Modeling the supply chain of LNG with system dynamic method (Case study: Iran)

Sara Mahmoudian Yonesi[1] - Mahdi Gandomzadeh[2]
Abolghasem Mosayyebi[3] - Mohsen Mazlom Farsibaf[4] - Majid Zandi[5]

Abstract

Nowadays, according to environmental issues and international agreements, countries have put the use of energy with less pollution in their agenda. One of the most important clean fossil fuels is natural gas. In recent years in Iran, there has been a shortage of natural gas in the cold months of the year due to the peak gas consumption in these months, especially in the domestic sector. One way to solve this challenge is to store natural gas either actively or passively. In this research, the LNG supply chain has been modeled using the system dynamics method and using Vensim software, and four different scenarios have been considered according to Iran's conditions. For these four scenarios, the modified amount of available natural gas is plotted. Also, according to the possibility of LNG export in the two scenarios mentioned, two modes have been considered for the sale price of natural gas according to long-term contracts (35 cents) and according to the sale of single cargo (70 cents).

Key words:
Liquefied Natural Gas (LNG), storage, system dynamic

1. PhD student in Renewable Energy Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, s_mahmoodian@sbu.ac.ir
2. PhD student in Renewable Energy Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_gandomzadeh@sbu.ac.ir
3. Laboratory expert, Renewable Energy Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Mosayyebi@ut.ac.ir
4. Director of research and technology of National Gas Company of Iran, Farsibaf@nigc.ir
5. Associate Professor, Renewable Energy Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_zandi@sbu.ac.ir, Corresponding Author

مقاله علمی ـ پژوهشی

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش ۱۴۰۲ /۰۷/۰۴

مدل‌سازی زنجیره تأمین LNG با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها (مطالعه موردی: کشور ایران)

سارا محمودیان یونسی[۱] ـ مهدی گندم‌زاده[۲] ـ ابوالقاسم مسیبی[۳]

محسن مظلوم فارسی‌باف[۴] ـ مجید زندی[۵]

چکیده

امروزه با توجه به مسائل زیست‌محیطی و پیمان‌های بین‌المللی، کشورها استفاده از انرژی‌هایی با آلایندگی کم‌تر را در دستورکار خود قرار داده‌اند. یکی از مهمترین سوخت‌های فسیلی پاک، گاز طبیعی است. در سال‌های اخیر در کشور ایران کمبود گاز طبیعی در ماه‌های سرد سال به‌دلیل پیک مصرف گاز در این ماه‌ها به‌خصوص در بخش خانگی اتفاق افتاده است. یک راه‌کار برای حل این چالش، ذخیره‌سازی گاز طبیعی به‌صورت فعال یا غیرفعال است. در این پژوهش، زنجیره تأمین LNG با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها و با استفاده از نرم‌افزار ونسیم مدلسازی شده است و چهار سناریوی مختلف با توجه به شرایط ایران در نظر گرفته شده است. برای این چهار سناریو، مقدار گاز طبیعی در دسترس اصلاح شده رسم شده است. هم‌چنین با توجه به امکان صادرات LNG در دو سناریوی مطرح شده، دو حالت نیز برای قیمت فروش گاز طبیعی با توجه به قراردادهای طولانی‌مدت و یا فروش به‌صورت تک محموله در نظر گرفته شده است.

واژگان کلیدی: گاز طبیعی مایع، ذخیره‌سازی، پویایی‌شناسی سیستم‌ها

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، s_mahmoodian@sbu.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_gandomzadeh@sbu.ac.ir

۳. کارشناس لابراتوار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، Mosayyebi@ut.ac.ir

۴. مدیر پژوهش و فناوری، شرکت ملی گاز ایران، Farsibaf@nigc.ir

۵. دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، نویسنده مسئول، m_zandi@sbu.ac.ir

مقدمه

امروزه به دلیل افزایش جمعیت، استفاده از منابع حیاتی برای بشر به‌خصوص منابع انرژی بسیار افزایش یافته است. پیش‌بینی شده است که جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ میلادی به نه و نیم میلیارد نفر خواهد رسید و این میزان جمعیت نیاز به درصد انرژی بسیار زیادی خواهند داشت. این افزایش مصرف انرژی، علاوه‌بر آثار منفی زیست‌محیطی، چالش‌هایی در زمینه تأمین این منابع انرژی به همراه دارد.

