

# بهینه‌سازی چند هدفه و تحلیل اکسرژی فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد آمیخته

سمیرا احمدی و محمدرضا جعفری نصر\*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۶/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۸/۸/۲۵

## چکیده

مبرد آمیخته در فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی به صورت وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد و این امر باعث می‌شود تا بهینه‌سازی پارامترهای اثرگذار در این فرآیند مهم باشد. در این پژوهش یک فرآیند پریکو با مبرد آمیخته به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رتبه‌بندی نامغلوب ۲ بهینه‌سازی شده است. در این بهینه‌سازی انرژی مصرفی و سطح مبدل حرارتی به صورت هم‌زمان بهینه شدند تا اثر نامطلوب افزایش سطح مبدل حرارتی ناشی از بهینه‌سازی تک هدفه انرژی مصرفی که در مقالات پیشین مشاهده شد، برطرف شود. دبی‌های مولی ترکیبات مبرد آمیخته شامل متان، اتیلن، پروپان، ایزوپنتان و نیتروژن، فشار جریان‌های خروجی از کمپرسور اول و دوم و فشار جریان خروجی از شیرفشارشکن چرخه سردسازی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. همچنین توابع هدف در نظر گرفته شده نسبت به متغیرهای بهینه‌سازی تحلیل حساسیت شدند. جواب‌های بهینه‌سازی به صورت مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به نام جبهه بهینه پارتو ارائه شدند که نتایج آن، تضاد دو تابع هدف را به خوبی نشان می‌دهند. در ادامه نتایج بهینه‌سازی چندهدفه با نتایج کمینه‌سازی تک هدفه انرژی مصرفی مقایسه شدند. نتایج مقایسه نشان می‌دهند که سطح مبدل حرارتی در بهینه‌سازی چندهدفه به میزان ۵۴٪ نسبت به بهینه‌سازی تک‌هدفه (کمینه‌سازی انرژی) کاهش یافته است.

**کلمات کلیدی:** مایع‌سازی گاز طبیعی، فرآیند پریکو، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه، تحلیل اکسرژی

## مقدمه

پروژه‌های صنعت گاز همواره از اهمیت ویژه‌ای در صنعت برخوردار است. ارسال گاز طبیعی از طریق خط لوله، خصوصاً در مسافت‌های طولانی و به ویژه مناطق صعب‌العبور و کف دریا، بسیار هزینه‌بر و گران خواهد بود. از این رو یکی از راه‌های غلبه بر این مشکل، تبدیل گاز طبیعی به گاز طبیعی مایع است. انتقال و حمل و نقل گاز طبیعی مایع از طریق کشتی و یا تانکر انجام می‌شود [۱]. مایع‌سازی گاز طبیعی توسط یک چرخه سردسازی با مبرد صورت

گاز طبیعی سوختی پاک و ارزان است که در دهه‌های اخیر به دلیل آلودگی زیست محیطی کمتر، مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به اینکه ایران دومین کشور از لحاظ دارا بودن مخازن گازی است، پیشرفت و توسعه در

می‌گیرد. فرآیندهای مایع‌سازی به دلیل ایجاد برودت موردنیاز جهت میعان گاز طبیعی، بسیار انرژی‌بر بوده و نیازمند بهینه‌سازی‌های مختلف است. چرخه مبرد آمیخته تک مرحله‌ای<sup>۱</sup> به دلیل سادگی، کاهش تجهیزات، هزینه و راندمان بالا مورد توجه بسیاری از محققان بوده است.

تاکنون پایان‌نامه‌ها و مقالات متعددی در زمینه بررسی فرآیندهای مایع‌سازی گاز طبیعی انجام شده است. تعدادی از مقالات با انجام تحلیل‌های حساسیت و اکسرژی و بهینه‌سازی، انرژی مصرفی را کاهش دادند. اسلم‌بخش [۲] به بهینه‌سازی انرژی فرآیند پریکو و فرآیند انبساطی-نیتروژن پرداخت و با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک، انرژی مصرفی فرآیند پریکو و فرآیند انبساطی-نیتروژن را به ترتیب ۵۸٪ و ۷۴٪ کاهش داد و نتیجه گرفت فرآیند پریکو به‌منظور بهینه‌سازی انرژی مصرفی مناسب‌تر است. اسپلند و همکاران [۳] فرآیند پریکو را در نرم‌افزار اسپن‌هایسیس<sup>۲</sup> در حالت‌های مختلف، شبیه‌سازی کردند و از روش سرچ‌تابو<sup>۳</sup> جهت بهینه‌سازی بهره‌بردند و انرژی مصرفی را نسبت به حالت اولیه ۳۶-۲۳٪ بهبود دادند.

مکاری‌زاده و مولا [۴] به‌منظور بهینه‌سازی عملیاتی فرآیند پریکو از الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> بهره‌بردند. همچنین به‌وسیله تحلیل اکسرژی<sup>۵</sup> میزان برگشت‌ناپذیری تجهیزات را محاسبه نمودند و به انرژی مصرفی ۱۰۹۲ kW.h/kgLNG دست یافتند. عبدالکریم و همکاران [۵] به بهینه‌سازی فرآیند مبرد آمیخته با پیش‌سرماسازی پروپان<sup>۶</sup> پرداختند و توانستند به کمک بهینه‌سازی به ۱۳/۲۸٪ و ۱۷/۱۶٪ ذخیره انرژی در چرخه سردسازی و چرخه پروپان دست یابند. هچر و همکاران [۶] ۴ تابع هدف مختلف به‌منظور بهینه‌سازی عملیاتی فرآیند پیش‌سرماسازی با پروپان<sup>۷</sup> در نظر گرفتند و پس از انجام بهینه‌سازی و بررسی نتایج، به این نتیجه رسیدند که بهترین تابع هدف، مجموع

انرژی مصرفی کمپرسورها است. خان و همکاران [۷] روی ترکیبات بهینه مبرد آمیخته بحث کردند و مجموع انرژی مصرفی کمپرسورهای فرآیند مبرد آمیخته تک مرحله‌ای را کاهش دادند. ول و همکاران [۸] فرآیند پریکو مورد مطالعه در مقاله اسپلند را شبیه‌سازی کردند و از روش SQP جهت بهینه‌سازی استفاده نمودند. نتایج بهینه‌سازی حالت‌های مختلف در مقایسه با مقاله پیشین بهبود پیدا کرده و حدود ۱٪ الی ۴٪ صرفه‌جویی انرژی به همراه داشت و همچنین زمان دستیابی به مقادیر بهینه کوتاه گردید. ژو و همکاران [۹] به یافتن درصد ترکیبات بهینه مبرد در شرایط مختلف محیطی پرداختند و مشخص شد با افزایش دمای محیط جهت دستیابی به مقدار بهینه انرژی مصرفی، درصد مولی ترکیبات سنگین افزایش می‌یابد. ژو و همکاران [۱۰] شبیه‌سازی فرآیند پریکو را در نرم‌افزار Aspen Plus انجام دادند و از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی فرآیند استفاده کردند و به بررسی اثر درصد ترکیبات مبرد بر منحنی‌های مرکب گرم و سرد<sup>۸</sup> و محل نقطه پینچ پرداختند. موروک و همکاران [۱۱] به بررسی اکسرژی فرآیند پریکو پرداختند. تحلیل اکسرژی نشان داد که اثرگذارترین تجهیز از نقطه نظر ترمودینامیکی و اقتصادی، مبدل حرارتی است و با بهبود ترمودینامیکی آن (کاهش اختلاف دمای منحنی‌های مرکب گرم و سرد و افت فشار حین مبادله حرارتی) عملکرد فرآیند به مقدار چشم‌گیری بهبود می‌یابد. نا و همکاران [۱۲] به ارائه الگوریتمی برای بهینه‌سازی پرداختند و مصرف انرژی فرآیند پریکو را ۱۸/۹٪ کاهش دادند.

اسلم‌بخش و همکاران [۱۳] به بهینه‌سازی تک هدفه سود حاصل از فرآیند پریکو پرداختند و

1. Single Mixed Refrigerant (SMR)
2. Aspen HYSYS
3. Tabu Search
4. Genetic Algorithm (GA)
5. Exergy Analysis
6. Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant
7. C3/MCR
8. Composite Curves

اول و دوم و فشار جریان خروجی از شیرفشارشکن چرخه سردسازی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. همچنین توابع هدف در نظر گرفته شده نسبت به متغیرهای بهینه‌سازی تحلیل حساسیت شدند.

