

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2024.442770.1398



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Cold Energy Recovery of Liquefied Natural Gas Using Allam Cycle

N. Tahouni^{1*}, Z. Deldari², K. Mohammadbagherzade²

1- Associate Professor of Chemical Engineering, University of Tehran

2- B. Sc. Student of Chemical Engineering, University of Tehran

Email: ntahuni@ut.ac.ir

Abstract

The Allam cycle is an oxy-combustion cycle for generating electricity from natural gas with near-zero emissions. When the fuel is changed to liquified natural gas, the gas compression work is reduced; therefore; the power plant cycle can be highly competitive with the other conventional power plant cycles. In this study, two alternatives for using cold energy during the liquified natural gas regasification were investigated to reduce the CO₂ compression work. The results indicated that the direct heat integration of liquified natural gas regasification and liquefaction of captured CO₂ in the Allam cycle leads to an energy saving of 46.34%. Additionally, the amount of captured CO₂ during indirect heat integration of the Allam cycle with an organic Rankine cycle is less than the direct method. However, this method is the best choice for improvement, generating additional electricity and showing a 58% energy saving.

Received: 13 February 2024

Accepted: 13 March 2024

Page Number: 109-120

Keywords:

Allam Cycle,
LNG Cold Energy,
Carbon Capture and
Storage,
Compression Work,
Heat Integration,
Organic Rankin Cycle

Please Cite this Article Using:

Tahouni, N., Deldari, Z., & Mohammadbagherzade, K. (2025). Cold Energy Recovery of Liquefied Natural Gas Using Allam Cycle. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(138), 109-120, [In Persian].



بازیابی انرژی سرد گاز طبیعی مایع با استفاده از چرخه آلوم

نسیم طاهونی^{۱*}، زهرا دلداری^۲، کوثر محمدباقرزاده^۲

۱- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

پیام نگار: ntahuni@ut.ac.ir

چکیده

چرخه آلوم یک چرخه اکسیژن- سوخت برای تولید برق از گاز طبیعی با انتشار آلاینده‌گی بسیار کم است. وقتی سوخت این نیروگاه به گاز طبیعی مایع تغییر یابد، کار مربوط به فشرده‌سازی گاز طبیعی کاهش می‌یابد و در این صورت این چرخه توان رقابتی بالایی با سایر چرخه‌های متداول نیروگاهی خواهد داشت. در مطالعه حاضر، دو راهکار برای استفاده از انرژی سرد گاز طبیعی مایع بررسی شد تا کار فشرده‌سازی دی‌اکسیدکربن در چرخه آلوم را کاهش دهند. نتایج نشان داد که یک پارچه‌سازی حرارتی مستقیم فرایند گازی‌سازی مجدد گاز طبیعی مایع و فرایند مایع‌سازی جریان دی‌اکسیدکربن جذب شده در چرخه، صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به میزان ۴۶/۳۴ درصد در پی دارد. هم‌چنین، میزان گاز دی‌اکسیدکربن جذب شده در روش یک پارچه‌سازی حرارتی غیر مستقیم با استفاده از چرخه رانکین آلی کمتر از روش مستقیم است، اما این روش با توجه به تولید برق بیشتر، بهترین گزینه برای بهبود طرح پایه است و باعث صرفه‌جویی ۵۸ درصدی در مصرف انرژی می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۱

شماره صفحات: ۱۰۹ تا ۱۲۰

کلیدواژه‌ها:

چرخه آلوم،

انرژی سرد گاز طبیعی مایع،

جذب و ذخیره‌سازی

دی‌اکسیدکربن،

کار فشرده‌سازی،

یک پارچه‌سازی حرارتی،

چرخه رانکین آلی

* تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

طاهونی، نسیم، دلداری، زهرا، و محمدباقرزاده، کوثر. (۱۴۰۴). بازیابی انرژی سرد گاز طبیعی مایع با استفاده از چرخه آلوم، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۱۲۴(۱۳۸)، ۱۰۹-۱۲۰.

۱. مقدمه

روش‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی و انتقال گاز طبیعی در دنیا متداول است که انتقال به صورت گاز طبیعی مایع^۱ بهترین گزینه برای مسافت‌های بیشتر از ۲۵۰۰ مایل و در حجم زیاد گاز است [۱]. به دلیل وجود فاصله میان کشورهای تولیدکننده و کشورهای واردکننده گاز، انتقال گاز به صورت گاز طبیعی مایع از محبوبیت زیادی برخوردار شده است. هنگام گازی‌سازی مجدد گاز طبیعی مایع، باید از انرژی سرد آن بهره‌برد. روش‌های مختلفی برای استفاده از انرژی سرد گاز طبیعی مایع به کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به تولید برق، جداسازی هوا، نمک‌زدایی و ذخیره‌سازی کربن اشاره کرد [۲].

فخارزاده و همکاران یک چرخه رانکین آلی^۲ دومرحله‌ای را برای استفاده از انرژی سرد گاز طبیعی مایع ارائه کردند. آنان ۱۰ متغیر فرایندی و نیز سیال کاری مناسب در هر مرحله را به گونه‌ای بهینه کردند تا تولید برق بیشینه شود [۳]. غائبی و همکاران یک چرخه تولید برق کالینا^۳ را پیشنهاد کردند که از انرژی زمین‌گرمایی به عنوان منبع حرارت و از گاز طبیعی مایع به عنوان چاله حرارت استفاده می‌کند. آنان چرخه مذکور را از نظر میزان بازده انرژی و بازده اکسرژی^۴ بهینه کردند [۴]. چن و همکاران از انرژی سرد گاز طبیعی مایع برای تولید برق با چرخه آلآم^۵ استفاده کردند. آنان اثر متغیرهای کلیدی چرخه را مطالعه و با تعریف دو تابع هدف متفاوت - برای بیشینه کردن بازده اکسرژی و کمینه کردن هزینه کل - یک طراحی بهینه ارائه کردند [۵]. یاری جانی و همکاران طراحی یک پارچه‌سازی حرارتی دو واحد مایع‌سازی گاز طبیعی و جداسازی اجزای هوا ارائه کردند. آنان ظرفیت صرفه‌جویی انرژی را در این دو فرایند زیر دمای محیط و انرژی بر و با لحاظ تابع هدف هزینه کلی سالانه مطالعه کردند [۶].