از سوی دیگر، سبد انرژی مصرفی در جهان، به دلایل مختلف زیست‌محیطی و عمل به تعهدها و پیمان‌های بین‌المللی مانند پیمان پاریس در خصوص کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در حال تغییر است.

بسیاری از کشورهای جهان در مسیر گذار انرژی و حرکت به سمت منابع انرژی پاک یا با آلایندگی کم‌تر هستند و هدف‌گذاری‌هایی برای افزایش سهم منابع مختلف در سبد انرژی خود با تدوین اسناد توسعه و یا اعمال سیاست‌های مختلف انجام داده‌اند. به‌عنوان مثال کشور چین که یکی از مهمترین منابع انرژی آن زغال‌سنگ است، درحال حرکت به سمت افزایش سهم گاز طبیعی در سبد انرژی خود طبق برنامه‌های توسعه ۵ ساله هستند(" The 13th Five-Year-Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China," 2013).

به‌طورکلی، گذار انرژی در دنیا یا به سمت منابع تجدیدپذیر انرژی پیش می‌رود که بسته به شرایط و پتانسیل هر اقلیم در مقیاس‌های کوچک تا نیروگاهی به‌کار می‌رود. از سمت دیگر، یکی از سوخت‌های فسیلی پاک که کم‌ترین آلایندگی را در میان سایر سوخت‌های فسیلی دارد، گاز طبیعی است.

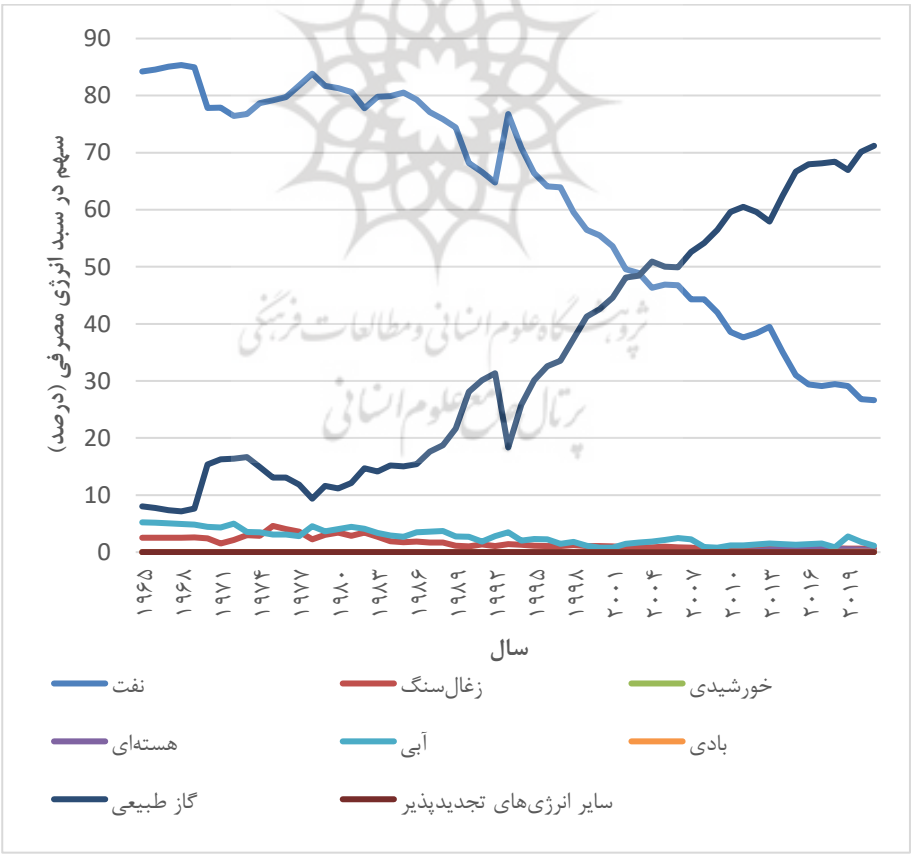
از آنجایی که کشور ایران در جایگاه دومین دارنده منابع گاز طبیعی، سومین تولیدکننده و چهارمین مصرف‌کننده گاز طبیعی در جهان است و یکی از طولانی‌ترین خطوط انتقال و توزیع گاز را در اختیار دارد، لذا ذخیره‌سازی این حامل انرژی در کشور در جهت افزایش پایداری تولید و امنیت عرضه در شبکه انتقال، دارای اهمیت دوچندان است.