### شرح فرآیند

هسته اصلی فرآیند پریکو و به طور کل فرآیندهای سردسازی، مبدل حرارتی است. در مبدل حرارتی، حرارت توسط جریان کم فشار مبرد (جریان خروجی از شیر فشارشکن، جریان ۱۱) از گاز (جریان NG) و جریان پرفشار مبرد (جریان ۹) دریافت می‌شود تا برودت لازم جهت میعان گاز طبیعی و مبرد پرفشار تأمین گردد. مبرد طی عبور از دو کمپرسور، فشرده شده و به حداکثر دما و فشار (جریان ۶) می‌رسد. از کولر هوایی جهت خنک نمودن و کاهش دمای مبرد استفاده شده است.

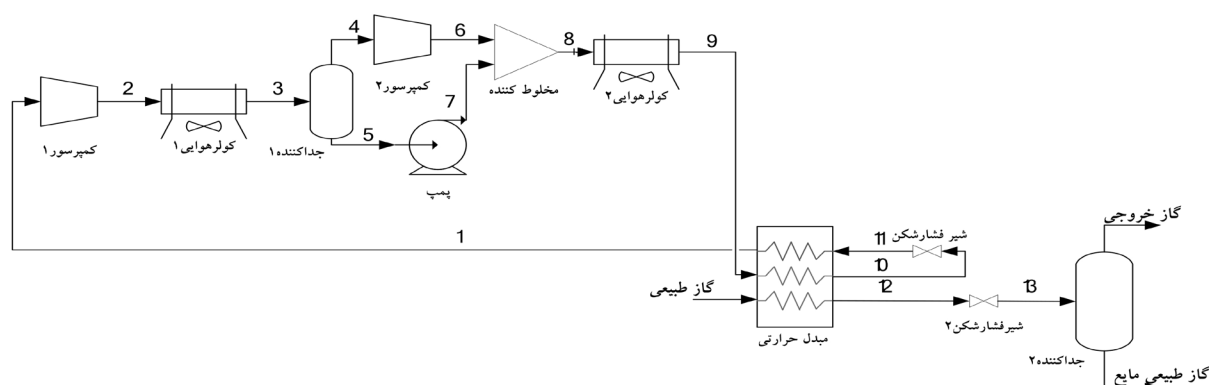
سپس مبرد به عنوان جریان گرم (جریان ۹) وارد مبدل حرارتی شده و حرارت خود را از دست داده، مایع می‌گردد و به دمای  $160^{\circ}\text{C}$  می‌رسد (جریان ۱۰). با توجه به اینکه ضریب ژول تامسون مبرد مثبت است، عبور از شیر فشارشکن باعث کاهش فشار و دمای مبرد می‌گردد. سپس جریان مبرد خروجی از شیر فشارشکن (جریان ۱۱)، وارد مبدل حرارتی شده و حرارت را از دو جریان دیگر دریافت می‌کند و دمای آن افزایش می‌یابد. گاز طبیعی در مبدل حرارتی نیز حرارت خود را از دست داده و دمای آن به  $160^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌یابد.

در این فرآیند به منظور خنک نمودن جریان مبرد در چرخه سردسازی از کولرهای هوایی استفاده می‌شود. گاز طبیعی مایع در فشار اتمسفریک است، بنابراین در مسیر خروجی گاز طبیعی، از شیر فشار شکن جهت کاهش فشار استفاده می‌شود. شماتیکی از فرآیند پریکو در شکل ۱ نشان داده شده است.

توانستند انرژی مصرفی فرآیند و سطح تبادل حرارت مبدل را به ترتیب  $59\%$  و  $37/5\%$  کاهش دهند.

تعدادی از مقالات به تغییرات ساختاری و چیدمان تجهیزات به منظور ذخیره انرژی پرداختند. عبداللهی [۱۴] با تغییر آرایش مبدل‌های حاصل درون جعبه تبرید و تعبیه توربین به جای شیر فشارشکن، هدر رفت اکسرژی کل فرآیند را به میزان  $10/18\%$  کاهش داد. حسینی [۱۵] پیکربندی جدیدی برای تولید هم‌زمان LNG و NGL ارائه داد و مصرف انرژی را به حداقل  $(0/42 \text{ kWh/kgLNG})$  رساند. کامالی‌نژاد [۱۶] روی اصلاح ساختار چرخه‌های سرمایه‌های عمیق چندطبقه‌ای و چندجزئی واحدهای گاز طبیعی مایع، به‌منظور کاهش مصرف انرژی پرداخت و مواردی از جمله فشار مکش کمپرسور، درصد ترکیبات مبرد و چیدمان کمپرسورها را تغییر داد و به صرفه‌جویی بالغ بر  $7/1\%$  دست یافت. نویجاری [۱۷] با ارائه یک فرآیند جدید با ادغام سامانه‌های سرمایه‌های جذبی آب-آمونیاک با فرآیندهای تولید گاز طبیعی مایع، به کاهش  $20\%$  مصرفی برق دست یافت. وطنی و همکاران [۱۸] پیکربندی جدیدی برای یکپارچه‌سازی تولید LNG و NGL معرفی نمودند که مصرف انرژی بسیار پایینی  $(0/414 \text{ kWh/kgLNG})$  داشت. قیوم و همکاران [۱۹] با تغییر شیرفشار شکن به توربین هیدرولیکی در چرخه سردسازی مبرد، توانستند به ذخیره انرژی  $16/5\%$  دست یابند.

در این پژوهش یک فرآیند پریکو با مبرد آمیخته به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رتبه‌بندی نامغلوب ۲ بهینه‌سازی شده است. در این بهینه‌سازی، انرژی مصرفی و سطح مبدل حرارتی به صورت هم‌زمان بهینه شدند تا اثر نامطلوب افزایش سطح مبدل حرارتی ناشی از بهینه‌سازی تک هدفه انرژی مصرفی که در مقالات پیشین مشاهده شد، برطرف شود. دبی‌های مولی ترکیبات مبرد آمیخته شامل متان، اتیلن، پروپان، ایزوپنتان و نیتروژن، فشار جریان‌های خروجی از کمپرسور



شکل ۱ طرح شماتیکی از فرآیند پریکو [۹] با کولر هوایی

درصد ترکیبات گاز طبیعی و گاز مایع، دبی جرمی، دما و فشار جریان گاز طبیعی ورودی و گاز مایع خروجی که در جدول ۱ آورده شده است، همواره در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی‌ها ثابت بودند و تغییر نکردند. دمای خروجی جریان مبرد و گاز طبیعی

مایع از مبدل، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. دمای هوای ورودی به کولرهای هوایی  $30^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شد. حداقل دمای خروجی مبرد از کولر هوایی  $40^{\circ}\text{C}$  است. پارامترهای ثابت فرآیندی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ مشخصات جریان ورودی گاز طبیعی و محصول گاز طبیعی مایع [۹]

پارامتر	گاز طبیعی	گاز طبیعی مایع
دبی جرمی (kg/h)	۳۶۰۰	۳۳۳۲
دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	۴۰	-۱۶۶
فشار (bar)	۵۰	۱/۰۱۳
درصد مولی متان (%)	۸۷/۵	۸۹/۳
درصد مولی اتان (%)	۵/۵	۵/۸۸
درصد مولی پروپان (%)	۲/۱	۲/۲۵
درصد مولی ایزو بوتان (%)	۰/۳	۰/۳۲
درصد مولی نرمال بوتان (%)	۰/۵	۰/۵۴
درصد مولی ایزو پنتان (%)	۰/۱۰	۰/۱۱
درصد مولی نیتروژن (%)	۴	۱/۶۰

جدول ۲ پارامترهای ثابت فرآیند در بهینه‌سازی

مقادیر	موارد
۰/۷۸	راندمان آدیپاتیک کمپرسور [۹]
۳	حداقل دمای نزدیکی مبدل $1^{\circ}\text{C}$ [۹]
۰/۵	افت فشار در مبدل (bar) [۹]
صفر	اتلاف حرارت مبدل [۹]
-۱۶۰	دمای جریان‌های گرم خروجی مبدل ( $^{\circ}\text{C}$ ) [۹]
۳۰	دمای هوای ورودی به کولرهای هوایی ( $^{\circ}\text{C}$ )
۴۰	دمای خروجی مبرد از کولرهای هوایی ( $^{\circ}\text{C}$ ) [۲۰]
۰/۵	افت فشار در کولرهای هوایی (bar) [۲۰]

می‌باشند. لازم به ذکر است که برای مسئله تک هدفه ماتریس  $f(x)$  یک درایه دارد و برای مسائل چند هدفه به تعداد توابع هدف درایه دارد. هنگامی که نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک محدودیت‌های مسأله را رعایت نکند، برای در نظر گرفتن اثر نقض قیود در حین فرآیند بهینه‌سازی یک مقدار دلخواه بزرگ که به تابع جریمه مشهور است به تابع هدف افزوده می‌شود. بنابراین تابع هدف مسئله به صورت رابطه زیر اصلاح می‌گردد [۲۲]:

$$\text{Minimise } f(x) = f(x) + \sum_{j=1}^m R_j (c_j(x))^2 \quad (3)$$

$R_j$  پارامتر جریمه است که در مقایسه با  $f(x)$  دارای مقدار نسبتاً بزرگی است و  $c_j(x)$  مقدار انحراف از قیود است.

#### بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه که کاملاً تصادفی است و براساس تابع هدف تعیین شده برای مسئله ارزیابی می‌گردد، یک جستجوی سرتاسری را آغاز می‌کند و سپس با ترکیب معیارهای انتخاب، هم‌گذری<sup>۲</sup> و جهش<sup>۳</sup> از نقاط اکسترمم محلی، جهت یافتن بهترین جواب استفاده می‌کند. مسئله بهینه‌سازی شامل حداکثر یا حداقل کردن همزمان یک یا چند تابع هدف با تعدادی قیود تساوی و غیرتساوی هستند. در الگوریتم چندهدفه نسبت به نوع تک هدفه آن، دو مرحله مرتب‌سازی نامغلوب و محاسبه پارامتر کنترلی فاصله جمعیت برای رده‌بندی جواب‌ها اضافه می‌شوند که در ادامه به‌طور مختصر توضیح داده می‌شوند.

#### جدول ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با شبیه‌سازی پیشین

پارامتر	مطالعه پیشین [۹]	مطالعه حاضر	درصد خطا (%)
بازده کمپرسور (%)	۷۸	۷۸	---
دمای خروجی از کولرها (°C)	۲۰	۲۰	---
دبی جرمی گاز طبیعی (kg/s)	۱	۱	---
انرژی مصرفی (kW)	۱۰۱۳/۵	۱۰۱۴/۲۳	۰/۰۷۲
ضریب عملکرد	۰/۷۶۲	۰/۷۶۰	۰/۲۶۲

1. Selection
2. Crossover
3. Mutation

#### اعتبارسنجی

به منظور درستی و صحت برنامه نوشته شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند مایع‌سازی در مطالعه حاضر با نتایج مطالعه پیشین که توسط ژو و همکاران [۹] انجام شد، مقایسه شده است. در مقاله ذکر شده فرآیند پریکو با نرم‌افزار اسپن هایسیس شبیه‌سازی شد. داده‌های ورودی و نتایج حاصل از دو تحقیق در جدول ۳ آورده شده است. اعداد به دست آمده از مقایسه دو مطالعه، دقت مناسب و قابل قبول شبیه‌سازی انجام گرفته توسط محققین تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. خطاهای نسبی به دست آمده برای انرژی مصرفی فرآیند و COP به ترتیب برابر ۰/۰۷۲٪ و ۰/۲۶۲٪ است.

#### بهینه‌سازی

##### بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه

صورت استاندارد مسائل بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۱]:

یافتن بردار طراحی  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  به نحوی که بردار هدف  $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T$  را با توجه به قیود زیر بهینه کند.

$k$  قید مساوی به صورت

$$g_i(x) = 0, \forall_i = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

و  $M$  قید نامساوی به صورت

$$h_j(x) \leq 0, \forall_j = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$f(x)$  تابع هدف،  $g_i(x)$  قیود نامساوی،  $h_j(x)$  قیود مساوی،  $x$  بردار ستونی از متغیرهای طراحی و  $x_{k, \min}$  و  $x_{k, \max}$  به ترتیب، کران‌های پایین و بالای متغیرهای طراحی

## بمرتب‌سازی نامغلوب

بدون از دست دادن کلیت قضیه، یک مسئله بیشینه‌سازی را که دارای دو متغیر تصمیم‌گیری  $A$  و  $B$  است، در نظر می‌گیریم.

طبق تعریف  $A$  بر  $B$  غلبه دارد در صورتی که:

$$\begin{aligned} f(A) &\leq f_i(B) \text{ برای تمامی توابع هدف} \\ f_i(A) &< f_i(B) \text{ برای حداقل یک تابع هدف} \end{aligned} \quad (۴)$$

با این تعریف، به بردار یا بردارهای ورودی که هیچ بردار ورودی دیگری بر آنها غلبه نداشته باشد، بردار ورودی غلبه نشده<sup>۱</sup> گفته می‌شود. مجموعه بردارهایی (بردارهای شامل متغیرهای طراحی) که همگی غلبه نشده باشند جبهه بهینه پارتو<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. بنابراین جواب‌های بهینه در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه جواب‌های غلبه نشده هستند. اگر با دید ریاضی به قضیه نگریسته شود الگوریتم بهینه‌سازی باید با رسیدن به اولین نقطه بهینه پارتو متوقف گردد؛ اما از آنجا که مناسب بودن جواب به دست آمده بستگی به پارامترهای مختلفی نظیر انتخاب طراح برای شرایط مختلف دارد، معمولاً به‌دست آوردن مجموعه نقاط بهینه پارتو مطلوب و به عنوان هدف در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه مدنظر قرار می‌گیرد.

فاصله ازدحام<sup>۳</sup>

برای تخمین پراکندگی جواب‌ها حول یک نقطه (جواب) خاص از جمعیت، فاصله میانگین دو نقطه در دو طرف آن نقطه خاص در راستای هر یک از توابع هدف در نظر گرفته می‌شود. مقدار فاصله ازدحامی در نقطه  $i$  برابر است با اندازه بزرگترین مکعب دربرگیرنده نقطه  $i$  که هیچ نقطه دیگری از جمعیت در آن قرار نداشته باشد. نکته مهم اینکه این فاصله برای اعضای جمعیت هر جبهه به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود و مقایسه بین فاصله‌ها نیز تنها بین اعضای جبهه‌ها، به‌طور جداگانه انجام می‌شود. باتوجه به ترکیبات موجود در فرآیند، معادله پنگ رابینسون<sup>۴</sup> جهت محاسبه خصوصیات جریان‌های فرآیندی انتخاب شد. ترکیبات مبرد

شامل متان، اتیلن، پروپان، ایزوپنتان و نیتروژن است. تابع هدف انرژی مصرفی فرآیند است که در معادله ۵ آورده شده است.

$$f_1(x) = (w_{CM1} + w_{CM2}) \quad (۵)$$

اگرچه کاهش انرژی مصرفی فرآیندی ارزشمند است، اما پیامدهایی به دنبال دارد که از آن جمله می‌توان به افزایش سطح مبدل حرارتی اشاره کرد. کاهش فاصله منحنی‌های مرکب منجر به افزایش سطح تبادل حرارت مبدل می‌شود که به خصوص در فرآیندهای دور از ساحل<sup>۵</sup> متغیر بسیار مهمی محسوب می‌گردد [۶]. بنابراین جهت بهینه‌سازی هم زمان انرژی مصرفی و سطح تبادل حرارت مبدل لازم است از بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۶</sup> الگوریتم ژنتیک استفاده شود. برای این منظور از دستور الگوریتم ژنتیک چندهدفه<sup>۶</sup> در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. تابع هدف دوم به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$f_2(x) = UA_{HE} \quad (۶)$$

که ضریب انتقال حرارت بر واحد سطح  $U$  ثابت و برابر  $700 \frac{kJ}{m^2 \cdot h \cdot K}$  در نظر گرفته شده است [۱۳]. جهت اینکه فرآیند به صورت ایمن کار کند، لازم است محدودیت‌هایی رعایت گردد. در بهینه‌سازی نیز می‌بایست این محدودیت‌ها برقرار باشد:

۱- حداقل دمای نزدیکی در مبدل حرارتی باید از  $3^\circ C$  بالاتر باشد.

$$\Delta T_{\min}^{HE1} \geq 3 \quad (۷)$$

۲- دمای جریان‌های ورودی به کمپرسورها بالاتر از دمای شبنم آنها باشد تا مایع وارد کمپرسورها نگردد.

$$T_{\text{suction}}^{CM1} > T_{\text{suction, Dewpo int}}^{CM1} \quad (۸)$$

$$T_{\text{suction}}^{CM2} > T_{\text{suction, Dewpo int}}^{CM2} \quad (۹)$$

باتوجه به تغییراتی که فرآیند در اثر جایگذاری

1. Non-dominated  
2. Pareto-optimal front  
3. Crowding Distance  
4. Peng-Robinson equation  
5. Off-shore processes  
6. gamultiobj

که بیشترین اثر را بر تابع هدف داشتند، به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب شدند. اثر متغیرهای طراحی بر توابع هدف در شکل ۲ نشان داده شده است.