کیم و همکاران از انرژی سرد گاز طبیعی مایع در یک واحد جداسازی هوای تک‌ستونه استفاده کردند و دو طرح پیشنهادی مختلف را ارزیابی کردند. آنان گزارش کردند که با این کار هزینه استفاده از چرخه سرماسازی و مصرف برق کاهش یافته است [۷]. چن

و همکاران طراحی برای تولید هیدروژن سبز با استفاده از انرژی بادی در یک منطقه ساحلی ارائه کردند. آنان از انرژی سرد گاز طبیعی مایع برای مایع‌سازی و ذخیره هیدروژن استفاده کردند [۸]. جناجره و همکاران استفاده از انرژی سرد گاز طبیعی مایع را برای نمک‌زدایی انجمادی آب روشی بسیار جذاب برای تولید آب شیرین معرفی کردند [۹]. لیم و همکاران از انرژی اتلافی در یک نیروگاه گاز طبیعی مایع برای جداسازی و ذخیره کربن استفاده کردند. مدل پیشنهادی شامل گازی‌سازی مجدد گاز طبیعی مایع، چرخه ترکیبی تولید برق با سوخت گاز طبیعی و واحد جداسازی و ذخیره کربن بود. آنان از انرژی سرد گاز طبیعی مایع برای کاهش دمای حلال آمین در برج جذب استفاده کردند و بدین ترتیب تولید خالص برق و بازده اکسرژی را افزایش دادند [۱۰].

استفاده از انرژی سرد گاز طبیعی مایع در چرخه‌های متداول نیروگاهی در مطالعات قبلی به طور مبسوط بررسی شده است. در این مطالعه، استفاده از این انرژی با چرخه نیروگاهی آلآم مد نظر است. ابتدا یک چرخه آلآم با سوخت گاز طبیعی مایع شبیه‌سازی و میزان مصرف انرژی در مایع‌سازی گاز دی‌اکسیدکربن جذب شده بررسی می‌شود. در ادامه، دو طرح برای یک پارچه‌سازی حرارتی مستقیم و غیر مستقیم انرژی سرد گاز طبیعی مایع با فرایند جداسازی و ذخیره‌سازی کربن در چرخه آلآم مطالعه خواهد شد. در پایان، این سه حالت از نقطه نظر میزان مصرف انرژی مقایسه خواهند شد.

۲. شرح چرخه آلآم

پژوهش‌های زیادی در زمینه ساخت نیروگاه‌های برق انجام گرفته است تا بتوان به گونه‌ای از ورود دی‌اکسیدکربن به هوا جلوگیری کرد. فناوری‌های جداسازی و ذخیره‌سازی کربن^۶ در نیروگاه‌ها را می‌توان به سه دسته پیش‌احتراق، پس‌احتراق و اکسیژن-سوخت^۷ تقسیم‌بندی کرد [۱۱]. در روش اکسیژن-سوخت به جای استفاده از هوا برای احتراق سوخت، از اکسیژن خروجی واحد جداسازی هوا استفاده و دی‌اکسیدکربن و آب تولید می‌شود.

چرخه آلآم یک سامانه نوین اکسیژن-سوخت است که در آن سیال کاری دی‌اکسیدکربن با فشار بالا و تحت شرایط فوق بحرانی در یک

1. LNG
2. Organic Rankine Cycle (ORC)
3. Kalina
4. Exergy
5. Allam Cycle

6. Carbon Capture and Storage (CSS)
7. Oxy-Combustion

۳. ارائه راهکار برای بهبود مصرف انرژی

فرایند گازی‌سازی گاز طبیعی مایع و فرایند مایع‌سازی جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده را می‌توان به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم یک‌پارچه‌سازی حرارتی کرد. مقدار انرژی سرد گاز طبیعی مایع به فشار گازی‌سازی بستگی دارد [۱۴].

۳-۱ حالت پایه

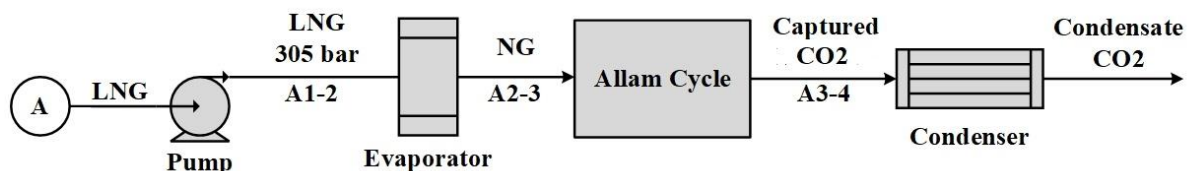
در این حالت، مطابق با شکل (۲) ابتدا گاز طبیعی مایع تا فشار ۳۰۵ بار پمپ می‌شود (جریان A1-2) و سپس در فشار ثابت در تبخیرکننده تبخیرشده، سپس گاز طبیعی (NG) به چرخه آلوم وارد می‌شود (جریان A2-3). گاز حاصل از احتراق در چرخه آلوم به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش عمده (حدود ۹۷ درصد) به‌صورت جریان برگشتی استفاده می‌شود و بخش دیگر که در این مطالعه همان جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده (جریان A3-4) نامیده می‌شود، در فشار ۸۶ بار میعان می‌شود. این فرایند یک روش ناکارآمد است؛ زیرا از انرژی سرد گاز طبیعی مایع هیچ استفاده‌ای نمی‌شود.

