

## ارزیابی فنی - اقتصادی به کارگیری چرخه یک طبقه ای مایع سازی گاز طبیعی با مبرد چند جزئی به منظور قله سایی نیاز صنایع انرژی بر

**امیرفرشاد کلوانی** کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، اداره کل استاندارد استان تهران، تهران، ایران، amirfarshadkalvani@gmail.com  
**مصطفی مافی\*** دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی<sup>(۶)</sup>، قزوین، ایران، mostafa.mafi@gmail.com  
**منصور خانکی** دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی<sup>(۶)</sup>، قزوین، ایران، khanaki.m@gmail.com

### چکیده

واحدهای مایع سازی قله سایی با توجه به کاهش ۶۰۰ برابری حجم گاز طبیعی، مطلوب ترین شیوه برای ذخیره سازی گاز طبیعی مازاد در فصول گرم سال و استفاده از آن در ایام سرد سال در مجاورت صنایع انرژی بر است. در این پژوهش ضمن انتخاب نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی، چرخه مبرد چند جزئی یک طبقه ای با هدف تامین سوخت مورد نیاز کل واحدهای این نیروگاه برای ۶۰ روز کارکرد، شبیه سازی شد و مورد تحلیل فنی قرار گرفت. در ادامه میزان سرمایه گذاری اولیه و هزینه های جاری واحد مایع سازی گاز طبیعی محاسبه شد. ارزیابی اقتصادی طرح بر اساس روش ارزش خالص فعلی با فرض نرخ تنزیل ۱۲ درصد بیانگر دوره بازگشت سرمایه ای معادل ۴/۳ سال است. تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات نرخ تنزیل و هزینه سرمایه گذاری اولیه از دیگر مواردی است که در این پژوهش مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان می دهد حتی با افزایش نرخ تنزیل تا ۴۰ درصد و یا افزایش ۵۰ درصدی هزینه سرمایه گذاری اولیه نیز احداث واحد مایع سازی توجیه اقتصادی دارد اما با توجه به عمر ۲۰ ساله طرح، چنین دوره بازگشت سرمایه ای چندان مطلوب نیست. **واژه های کلیدی:** مایع سازی گاز طبیعی، قله سایی، مبرد چند جزئی، نیروگاه شهید رجایی، ارزیابی اقتصادی، تحلیل حساسیت.

## Techno-Economic Assessment of Using Single Mixed Refrigerant Cycle for Natural Gas Liquefaction in order to Energy Demand Peak-Shaving in Industrial Units

**A. Farshad Kalvani** General Bureau of Standard Tehran Province, Tehran, Iran  
**M. Mafi** Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran  
**M. Khanaki** Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

### Abstract

Constructing peak-shaving liquefaction units with 600 times 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. In this research, along with selecting Shahid Rajaei power plant in Qazvin as case study, the natural gas liquefaction cycle with mixed refrigerant with the purpose of supplying the fuel of total unit of this power plant for 60 days was established; and subjected to technical analysis. Then the amount of initial investment and current costs of the natural gas liquefaction unit is calculated. The economic evaluation of the project based on the net present value method and 12 percent discount rate assumption indicates the payback period is 4.3 years. Sensitivity analysis about variation in discount rate and initial investment cost is another consideration in this study. The results show that even with an increase in the discount rate up to 40% or 50% increase in the initial investment cost, the construction of liquefaction unit is economically justified, but by considering that the life cycle of project is 20 years, such a payback period is not much desirable.

**Keywords:** Natural Gas Liquefaction, Peak Shaving, Mixed Refrigerant, Shahid Rajaei Power Plant, Economic Evaluation, Sensitivity Analysis.

پتانسیل بالا بهره مند گردد. 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 شد که از این مقدار، سهم نیروگاه شهید رجایی ۲ میلیارد و ۶۳۴ میلیون متر مکعب بود که معادل ۵۰ درصد مصرف کل استان است [۳]. با توجه به این که واحدهای صنعتی و نیروگاه های کشور عمده مصرف کنندگان 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 افت فشار در شبکه سراسری گاز، واحدهای صنعتی و نیروگاهی از شبکه سراسری تغذیه نخواهند شد و به تناسب سیستم های موجود، این واحدها با سوخت ثانویه نظیر گازوئیل یا مازوت به فعالیت خود ادامه می دهند. یک

### ۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت و توسعه صنایع در تمامی کشورها اعم از توسعه یافته یا در حال توسعه، همواره نگرانی از بابت کمبود منابع و زیرساخت ها وجود دارد. نیاز به سوخت یکی از اضلاع اصلی شکل گیری فعالیت صنایع است و تامین سوخت باید به شکل پایدار، مقرون به صرفه و در عین حال سازگار با محیط زیست باشد. با توجه به آلاینده های اندک و قیمت مناسب گاز طبیعی نسبت به سایر سوخت های فسیلی انتظار می رود که گاز طبیعی نقش کلیدی در بازار حامل های انرژی در دهه های آینده داشته باشد [۱]. شایان ذکر است ایران به عنوان دومین دارنده منابع عظیم گاز طبیعی جهان [۲] می تواند در بخش های مختلف مصرف اعم از بخش خانگی، صنایع و نیروگاه ها، حمل و نقل و ... از این

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

راهکار مناسب جهت حل این مشکل این است که با احداث واحدهای مایع‌سازی کوچک‌مقیاس در مجاورت واحدهای صنعتی و نیروگاه‌ها، در فصول گرم سال که مصرف گاز طبیعی کاهش می‌یابد، گاز مازاد در شبکه با قیمتی منطبق بر سیاست‌های حمایتی دولت، مایع و ذخیره گردد و با آغاز فصل سرما و قطع ارتباط این صنایع با شبکه سراسری توزیع گاز طبیعی، سوخت موردنیاز این واحدها از محل ذخیره شده، تامین گردد. شایان ذکر است بنا بر اعلام سازمان حفاظت از محیط زیست در بهمن ماه سال ۱۳۹۷، روزانه ۴۴۰ هزار بشکه مازوت در نیروگاه‌های کشور سوزانده شده است که این امر در فصل زمستان به علت پدیده وارونگی هوا بسیار زیان‌آور است [۴]. یکی از مهم‌ترین راهکارها جهت مدیریت و کاهش تبعات زیست محیطی بخش انرژی، استفاده از سوخت‌های پاک نظیر گاز طبیعی و منابع انرژی تجدیدپذیر است. لازم به ذکر است تکنیک ذخیره‌سازی گاز طبیعی به شکل مایع شده علاوه بر کاهش آلودگی محیط زیست، موجب کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات نیروگاهی و سهولت در بهره‌برداری از آن‌ها خواهد شد، که این کاهش مخارج باعث کاهش هزینه تمام شده برق تولیدی خواهد شد؛ ضمن آن که کاهش واردات گازوئیل و افزایش صادرات مازوت و در نتیجه افزایش درآمد ارزی کشور را به ارمغان خواهد آورد. فرآیندهای مایع‌سازی گاز طبیعی را می‌توان به سه گروه اصلی چرخه مایع‌سازی آبشاری، چرخه مایع‌سازی میرد چندجزئی و چرخه مایع‌سازی انبساطی تقسیم نمود. هر یک از این چرخه‌ها دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود می‌باشد. چرخه‌هایی که در واحدهای قله‌سایه به کار گرفته می‌شوند باید از ویژگی‌های خاصی مانند سادگی در ساختار و عملکرد، کم حجم بودن تاسیسات و عدم حساسیت به تغییرات محیطی و شرایط گاز خوراک برخوردار باشند [۵].