### تحلیل انرژی و اکسرژی

در تحلیل انرژی، مصرف انرژی توسط تجهیزات فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از شاخص‌های آن، انرژی مصرفی ویژه است<sup>۱</sup> که در معادله ۱۰ آورده شده است. شاخص دیگری که به منظور بررسی عملکرد چرخه سردسازی محاسبه می‌گردد، ضریب عملکرد<sup>۲</sup> است. ضریب عملکرد عبارت است از نسبت مجموع حرارت گرفته شده از منبع سرد به کل کار مصرفی در چرخه [۱۱].

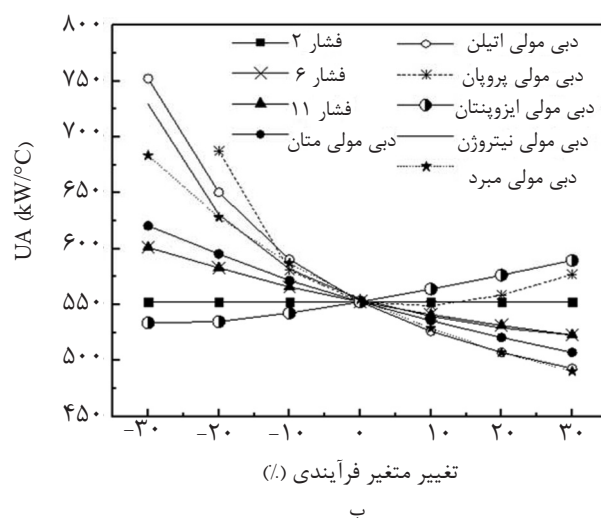
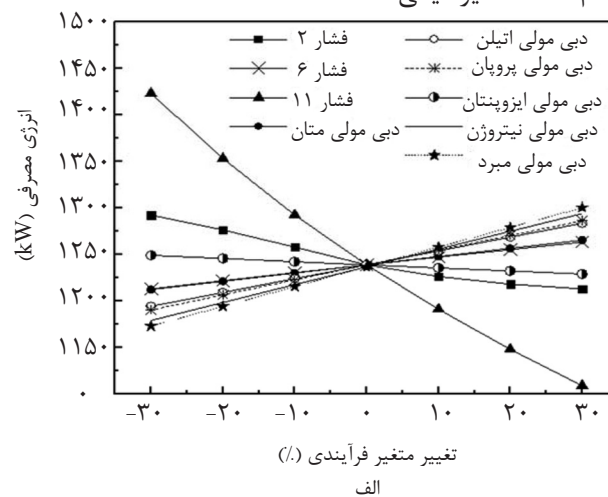
کولر هوایی پیدا کرد، فرآیند پریکو با انرژی مصرفی ۱۵۸۵ kW و سطح انتقال حرارت  $2092 \text{ m}^2$  به عنوان فرآیند اولیه در نظر گرفته شد. روش عملگرهای الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ روش عملگرهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	روش انتخابی
انتخاب	Tournament
ترکیب	Scattered
جهش	Adaptive feasible
جمعیت	۲۰۰
نسل	۲۰۰

### تحلیل حساسیت

به منظور شناسایی متغیرهای اثرگذار بر توابع هدف تحلیل حساسیت روی فرآیند انجام شد. متغیرهایی



شکل ۲ تحلیل حساسیت متغیرهای طراحی بر الف) انرژی مصرفی فرآیند ب) ضریب انتقال حرارت مبدل حرارتی

1. Specific Energy Consumption (SEC)
2. Coefficient of Performance (COP)

است. بنابراین دو شاخص در تحلیل اکسرژی محاسبه می‌شوند: تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی. تحلیل اکسرژی استفاده شده برای فرآیند مایع سازی گاز طبیعی، با روش اکسرژی سوخت و محصول محاسبه گردید. شاخص‌های تحلیل اکسرژی براساس این روش دقیق‌تر هستند و باعث دستیابی به نتایج صحیح‌تری می‌شوند. معادلات مربوط به اکسرژی سوخت و محصول تجهیزات فرآیند در جدول ۵ آورده شده است [۲۰]. لازم به ذکر است که دمای محیط برای استفاده از معادلات این جدول برابر  $30^{\circ}\text{C}$  لحاظ شده است.

### نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه با الگوریتم ژنتیک

ابتدا فرآیند پریکو با تابع هدف انرژی مصرفی توسط الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه بهینه‌سازی شد و نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است.

$$SEC = \frac{W_{CM1} + W_{CM2}}{m_{LNG}} \quad (10)$$

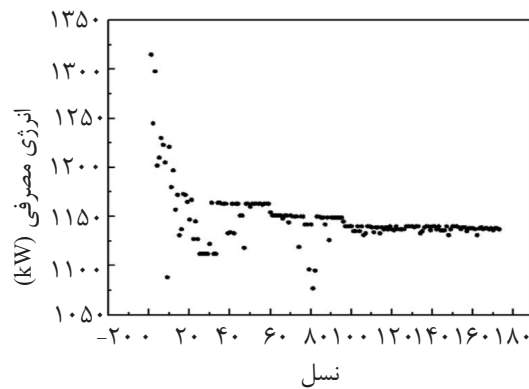
$$COP = \frac{(\dot{H}_{NG} - \dot{H}_{12}) \times m_{NG}}{W_{CM1} + W_{CM2}} \quad (11)$$

در چرخه‌های سردسازی گاز طبیعی، منبع سرد گاز طبیعی است. هرچه ضریب عملکرد چرخه‌ای بالاتر باشد به این معنی است که به ازای مقدار مشخصی حرارت گرفته شده از گاز طبیعی، کار مصرفی چرخه کمتر است و در نتیجه راندمان چرخه بالاتر خواهد بود. هدف تحلیل اکسرژی یافتن و شناسایی تجهیزاتی است که برگشت‌ناپذیری بیشتری دارند و موجب افزایش کار تلف شده می‌شوند. اکسرژی حداکثر کار مفید تئوری به دست آمده از تبادل انرژی سیستم با محیط برای رسیدن به تعادل ترمودینامیکی است. بنابراین برگشت‌ناپذیری‌هایی که موجب کار تلف شده می‌شوند تحت عنوان اکسرژی تخریب شده در این تحلیل محاسبه می‌شوند. همچنین محاسبه نسبت اکسرژی محصول یک تجهیز به اکسرژی خوراک آن، بیانگر عملکرد ترمودینامیکی تجهیز

جدول ۵ شاخص‌های اکسرژی تجهیزات فرآیند پریکو [۲۰]

کل فرآیند	کولر هوایی	مبدل حرارتی زیردمای محیط	کمپرسور	تجهیز
$\dot{E}_{F,tot} = \sum \dot{W}_{CM}$	$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}$	$\sum (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})_{Cold}$	$\dot{W}_{CM}$	اکسرژی سوخت ( $\dot{E}_{F,k}$ )
$\dot{E}_{F,tot} - \dot{E}_{D,tot}$	$\dot{E}_{out}^{air}$	$\sum (\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})_{Hot}$	$\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in}$	اکسرژی محصول ( $\dot{E}_{P,k}$ )
$\dot{E}_D =$ مجموع اکسرژی تخریب شده تجهیزات	$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} - \dot{E}_{out}^{air}$	$\sum (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})_{Cold} - \sum (\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})_{Hot}$	$\dot{W}_{CM} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{in}$	اکسرژی تخریب شده ( $\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k}$ )
$\varepsilon_{tot} = 1 - \left( \frac{\dot{E}_{D,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} \right)$	$\frac{\dot{E}_{out}^{air}}{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}$	$\frac{\sum (\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})_{Hot}}{\sum (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})_{Cold}}$	$\frac{\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in}}{\dot{W}_{CM}}$	راندمان اکسرژی ( $\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}}$ )
$y_{total} = \frac{\dot{E}_{D,tot}}{\dot{E}_{F,tot}}$	$\frac{\dot{E}_{D,AC}}{\dot{E}_{F,tot}}$	$\frac{\dot{E}_{D,HE}}{\dot{E}_{F,tot}}$	$\frac{\dot{E}_{D,CM}}{\dot{E}_{F,tot}}$	نسبت تخریب اکسرژی ( $y_k = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,tot}}$ )