۳-۲ یک‌پارچه‌سازی حرارتی مستقیم

روش یک‌پارچه‌سازی حرارتی مستقیم باید طوری تعیین شود که بین انرژی سرد آزادشده هنگام گازی‌سازی مجدد گاز طبیعی مایع و کار مصرفی برای فشرده‌سازی جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده، تبدیلی ایجاد شود. به‌همین منظور، مطابق با شکل (۳) پس از پمپاژ گاز طبیعی مایع با پمپ، یک مبدل حرارتی برای تبادل حرارت بین گاز طبیعی مایع فشرده و جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله گاز طبیعی مایع به گاز طبیعی تبدیل می‌شود و جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده به‌وسیله انرژی سرد گاز طبیعی مایع تا حد زیادی مایع می‌شود. در این طرح در مصرف انرژی فرایند صرفه‌جویی می‌شود.

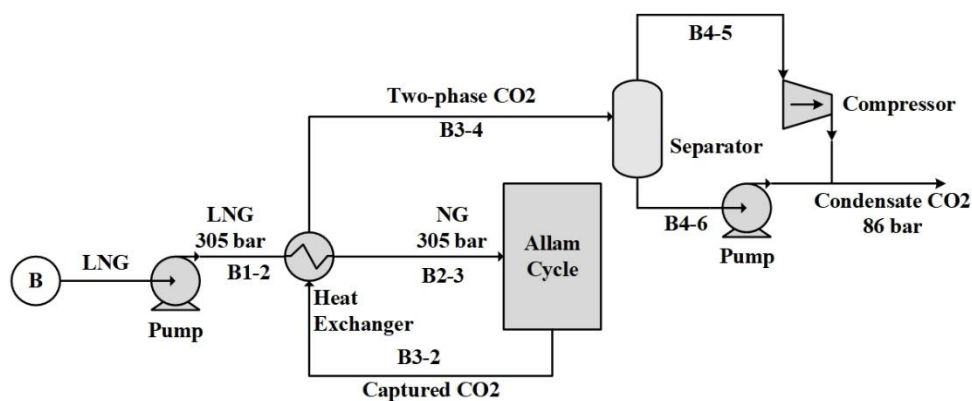
به‌طور خلاصه جریان برگشتی دی‌اکسیدکربن (جریان RE-1/RE-2/RE-4) کارکرد اصلی دارد: محصولات احتراق را رقیق می‌کند و اطمینان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد سیال کاری چرخه که از توربین خارج می‌شود (جریان FG-2) دی‌اکسیدکربن است، دمای احتراق را تعدیل می‌کند، باعث می‌شود که مقادیر چشم‌گیری گرما در چرخه حفظ شود که به‌نوبه خود میزان سوخت و اکسیژن مورد نیاز را کاهش می‌دهد. با کاهش نیاز به اکسیژن، واحد جداسازی هوا می‌تواند کوچک‌تر شود و هزینه سرمایه‌گذاری و انرژی مورد نیاز آن کمتر شود [۱۲]. نکته دیگر آن است که برای پیش‌گرم کردن اکسیژن و دی‌اکسیدکربن ورودی به محفظه احتراق از جریان خروجی توربین (جریان FG-2) و حرارت بخش فشرده‌سازی در واحد جداسازی هوا (AR-1 به AR-2) استفاده می‌شود. بدین ترتیب، بخشی از انرژی (کار) مصرفی در فرایند زیر دمای محیط جداسازی هوا به مبدل حرارتی چندجریانی چرخه آلوم وارد و بازیابی می‌شود. چرخه آلوم از این بازیابی حرارت استفاده می‌کند تا مصرف انرژی واحد جداسازی هوا را به بهبود عملکرد چرخه تبدیل کند و در نتیجه، بازده چرخه را بهبود بخشد [۱۲].

هنگامی که سوخت چرخه آلوم به گاز طبیعی مایع تغییر یابد، می‌توان به‌جای کمپرسور سوخت از پمپ برای بالا بردن فشار گاز طبیعی مایع بهره‌برد. پمپ‌ها علاوه بر کار مصرفی کمتر، نسبت به کمپرسورها ارزان‌تر نیز هستند. گاز طبیعی مایع در فشار اتمسفر دمایی حدود ۱۶۰- درجه سلسیوس دارد و حجم آن در مقایسه با گاز طبیعی ۶۰۰ برابر کمتر است؛ بنابراین گاز طبیعی مایع باید قبل از ورود به چرخه آلوم از نو به گاز طبیعی تبدیل شود که طی این تبدیل انرژی سرد آن قابل استفاده است. این انرژی می‌تواند در بخش مایع‌سازی دی‌اکسیدکربن به‌کار رود.



شکل ۲. حالت پایه.

Figure 2. Base case.



شکل ۳. یک پارچه سازی حرارتی مستقیم.

