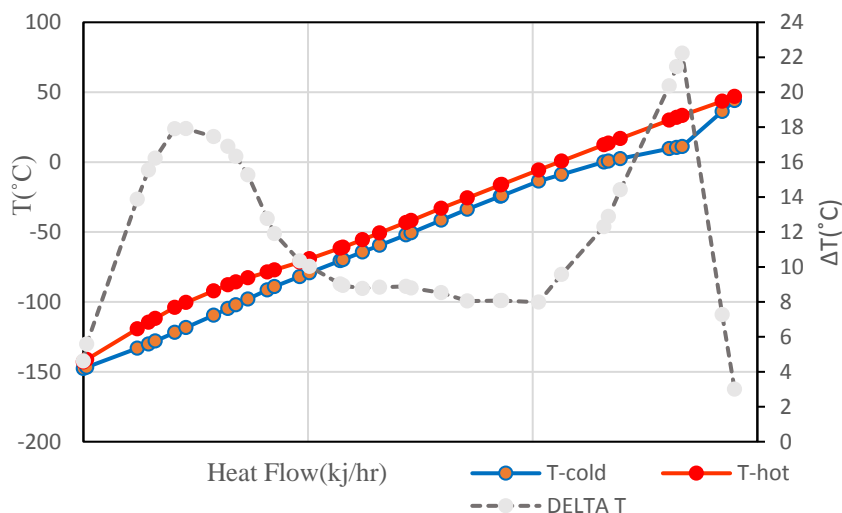
$$\beta = \text{COP} = \frac{Q_c}{W} \quad (2)$$

در مورد چرخه های مایع سازی گاز طبیعی، منبع سرد میرد بوده و کار در کمپرسورهای بخش تراکم و کولرهای هوایی مصرف می شود. هرچه این ضریب عملکرد بزرگ تر باشد، به ازای مقدار معینی از کار مصرفی در کمپرسورها، پمپ ها و کولرهای هوایی گرمای بیشتری از گاز طبیعی گرفته می شود و نهایتاً بازده چرخه افزایش می یابد [۳]. در جدول ۶ مصرف ویژه انرژی که تابع هدف این تحقیق بوده است، آورده شده است. در حالت فشار بالا این ضریب کم ترین مقدار را دارد و نسبت به مقدار مرجع ۲۲٪ کاهش را نشان می دهد. هم چنین کار مصرفی و ضریب عملکرد هم بهترین حالت را دارند.

جدول ۶- نتایج اعتبار سنجی

Parameters	High Pressure	Low Pressure	Ref [3]
SEC (Kwh/Kg LNG)	۰/۳۱۶	۰/۳۹۶	۰/۴۱
COP	۳/۱۲	۲/۸۱	۲/۷
Total work (Kwh)	۳۹۸/۱	۵۰۲/۱	۶۱۶/۵

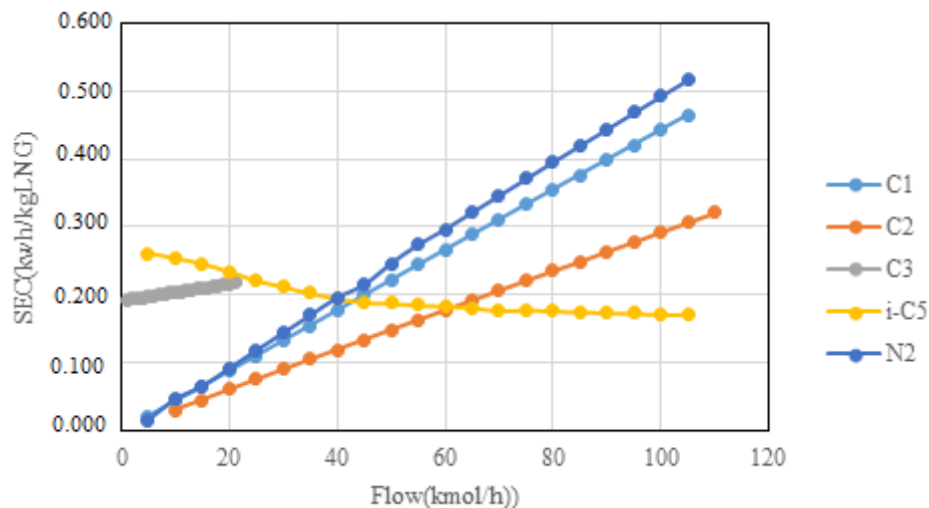
در حالت فشار بالا نسبت به فشار پایین منحنی جریان سرد و گرم به یکدیگر نزدیک تر است و این یعنی مبدل در این حالت عملکرد مناسب تری دارد. همان طور که مشاهده می شود حداقل اختلاف دما طی روند بهینه سازی در مبدل حرارتی  $\Delta T_{\min} \geq 3$  است که صحت روند بهینه سازی را نشان می دهد.