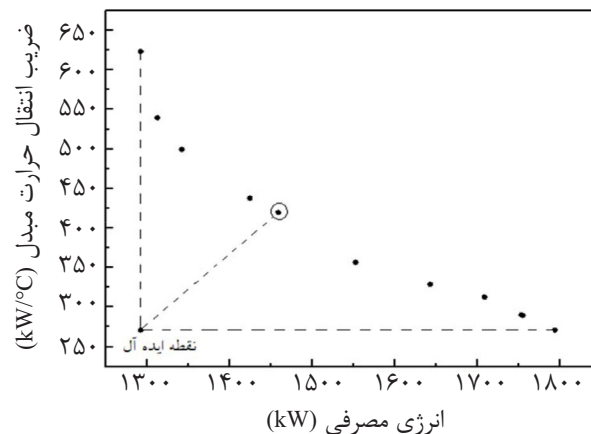




شکل ۳ مقادیر بهینه انرژی مصرفی فرآیند در نسل‌های مختلف الگوریتم ژنتیک

سطح انتقال حرارت آن مقدار بیشتر و نامطلوب‌تری پیدا می‌کند. با یافتن نقطه ایده‌آل غیرقابل دسترس که در شکل ۴ مشخص است و نقطه‌ای از جبهه پارتو که کمترین فاصله را با آن دارد، بهترین جواب بهینه‌سازی چندهدفه با رتبه‌بندی نامغلوب ۲ قابل دستیابی است. متغیرهای بهینه‌سازی‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

جواب‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رتبه‌بندی نامغلوب ۲ به صورت مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به نام جبهه بهینه پارتو در شکل ۴ نشان داده شده‌اند که نتایج آن، تضاد دو تابع هدف را به خوبی نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است با بهبود مقدار انرژی مصرفی فرآیند، ضریب انتقال حرارت مبدل یا



شکل ۴ نمودار پارتو بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک

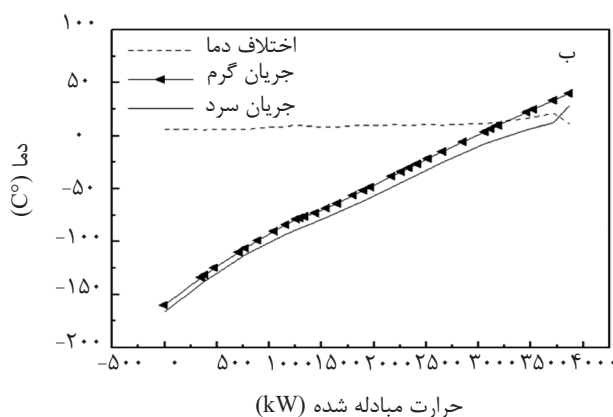
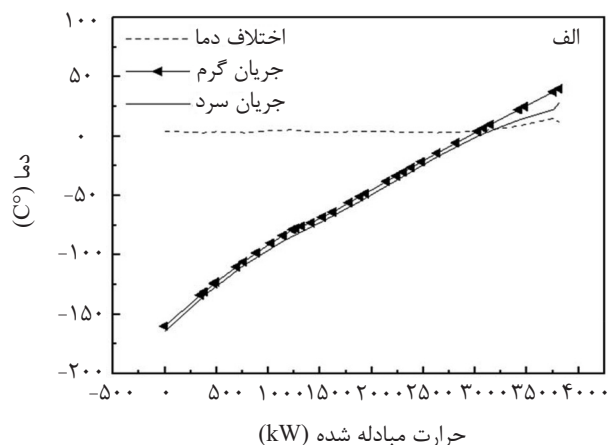
جدول ۶ متغیرهای بهینه‌سازی

چند هدفه	تک هدفه	متغیر بهینه‌سازی
۵۹۸/۲	۵۷۶/۹	شدت جریان مبرد (kmol/h)
۱۰۹/۷	۳/۱۱۱	شدت جریان متان مبرد (kmol/h)
۲۰۵/۱۸	۱۹۷/۳	شدت جریان اتیلن مبرد (kmol/h)
۷۷/۷	۷۰/۸۶	شدت جریان پروپان مبرد (kmol/h)
۹۲/۷	۱۰۰/۵	شدت جریان ایزوپنتان مبرد (kmol/h)
۱۱۲/۷	۹۶/۹	شدت جریان نیتروژن مبرد (kmol/h)
۱۲۲۹/۴	۱۵۰۰	فشار جریان ۲ (kPa)
۴۹۳۲	۴۴۸۲	فشار جریان ۶ (kPa)
۴۱۳/۸	۵۳۱/۶	فشار جریان ۱۱ (kPa)

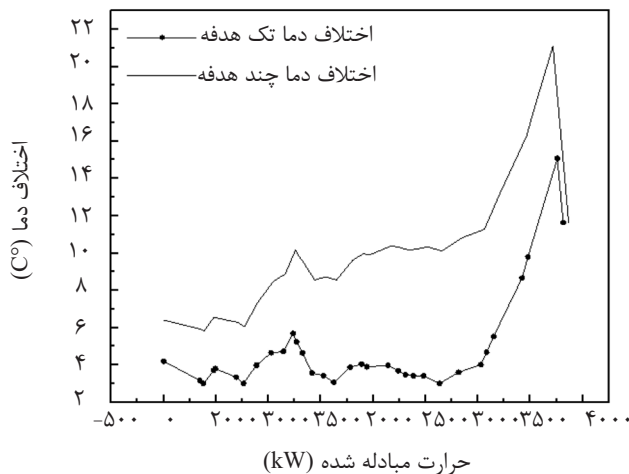
## منحنی‌های مرکب

هرچه منحنی‌های مرکب گرم و سرد به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، حرارت به صورت کارا تر انتقال می‌یابد. در واقع اتلاف حرارت مبدل کاهش می‌یابد. منحنی مرکب فرآیند بهینه تک‌هدفه و چندهدفه در شکل ۵ رسم شده است. کاهش انرژی

مصرفی باعث نزدیک‌تر شدن منحنی‌ها به یکدیگر و افزایش سطح مورد نیاز مبدل می‌گردد. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، منحنی‌های مرکب گرم و سرد فرایند بهینه تک‌هدفه به دلیل کم‌تر بودن انرژی مصرفی آن، فاصله کمتری از یکدیگر دارند.



شکل ۵ منحنی‌های مرکب گرم و سرد مبدل حرارتی در فرآیند بهینه الف- تک هدفه، ب- چند هدفه



شکل ۶ اختلاف دمای مبدل حرارتی فرآیند بهینه تک هدفه و چندهدفه

## نتایج تحلیل انرژی و اکسرژی

نتایج تحلیل انرژی و اکسرژی روی فرآیندهای بهینه شده در جدول ۷ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۷ مشخص است، مقدار انرژی مصرفی ویژه برای فرآیندهای بهینه تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب ۰/۳۴۱ و ۰/۴۳۷ kWh/kgLNG محاسبه گردید. درحقیقت مقدار انرژی مصرفی ویژه در فرآیند بهینه تک‌هدفه و چندهدفه نسبت به فرآیند اولیه به ترتیب ۲۸/۲۱٪ و ۷/۹۶٪ کاهش یافته است. ضریب عملکرد چرخه سردسازی فرآیند بهینه تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۵۶ محاسبه شد. نسبت تخریب اکسرژی در دو فرآیند بهینه تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب ۴۵/۲۶٪ و ۵۴/۱۲٪ محاسبه گردید. بازده اکسرژی فرآیند بهینه تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب ۵۴/۷۴٪ و ۴۵/۸۸٪ به دست آمد.

بازده اکسرژی و نسبت تخریب اکسرژی تجهیزات در شکل‌های ۷ و ۸ و جدول ۸ آورده شده است. هر چقدر دمای هوای گرم خروجی از کولرهای هوایی بیشتر باشد، تخریب اکسرژی آنها بیشتر محاسبه می‌شود. دمای هوای خروجی از کولرهای هوایی دوم به طور کلی بالاتر است، به همین دلیل تخریب اکسرژی آنها بالاتر به دست آمد.