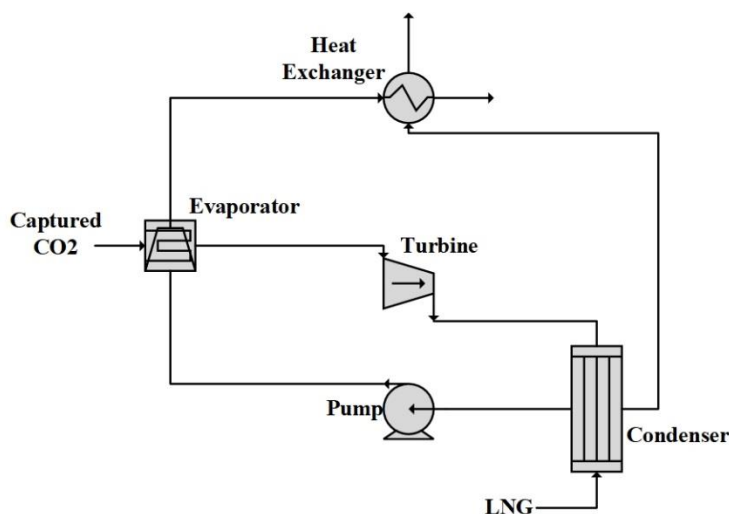
Figure 3. Direct heat integration.

پمپ می‌شود تا فشار آن افزایش یابد، سپس به تبخیرکننده وارد می‌شود تا با تبادل حرارتی با جریان گرم (جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده در چرخه آلام) به صورت گازی درآید. سپس، به درون یک توربین فرستاده می‌شود تا ضمن انبساط و کاهش فشار برق تولید شود. در مسأله مورد مطالعه پژوهش حاضر، جریان گاز طبیعی مایع بعد از عبور از کندانسور چرخه آلام هم‌چنان به صورت مایع است. بنابراین، یک مبدل حرارتی بین جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده خروجی از تبخیرکننده و گاز طبیعی مایع خروجی از کندانسور تعبیه می‌شود تا خروجی کندانسور جریانی به صورت کاملاً گازی (گاز طبیعی) باشد. جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده نیز طی این فرایند به میزان بیشتری به مایع تبدیل شود.

۳-۲ یک پارچه سازی حرارتی غیرمستقیم

در روش یک پارچه سازی حرارتی غیرمستقیم که برای استفاده در مقیاس بزرگ مناسب‌تر است، از چرخه رانکین آلی استفاده می‌شود. چرخه رانکین آلی یک فناوری مؤثر برای استفاده از گرمای تلف شده در دمای پایین است. این چرخه به دلیل طرح ساده (شامل پمپ، تبخیرکننده، توربین و کندانسور)، هزینه تعمیر و نگهداری کم و عملکرد مستقل به فناوری مهمی برای بازیابی گرمای تلف شده تبدیل شده [۱۵] و توجه بسیاری از محققان را در سراسر جهان به خود جلب کرده است.

مطابق با شکل (۴)، جریان سرد (گاز طبیعی مایع در فشار ۳۰۵ بار) وارد کندانسور چرخه رانکین آلی می‌شود. سیال کاری داخل چرخه طی تبادل گرمایی با این جریان سرد، به صورت مایع درآمده، وارد



شکل ۴. طرحی از چرخه رانکین آلی.

Figure 4. Scheme of the Organic Rankine Cycle.

جذب شده ($W_{pump}^{CO_2}$)، کار مصرفی پمپ گاز طبیعی مایع (W_{pump}^{LNG})، کار مصرفی پمپ چرخه رانکین آلی (W_{pump}^{ORC}) و برق تولیدی به وسیله چرخه رانکین آلی (در صورت وجود) ($W_{turbine}^{ORC}$) است. در مطالعه حاضر مقدار کار تولیدی با توربین در چرخه آلوم در هر سه حالت بررسی شده مقدار ثابتی است و در معادله لحاظ نشده است. از آنجایی که سوخت ورودی مایع است، کمپرسور مربوطه سوخت (در شکل (۱) مشخص است) هم حذف می شود و کار آن لحاظ نمی شود.

$$W_{total} = W_{comp}^{CO_2} + W_{pump}^{CO_2} + W_{pump}^{LNG} + W_{pump}^{ORC} - W_{turbine}^{ORC} \quad (1)$$