با توجه به جریان‌های درآمدی و هزینه‌ای متعدد پیرامون بحث احداث واحدهای مایع‌سازی کوچک‌مقیاس در مجاورت نیروگاه‌ها، بایستی با ارائه مدل سرمایه‌گذاری و بازگشت سرمایه، توجیه‌پذیری اقتصادی احداث چنین واحدهایی برای مدیران و مسئولین تصمیم‌گیر، شناسانده شود.

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در راستای جنبه‌های فنی و تکنولوژیک و بهبود عملکرد واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی انجام گرفته است. در پژوهش کوثری و وافری [۶] امکان‌سنجی ایجاد فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی با استفاده از خط لوله سراسری گاز ایران برای مصرف در حمل و نقل جاده‌ای بررسی شد. در این راستا چرخه میرد چندجزئی ساده در نرم افزار شبیه‌سازی شد و در نهایت با مقایسه خروجی نرم افزار با فرآیندهای مرسوم، امکان اجرای این واحدها مورد تایید قرار گرفت. در پژوهش گونگ و همکاران [۷] یک دستگاه مایع‌ساز گاز طبیعی با میرد چندجزئی مورد طراحی و تست قرار گرفت و به جهت این‌که این دستگاه بایستی برای کاربردهای قله‌سایه و مایع‌سازی مجدد بخارات گاز طبیعی مایع مناسب باشد اقدام به طراحی قطعات آن با رویکرد فضاگیری اندک و عملکرد بالاتر شد و به لحاظ میزان مصرف انرژی ویژه مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش نگوین و همکاران [۸] روی سه چیدمان مناسب برای کاربردهای کوچک‌مقیاس که به علت سادگی و جمع و جور بودن در صنعت مایع‌سازی کاربرد دارند مطالعه‌ای انجام گرفت. این سه چیدمان عبارتند از: ۱- چرخه میرد چندجزئی تکی ۲- چرخه برایتون معکوس تکی ۳- چرخه برایتون

معکوس دوتایی. تاثیر ترکیب‌های مختلف گاز خوراک و خواص میرد مورد تحلیل قرار گرفت و یک ارزیابی با جزئیات از جریان‌های انرژی و انرژی برقرار شد و با به کارگیری روندهای بهینه‌سازی چند هدفه بهینه‌ترین طرح‌های چرخه مشخص گردید. در پژوهش کلوانی و همکاران [۹] چرخه مایع‌سازی گاز طبیعی با میرد چندجزئی و پیش‌سرمایش تبرید جذبی شبیه‌سازی گردید و ضمن برقراری تحلیل انرژی، عملکرد این چرخه با چرخه میرد چندجزئی یک طبقه‌ای ساده (رانکین معکوس) مقایسه شد. در پژوهش کرملو و همکاران [۱۰] سیستم مایع‌ساز گاز طبیعی دو طبقه‌ای میرد چندجزئی مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد این سیستم تحت تاثیر تغییرات شرایط عملیاتی و محیطی نظیر دما، فشار و ترکیب گاز خوراک مورد مطالعه قرار گرفت. در پژوهش مرادی و همکاران [۱۱] در ابتدا به معرفی چرخه‌های مطرح در حوزه ذخیره‌سازی گاز طبیعی پرداخته شد و با استفاده از روش آنالیز اغتشاشات، رفتار پارامترهای عملکردی آنان نسبت به تغییرات محیطی و عملیاتی خطوط توزیع گاز کشور، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در پژوهش شیرازی و همکاران [۱۲] امکان‌سنجی فنی-اقتصادی احداث واحد مایع‌سازی کوچک‌مقیاس با هدف تامین گاز موردنیاز مناطق دور از شبکه سراسری گاز ایران (مطالعه موردی: شمال ایران) مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ به مقایسه و بررسی تحقیقات انجام گرفته طی سال‌های ۲۰۱۲ الی ۲۰۲۱ می‌پردازد. همانطور که مشاهده می‌گردد مطالعه پیرامون برآورد میزان نیاز به گاز طبیعی مایع جهت تامین سوخت نیروگاه‌های برق حرارتی کشور در فصول سرد، که از صنایع انرژی‌بر 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 کارکرد (دوران اوج مصرف گاز طبیعی و دارای بیشترین احتمال قطعی گاز)، فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی با چرخه میرد چندجزئی ساده، به عنوان یکی از چرخه‌های رایج در حوزه مایع‌سازی گاز طبیعی، شبیه‌سازی می‌گردد و ضمن اعتبارسنجی خروجی شبیه‌سازی با اطلاعات مندرج در پژوهش کوثری و وافری [۶]، شاخص عملکردی کار مصرفی به ازای واحد جرم گاز طبیعی مایع تولیدی محاسبه و با پژوهش‌های مشابه مقایسه می‌شود. در ادامه بر مبنای اصول اقتصاد مهندسی و محاسبه پارامترهایی نظیر ارزش فعلی خالص، نسبت منافع به مخارج و دوره بازگشت سرمایه، توجیه‌پذیری اقتصادی احداث چنین واحدهایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت با انجام تحلیل حساسیت، میزان اثرگذاری عواملی نظیر تغییرات در نرخ تنزیل و تغییرات در هزینه سرمایه‌گذاری اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که مطالعات قبلی در این زمینه هیچ کدام بر جنبه‌های اقتصادی تکیه نکرده‌اند و از آنجایی که تاکنون در ایران هیچ واحد مایع‌سازی گاز طبیعی احداث نشده است، توجه به مسائل اقتصادی و ارائه مدلی جهت سرمایه‌گذاری و بازگشت سرمایه برای مدیران بالادستی بسیار حائز اهمیت است و از جنبه‌های نوآورانه پژوهش حاضر محسوب می‌گردد.