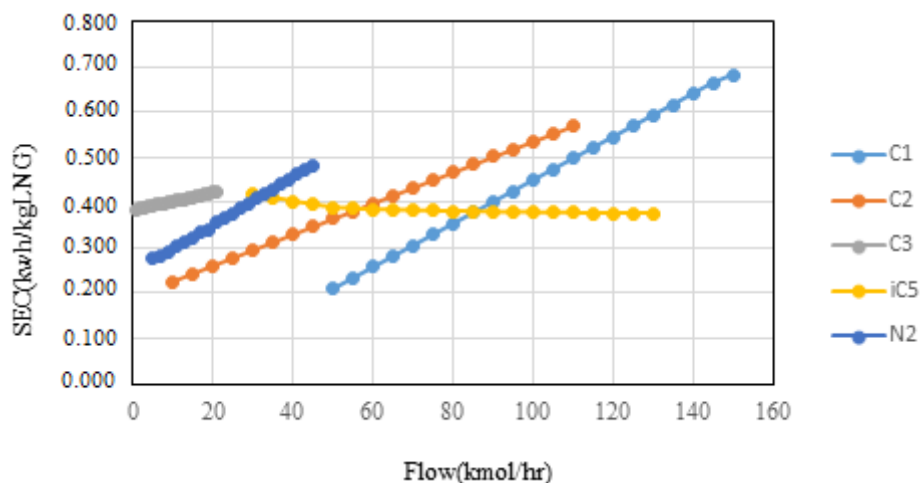
شکل ۳- نمودار منحنی ترکیبی

آنالیز حساسیت در دو حالت فشار بالا و پایین در شکل های ۴ و ۵ آورده شده است. هر چه دبی مولی متان، اتان، پروپان و نیتروژن در ترکیب میرد افزایش یابد مصرف ویژه انرژی هم افزایش می یابد. علاوه بر آن بهتر است درصد ایزوپنتان در میرد بالا باشد تا بتوان به کم ترین مصرف ویژه انرژی رسید.





شکل ۴- آنالیز حساسیت برای حالت فشار بالا



شکل ۵- آنالیز حساسیت برای حالت فشار پایین

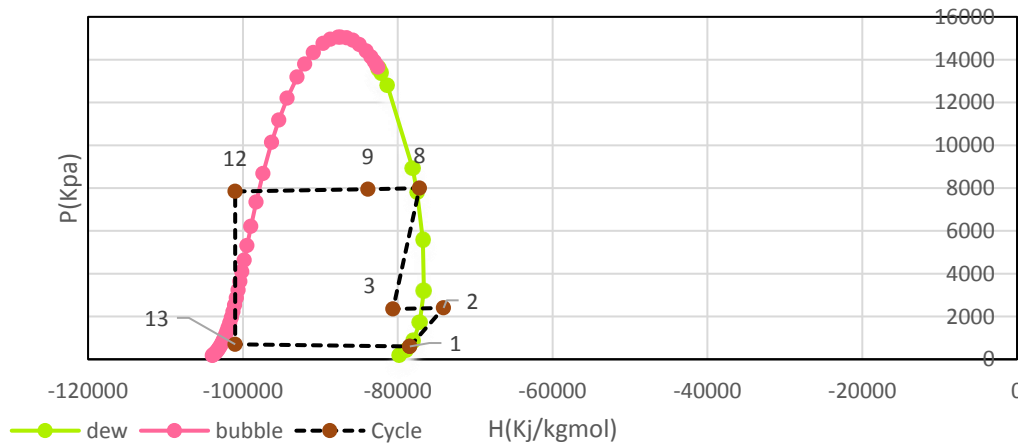
فشار خروجی از شیر فشارشکن اول و کمپرسورها بررسی شد و نتیجه هر دو افزایش فشار میعان تبرید است و اثر کاهش فشار تبخیر بر روی درجه حرارت کم‌تر تأثیرگذار است، وجود این دو محدودیت باعث افزایش کار شفت مورد نیاز در چرخه شده است. در جدول زیر فشارهای خروجی از کمپرسورها و شیر فشارشکن آورده شده است.