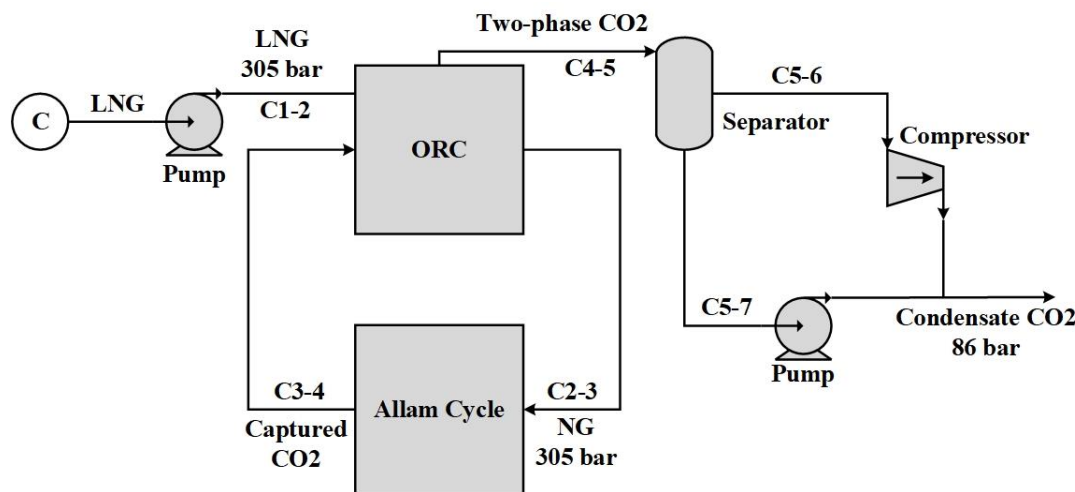
۴. شبیه سازی مسئله مورد مطالعه

طرح مورد نظر مطابق شکل (۱) شبیه سازی شده و خواص ترمودینامیکی و رفتار فازی جریان مواد در سامانه با معادله حالت اصلاح شده پنگ-رابینسون^۱ حساب شده است. برای شبیه سازی چرخه آلوم از سوختی مشابه سوخت مرجع [۱۳] با مشخصات جدول (۱) استفاده شده است. پس از صحت سنجی شبیه سازی انجام شده در مرحله بعد سوخت چرخه به گاز طبیعی مایع تغییر یافته است. گاز طبیعی مایع متان خالص فرض شده است. هم چنین فرضیات لازم برای شبیه سازی تجهیزات مورد استفاده در جدول (۲) آمده است. در این مطالعه، فشار نهایی جریان دی اکسید کربن جذب شده برابر با ۸۶ بار لحاظ شده است [۱۴].

باتوجه به دمای برودتی گاز طبیعی مایع، دمای چگالش چرخه رانکین آلی باید بسیار کمتر از دمای محیط باشد و سیال کاری نیز باید با چرخه های رانکین آلی معمولی - که بالاتر از دمای محیط کار می کنند - متفاوت باشد. با این حال، انتخاب سیال کاری به پیکربندی چرخه و فشار هدف گاز طبیعی نیز بستگی دارد [۱۶]. بادر نظر گرفتن تمامی موارد بیان شده و بررسی خواص سیال های مختلف، اتان به عنوان سیال کاری برای چرخه رانکین آلی انتخاب شده است.

بدین ترتیب مطابق با شکل (۵) برای تبادل انرژی بین انرژی سرد گاز طبیعی مایع هنگام گازی شدن و جریان دی اکسید کربن جذب شده، چرخه رانکین آلی تعبیه می شود؛ سپس به وسیله مبدل حرارتی بین جریان های خروجی از چرخه رانکین آلی تبادل انرژی انجام می گیرد و گاز طبیعی در دمای خیلی پایین و دی اکسید کربن دوفازی به دست می آید. دی اکسید کربن دوفازی وارد جداکننده شده، فاز گاز و مایع از هم جدا می شوند، فاز مایع تا ۸۶ بار پمپ می شود و فاز گاز داخل کمپرسور به همان فشار می رسد و عمدتاً به مایع تبدیل می شود. به کمک این روش برق نیز در چرخه رانکین آلی تولید می شود.

هدف اصلی برای اصلاح این نیروگاه، به حداقل رساندن انرژی کل مصرفی برای گازی سازی مجدد گاز طبیعی مایع و فرایند جذب کربن است. معادله (۱) میزان مصرف انرژی (W_{total}) در چرخه را نشان می دهد که شامل کار مصرفی کمپرسور جریان دی اکسید کربن جذب شده ($W_{comp}^{CO_2}$)، کار مصرفی پمپ جریان دی اکسید کربن



شکل ۵. یک پارچه سازی حرارتی با چرخه رانکین آلی.

Figure 5. Heat integration with the Organic Rankine Cycle.

1. Peng-Robinson

جدول ۱. شرایط خوراک گاز طبیعی [۱۳].

Table 1. Natural gas feed conditions [13].

Natural gas conditions		Mole fraction
Composition	Methane	89
	Ethane	7
	Propane	1
	Butane	0.1
	Pentane	0.01
	N ₂	0.89
	CO ₂	2
Temperature (°C)		15
Pressure (bar)		70
Flowrate (kg/s)		16.52

جدول ۲. فرضیات شبیه‌سازی چرخه آلام [۱۳].

Table 2. Assumptions of the Allam Cycle simulation [13].

Simulation Assumptions	Value	Unit
Adiabatic efficiency of pumps	75	%
Adiabatic efficiency of compressors	75	%
Pressure drop in heat exchangers	0	Bar
Minimum heat exchanger temperature approach	3	K

۵. نتایج و بحث
 مشابه [۱۳] و فرضیات ذکر شده انجام گرفت در جدول‌های (۳) و (۴) نتایج شبیه‌سازی چرخه آلام (شکل (۱)) که با سوخت گازی آورده شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی چرخه آلام در مطالعه فعلی و مرجع.

Table 3. Comparison of simulation results for Allam Cycle in this study and reference.

Stream	Simulation	Flowrate (kg/s)	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Mole fraction				
					Ar	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
RE-3	This work	780.3	50	305	0.57	97.97	0.15	1.18	0.12
	[13]	780.3	50	305	0.57	97.88	0.15	1.18	0.21
RE-4	This work	635.3	720	303	0.57	97.97	0.15	1.18	0.12
	[13]	635.3	720	303	0.57	97.88	0.15	1.18	0.21
OX-1	This work	612.8	45	305	0.53	85.01	0.13	1.05	13.27
	[13]	612.8	45	305	0.53	84.94	0.13	1.05	13.34
OX-2	This work	612.8	720	303	0.53	85.01	0.13	1.05	13.27
	[13]	612.8	720	303	0.53	84.94	0.13	1.05	13.34
FG-1	This work	1265	1152	300	0.53	91.88	6.36	1.11	0.12
	[13]	1264.7	1150	300	0.53	91.8	6.36	1.11	0.2
FG-2	This work	1410	740	34	0.54	92.49	5.74	1.12	0.12
	[13]	1409.6	740	34	0.54	92.41	5.74	1.12	0.2
FG-3	This work	1410	55	33	0.54	92.49	5.74	1.12	0.12
	[13]	1409.6	55	33	0.54	92.41	5.74	1.12	0.2

جدول ۴. نتایج مقایسه‌ای کارکرد چرخه آلوم با مرجع.