در کشور ایران، سهم گاز طبیعی در میان سایر منابع به مرور زمان تغییر کرده است (شکل ۱). تا قبل از سال ۲۰۰۳ میلادی، سهم نفت در سبد مصرف انرژی ایران بیش‌تر از سایر منابع بوده است اما پس از آن با سرعت زیادی گاز طبیعی جای نفت را می‌گیرد. به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۱ میلادی، سهم گاز طبیعی به بیش از ۷۱ درصد و

سهم نفت به کم‌تر از ۲۷ درصد رسیده است. هم‌چنین سهم نفت و گاز طبیعی همواره بیش از ۹۵ درصد سبد انرژی مصرفی بوده و روندهای آن طبق نمودار، مکمل هم بوده است. هم‌چنین سایر منابع انرژی نیز ازجمله هیدروپاور، زغال‌سنگ، هسته‌ای، باد، خورشیدی و سایر تجدیدپذیرها سهم حدود ۱ درصد و کم‌تر را دارند.

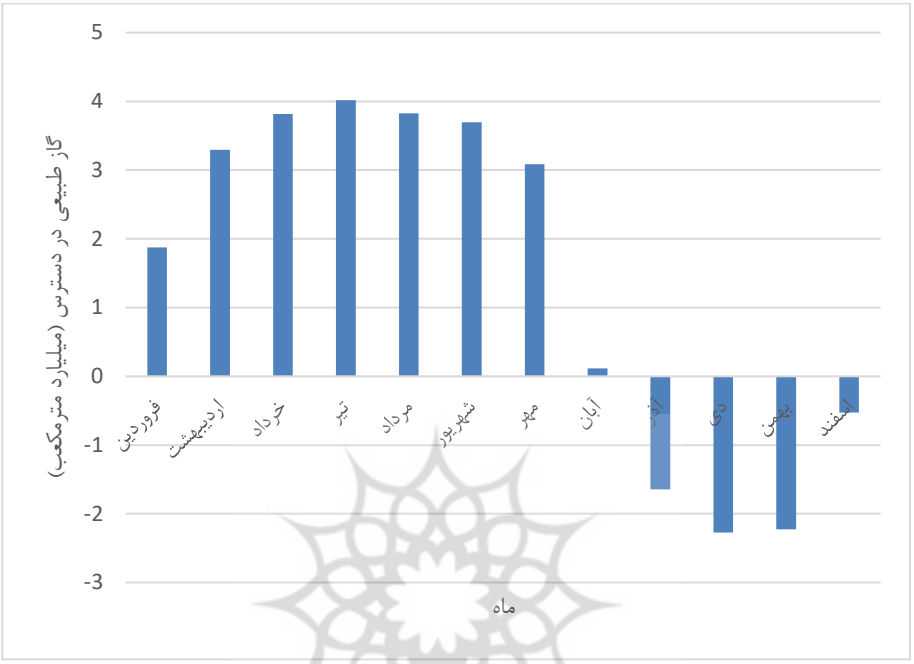
مصرف روزافزون گاز طبیعی در کشور، فشارهای زیادی بر شرکت ملی گاز برای تأمین این انرژی داشته است. بیش‌تر این سهم مصرف انرژی مربوط به بخش نیروگاهی و خانگی کشور است. مقدار گاز طبیعی در دسترس یا به عبارتی دیگر میزان ناترازی گاز طبیعی کشور طبق داده‌های دریافتی از شرکت ملی گاز برای سال ۱۴۰۰، در Bp Statistical Review of World Energy, 2022 شکل ۲ مشاهده می‌شود (Bp Statistical Review of World Energy, 2022).

شکل ۱. سهم مصرف انرژی بر اساس منبع برای کشور ایران



Bp Statistical Review of World Energy, 2022

شکل ۲. گاز طبیعی در دسترس برای سال ۱۴۰۰



با توجه به افزایش دمای هوا در فصل زمستان و افزایش مصرف بخش خانگی در ماه‌های سرد سال و با در نظر گرفتن میزان معین تولید گاز طبیعی، میزان مصرف گاز در ماه‌های سرد بیش‌تر از تولید می‌شود که این موضوع باعث کمبود گاز مقطعی و درنتیجه قطعی گاز بسیاری صنایع می‌شود و نیروگاه‌ها نیز در برخی موارد برای تأمین سوخت خود از مازوت استفاده می‌کنند. قطعی گاز صنایع ضرر ناشی از عدم تولید برای آنان را به همراه دارد و هم‌چنین باعث کاهش میزان تولید ناخالص داخلی کشور می‌شود. در خصوص نیروگاه‌ها نیز، سوخت مازوت آلایندگی بسیار بالایی دارد و استفاده از مازوت در نیروگاه‌ها به‌خصوص در ماه‌های سرد سال که وارونگی دمایی نیز اتفاق می‌افتد. معضل جدی آلودگی هوا را به وجود آورده است.