جدول ۱- خلاصه مهم‌ترین تحقیقات انجام شده از سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۲۱

ردیف	سال	محقق	چرخه مورد مطالعه	اقدامات	خروجی
۱	۲۰۱۲	گونگ و همکاران [۷]	مبرد چندجزئی	طراحی قطعات متناسب با کاربری قله‌سایی	میزان مصرف انرژی ویژه
۲	۲۰۱۵	مرادی و همکاران [۱۱]	مبرد چندجزئی ساده اکسپاندی-نیترژی	آنالیز اغتشاشات ناشی از تغییرات محیطی و عملیاتی	انتخاب مناسب‌ترین چرخه با توجه به شرایط
۳	۲۰۱۶	کرملو و همکاران [۱۰]	مبرد چندجزئی دو طبقه‌ای	اعمال تغییر در دما، فشار و ترکیب گاز خوراک	بررسی رفتار سیستم ناشی از تغییرات در ورودی
۴	۲۰۱۸	نگوین و همکاران [۸]	چرخه مبرد چندجزئی ساده چرخه برایتون معکوس تکی چرخه برایتون معکوس دو تایی	تغییر در شرایط گاز خوراک و مبرد آنالیز انرژی و انرژی	انتخاب بهینه‌ترین چرخه
۵	۲۰۱۹	شیرازی و همکاران [۱۲]	مبرد چندجزئی	طراحی بخش‌های مختلف یک کارخانه گاز طبیعی مایع مشتمل بر تولید، ذخیره‌سازی و بارگیری	امکان‌سنجی فنی و اقتصادی
۶	۲۰۲۰	کوثری و وافری [۶]	مبرد چندجزئی ساده	شبیه‌سازی چرخه براساس شرایط خطوط لوله سراسری گاز ایران	امکان‌سنجی فنی و اقتصادی
۷	۲۰۲۱	کلوانی و همکاران [۹]	مبرد چندجزئی ساده مبرد چندجزئی با پیش‌سرمایش تبرید جذبی	شبیه‌سازی چرخه‌ها تحلیل فنی و آنالیز انرژی	میزان بهبود ناشی از استفاده از پیش‌سرمایش تبرید جذبی نسبت به حالت پایه

۲- معرفی نمونه مورد مطالعه و محاسبات میزان

### سوخت موردنیاز

نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی قزوین، شامل نیروگاه بخار و چرخه ترکیبی، با مجموع ظرفیت تولید ۲۰۴۲ مگاوات است. نیروگاه بخار شامل ۴ واحد ۲۵۰ مگاواتی با ظرفیت تولید ۱۰۰۰ مگاوات و نیروگاه چرخه ترکیبی شامل ۶ واحد گازی ۱۲۳/۴ مگاواتی و ۳ واحد بخار ۱۰۰/۶ مگاواتی با ظرفیت تولید ۱۰۴۲/۲ مگاوات است [۱۳]. در این بخش سوخت موردنیاز واحدهای بخار و واحدهای چرخه ترکیبی برای دو حالت تامین سوخت با سوخت اصلی (گاز طبیعی) و تامین سوخت با سوخت جایگزین (گازوئیل و مازوت) به مدت ۶۰ روز کارکرد به تفکیک تعیین می‌گردد. مقادیر مربوط به کارایی حرارتی واحدهای مختلف و ارزش حرارتی گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت از آمار تفصیلی صنعت برق ایران [۱۴] استخراج شده است و این مقادیر به همراه میزان گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت مورد نیاز واحد نیروگاهی برای دو ماه کار مداوم، در جدول ۲ آورده شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۲ بیانگر این مهم است که اگر گاز طبیعی، سوخت اصلی باشد برای تامین نیاز ۶۰ روزه نیروگاه به ۷۰۶/۴۲ میلیون متر مکعب گاز طبیعی نیاز است و در صورت استفاده از سوخت جایگزین (گازوئیل و مازوت) برای تامین نیاز ۶۰ روزه نیروگاه به ۳۳۱ میلیون لیتر گازوئیل و ۳۲۴ میلیون لیتر مازوت نیاز است. علت این‌که در محاسبات مربوط به تعیین میزان سوخت موردنیاز نیروگاه، علاوه بر میزان گاز طبیعی، مقدار گازوئیل و مازوت مصرفی نیز محاسبه شده است این است که از این اعداد برای مقایسه هزینه‌ی تمام شده سوخت مصرفی نیروگاه طی ۶۰ روز کارکرد نیروگاه در صورت استفاده از هر سوخت، استفاده می‌شود.

جدول ۲- محاسبات مربوط به میزان نیاز نیروگاه چرخه ترکیبی شهید

رجایی به سوخت گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت

ردیف	عنوان	چرخه ترکیبی	چرخه بخار	مرجع محل اقتباس
۱	توان نیروگاه (مگاوات)	۱۰۴۲/۲	۱۰۰۰	[۱۳]
۲	راندمان حرارتی (درصد)	۴۵/۴	۳۷/۱	[۱۴]
۳	توان حرارتی مورد نیاز (مگاوات)	۲۲۹۵/۶	۲۶۹۵/۴۲	
۴	تعداد روزهای کمبود گاز طبیعی (دوران اوج مصرف شبکه)	۶۰ روز	۶۰ روز	
۵	ارزش حرارتی گاز طبیعی (مگاژول بر مترمکعب)	۳۶/۶۶۴	۳۶/۶۶۴	[۱۴]
۶	ارزش حرارتی مازوت (مگاژول بر لیتر)	---	۴۳/۱۸۳	[۱۴]
۷	ارزش حرارتی گازوئیل (مگاژول بر لیتر)	۳۶/۹۸۲	---	[۱۴]
۸	گاز طبیعی موردنیاز دوره اوج مصرف (میلیون متر مکعب)	۲۲۴/۵۷	۳۸۱/۸۵	

۹	کل گاز طبیعی موردنیاز دوره اوج مصرف (میلیون متر مکعب)	۷۰۶/۴۲	
۱۰	مازوت موردنیاز دوره اوج مصرف (میلیون لیتر)	---	۳۲۴/۴
۱۱	گازوئیل موردنیاز دوره اوج مصرف (میلیون لیتر)	۳۳۰/۷۲	---

در جدول ۳ قیمت تمام شده برای انواع سوخت مصرفی آورده شده است. لازم به ذکر است مبنای قیمت‌ها بدین صورت است که قیمت گاز طبیعی به صورت تبدیل تعرفه گاز نیروگاهی به دلار (با نرخ تسعیر دلار ۴۲۰۰ تومانی) و قیمت گازوئیل و مازوت با نرخ جهانی (به جهت عدم مصرف در نیروگاه و امکان صادرات) محاسبه شده است.

جدول ۳- هزینه تمام شده خرید / فروش سوخت های نیروگاه [۱۵]

نوع سوخت	مقدار مصرفی	قیمت خرید / فروش (میلیون دلار)	قیمت نهایی (میلیون دلار)
گاز طبیعی	۷۰۶/۴۲ متر مکعب	۰/۰۲۴ دلار بر مترمکعب	۱۶/۹۵
گازوئیل	۳۳۱ لیتر	۰/۳۱ دلار بر لیتر	۱۰۲/۶
مازوت	۳۲۴ لیتر	۰/۴۶ دلار بر لیتر	۱۴۹
اختلاف قیمت گاز طبیعی با سوخت جایگزین در بازه ۶۰ روزه			۲۳۴/۶۵

بر مبنای قیمت حامل های انرژی (در ۱۱ فوریه ۲۰۲۱) قیمت هر گالن گازوئیل معادل با ۱/۱۷ دلار و قیمت هر گالن مازوت معادل با ۱/۷۶ دلار در نظر گرفته شده است و قیمت گاز طبیعی تحویلی به نیروگاه‌ها مطابق تعرفه اعلامی شرکت ملی گاز ایران در سال ۱۳۹۹، ۱۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب (معادل با ۲/۴ سنت به ازای هر مترمکعب) خواهد بود. که با توجه به این نرخ ها سود حاصل از استفاده از گاز طبیعی به جای گازوئیل و مازوت تنها برای ۶۰ روز کارکرد (گذراندن دوران اوج مصرف یک سال) در حدود ۲۳۵ میلیون دلار خواهد بود.