Table 4. Comparative performance results of the Allam Cycle.

Parameter	Simulation	Power (MW)
Turbine power output	This work	589.51
	[13]	622.42
Cycle power output	This work	513.40
	[13]	514.24
Natural gas compression work	This work	3.92
	[13]	4.18

گازی‌سازی گاز طبیعی مایع هم در این فشار بالا انجام می‌گیرد. فشار تبخیر کم گاز طبیعی مایع بدین معنی است که باید کار بیشتری برای فشرده‌سازی گاز طبیعی در چرخه مصرف شود. با این حال، فشار گازهای حاصل از احتراق در چرخه آلوم می‌تواند تا ۳۳ بار (بسیار بیشتر از چرخه‌های توان معمولی) باشد که انرژی مورد نیاز فرایند تراکم آن را کاهش می‌دهد [۱۴].

نتایج مربوط به شبیه‌سازی حالت پایه (شکل (۲))، یک پارچه‌سازی حرارتی مستقیم (شکل (۳)) و یک پارچه‌سازی حرارتی غیر مستقیم (شکل (۵)) در جدول (۵) آورده شده است. حالت پایه که از انرژی سرد گاز طبیعی مایع هیچ بهره‌ای نمی‌برد، به‌عنوان ناکارآمدترین روش معرفی می‌شود و کمپرسور جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده حدود ۳۰۳۳ کیلووات کار مصرف می‌کند. صرفه‌جویی در انرژی می‌تواند با یک پارچه‌سازی حرارتی انرژی آزاد شده هنگام گازی‌سازی مجدد گاز طبیعی مایع و انرژی لازم برای جذب دی‌اکسیدکربن جذب‌شده رخ دهد. روش یک پارچه‌سازی حرارتی مستقیم با هدف حذف کمپرسور گاز طبیعی شبیه‌سازی شده است، یعنی گاز طبیعی مایع به‌طور مستقیم قبل از تبدیل مجدد به گاز به ۳۰۵ بار پمپ می‌شود. پمپ گاز طبیعی مایع ۱۵۷۹ کیلووات کار مصرف می‌کند و ۷۲/۵۱ درصد از جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده در چرخه آلوم به‌وسیله گاز طبیعی مایع تبدیل به مایع می‌شود.

میزان دی‌اکسیدکربن بازگشتی ۹۷ درصد است. با مقایسه میان مرجع و شبیه‌سازی انجام‌شده در این تحقیق، قابل‌اتکا است و نتایج مشخصات جریان‌های کلیدی و واحدهای اصلی فرایندی تطابق بسیار خوبی دارند.

حال، بعد از اطمینان از صحت شبیه‌سازی انجام‌شده، سوخت ورودی به چرخه آلوم به گاز طبیعی مایع تغییر می‌یابد. با فرض این که سوخت ورودی متان خالص و گاز حاصل از احتراق دی‌اکسیدکربن خالص باشد، به‌ازای یک مول متان در سوخت، یک مول دی‌اکسیدکربن به‌دست می‌آید. بنابراین می‌توان حرارت لازم را برای مایع‌سازی یک مول دی‌اکسیدکربن و حرارت لازم را برای تبخیر یک مول گاز طبیعی مایع در فشارهای مختلف با یکدیگر مقایسه کرد. نقطه میعان دی‌اکسیدکربن باید بالای نقطه سه‌گانه^۱ باشد. منحنی دما-انتالپی نشان می‌دهد که با افزایش فشار میعان برای دی‌اکسیدکربن، مقدار انرژی مورد نیاز مایع‌سازی کاهش می‌یابد. هم‌چنین، افزایش فشار تبخیر برای گاز طبیعی مایع نیز به کاهش انرژی لازم برای تبخیر آن منجر می‌شود. بنابراین، فشار بالا برای مایع‌سازی دی‌اکسیدکربن (نیاز به مصرف کمتر انرژی برای مایع شدن) و فشار کم برای تبخیر گاز طبیعی مایع (آزاد شدن انرژی بیشتر در حین فرایند گازی‌سازی) مطلوب است [۱۴]. با این حال در چرخه آلوم گاز طبیعی باید تا ۳۰۵ بار فشرده‌شود و بنابراین، فرایند