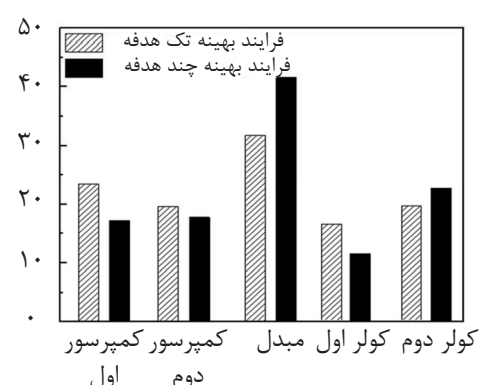
همان‌طور که در جدول ۷ و شکل ۷ مشخص است، نسبت تخریب اکسرژی مبدل حرارتی در دو فرآیند بهینه تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب ۲۸/۶۲٪ و ۳۷/۴۱٪ و از سایر تجهیزات بیشتر است. دلیل آن وجود جریان‌های مختلف با اختلاف دمایی بالا است. بعد از مبدل حرارتی، نسبت تخریب اکسرژی کمپرسورها بیشترین مقدار است و در نهایت، کولرهای هوایی کمترین نسبت تخریب را دارند.

جدول ۷ نتایج بهینه‌سازی فرآیند تک‌هدفه و چندهدفه

مورد	فرآیند بهینه تک‌هدفه	فرآیند بهینه چند هدفه
انرژی مصرفی کل (kW)	۱۱۳۸	۱۴۵۹
ضریب انتقال حرارت مبدل (kW/°C)	۹۱۶/۰۸	۴۱۹/۸
ظرفیت سردسازی کل (kW)	۳۸۱۳/۷۶	۳۸۶۶/۲
گاز طبیعی مایع (kg/h)	۳۳۳۲/۳۲	۳۳۳۲/۳۲
انرژی مصرفی ویژه (kWh/kgLNG)	۰/۳۴۱	۰/۴۳۷
ضریب عملکرد	۰/۷۲۰۷	۰/۵۶۲۴
بازده اکسرژی (٪)، $\varepsilon$	۵۴/۷۴	۴۵/۸۸
نسبت تخریب اکسرژی (٪)، $\gamma_k$	۲۶/۴۵	۵۴/۱۲



شکل ۸ نمودار بازده اکسرژی تجهیزات فرآیندهای بهینه



شکل ۷ نمودار نسبت تخریب اکسرژی تجهیزات فرآیندهای بهینه

جدول ۸ شاخص‌های اکسرژی تجهیزات فرآیند بهینه تک‌هدفه و چندهدفه

فرآیند	تجهیز	اکسرژی تخریب‌شده، $E_D$ (kJ/h)	بازده اکسرژی $\epsilon$ ، (%)	نسبت تخریب اکسرژی $y_k$ ، (%)
بهینه تک هدفه	کمپرسور اول	۳۹۲۴۷۶	۸۱/۹۲	۲۱/۱۶
	کمپرسور دوم	۳۲۸۰۱۸	۸۲/۹۸	۱۷/۶۹
	مبدل حرارتی	۵۳۰۷۶۳	۹۱/۹۷	۲۸/۶۲
	کولر هوایی اول	۲۷۶۱۳۶	۷۶/۲۷	۸۹/۱۴
	کولر هوایی دوم	۳۲۷۲۰۳	۵۱/۲۹	۶۴/۱۷
بهینه چندهدفه	کمپرسور اول	۴۳۹۷۳۴	۸۲/۱۸	۴۷/۱۵
	کمپرسور دوم	۴۵۴۴۸۶	۸۳/۶۷	۵۱/۹۹
	مبدل حرارتی	۱۰۶۳۳۶۳	۸۵/۳۰	۴۱/۳۷
	کولر هوایی اول	۲۹۹۶۵۳	۲۲/۸۶	۵۴/۱۰
	کولر هوایی دوم	۵۸۵۰۴۷	۲۷/۲۱	۵۸/۲۰

۹ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۹ مشخص است، انرژی مصرفی ویژه و بازده اکسرژی فرآیند در مطالعه حاضر در مقایسه با فرآیند تجاری پریکو به ترتیب ۱۷/۳٪ کاهش و ۸۲/۴۶٪ افزایش داشته است. همچنین انرژی مصرفی ویژه و بازده اکسرژی فرآیند مطالعه حاضر در مقایسه با مقالات پیشین به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

بازده اکسرژی تجهیزات در جدول ۷ و شکل ۸ آورده شده است. بالاترین بازده اکسرژی مربوط به مبدل حرارتی است. دلیل آن، بالا بودن اکسرژی سوخت و محصول این تجهیز است که در نهایت منجر به افزایش بازده آن شده است. مقایسه نتیجه بهینه‌سازی و بازده اکسرژی با چندین مقاله پیشین که در بخش مقدمه اشاره شده است، و درصد اختلاف آن با فرآیند مطالعه حاضر در جدول

جدول ۹ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات پیشین

فرآیند	تابع موردنظر	مقدار	درصد بهبود مطالعه حاضر (%)
فرآیند تجاری پریکو [۳]	انرژی مصرفی ویژه (kW.h/kgLNG) بازده اکسرژی (%)	۳۰-۰/۴۱۲۵	۸۲/۴۶ ۱۷/۳
مکاریزاده [۴]	بازده اکسرژی (%)	۳۷/۱	۴۷/۵
ژو [۹]	بازده اکسرژی (%)	۴۳/۹	۲۴/۷
موروسک [۱۱]	انرژی مصرفی ویژه (kW.h/kgLNG) بازده اکسرژی (%)	۰/۵۰۶-۲۲/۷	۳۲/۶-۱۴۱/۱
حسینی [۱۵]	انرژی مصرفی ویژه (kW.h/kgLNG)	۰/۴۲	۱۸/۸
وطنی [۱۸]	انرژی مصرفی ویژه (kW.h/kgLNG)	۰/۴۱۴	۱۷/۶
تحقیق حاضر	انرژی مصرفی ویژه (kW.h/kgLNG) بازده اکسرژی (%)	۵۴/۷۴-۰/۳۴۱	-----

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، انرژی مصرفی و سطح مبدل حرارتی یک فرآیند پریکو با مبرد آمیخته به طور هم‌زمان با الگوریتم ژنتیک چندهدفه بهینه‌سازی شدند. بنابراین در این تحقیق، اثر نامطلوب افزایش سطح مبدل حرارتی ناشی از بهینه‌سازی تک‌هدفه انرژی مصرفی که در مقالات پیشین مشاهده گردید، رفع شد. متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده، دبی‌های مولی ترکیبات مبرد آمیخته شامل متان، اتیلن، پروپان، ایزوپنتان و نیتروژن، فشار جریان‌های خروجی از کمپرسور اول و دوم و فشار جریان خروجی از شیرفشارشکن چرخه سردسازی بودند. نتایج اصلی این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- بهینه‌سازی تک‌هدفه (کمینه‌سازی انرژی مصرفی) انرژی مصرفی را به میزان ۲۸/۲۱٪ نسبت به فرآیند اولیه کاهش داد و انرژی مصرفی به مقدار ۱۱۳۸ kWh/kgLNG رسید. همچنین، میزان سطح مبدل حرارتی را به مقدار ۲۵/۱۹٪ نسبت به فرآیند اولیه افزایش داد و به مقدار  $4711/2 \text{ m}^2$  رسید.

- بهینه‌سازی چندهدفه (بهینه‌سازی انرژی مصرفی و سطح مبدل حرارتی) انرژی مصرفی را به میزان ۷/۹۶٪ نسبت به فرآیند اولیه کاهش داد و به مقدار ۱۴۵۹ kWh/kgLNG رسید و سطح مبدل حرارتی به میزان ۳/۱۹٪ نسبت به فرآیند اولیه کاهش و به مقدار  $2158/9 \text{ m}^2$  کاهش یافت.

- سطح مبدل حرارتی در بهینه‌سازی چندهدفه به میزان ۵۴٪ نسبت به بهینه‌سازی تک‌هدفه (کمینه‌سازی انرژی) کاهش یافت.

- بالاترین تخریب اکسرژی تجهیزات، مربوط به مبدل حرارتی بود و کمترین آن مربوط به کولر هوایی

اول بود. همچنین بالاترین بازده اکسرژی تجهیزات مربوط به مبدل حرارتی بود.