جدول ۷- نتایج مقایسه فشارهای خروجی از کمپرسورها و شیر فشارشکن

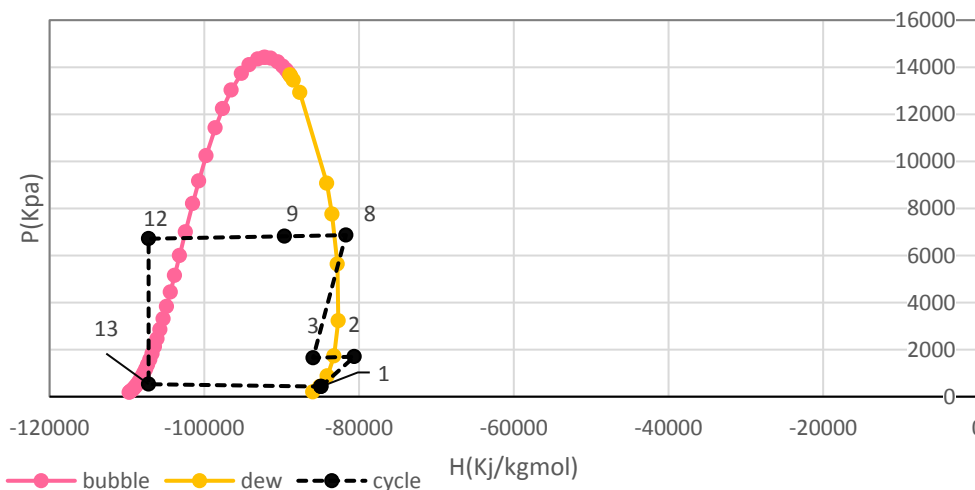
Outlet Pressure (bar)	High pressure	Low pressure
C-1	۲۴	۱۷
C-2	۷۹/۹۵	۶۸/۶۵
VLV-1	۷	۵/۳

در نمودارهای فشار آنتالپی و دما آنتروپی، جریان مبرد (MR) تقریباً بخار است و وارد کمپرسور شماره ۱ می‌شود و فشار آن افزایش می‌یابد و جریان شماره ۲ به حالت سوپرهیت می‌رسد و در منطقه سوپرهیت قرار می‌گیرد. جریان شماره ۳ که از کولر هوایی ۱ می‌گذرد در منطقه دوفازی قرار می‌گیرد و در فشار ثابت آنتالپی آن کاهش می‌یابد و

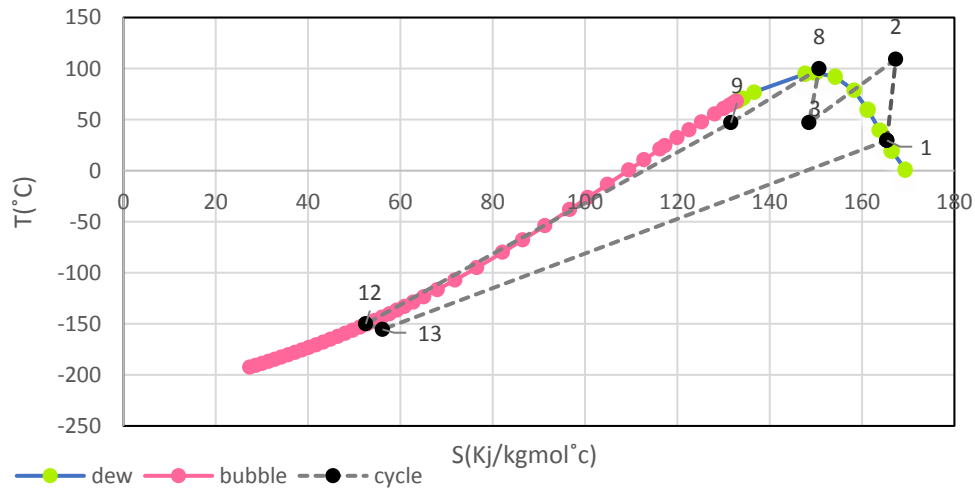
بعد از عبور از جداکننده و کمپرسور دوم و مخلوط شدن در مخلوط کننده با افزایش فشار به جریان ۸ می‌رسیم که تقریباً روی خط بخار قرار می‌گیرد. جریان شماره ۹ بعد از گذشتن از کولر هوایی دوم با مقدار کمی کاهش فشار و کاهش آنتالپی به حالت دوفازی می‌رسد و جریان شماره ۱۲ بعد از عبور از مبدل حرارتی به منطقه مایع فوق سرد می‌رسد و تقریباً مایع‌سازی در حال رخ دادن است. جریان شماره ۱۳ با افت فشار زیاد بعد از گذشتن از شیر فشارشکن ۱ به منطقه دوفازی می‌رسد و باز به جریان شماره ۱ که حالت بخار دارد، می‌رسد و این‌گونه چرخه تکمیل می‌شود. از مقایسه دو حالت فشار بالا و پایین نتیجه می‌گیریم که هرچقدر فشار را کاهش دهیم آنتالپی نیز کاهش می‌یابد. در نمودارهای دما آنتروپی، تغییرات آنتروپی مبرد آمیخته برحسب دما در طول مسیر چرخه به صورت شماتیک مشخص می‌شود، هم‌چنین مقدار انحرافی که از حالت ایده‌آل می‌تواند داشته باشد، دیده می‌شود.