با توجه به اینکه در ماه‌های گرم سال میزان تولید از میزان مصرف بیش‌تر است، یک راهکار برای مدیریت شبکه عرضه و تقاضای گاز طبیعی این است که گاز طبیعی را در فصول گرم ذخیره و در ماه‌های سرد از حجم گاز ذخیره شده استفاده کرد.

ذخیره‌سازی گاز طبیعی می‌تواند به شیوه‌های مختلف انجام شود، اما در ایران

اغلب به‌صورت ذخیره‌سازی غیرفعال[1] در مخازن زیرزمینی است. ذخیره‌سازی زیرزمینی در سه نوع مخزن تخلیه شده هیدروکربوری، سفره‌های آبی و غارهای نمکی انجام می‌شود (Energy & Commission, 2004). ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ایران تا سال ۲۰۲۲ میلادی در دو مخزن شوریجه و سراجه انجام شده است. این دو مخزن تاکنون درمجموع قابلیت ذخیره‌سازی حدود ۳/۳ میلیارد مترمکعب در سال را دارد (کاسبی، ۱۳۹۲). توسعه این مخازن تا رسیدن به ظرفیت ۶ میلیارد مترمکعب نیز در دستورکار قرار دارد و در مرحله انتخاب پیمان‌کار برای عملیاتی شدن است. پروژه‌های ذخیره‌سازی دیگری از نوع سفره آب زیرزمینی و مخازن گازی نیز در مرحله توسعه قرار دارد، اما تاکنون موردبهره‌برداری قرار نگرفته است (مدیریت برنامه‌ریزی تلفیقی امور سیستم‌های اطلاعات, ۱۴۰۰).

درحالی‌که رایج‌ترین راه برای توسعه ذخیره‌سازی گاز، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز است، به‌دلیل ملاحظه‌های زمین‌شناسی و سایر موارد دیگر، برخی از کشورها به ظرفیت ذخیره‌سازی ساخته شده در پایانه‌های دریافت LNG برای اطمینان از تأمین گاز قابل‌اطمینان متکی هستند. این سیاست برای اولین بار در ژاپن برای ملاحظه‌های زمین‌شناسی و جغرافیایی توسعه یافت. پس از آن با ظهور فناوری واحد ذخیره‌سازی مجدد گازی شناور[2] از اواسط دهه ۲۰۰۰ میلادی و هم‌چنین افزایش حجم LNG انعطاف‌پذیر در بازار بین‌المللی، تعدادی از کشورها به سمت ایجاد واحد ذخیره‌سازی مجدد گازی شناور و به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز روی آوردند. بدیهی است که ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز و پایانه‌های واردات LNG (در خشکی یا واحد ذخیره‌سازی مجدد گازی شناور) عملکردهای یکسانی را انجام نمی‌دهند. هدف اصلی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز انتقال عرضه و تقاضا از یک دوره به دوره دیگر است، درحالی‌که پایانه‌های واردات LNG برای دسترسی پایدار، تنوع بخشیدن به منابع گاز و نیاز مقطعی به گاز ساخته شده‌اند، هدف اصلی آن‌ها ذخیره طولانی‌مدت گاز به‌صورت LNG نیست، بلکه تزریق گاز به سیستم انتقال است؛ بنابراین، یک تفاوت عمده بین ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز و LNG، ظرفیت ذخیره‌سازی آن‌ها است. ظرفیت گاز کاری ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز در جهان بیش از دوازده برابر ظرفیت ذخیره‌سازی در پایانه‌های دریافت LNG در سراسر جهان است. با وجود ظرفیت ذخیره‌سازی محدود، پایانه‌های LNG

1. passive
2. FSRU

می‌توانند به‌سرعت گاز ذخیره شده در مخازن LNG را مجدد گازی کرده و آن را به سیستم انتقال تزریق کنند. این توانایی برای تأمین گاز پایدار کلیدی است.