## علائم و نشانه‌ها

$AC$ : کولر هوایی

$CM$ : کمپرسور

$\bar{E}$ : اکسرژی مخصوص (kJ/kg)

$f(x)$ : تابع هدف

$\bar{H}$ : آنتالپی مخصوص (kJ/kg)

$HE$ : مبدل حرارتی

$JT$ : شیر فشارشکن

$m$ : دبی جرمی (kg/h)

$SEP$ : برج جداکننده

$y_k$ : نسبت تخریب اکسرژی

$\mathcal{E}$ : بازده اکسرژی

## زیر نویس‌ها

$Cold$ : جریان سرد

$D$ : تخریب

$Dew\ point$ : نقطه شبنم

$F$ : سوخت

$Hot$ : جریان گرم

$In$ : جریان ورودی

$K$ : تجهیز مورد نظر

$LNG$ : گاز طبیعی مایع

$NG$ : گاز طبیعی

$Out$ : جریان خروجی

$P$ : محصول

$Suction$ : مکش

$total$ : کل فرآیند

## مراجع

- [۱] نیک‌آذر م، کی‌نژاد ک، "نفت و گاز پیدایش - پالایش"، تهران: علوم کاربردی، ۱۳۹۱.
- [۲] اسلم‌بخش ا، "بررسی فنی - اقتصادی فرآیندهای SMR و N2 Expansion برای تولید LNG در مقیاس کوچک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۳.
- [3] Aspelund A., Gundersen T., Myklebust J., Nowak M.P. and Tomasgard A., "An optimization-simulation model for a simple LNG process," *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 34, Issue 10, pp. 1606-1617, Oct. 2010.
- [4] Mokarizadeh Haghighi Shirazi M. and Mowla D., "Energy optimization for liquefaction process of natural gas in peak shaving plant," *Energy*, Vol. 35, Issue 7, pp. 2878-2885, July 2010.
- [5] Alabdulkarem A., Mortazavi A., Hwang Y., Radermacher R. and Rogers P., "Optimization of propane pre-cooled mixed refrigerant LNG plant," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, Issue 6-7, pp. 1091-1098, May 2011.
- [6] Hatcher P., Khalilpour R. and Abbas A., "Optimisation of LNG mixed-refrigerant processes considering operation and design objectives," *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 41, pp. 123-133, June 2012.
- [7] Khan M. S., Lee S., Rangaiah G. P. and Lee M., "Knowledge based decision making method for the selection of mixed refrigerant systems for energy efficient LNG processes," *Applied Energy*, Vol. 111, pp. 1018-1031, 2013.
- [8] Wahl P. E., Lovseth S. W. and Molnvik M. J., "Optimization of a simple LNG process using sequential quadratic programming," *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 56, pp. 27-36, 2013.
- [9] Xu X., Liu J., Jiang C. and Cao L., "The correlation between mixed refrigerant composition and ambient conditions in the PRICO LNG process," *Applied Energy*, Vol. 102, pp. 1127-1136, 2013.
- [10] Xu X., Liu J. and Cao L., "Optimization and analysis of mixed refrigerant composition for the PRICO natural gas liquefaction process," *Cryogenics*, Vol. 59, pp. 60-69, 2014.
- [11] Morosuk T., Tesch S., Hiemann A., Tsatsaronis G. and Bin Omar N., "Evaluation of the PRICO liquefaction process using exergy-based methods," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 27, Part 1, pp. 23-31, 2015.
- [12] Na J., Lim Y. and Han C., "A modified DIRECT algorithm for hidden constraints in an LNG process optimization," *Energy*, Vol. 126, pp. 488-500, 2017.
- [13] 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.
- [۱۴] عبداللهی دمنه ف، "ارائه یک فرآیند جدید مایع‌سازی گاز طبیعی با استفاده از تحلیل هم‌زمان پینچ و اکسرژی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۴.
- [۱۵] حسینی م، "طراحی و بهینه‌سازی فرآیند یکپارچه تولید NGL و LNG"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۳.
- [۱۶] کمالی‌نژاد م، "اصلاح ساختار چرخه‌های سرمایش عمیق چند طبقه‌ای و چندجزئی واحدهای LNG برای کاهش مصرف انرژی و سرمایه‌گذاری از طریق تحلیل‌های مفهومی (پینچ و اکسرژی) با ابزار ریاضیات غیر خطی گسسته (MINLP)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران، ۱۳۹۳.
- [۱۷] نوبیحاری م، "ارائه یک فرآیند جدید برای تولید LNG با استفاده از سامانه‌های سرمایش جذبی با

- هدف کاهش انرژی موردنیاز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۵.
- [18] Vatani A., Mehrpooya M. and Tirandazi B., "A novel process configuration for co-production of NGL and LNG with low energy requirement," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 63, pp. 16-24, 2013.
- [19] Qyumm M. A., Ali W., Long N. V. D., Khan M. S. and Lee M., "Energy efficiency enhancement of a single mixed refrigerant LNG process using a novel hydraulic turbine," *Energy*, Vol. 144, pp. 968-976, 2017.
- [20] Palizdar A., Ramezani T., Nargessi Z., AmirAfsharar S., Abbasi M. and Vatani A., "Thermodynamic evaluation of three mini-scale nitrogen single expansion processes for liquefaction of natural gas using advanced exergy analysis," *Energy Conversion and Management*, Vol. 150, pp. 637-650, 2017.
- [۲۱] مقصودی پ. و حنفی‌زاده پ.، "بهینه‌سازی چند هدفه رکوپراتور میکروتوربین گازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، ماهنامه مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۶، شماره ۳، صفحات ۱۱۱-۱۲۰، ۱۳۹۵.
- [۲۲] زارع ح.، بعنونی س. و قنبرزاده ا.، "طراحی بهینه مبدل گرمایی صفحه‌ای پره‌دار با روش الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل"، ماهنامه مکانیک مدرس، دوره ۱۲، شماره ۵، صفحات ۲۲-۲۹، ۱۳۹۱.



## Petroleum Research

Petroleum Research, 2020(February-March), Vol. 29, No. 109, 12-15

DOI: 10.22078/pr.2019.3919.2784

# Multi-Objective Optimization and Exergy Analysis of Liquefaction of Natural Gas Process with Mixed Refrigerant

Samira Ahmadi and Mohammad Reza Jafari Nasr\*

Chemical Engineering Department, College of Petroleum and Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[nasrmrj@ripi.ir](mailto:nasrmrj@ripi.ir)

DOI: 10.22078/pr.2019.3919.2784

Received: September/28/2019

Accepted: November/16/2019

## INTRODUCTION

One of the major sources of energy supply is fossil fuels. Moreover, Natural gas has been considered in recent years due to lower environmental pollution. Natural gas is a clean, inexpensive and abundant fuel used today for domestic and industrial use as feedstock for petrochemicals. It is very costly and expensive to ship natural gas through the pipelines, especially in long distances, especially in the deep-sea areas and the sea floor. Hence, one way to overcome this problem is to transport this gas through a vessel or tanker, which it makes the natural gas somehow [1]. The present study simulates the PRICO process in the Aspen HYSYS. Due to the constraints that Iran faces such as water scarcity, the reference process was developed, and a new process was introduced to solve these problems. Since the liquefaction processes of natural gas

are very energy efficient, the process energy consumed is obtained by the genetic algorithm optimization and the values of the process variables. The optimization results showed that the decrease in energy consumption results in an increase in the heat exchange surface so the multi-objective optimization of the genetic algorithm was used to simultaneously optimize the energy consumption and heat exchanger surface and to evaluate more accurately the results which were analyzed on energy and exergy analysis.

## EXPERIMENTAL PROCEDURE PROCESS DESCRIPTION

The core of the process is generally the heat exchanger cooling processes. In a heat exchanger, heat is received by the high pressure refrigerant flow (outlet from the second compressor, stream 9) of the gas and the low pressure refrigerant



flow (outlet from the valve, stream 11). Natural gas in the heat exchanger also loses heat, and its temperature drops to  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The lack of water resources is one of the problems that Iran is facing. In some areas, it is also very costly and difficult to set up water facilities to supply water to coolers. For this reason, air coolers are used to cool the refrigerant flow in the cooling cycle. The PRICO process is illustrated in Figure 1.

### SINGLE-OBJECTIVE AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION WITH GENETIC ALGORITHM

Multi-objective optimization is often used when improving one process function will make the other function less favorable. In the process of liquefaction of natural gas, this contradiction can be seen in the functions of energy consumption and the surface of heat exchanger. As the energy consumption decreases, the hot and cold curves approach each other and the minimum temperature of the heat exchanger is reduced. Reducing the curvature distance results in an increase in the surface of heat exchanger and its size. Therefore the objective function of energy consumption and surface of heat exchanger are

considered as follows:

$$f_1(x) = (w_{CM1} + w_{CM2}) \quad (1)$$

$$f_2(x) = UA_{HE} \quad (2)$$

In which  $f_1(x)$ ,  $w_{CM1}$ ,  $w_{CM2}$ ,  $f_2(x)$ ,  $U$  and  $A_{HE}$  are first objective function, energy consumption of first compressor, energy consumption of second compressor, second objective function, heat transfer coefficient which is equals to 700 and heat transfer surface, respectively[2].