### ۳- مایع سازی گاز طبیعی

#### ۳-۱- معرفی گاز طبیعی مایع

گاز طبیعی مایع از مایع‌سازی گاز طبیعی در فرآیندی متشکل از چرخه‌های تراکم و برودت به وجود می‌آید. در این تغییر فاز، حجم گاز طبیعی ۶۰۰ برابر کاهش پیدا می‌کند و در نهایت گاز طبیعی مایع در

فشار جو و دمای ۱۶۰- درجه سلسیوس در مخازن ویژه‌ای ذخیره می‌گردد [۵]. گاز طبیعی به دلیل ماهیت فیزیکی اش در شرایط استاندارد تنها از طریق خطوط لوله قابل انتقال است بنابراین اگر کشوری بخواهد گاز را در مسیرهای بین قاره‌ای صادر نماید تنها شیوه ممکن، تولید گاز طبیعی مایع و سپس حمل آن با کشتی‌های مخصوص است؛ لذا در حال حاضر عمده گاز طبیعی مایع تولید شده در دنیا به همین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از بزرگترین صادرکنندگان گاز طبیعی مایع از حوزه مشترک پارس جنوبی، کشور قطر است ولی در کشور ما هنوز تکنولوژی تولید گاز طبیعی مایع وجود ندارد گرچه برنامه‌هایی برای احداث این واحدها در منطقه عسلویه در دست اجراست.

#### ۳-۲- ذخیره سازی گاز طبیعی مایع

یکی از مهم‌ترین کاربردهای گاز طبیعی مایع که مدنظر مقاله حاضر است، تولید گاز طبیعی مایع به منظور ذخیره سازی گاز در داخل کشور است. کاهش حجم گاز طبیعی در اثر فرآیند میعان به میزان ۶۰۰ برابر، ذخیره‌سازی مقادیر عظیمی را به شکل گاز طبیعی مایع در یک مخزن معمولی امکان‌پذیر می‌سازد. البته تولید گاز طبیعی مایع به دلیل پیچیدگی‌های فنی آن مستلزم به‌کارگیری تکنولوژی پرهزینه‌ای است که سرمایه‌گذاری را نسبت به روش ذخیره‌سازی زیرزمینی افزایش می‌دهد ولی ویژگی بسیار مهم و با ارزش این روش یعنی امکان ذخیره سازی گاز در هر نقطه از کشور که شبکه گاز وجود داشته باشد و نیز امکان ذخیره‌سازی گاز به مقدار دلخواه، موجب برتری و رجحان این شیوه ذخیره‌سازی می‌گردد. به طور کلی در حوزه ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع شده از دو دسته مخزن استفاده می‌گردد این دو دسته شامل مخازن ذخیره در فشار جوی و مخازن ذخیره تحت فشار هستند. مخازن ذخیره تحت فشار معمولاً برای واحدهای مایع‌سازی کوچک و حجم ذخیره کم مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ درحالی‌که مخازن ذخیره جوی معمولاً در ذخیره‌سازی محصول واحدهای مایع‌سازی با ظرفیت بالا استفاده می‌شوند [۱۶].

#### ۳-۳- معرفی چرخه مایع‌سازی گاز طبیعی مبرد

##### چندجزئی ساده ( یک طبقه‌ای)

فرآیند مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای یا رانکین معکوس، ساده‌ترین نوع فرآیندهای مبرد چندجزئی می‌باشد. 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 [۱۱]. شکل ۱، شمای کلی فرآیند مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای را نشان می‌دهد. توان مصرفی و کارایی این چرخه در مقایسه با فرآیند انبساطی-نیتروژنی مقبول‌تر است. بالا بودن ضریب انتقال حرارت مربوط به مبرد چندجزئی موجب کاهش دبی مبرد نسبت به فرآیند انبساطی و کاهش توان مصرفی چرخه می‌گردد. استفاده از مبردهای هیدروکربنی و مخازن حاوی هیدروکربن (برای

			اوج مصرف (میلیون متر مکعب)	
۷	ضریب تغییر حجم گاز طبیعی مایع	۶۰۰	۶۰۰	[۵]
۸	حجم گاز طبیعی مایع مورد نیاز دوره اوج (متر مکعب)	۵۴۰۹۵۰	۶۳۶۴۱۷	
۹	چگالی گاز طبیعی مایع (کیلوگرم بر مترمکعب)	۴۵۰	۴۵۰	[۵]
۱۰	جرم گاز طبیعی مایع مورد نیاز دوره اوج (تن)	۲۴۳۴۲۸	۲۸۶۳۸۸	
۱۱	تعداد روز مد نظر برای تولید گاز طبیعی مایع	روز ۲۰۰	روز ۲۰۰	[۵]
۱۲	ظرفیت واحد مایع سازی (تن در روز)	۱۲۱۷	۱۴۳۲	
ظرفیت کل واحد مایع سازی (تن در روز)		۲۶۴۹		

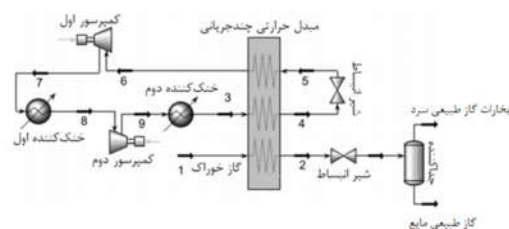
با توجه به ارقام حاصل از جدول ۴، واحد مایع‌سازی بایستی دارای ظرفیت تولید ۲۶۴۹ تن در روز گاز طبیعی مایع باشد تا بتواند در طی ۲۰۰ روز کارکرد (روزهای غیر اوج در شبکه توزیع گاز کشور)، گاز موردنیاز نیروگاه شهید رجایی را تامین کند.

#### ۴- تحلیل فنی

##### ۴-۱- مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند

در این پژوهش جهت شبیه‌سازی چرخه مورد مطالعه از نرم افزار Aspen HYSYS نسخه ۴.۸ استفاده شده است. نرم افزار Aspen HYSYS به دلیل داشتن معادله حالت‌های مناسب برای کاربردهای گوناگون، تعریف اغلب المان‌های مورد نیاز شبیه‌سازی، وجود 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 حوزه 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

تامین نشت میرد احتمالی)، از معایب اصلی این فرآیند است و کاهش ایمنی را در پی دارد. استفاده از میرد دو فازی موجب افزایش پیچیدگی فرآیند و تجهیزات شده و زمان آغاز به کار این فرآیند را افزایش می‌دهد [۱۱]. در این فرآیند، کاهش دما و در نتیجه تولید سرمایش به سبب انبساط آنتالپی ثابت میرد خروجی از مبادله‌کن گرمایی چند جریانی در شیر اختناق صورت می‌پذیرد.