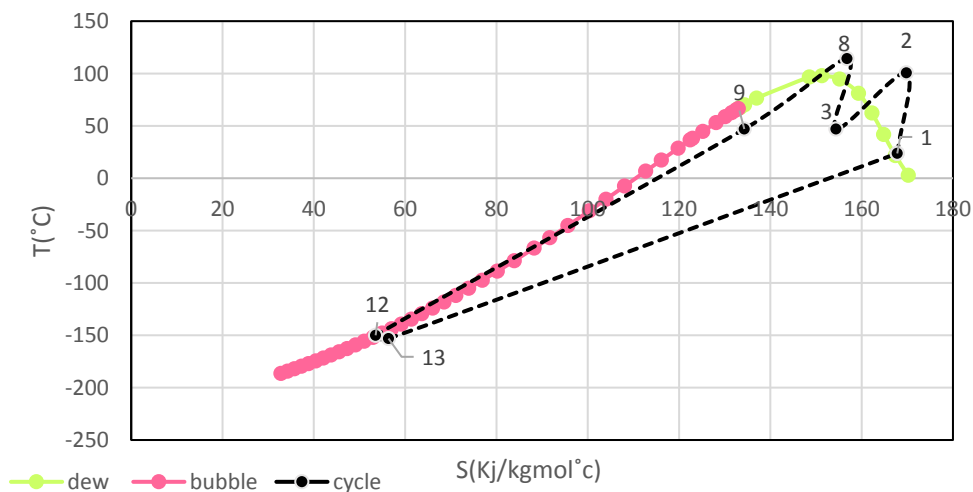
شکل ۶- نمودار فشار آنتالپی برای حالت فشار بالا



شکل ۷- نمودار فشار آنتالپی برای حالت فشار پایین



شکل ۸- نمودار دما آنتروپی برای حالت فشار بالا



شکل ۹- نمودار دما آنتروپی برای حالت فشار پایین

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Aspen Hysys چرخه مایع‌سازی فرایند PRICO که شامل دو کمپرسور و یک مبدل حرارتی که قلب فرایند است، شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی در دو حالت فشار بالا (۷۹۴۵ Kpa) و فشار پایین (۲۸۶۱ Kpa) گاز طبیعی انجام شد. هدف از انتخاب این دو فشار مقایسه بین فشار بالا (فشار خط لوله) و فشار پایین (فشار مقاله مرجع) است. در چرخه فرایند PRICO با افزایش فشار گاز طبیعی ورودی مقدار تولید LNG افزایش می‌یابد که علت آن افزایش نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی است. با افزایش دمای گاز ورودی مقدار تولید LNG کاهش می‌یابد. تابع هدف کمینه کردن مصرف ویژه انرژی فرایند است که در حالت فشار بالا (بهترین حالت) مصرف ویژه انرژی ۰/۳۱۶ Kwh/kgLNG به دست آمد که نسبت به مرجع ۲۲٪ کاهش مصرف ویژه انرژی را نشان می‌دهد. علاوه بر آن ضریب عملکرد هم مورد بررسی قرار گرفت که در بهترین حالت یا همان فشار بالا به ۳/۱۲ رسید. هم‌چنین نمودار منحنی ترکیبی جریان‌ات سرد و گرم در مبدل حرارتی تحلیل شد و نتیجه گرفته شد که هر چه منحنی جریان‌ات سرد و گرم به یکدیگر نزدیک‌تر باشند مبدل عملکرد بهتری را داراست. حداقل اختلاف دمای بین جریان سرد و گرم بزرگ‌تر از ۳ درجه سلسیوس است که صحت روند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. با مقایسه دو نمودار P-H