همچنین به‌دلیل عدم‌قطعیت در دسترس بودن زمین مناسب، محدودیت‌های اقتصادی و مالی و رقابت با منابع جایگزین، بسیاری از پروژه‌های ذخیره‌سازی که برای سال‌ها برنامه‌ریزی شده‌اند، محقق نشده‌اند و چندین کشور (اغلب در جنوب آسیا، آسیای جنوب شرقی و آمریکای مرکزی و جنوبی) تصمیم به ساخت پایانه‌های گازی‌سازی مجدد LNG کرده‌اند و از واردات LNG برای تأمین نیازهای کوتاه‌مدت خود استفاده می‌کنند (LNG Mark. Trends Their Implic.," 2019").

موضوع مایع‌سازی گاز طبیعی از دیدگاه‌های مختلف فنی در حوزه‌های روش‌های مایع‌سازی گاز طبیعی، ایستگاه‌های بانکرینگ LNG (Doymus et al., 2022)، کنترل تولید گاز جوشش[1] (Shin et al., 2022)، استفاده به‌عنوان سوخت در حمل‌ونقل دریایی (Le Fevre, 2018) و سایر حوزه‌ها در نظر گرفته شده است.

در پژوهشی از یک مدل مبتنی بر عامل[2] برای ارزیابی چشم‌اندازهای گسترش عرضه و تقاضا، رقابت بین تأمین‌کنندگان مختلف و چالش‌های تجاری بالقوه در حوزه LNG در دهه‌های آینده استفاده شده است. در این مدل با ادامه نتایج برای افق زمانی تا سال ۲۰۳۰، برتری قطر به‌عنوان رقابتی‌ترین تأمین‌کننده LNG نشان داده می‌شود (Meza et al., 2021). در پژوهش دیگری نیز از مدل مبتنی بر عامل برای بررسی نقاط گلوگاهی حمل‌ونقل دریایی LNG در دنیا استفاده شده است. در این پژوهش از این مدل برای توسعه یک مدل بازار LNG و شبیه‌سازی اختلال در سه نقطه اصلی کانال پاناما، کانال سوئز / تنگه باب المندب، و تنگه مالاکا استفاده شده است و درنهایت پیشنهاد داده است که هر واردکننده باید بازارهای گاز خود را با شبکه خطوط لوله ادغام کند، منابع گاز داخلی را جستجو کند و منابع انرژی را متنوع کند تا وابستگی به انرژی و واردات گاز از مناطق دورافتاده تولیدکننده را کاهش دهد (Meza et al., 2022).

در مدلسازی مبتنی بر عامل هر جز در یک جمعیت مدل می‌شود و تفاوت‌ها و تعامل بین این اجزا بررسی می‌شود. مدل ریاضی دیگر در حوزه آینده‌نگری که به‌عنوان مکمل مدل مبتنی بر عامل در نظر گرفته می‌شود، مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها[3] است. این مدل بر رفتار سطح بالای یک سیستم متمرکز است و باعث درک کل سیستم در

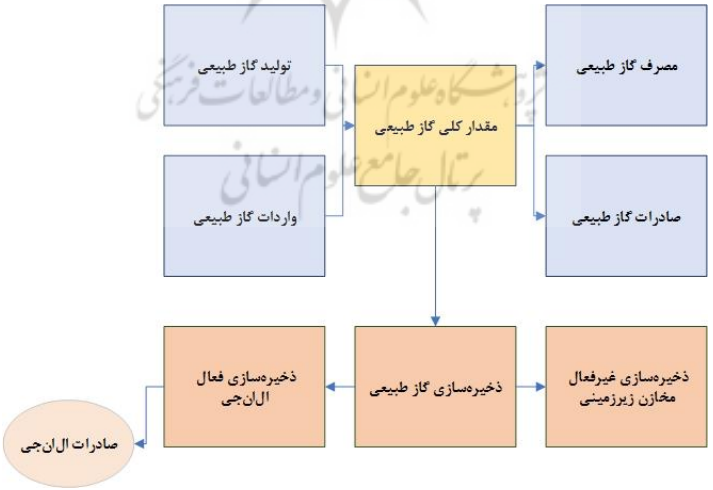
1. Boil-off gas
2. Agent Based Model (ABM)
3. System Dynamic (SD)