شکل ۱- فرآیند مایع‌سازی میرد چندجریانی یک طبقه‌ای [۱۱]

##### ۴-۳- محاسبات ظرفیت واحد مایع سازی

با توجه به موارد ذکر شده در بخش ۲ پیرامون نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی قزوین و اطلاعات تکمیلی پیرامون گاز طبیعی مایع، محاسبات مربوط به میزان نیاز نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی به سوخت گاز طبیعی مایع برای دو ماه کار مداوم در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- محاسبات مربوط میزان نیاز نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی به سوخت گاز طبیعی مایع

ردیف	عنوان	چرخه ترکیبی	چرخه بخار	مرجع محل اقتباس
۱	توان نیروگاه (مگاوات)	۱۰۴۲/۲	۱۰۰۰	[۱۳]
۲	راندمان حرارتی (درصد)	۴۵/۴	۳۷/۱	[۱۴]
۳	توان حرارتی مورد نیاز (مگاوات)	۲۲۹۵/۶	۲۶۹۵/۴۲	
۴	تعداد روزهای کمبود گاز طبیعی (دوران اوج مصرف شبکه)	روز ۶۰	روز ۶۰	
۵	ارزش حرارتی گاز طبیعی (مگاژول بر مترمکعب)	۳۶/۶۶۴	۳۶/۶۶۴	[۱۴]
۶	گاز طبیعی موردنیاز دوره	۳۲۴/۵۷	۳۸۱/۸۵	

استفاده شده است. در جدول ۵ مشخصات جریان خوراک، مبرد 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 [۱۷] فرض شده است که این مقادیر در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- مشخصات فرآیندی و ترکیبات جریان خوراک، مبرد چندجزئی و محصول گاز طبیعی مایع

نام جریان	گاز طبیعی خوراک	گاز طبیعی مایع	مبرد چندجزئی (پس از خنک کننده دوم)
دبی (تن بر ساعت)	۱۲۲	۱۱۱	۹۱۸
دما (درجه سلسیوس)	۳۲	-۱۶۱	۲۷
فشار (بار)	۶۰	۱	۲۴
ترکیبات (درصد مول)			
نیترژن	۴	۱/۵۴	۷
متان	۸۷/۵	۸۹/۳۳	۴۱/۸
اتان	۵/۵	۵/۹۱	۲۹/۹
پروپان	۲/۱	۲/۲۶	۲۱/۳
نرمال- بوتان	۰/۵	۰/۵۴	---
ایزو- بوتان	۰/۳	۰/۳۲	---
ایزو- پنتان	۰/۱	۰/۱۱	---

#### ۲-۴- قیدهای مدل‌سازی

قیدها و ساده‌سازی در نظر گرفته شده در مدل توسعه داده شده برای فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای در این تحقیق مطابق موارد زیر فرض شده است:

- افت فشار در مبادله‌کن گرما، ۳۰ کیلوپاسکال فرض شده است.
- کارایی آیزنتروپیک کمپرسورها ۷۵٪ در نظر گرفته شده است.
- مایع وارد کمپرسور نمی‌شود.
- حد اقل اختلاف دما بین جریان‌های سرد و گرم در مبادله کن‌های گرمای چندجریانی ۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.
- تلفات گرما در مبادله‌کن گرما ناچیز است.

#### ۳-۴- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

جهت اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی چرخه‌ی مبرد چند جزئی یک طبقه‌ای در تحقیق حاضر با مرجع شماره [۶] مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که چرخه مورد استفاده در تحقیق حاضر همانند چرخه مرجع شماره [۶] است.

جدول ۶- اعتبارسنجی شبیه‌سازی تحقیق حاضر با مرجع شماره [۶]

تحقیق حاضر	مرجع شماره [۶]	
توان مصرفی کمپرسورهای چرخه (مگاوات)	۴۴/۷۵	۲۱/۸۷
دبی گاز طبیعی مایع (تن بر ساعت)	۱۱۱	۶۲/۵
توان مصرفی ویژه کمپرسورها (مگاوات ساعت بر تن ال ان جی)	۰/۴۰۳	۰/۳۵

با توجه به اعداد و ارقام مشخص می‌گردد که شبیه‌سازی انجام گرفته صحیح است و از تطابق خوبی با مقاله کوثری و وافری [۶] برخوردار است.

در جدول ۷ مقایسه توان مصرفی ویژه کمپرسورهای چرخه مورد مطالعه در این پژوهش با چهار مورد پژوهش قبلی که بیشترین شباهت را به لحاظ چیدمان تجهیزات با چرخه مایع‌سازی تحقیق حاضر دارند، آورده شده است.

جدول ۷- توان مصرفی ویژه کمپرسورهای تحقیق حاضر و پژوهش‌های پیشین

توان مصرفی ویژه کمپرسورها (مگاوات ساعت بر تن ال ان جی)	درصد اختلاف	پیشین
۰/۴۰۳	---	تحقیق حاضر
۰/۳۵۰	۱۳	کوثری و وافری [۶]
۰/۴۱۲	۲/۲۳	مرادی و همکاران [۱۰]
۰/۴۱۷	۳/۳۵	نگوین و همکاران [۷]
۰/۴۲۴	۴/۹۵	گونگ و همکاران [۶]

#### ۴-۴- نتایج تحلیل فنی و بحث

در این بخش، شاخص‌های عملکردی چرخه‌ی مبرد چندجزئی یک طبقه‌ای ساده مورد محاسبه قرار می‌گیرند. پارامتر مهمی که برای بررسی بازده مایع‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد توان مصرفی ویژه است که از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$SPC \left( \frac{MWh}{ton\ LNG} \right) = \frac{Power\ consumption\ of\ the\ cycle\ (MW)}{LNG\ product\ flowrate\ \left( \frac{ton}{hr} \right)} \quad (1)$$

پس از انجام شبیه‌سازی در نرم افزار Aspen HYSYS با توجه به

جدول ۹- تابع هزینه خرید تجهیزات اساسی یک کارخانه تولید گاز طبیعی مایع

ردیف	نام تجهیز	تابع هزینه خرید تجهیز [۱۸]
۱	کمپرسور	$PEC_{Compressor} = 142.12(Power)^{0.4}$
۲	مبادله کن‌های گرمایی چندجریانی	$PEC_{HeatExchanger} = 30000 + 1900(Area)^{0.83}$
۳	خنک کننده	$PEC_{Aircooler} = 30(Area)^{0.4}$
۴	مخزن ذخیره	$PEC_{Storage\ tank} = 1218F_M \exp(f(V))$

در شکل ۲ نمایی از یک واحد مایع‌سازی در مجاورت نیروگاهی با ظرفیت تولید ۱۰۰ مگاوات نشان داده شده است [۲۰].