در حالت فشار بالا و پایین نتیجه گرفته شد که هرچقدر فشار کاهش یابد، آنتالپی نیز کاهش می‌یابد و در نمودار T-S می‌توان دریافت که افزایش آنتروپی متعلق به کمپرسورهاست و این نشان‌دهنده تولید آنتروپی در آنهاست که باعث از بین رفتن کار مفید و هدر رفت انرژی می‌شود. علاوه بر آن با منحنی‌های آنالیز حساسیت در دو حالت فشار بالا و پایین نتیجه گرفته شد که هر چه دبی مولی متان، اتان، پروپان و نیتروژن در ترکیبات مبرد کاهش و ترکیب ایزوپنتان افزایش یابد مصرف ویژه انرژی در هر دو حالت کاهش می‌یابد.

### قدردانی

نویسندگان مایل‌اند از حمایت‌های مالی دانشگاه سیستان و بلوچستان قدردانی کنند.

### فهرست علائم

LNG	گاز طبیعی مایع شده
PRICO	عملیات سیکل یکپارچه چند مبردی
GTL	گاز طبیعی تبدیل به فراورده‌های نفتی مایع
SEC	مصرف ویژه انرژی
COP	ضریب عملکرد

- [1] Mokhatab S, Y. Mak J, V. Valappil J, D A. Wood; Handbook of Liquefied Natural Gas, Gulf Professional Publishing, ISBN 978-0-12-404585-9, <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07476-8>, 2014.
- [2] Rivera V, Aduku A, Harris O; Evaluation of LNG technologies. The University of Oklahoma. 2008.
- [3] Vatani, Ali, Study of natural gas liquefaction technologies and technology selection based on the ability to increase the scale and perform the selected conceptual technology design. National Iranian Gas Company, University of Tehran, 2016.
- [4] Al-Sobhi S, Alfadala H, & El-Halwagi M M; Simulation and Energy Integration of a liquefied Natural gas (LNG) Plant. In H. Alfadala, G. Reklaitis, & M. M. El-hallway (Eds.), Advances in Gas Processing: Proceedings of the 1st International Gas Processing Symposium, 2009, pp. 131–135, DOI:10.1016/B978-0-444-53292-3.50018-3.
- [5] Aspelund A, Gundersen T, Myklebust J, Nowak MP, Tomasgard A; An optimization-simulation model for a simple LNG process, Computers and Chemical Engineering 34 (2010), pp. 1606–1617, DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.10.018.
- [6] Xu X, Liu J, Cao L; Optimization and analysis of mixed refrigerant composition for the PRICO natural gas liquefaction process. Cryogenics, Volume 59, 2014, pp. 60-69, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.11.001>.
- [7] Venkatarathnam G, Timmerhaus KD, Carlo Rizzuto; Cryogenic Mixed Refrigerant Processes, New York: Springer; 2008, International Cryogenics Monograph Series, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78514-1>, eBook ISBN 978-0-387-78514-1.
- [8] Chunhe J, Yilong Y, Heechang S, Youngsub L; Novel propane-free mixed refrigerant integrated with nitrogen expansion natural gas liquefaction process for offshore units, Energy, Volume 238, Part A, 2022, 121765, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121765>
- [۹] نیلوفری، علی، ۱۳۹۹، شبیه‌سازی پویا و کنترل چرخه سردسازی مبرد آمیخته جهت تولید گاز طبیعی مایع، پنجمین همایش بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و HSE، همدان
- [10] Fernando Almeida-Trasvina, Robin Smith, and Megan Jobson; Development of an Energy-Efficient Single Mixed Refrigerant Cycle for Small-Scale LNG Production, Industrial & Engineering Chemistry Research, July 2021, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00432>.
- [11] Lucas F. Santos, Caliane B. B. Costa, José A. Caballero & Mauro A. S. S. Ravagnani; Design and optimization of energy-efficient single mixed refrigerant LNG liquefaction process, Brazilian Journal of Chemical Engineering, volume 38, pp. 669–682 (2021), <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00111-8>.
- [12] Nikkho S, Abbasi M, Zahirifar J, Saedi M, Vatani A. Energy and exergy investigation of two modified single mixed refrigerant processes for natural gas liquefaction. Computers & Chemical Engineering. Volume 140, September 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106854>.