مقیاس کلان می‌شود. این مدل برای حذف جزئیات غیرضروری و تمرکز بر موارد مهم در یک مدل، مناسب است.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۱ میلادی، میزان رشد مصرف گاز طبیعی در کشور چین با مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها مدل شده است (Li et al., 2011). همچنین در یک پژوهش در سال ۲۰۲۲ میلادی، از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای شبیه‌سازی زنجیره تأمین LNG در کشور چین استفاده شده است. در پژوهش موردنظر، دو تنگنای مهم در زنجیره تأمین LNG در کشور چین شامل ظرفیت محدود تانکرهای حامل LNG و ظرفیت دریافت LNG در پایانه‌های دریافت در سناریوهای مختلف بررسی شده است و تغییر در تأمین و مصرف LNG در هرکدام تحلیل شده است (Yin & Lam, 2022). در مطالعه‌های ذکرشده در خصوص LNG، اغلب مدلسازی در حد اجزا و جزئیات بیشتر محدود شده است و در دیدگاه کلان، به موضوع LNG از زاویه فناوری، حمل‌ونقل و واردات پرداخته شده است.

در این مقاله، موضوع شبیه‌سازی زنجیره LNG با هدف ذخیره‌سازی گاز طبیعی به‌منظور رفع ناترازی گاز برای کشور ایران مدنظر است. شماتیک مدل مورداستفاده در پژوهش در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

شکل ۳. شماتیک مدل استفاده‌شده در این پژوهش



در این مقاله:

- از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده شده است که این امکان را می‌دهد تا

بخش‌های مختلف از تولید تا مصرف گاز طبیعی به‌صورت متغیر با زمان و از دیدگاه کلان دیده شود.

- موضوع استفاده از فناوری مایع‌سازی گاز طبیعی به‌منظور اهداف ذخیره‌سازی گاز طبیعی برای ماه‌های سرد در ایران و به‌خصوص برای صنایع مطرح شده است.
- سناریوهای مختلف با توجه به شرایط حال حاضر ایران تعریف شده است و پتانسیل و ظرفیت ذخیره‌سازی گاز طبیعی به‌صورت LNG در کنار ثروت تجمعی تولید شده برای کشور در سناریوهای مختلف محاسبه شده است.

روش‌شناسی

در این بخش، تعریف روش و نرم‌افزار به‌کار رفته، روابط تعریف شده در مدل و تعریف سناریوها به‌طور کامل بیان می‌شود.

تعریف روش و نرم‌افزار

همان‌طور که در بخش قبلی بیان شد، روش مورداستفاده در این پژوهش، روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها است. هدف از مدلسازی به روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها، به‌دست آوردن دیدگاهی در مورد روابط سیستم و تحلیل سناریوهای مختلف است تا بتوان خط‌مشی‌های ممکن برای بهبود سیستم را بررسی کرد. در این پژوهش، از نرم‌افزار ونسیم[1] برای ایجاد مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. Vensim PLE (نسخه یادگیری شخصی[2]) جهت ساخت مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم و تفکر سیستمی مناسب است و برای استفاده آموزشی یا شخصی رایگان است و می‌توان این نسخه را از سایت نرم‌افزار دانلود کرد (*Vensim*, 2015).

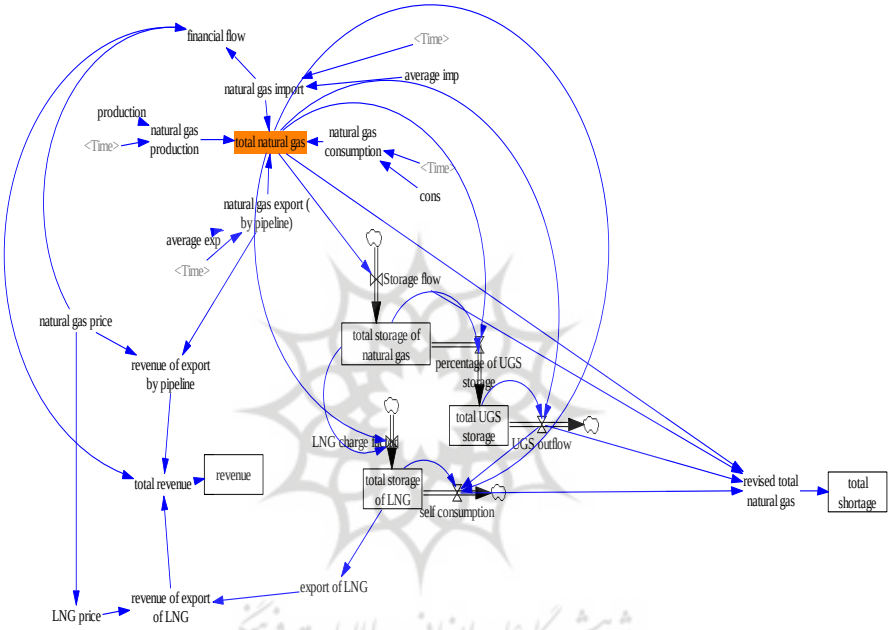
با مطالعه پژوهش‌های پیشین، شاخص‌های اصلی در زمینه موردبررسی و بخش‌های مختلف موردنیاز برای مدلسازی و شبیه‌سازی استخراج شده است و یک نمودار حلقه علت و معمولی[3] بین بخش‌ها، شاخص‌ها و متغیرها ترسیم شده است (شکل ۴). سپس با استفاده از نرم‌افزار پویایی‌شناسی سیستم‌ها ونسیم، مدل نهایی پژوهش، استخراج و پیاده‌سازی می‌شود.