شکل ۲- نمایی از یک واحد مایع‌سازی گاز طبیعی در مجاورت نیروگاه [۲۰]

### ۲-۵- برآورد هزینه های جاری واحد مایع سازی

یک واحد مایع‌سازی گاز طبیعی دارای مخارج جاری اعم از هزینه حامل‌های انرژی (شامل خرید گاز طبیعی از شبکه سراسری توزیع، هزینه خرید برق موردنیاز برای راه اندازی کمپرسورها و سایر تجهیزات مصرف کننده الکتریسیته)، هزینه تعمیرات و نگهداری سالیانه است که روابط و محاسبه آنها در جدول ۱۰ ذکر شده است.

جدول ۱۰- تابع هزینه‌های جاری واحد مایع‌سازی

ردیف	عنوان	تابع هزینه	مرجع محل اقتباس
۱	هزینه خرید گاز طبیعی موردنیاز (دلار)	$FC_{NG} = C_{NG} \times V$	[۲۱]
۲	هزینه خرید برق مصرفی از شبکه (دلار)	$FC_{elec} = C_{elec} \times W \times \tau \times 3600$	[۲۱]

اطلاعات ورودی به نرم افزار و قيود تعريف شده، مقدار توان مصرفی کمپرسورهای چرخه سرمایش که از جمع مقادیر توان مصرفی تک تک کمپرسورهای چرخه به‌دست می‌آید محاسبه می‌گردد که در نتیجه آن، توان مصرفی ویژه چرخه مبرد چند جزئی یک طبقه‌ای تحقیق حاضر ۰/۴۰۳ حاصل می‌شود. پارامتر بی 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 [۱۷].

$$FOM = \frac{W_{rev}}{W_{total}} = \frac{14.32}{44.75} = 0.32 \quad (2)$$

### ۵- تحلیل اقتصادی

#### ۱-۵- برآورد هزینه سرمایه گذاری اولیه واحد مایع‌سازی

در جدول ۸ توزیع هزینه های یک واحد متعارف تولید، ذخیره‌سازی و بازتبخیر گاز طبیعی مایع ذکر شده است [۱۲].

جدول ۸- توزیع هزینه‌های یک چرخه متعارف گاز طبیعی مایع

ردیف	شرح	درصد	مرجع محل اقتباس
۱	واحد شیرین سازی و جداسازی	۷	[۱۲]
۲	تبرید و مایع‌سازی	۵۰	
۳	ذخیره سازی	۱۱	
۴	تبخیر مجدد	۱۷	
۵	سرویس های جانبی	۱۵	
	مجموع	۱۰۰	

با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۸ دریافته می‌شود که عمده هزینه یک واحد کامل، مربوط به تجهیزات چرخه تبرید و مایع‌سازی است؛ با توجه به تجهیزات و ساختمان چرخه مبرد چندجزئی ساده، این هزینه از مجموع قیمت کمپرسورها، مبادله‌کن‌های گرمایی چندجریانی و سایر تجهیزات به‌دست می‌آید که کمپرسورها و مبادله‌کن‌های گرمایی جزء گران‌قیمت‌ترین تجهیزات هستند که روابط محاسبه قیمت این تجهیزات به شرح جدول ۹ است.

بنا بر مستندات موجود در مرجع [۱۹] هزینه یک چرخه تولید گاز طبیعی مایع به همراه عملیات شیرین سازی به ازای هر تن ظرفیت تولید سالانه معادل با ۶۰۰ دلار است که با توجه به ظرفیت موردنیاز برای نیروگاه شهید رجایی که در حدود ۰/۵۳ میلیون تن بر سال است هزینه مربوط به ماشین‌آلات و تجهیزات رقمی در حدود ۳۲۰ میلیون دلار است؛ شایان ذکر است پس از مایع‌سازی گاز طبیعی، یکی از اساسی‌ترین اقدامات، ذخیره‌سازی آن به شکل ایمن و با ظرفیت متناسب است که طبق جدول ۸، یازده درصد از هزینه‌های یک واحد کامل مایع‌سازی گاز طبیعی را به خود اختصاص داده که رابطه محاسبه این هزینه نیز در جدول ۹ ذکر گردیده است.

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

۳	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (دلار)	$OMC = 0.02 \times PEC_{total}$	[۲۱]
۴	هزینه های پرسنلی سالیانه (دلار)	$LC = n \times 12 \times 400(US\$)$	[۱۹]

ارقام حاصل از روابط موجود در جدول ۱۰ برای سال نخست کارکرد بوده و با توجه به عمر اقتصادی طرح که ۲۰ سال در نظر گرفته شده است هزینه های تعمیر و نگهداری با افزایش ۵ درصد سالیانه و هزینه خرید حامل های انرژی اعم از برق و گاز طبیعی با افزایش ۶ درصد سالیانه و هزینه های پرسنلی با افزایش ۱۰ درصد سالیانه مواجه می شوند [۲۱]. در جدول ۱۱ ورودی های مدل اقتصادی و فرضیات پایه آورده شده است.

جدول ۱۱- ورودی های مدل اقتصادی و فرضیات پایه

عنوان	مقدار
ظرفیت واحد مایع سازی	۲۶۴۹ تن بر روز
کل هزینه سرمایه گذاری اولیه	۵۶۱ میلیون دلار
هزینه های جاری سالیانه	۳۰/۳ میلیون دلار
نرخ تنزیل پایه	۱۲ درصد
عمر اقتصادی طرح	۲۰ سال

### ۳-۳- معرفی شاخص های ارزیابی اقتصادی

پس از مشخص شدن ظرفیت واحد مایع سازی مورد نیاز، هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه های جاری، می توان شاخص هایی همچون ارزش خالص فعلی، نسبت منافع به مخارج و در نهایت دوره بازگشت سرمایه را محاسبه کرد که در ادامه به تفکیک ارائه خواهند شد [۲۲].

### ۳-۳-۱- ارزش خالص فعلی

برای محاسبه دوره بازگشت سرمایه از روش ارزش خالص فعلی (NPV) استفاده می گردد. این نوع آنالیز اقتصادی جزئیات کار اعم از هزینه تعمیرات و نگهداری، استهلاکات سیستم، نرخ تورم و سایر پارامترهای اقتصادی را در بر می گیرد. معادله (۳) فرمول محاسبه ارزش خالص فعلی است.

$$NPV = -IC + \frac{ACF_1}{(1+i)} + \frac{ACF_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{ACF_n}{(1+i)^n} \quad (3)$$

در معادله (۳)، n شماره سال، i نرخ بهره و ACF سود خالص سالیانه حاصل از طرح که در آن هزینه های تعمیرات و نگهداری و سایر هزینه ها در نظر گرفته شده است، می باشد. این معادله برای چندین سال متناوب نوشته می شود تا رقم ارزش خالص فعلی به عددی مثبت تبدیل شود. شماره سالی که این اتفاق می افتد دوره واقعی بازگشت سرمایه را نمایش می دهد. به طور کلی اگر یک دوره بازگشت سرمایه خاص مدنظر باشد باید محاسبه نمود که در آن سال عدد ارزش

خالص فعلی مثبت، منفی و یا صفر است. اگر مثبت باشد یعنی پیاپی سازی پروژه کاری است معقول، اگر منفی باشد یعنی از لحاظ اقتصادی این امر توجیهی ندارد و اگر صفر باشد نشان دهنده این مطلب است که پروژه نه سوددهی بالا دارد و نه باعث زیان اقتصادی می گردد [۲۲].