### RESULTS AND DISCUSSION RESULTS OF SINGLE-OBJECTIVE AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

First, the PRICO process is optimized with the objective function of the energy consumption by single-objective genetic algorithm. Convergence of generations shown in Figure 2. The results of multi-objective optimization of energy consumption and heat transfer coefficient are illustrated in Figure 3. As shown in Figure 3, as the process energy consumption improves, the heat transfer coefficient or surface of heat exchanger of the process becomes more undesirable. The best multi-objective optimization solution is specified in the Figure 3 with a circle.

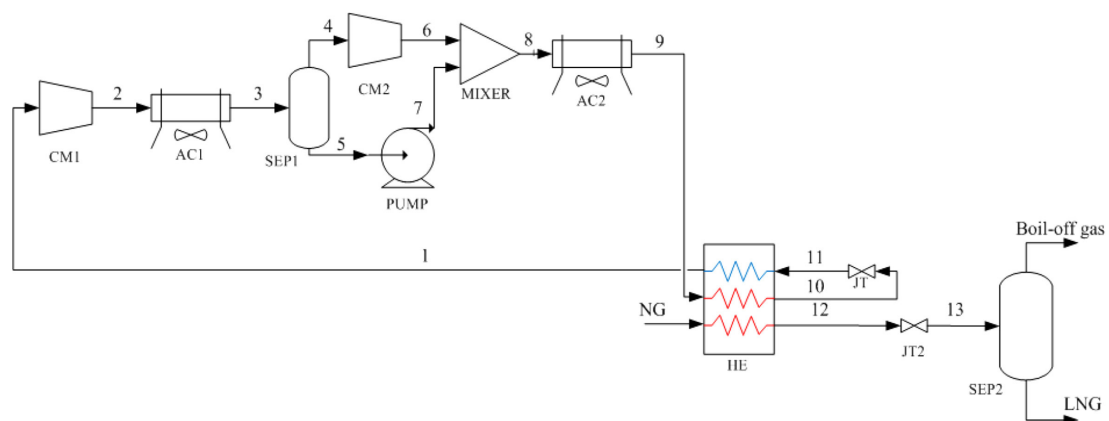
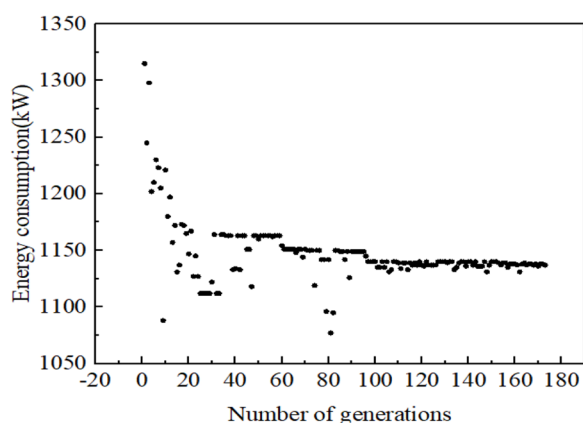
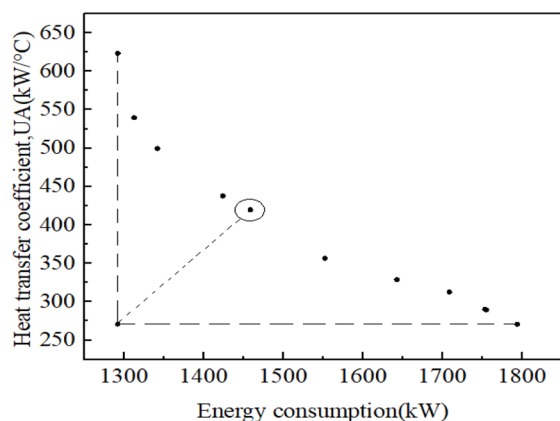


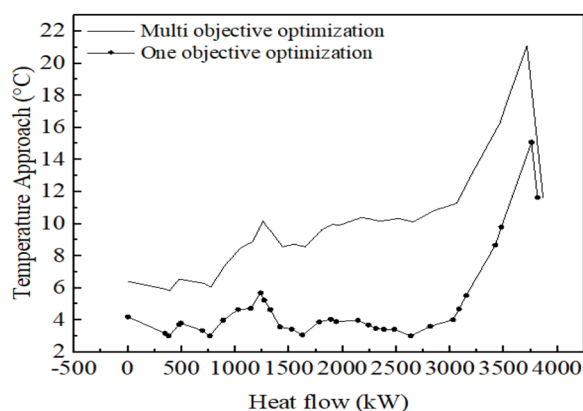
Figure 1: PRICO process [3] with air cooler.



**Figure 2:** Search convergence process of energy consumption.



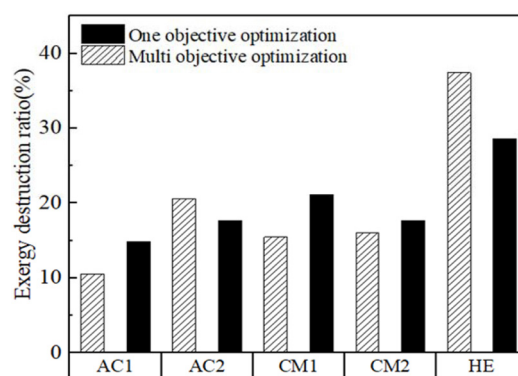
**Figure 3:** Pareto front of multi-objective optimization.



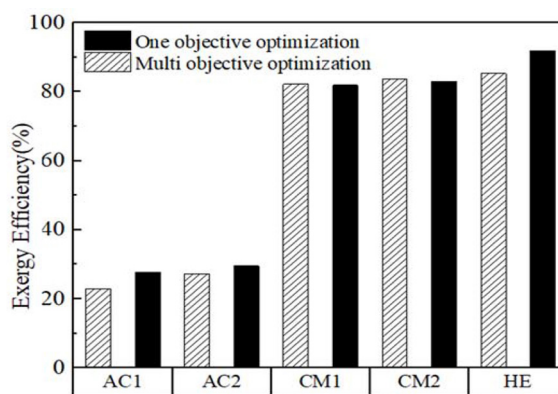
**Figure 4:** Temperature Approach of heat exchangers.

The exergy efficiency and the exergy destruction ratio of the equipment are presented in Figures 5 and 6. In the optimized process with one objective due to closer curves of hot and cold composite curves, exergy destruction ratio of heat exchanger was lower and its exergy efficiency

was higher. The higher the hot air temperature of the air cooler is, the more exergy they destroy. So the exergy destruction ratio of second air coolers in both optimized processes is more than the first ones. The highest exergy efficiency is related to heat exchanger. The reason is the increased exergy fuel and product of this equipment, which ultimately results in increased exergy efficiency.



**Figure 5:** Exergy destruction ratio of equipment in optimized processes



**Figure 6:** Exergy efficiency of equipment in optimized processes

## CONCLUSIONS

The simulated PRICO process in Aspen HYSYS was optimized by genetic algorithm. The results showed that with single-objective optimization, energy consumption decreased by 28.21% to 1138 kWh per kilogram of liquefied natural gas, the surface of heat exchanger increased by 25.19%; in other words, it increased to 4711.2 m<sup>2</sup>. While in multi-objective optimization, energy

consumption and the surface of heat exchanger decreased by 7.96% in other words, it decreased to 1459 kWh per kilogram of liquefied natural gas and by 3.19% and in other words, decreased to 158.99 m<sup>2</sup>, respectively. Energy and exergy analysis showed that the optimized process with one objective function of energy consumption has better performance and less destroyed exergy. The distance between the cold and hot composite curves was lower in the one objective optimized process, so its exergy destruction was calculated less than the multi objective process. Also, by exergy analysis of the equipment, it was found that the heat exchanger had the highest exergy destruction ratio and exergy efficiency than other equipment. Due to the lower energy consumption of the compressors in the optimized process of the compressor, their exergy destruction was also less calculated. In general, energy and exergy indices showed better performance and less exergy destruction for the optimized process of energy consumption.

*Improve Efficiency,”* M.Sc. thesis, University of Tehran, 57-60, Tehran, Iran, 2017.

## REFERENCES

- [1]. Nikazar M., Keynejad K., “Oil and gas emergence – refining,” Applied Sciences, Tehran, 2012.
- [2]. 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, 2018.
- [3]. Morosuk T., Tesch S., Hiemann A., Tsatsaronis G. and Bin Omar N., “*Evaluation of the PRICO liquefaction process using exergy-based methods,*” Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 27, Part 1, pp. 23-31, 2015.
- [4] Falsafi M., “*Structural Improvement of the Natural Gas Liquefaction Process (LNG) by Single-Staged Combined Refrigerant Method to*