1. Triple Point

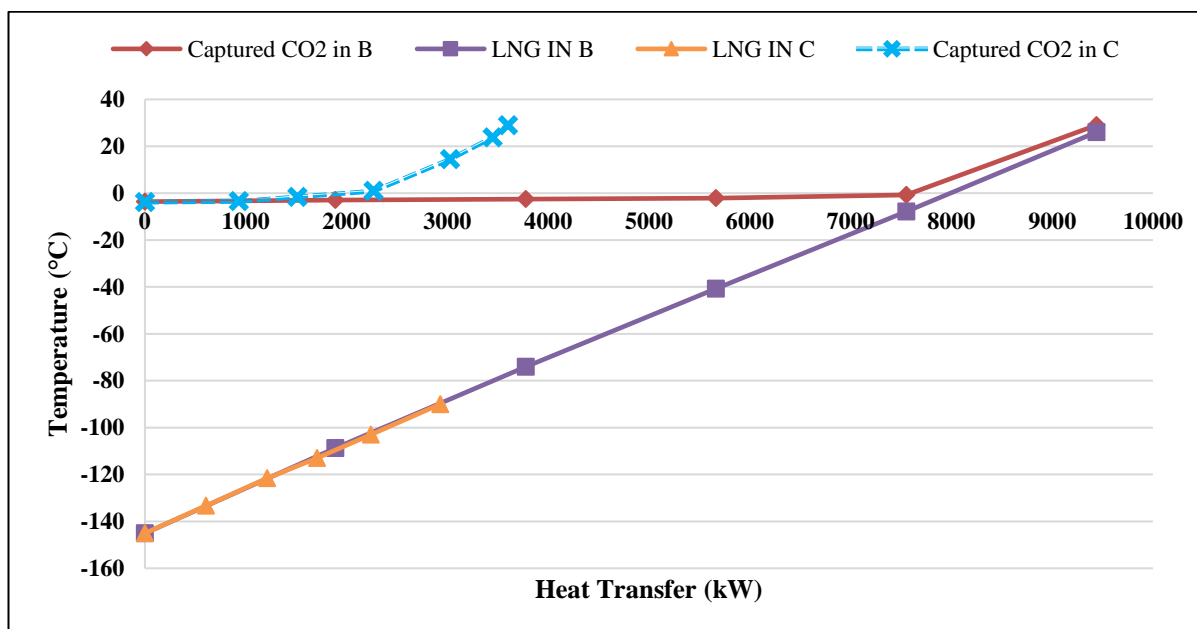
جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی روش‌های مختلف یکپارچه‌سازی حرارتی و حالت پایه.

Table 5. Simulation results of different heat integration methods and base case.

Case	Base case	Direct integration	ORC integration	Unit
W_{pump}^{LNG}	1579	1579	1579	kW
$W_{comp}^{CO_2}$	3033	650.9	913	kW
$W_{pump}^{CO_2}$	0	245	213	kW
$W_{turbine}^{ORC}$	0	0	799.3	kW
W_{pump}^{ORC}	0	0	29.94	kW
W_{total}	4612	2474.9	1935.64	kW

۱/۶۸- درجه سلسیوس می‌رسد. تفاوت آنتالپی جریان‌های گرم و سرد در حالت (ج) مقدار کار خالص تولیدی در چرخه را نشان می‌دهد. دقت شود که فقط بخش انتقال حرارت با کندانسور و تبخیرکننده داخل چرخه رانکین در شکل (۶) رسم شده‌است. هر دو جریان گرم و سرد، بعد از تبادل حرارت با سیال کاری اتان و خروج از چرخه مجدداً وارد یک مبدل حرارتی می‌شوند و با یکدیگر انتقال حرارت انجام می‌دهند و دمای جریان سرد به ۴/۶۷- و دمای جریان گرم به ۲/۵۳- درجه سلسیوس می‌رسد.

منحنی‌های جریان‌های سرد و گرم برای دو طرح پیشنهادی به منظور کاهش مصرف انرژی در شکل (۶) رسم شده‌است. در حالت (ب)، جریان گاز طبیعی مایع از دمای ۱۴۵/۱- به ۲۶ درجه سلسیوس می‌رسد و جریان دی‌اکسیدکربن جذب شده نیز از دمای ۲۹ به ۲/۹۳- درجه سلسیوس سرد می‌شود. همچنین، اختلاف دما بین دو جریان گرم و سرد در منطقه فوق گرم ۳ درجه کلوین است. در حالت استفاده از چرخه رانکین آلی (ج) دمای گاز طبیعی مایع از ۱۴۵/۱- به ۹۱/۹۷- و دمای جریان دی‌اکسیدکربن از ۲۹ به



شکل ۶. نمودار جریان‌های گرم و سرد در دو فرایند یکپارچه‌سازی حرارتی مستقیم و غیر مستقیم.

Figure 6. Hot and cold streams in direct and indirect heat integration.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی بهترین روش‌های یک‌پارچه‌سازی حرارتی برای چرخه آلآم با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی چرخه پرداخته‌شد و دو رویکرد یک‌پارچه‌سازی حرارتی مستقیم و یک‌پارچه‌سازی حرارتی با استفاده از چرخه رانکین آلی در کنار حالت پایه و با انجام شبیه‌سازی ارزیابی‌شد. نتایج حاکی از آن است که یک‌پارچه‌سازی حرارتی با چرخه رانکین آلی با توجه به صرفه‌جویی ۵۸ درصدی و هم‌چنین تولید برق درمقایسه با یک‌پارچه‌سازی حرارتی مستقیم، بهترین انتخاب برای این هدف است. دمای نهایی گاز طبیعی در روش یک‌پارچه‌سازی حرارتی با چرخه رانکین آلی کمتر است و به نظر می‌رسد که بخشی از انرژی سرد گاز طبیعی مایع تلف می‌شود، اما در واقع این انرژی صرف تولید برق در چرخه رانکین می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از سوخت گاز طبیعی مایع در چرخه آلآم می‌توان از انرژی سرد گاز طبیعی مایع برای کاهش کار مربوط به فشرده‌سازی گاز طبیعی و مایع کردن جریان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده بهره‌برد.

چنان‌که در جدول (۶) پیدا است، دمای نهایی گاز طبیعی مایع در حالت استفاده از چرخه رانکین آلی درمقایسه با مقدار آن در روش یک‌پارچه‌سازی حرارتی مستقیم کمتر است. دلیل این امر آن است که مقداری از انرژی سرد گاز طبیعی مایع هنگام گازی‌شدن، استفاده نشده است. با این حال، یک‌پارچه‌سازی حرارتی چرخه رانکین آلی با مبادلات انرژی جریان‌های سرد و گرم می‌تواند الکتریسیته اضافی تولید کند که خود برتری خوبی بر کارایی این روش خواهد بود.