### ۳-۳-۲- نسبت منافع به مخارج

این نسبت برابر با حاصل تقسیم ارزش فعلی منافع طرح بر ارزش فعلی مخارج آن است. اگر این نسبت بزرگتر از یک باشد به معنی سودآور بودن طرح بوده و کوچکتر از یک بودن آن نیز به معنی زیان ده بودن طرح است [۲۲].

$$\frac{B}{C} = \frac{PVB}{PVC} \quad (4)$$

### ۳-۳-۴- نتایج آنالیزهای اقتصادی و بحث

با توجه به مطالب قبلی، خروجی آنالیز اقتصادی برای احداث واحد مایع سازی با ظرفیت تامین نیاز ۶۰ روزه نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجائی قزوین، با فرضیات پایه ای نظیر نرخ تنزیل ۱۲ درصد و عمر اقتصادی ۲۰ ساله طرح به ارزش خالص فعلی  $10^9 \times 1/77$  دلار و نسبت منافع به مخارج معادل با ۴/۱۶ و دوره بازگشت سرمایه ۴/۳ ساله منجر می گردد.

### ۳-۳-۵- تحلیل حساسیت

بازنگری ارزیابی اقتصادی انجام شده با تغییر پارامترهای اولیه ی طرح را تحلیل حساسیت یک طرح گویند. به این منظور، باید مقدار یک یا چند عامل متغیر طرح، تغییر داده شده و سپس بر این مبنا پارامترهای ارزیابی اقتصادی آن محاسبه شود. میزان تغییر عامل مورد نظر باید بر اساس تجربه در مورد طرح های مشابه قبلی و سایر ملاحظات انجام پذیرد. تحلیل حساسیت، باید در مورد اقلام عمده ی طرح و اقلامی انجام پذیرد که نسبت به آن عدم اطمینان و تردید قابل ملاحظه ای وجود دارد. در این پژوهش تحلیل حساسیت با تغییرات در نرخ تنزیل و تغییرات در هزینه سرمایه گذاری اولیه با هدف بررسی اثرات آن ها روی ارزش خالص فعلی، نسبت منافع به مخارج و دوره بازگشت سرمایه انجام شده است.

### ۳-۳-۵-۱- تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات در نرخ تنزیل

نرخ تنزیل مورد استفاده در حالت پایه ۱۲ درصد بوده است. حال در جدول ۱۲ میزان تغییر در شاخص های ارزش خالص فعلی، نسبت منافع به مخارج و دوره بازگشت سرمایه به ازای تغییر در نرخ تنزیل نشان داده شده است.

جدول ۱۲- تحلیل حساسیت شاخص های ارزش خالص فعلی، نسبت منافع به مخارج و دوره بازگشت سرمایه نسبت به تغییرات نرخ تنزیل

نرخ تنزیل	ارزش خالص فعلی (دلار)	نسبت منافع به مخارج	دوره بازگشت سرمایه (سال)
۵٪	$3/77 \times 10^9$	۷/۷۲	۳/۹
۱۰٪	$2/18 \times 10^9$	۴/۸۷	۴/۱



## ۶- نتیجه گیری

نیاز به سوخت یکی از اضلاع اصلی شکل گیری فعالیت صنایع است و تامین سوخت باید به شکل پایدار، مقرون به صرفه و در عین حال سازگار با محیط زیست باشد. با توجه به این که واحدهای صنعتی و نیروگاه های کشور عمده مصرف کنندگان گاز طبیعی هستند؛ در فصول سرد سال در صورت افت فشار در شبکه سراسری گاز، واحدهای صنعتی و نیروگاهی از شبکه سراسری گاز تغذیه نخواهند شد و به تناسب سیستم های موجود، این واحدها با سوخت ثانویه نظیر گازوئیل یا مازوت به فعالیت خود ادامه می دهند. 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 کارکرد، فرآیند مایع سازی گاز طبیعی با چرخه میرد چندجزئی ساده، شبیه سازی گردید و ضمن اعتبارسنجی خروجی شبیه سازی، شاخص عملکردی کار مصرفی به ازای واحد جرم گاز طبیعی مایع تولیدی به میزان ۰/۴۰۳ مگاوات ساعت بر تن ال ان جی و عدد شایستگی چرخه ۰/۳۲ محاسبه شد. در ادامه پژوهش حاضر به کمک مفاهیم اقتصادی و محاسبات هزینه های سرمایه گذاری اولیه و هزینه های جاری به تحلیل اقتصادی پروژه پرداخته شد. نتایج مطالعات اقتصادی نشان داد که دوره بازگشت سرمایه پروژه احداث یک واحد مایع سازی گاز طبیعی جهت تامین گاز مورد نیاز نیروگاه شهید رجایی در بازه ۶۰ روزه اوج مصرف گاز که تامین سوخت گاز مورد نیاز نیروگاه از طریق شبکه سراسری امکان پذیر نیست با در نظر گرفتن دوره کارکرد ۲۰ ساله و نرخ تنزیل ۱۲٪، در حدود ۴/۳ سال است. در نهایت باید این مساله مورد توجه قرار گیرد که در ایران سوخت های فسیلی به قیمت بسیار ارزان عرضه می گردد و ارزیابی اقتصادی این گونه طرح ها با قیمت های یارانه ای سوخت در داخل، قطعاً با شکست مواجه خواهد شد. در این تحقیق ارزیابی اقتصادی بر مبنای نرخ جهانی سوخت انجام شد که ۱/۱۷ دلار در هر گالن (معادل ۰/۳۱ دلار در هر لیتر) برای گازوئیل و ۱/۷۶ دلار در هر گالن (معادل ۰/۴۶ دلار در هر لیتر) برای مازوت در نظر گرفته شد. جریان های هزینه ای این طرح عبارتند از خرید گاز طبیعی از شبکه سراسری توزیع، هزینه ناشی از خرید برق مورد نیاز، هزینه تعمیرات و نگهداری سالیانه و هزینه های پرسنلی و جریان درآمدی عبارت است از ما به التفاوت قیمت سوخت جایگزین (گازوئیل و مازوت) با سوخت اصلی (گاز طبیعی) که با توجه به محاسبات بر مبنای قیمت جهانی، رقم قابل توجهی خواهد بود. در پایان با انجام تحلیل حساسیت مشخص گردید که در حالت بدبینانه نظیر افزایش ۱/۵ برابری هزینه سرمایه گذاری اولیه و یا بالا بودن نرخ بهره مورد انتظار سرمایه گذار، همچنان احداث واحد مایع سازی گاز طبیعی توجیه پذیری اقتصادی دارد اما طبیعتاً این افزایش منجر به طولانی تر شدن دوره بازگشت سرمایه خواهد شد.