درمقایسه با حالت پایه، یک‌پارچه‌سازی حرارتی به هر دو روش، انرژی مصرفی را به‌طور چشم‌گیری کمتر می‌کند. در روش یک‌پارچه‌سازی حرارتی مستقیم مصرف انرژی ۴۶/۳۴ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به مطالعه انجام‌شده، میزان گاز دی‌اکسیدکربن مایع‌شده در روش یک‌پارچه‌سازی حرارتی مستقیم بیشتر از روش یک‌پارچه‌سازی حرارتی با چرخه رانکین آلی است و این درحالی است که صرفه‌جویی انرژی در روش یک‌پارچه‌سازی حرارتی با چرخه رانکین آلی حدود ۵۸ درصد است.

جدول ۶. نتایج نهایی یک‌پارچه‌سازی حرارتی چرخه آلآم.

Table 6. Final results of heat integration in the Allam Cycle.

Process	Stream	Flowrate (kg/s)	Temperature (°C)	Pressure (bar)
Base case	A1-2	16.52	-145.1	305
Base case	A2-3	16.52	26	305
Base case	A3-4	45.79	29	33
Direct integration	B1-2	16.52	-145.1	305
Direct integration	B2-3	16.52	26	305
Direct integration	B3-2	45.17	29	33
Direct integration	B3-4	45.17	-2.93	33
Direct integration	B4-5	12.39	-2.93	33
Direct integration	B4-6	32.78	-2.93	33
ORC integration	C1-2	16.52	-145.1	305
ORC integration	C2-3	16.52	-4.67	305
ORC integration	C3-4	45.94	29	33
ORC integration	C4-5	45.94	-2.53	33
ORC integration	C4-6	17.46	-2.53	33
ORC integration	C5-7	2848	-2.53	33
ORC integration	ORC pump inlet	5.945	-88.97	1
ORC integration	ORC pump outlet	5.945	-87.66	21.62
ORC integration	ORC turbine inlet	5.945	26	21.62
ORC integration	ORC turbine outlet	5.945	-88.97	1

مراجع

- [1] Rashidi, H., Ahmadpour A. (2009). Comparative investigation of storage and transportation methods of natural gas via compression, adsorption and hydrate. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 7, 64-74, [In Persian].
- [2] Akashah, M. H., Rozali, N. E. M., Mahadzir, S., & Liew, P. Y. (2023). Utilization of cold energy from LNG regasification process: A review of current trends. *Processes*, 11, 517.
- [3] Fakharzadeh, M., Tahouni, N., Abbasi, M., & Panjeshahi, M. H. (2023). Optimization and exergy analysis of a cascade organic Rankine cycle integrated with liquefied natural gas regasification process. *International Journal of Refrigeration*, 156, 186-197.
- [4] Ghaebi, H., Namin, A. S., & Rostamzadeh, H. (2018). Exergoeconomic optimization of a novel cascade Kalina/Kalina cycle using geothermal heat source and LNG cold energy recovery. *Journal of Cleaner Production*, 189, 279-296.
- [5] Yarijani, V., Tahouni, N., Panjeshahi, M.H., & Abbasi, M. (2023). Heat integration of two-low temperature processes: natural gas liquefaction and air separation unit. *Journal of Separation Science and Engineering*, 14(2), 67-81, [In Persian].
- [6] Chan, W., Li, H., Li, X., Chang, F., Wang, L., & Feng, Z. (2021). Exergoeconomic analysis and optimization of the Allam cycle with liquefied natural gas cold exergy utilization. *Energy Conversion and Management*, 235, 113972.
- [7] Kim, D., Giametta, R. E. H., & Gundersen, T. (2018). Optimal use of liquefied natural gas (LNG) cold energy in air separation units. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(18), 5914-5923.
- [8] Chen, X., Yue, J., Fu, L., Zhang, M., Tang, M., Feng, J., & Shen, B. (2023). Green hydrogen production and liquefaction using offshore wind power, liquid air, and LNG cold energy. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138653.
- [9] Janajreh, I., Zhang, H., El Kadi, K., & Ghaffour, N. (2023). Freeze desalination: Current research development and future prospects. *Water Research*, 229, 119389.
- [10] Lim, J., Kim, Y., Cho, H., Lee, J., & Kim, J. (2023). Novel process design for waste energy recovery of LNG power plants for CO₂ capture and storage. *Energy Conversion and Management*, 277, 116587.
- [11] Valiani, S., Tahouni, N., & Panjeshahi, M. H. (2017). Optimization of pre-combustion capture for thermal power plants using Pinch Analysis. *Energy*, 119, 950-960.
- [12] Allam, R. J., Fetvedt, J. E., Forrest, B. A., & Freed, D. A. (2014). The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 45660, V03BT36A016 American Society of Mechanical Engineers.
- [13] Scaccabarozzi, R., Gatti, M., & Martelli, E. (2016). Thermodynamic analysis and numerical optimization of the NET Power oxy-combustion cycle. *Applied energy*, 178, 505-526.
- [14] Yu, H., Gundersen, T., & Gençer, E. (2021). Optimal liquified natural gas (LNG) cold energy utilization in an Allam cycle power plant with carbon capture and storage. *Energy Conversion and Management*, 228, 113725.
- [15] Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and sustainable energy reviews*, 47, 448-461.
- [16] Yu, H., Feng, X., Wang, Y., Biegler, L. T., & Eason, J. (2016). A systematic method to customize an efficient organic Rankine cycle (ORC) to recover waste heat in refineries. *Applied Energy*, 179, 302-315.