## ۷- نمادها

علائم انگلیسی

C	هزینه، دلار
FC	هزینه سوخت، دلار
FOM	عدد شایستگی

۴/۳	۴/۱۶	$1/77 \times 10^9$	٪ ۱۲
۴/۵	۳/۳۶	$1/32 \times 10^9$	٪ ۱۵
۴/۹	۲/۴۸	$8/35 \times 10^8$	٪ ۲۰
۶/۳	۱/۵۹	$3/32 \times 10^8$	٪ ۳۰
۸/۷	۱/۱۷	$9/43 \times 10^7$	٪ ۴۰

با توجه به اعداد و ارقام جدول ۱۲ مشخص می گردد تا حداقل نرخ قابل انتظار ۴۰ درصد نیز احداث واحد مایع سازی توجیه اقتصادی دارد اما دوره بازگشت سرمایه چندان مطلوبی نخواهد داشت. دلیل این بازگشت سرمایه سریع در نرخ های تنزیل منطقی سود سرشار ناشی از صادرات گازوئیل و مازوت به قیمت فوب خلیج فارس و در مقابل دریافت گاز طبیعی از شبکه با تعرفه نیروگاهی است.

## ۵-۲- تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات در هزینه

### سرمایه گذاری اولیه

در جدول ۱۳ میزان تغییر در شاخص های ارزش خالص فعلی، نسبت منافع به مخارج و دوره بازگشت سرمایه به ازای تغییر در هزینه سرمایه گذاری اولیه نشان داده شده است. با توجه به اعداد و ارقام جدول ۱۳ مشخص می گردد حتی با ۱/۵ برابر شدن هزینه سرمایه گذاری اولیه نیز احداث واحد مایع سازی توجیه اقتصادی دارد که دلیل آن سود سرشار ناشی از صادرات گازوئیل و مازوت به قیمت فوب خلیج فارس و در مقابل دریافت گاز طبیعی از شبکه با تعرفه نیروگاهی است.

جدول ۱۳- تحلیل حساسیت شاخص های ارزش خالص فعلی، نسبت منافع به مخارج و دوره بازگشت سرمایه نسبت به تغییرات در هزینه

### سرمایه گذاری اولیه

تغییرات در هزینه سرمایه گذاری اولیه	ارزش خالص فعلی (دلار)	نسبت منافع به مخارج	دوره بازگشت سرمایه (سال)
-۵۰٪	$2/03 \times 10^9$	۸/۲	۲/۵
-۴۰٪	$1/98 \times 10^9$	۶/۸	۲/۹
-۳۰٪	$1/93 \times 10^9$	۵/۹	۳/۲
-۲۰٪	$1/88 \times 10^9$	۵/۱۸	۳/۶
-۱۰٪	$1/82 \times 10^9$	۴/۶۱	۳/۹
حالت پایه	$1/77 \times 10^9$	۴/۱۶	۴/۳
+۱۰٪	$1/72 \times 10^9$	۳/۷۹	۴/۶
+۲۰٪	$1/67 \times 10^9$	۳/۴۸	۵
+۳۰٪	$1/62 \times 10^9$	۳/۲۲	۵/۴
+۴۰٪	$1/57 \times 10^9$	۳	۵/۸
+۵۰٪	$1/52 \times 10^9$	۲/۸	۶/۲

[15] <http://www.nerkhbox.com> (11 Feb. 2021).

[۱۶] آردودیان راد، م.، زارع، م.، مطالعه و بررسی مخازن مورد استفاده در ذخیره سازی گاز طبیعی مایع شده، دومین کنفرانس ملی انجمن انرژی ایران، تهران، ایران، ۱۳۹۴.

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

[18] Couper, J. R., Penney, W. R., & Fair, J. R., *Chemical Process Equipment-Selection and Design* , Gulf Professional Publishing, 2009.

[19] Ghorbani, B., Shirmohammadi, R., & Mehrpooya, M. A novel energy efficient LNG/NGL recovery process using absorption and mixed refrigerant refrigeration cycles– Economic and exergy analyses. *Applied Thermal Engineering*, Vol.132, pp.283-295, 2018.

[20] Punnonen, K., Small and Medium size LNG for Power Production, Vaasa: Wärtsilä Finland Oy, 2013.

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

اسکونژاد، م.، *اقتصاد مهندسی ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ۱۳۹۶.

IC	هزینه اولیه، دلار
NPV	ارزش خالص فعلی، دلار
OMC	هزینه تعمیر و نگهداری، دلار
LC	هزینه پرسنلی، دلار
PEC	هزینه خرید تجهیزات، دلار
PVB	ارزش فعلی منافع، دلار
PVC	ارزش فعلی مخارج، دلار
SPC	توان مصرفی ویژه، MWh/ton LNG
<b>علائم یونانی</b>	
$\tau$	کارکرد، ساعت

## ۸- مراجع

[1] MIT Energy Initiative, The future of natural gas: An interdisciplinary MIT Study, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2011.

[2] Dudley, B., BP Statistical Review of World Energy, 67th Edition, 2018.

[3] <https://nigc.ir>.

[4] <https://khabarfarsi.com>.

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

[۶] کوثری، ع. و وافری، ب.، امکان‌سنجی تولید گاز طبیعی مایع‌شده از خط لوله سراسری گاز ایران برای مصرف در حمل و نقل جاده‌ای، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، د. ۱۰، ش. ۱، ص ۴۶-۵۳، ۱۳۹۹.

[7] Gong, M., Wu, J., Sun, Z., Liu, J., & Hu, Q., Development and performance test of a small trailer-mounted moveable natural gas liquefier, *Energy conversion and management*, Vol.57, pp.148-153, 2012.

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

[۹] کلوانی، الف. ف.، مافی، م.، خانکی، م.، مقایسه فنی و اقتصادی اثر پیش‌سرمایش جذبی بر واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی به منظور تامین سوخت نیروگاه شهید رجایی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۳، ص ۱۶۵-۱۷۴، ۱۴۰۰.

[۱۰] کرملو، ب.، خانکی، م.، مافی، م.، سادات سکاگ، ع.، تاثیر شرایط گاز خوراک بر عملکرد سیستم مایع‌ساز گاز طبیعی دو طبقه‌ای میرد چندجزئی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۶، ش. ۱۰، ص ۱۰۳-۱۱۴، ۱۳۹۵.

[۱۱] مرادی، الف. ح.، خانکی، م.، مافی، م.، آنالیز حساسیت چرخه‌های مایع‌سازی گاز طبیعی با کاربری قله سانی نسبت به متغیرهای محیطی و عملیاتی، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۵، ش. ۶، ص ۲۸۷-۲۹۸، ۱۳۹۴.

[12] Shirazi, L., Sarmad, M., Moghadasi Rostami, R., Moein, P., Zare, M., Mohammadbcigy, Kh., [24] Feasibility study of the small scale LNG plant infrastructure for gas supply in north of Iran (Case Study). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol.35, pp.220-229, 2019.

[13] <http://rajaei.tpph.ir/SitePages/Tamas/CantactForUs.aspx>.

[۱۴] معاونت منابع انسانی و تحقیقات دفتر فناوری اطلاعات و آمار- معاون آمار و اطلاع‌رسانی، آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی در سال ۱۳۹۵، شرکت مادر تخصصی توانیر، تهران، ۱۳۹۶.