1. Vensim
2. Personal Learning Edition
3. Causal Loop Diagram (CLD)

روابط تعریف شده در مدل

برای هرکدام از بلوک‌ها و نرخ‌های ورودی و خروجی، روابط ریاضی برای شش زیربخش صادرات، واردات، تولید، مصرف، ذخیره‌سازی و ثروت تجمعی به‌طور جداگانه تعریف می‌شود. این روابط در ادامه تعریف می‌شود.

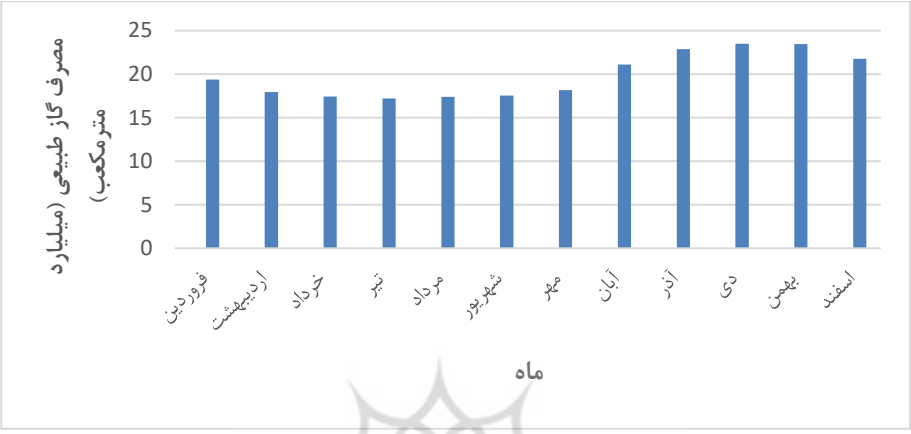
شکل ۴. دیاگرام حلقه علت و معلولی زنجیره گاز طبیعی و LNG



- **شبیه‌سازی بخش تولید**: در این پژوهش، به‌دلیل این‌که فرض شده است که مازاد گاز، ذخیره‌سازی می‌شود، تولید گاز با توجه به مصرف تنظیم نمی‌شود و یک مقدار ثابت در واحد ماه در نظر گرفته شده است. این مقدار ثابت، ۲۲/۶ میلیارد مترمکعب در ماه است.
- **شبیه‌سازی بخش مصرف**: پایه و اساس این مقاله، مصرف نامتوازن در ماه‌های مختلف سال است که چالش ناترازی گاز طبیعی به‌خصوص در ماه‌های سرد را ایجاد می‌کند. داده‌های مصرف کلی گاز طبیعی در کشور برای ماه‌های مختلف سال مطابق منحنی شکل ۵ است.
- **شبیه‌سازی بخش واردات**: بخش واردات گاز طبیعی نیز فرض شده است که در طول سال ثابت است و مقدار آن، ۰/۰۱۶۵ میلیارد مترمکعب در ماه است.

- **شبیه‌سازی بخش صادرات:** صادرات گاز طبیعی نیز به‌صورت ثابت و مقدار آن ۱/۵۳ میلیارد مترمکعب تعریف شده است.

شکل ۳. مصرف ماهانه گاز طبیعی در سال ۱۴۰۰



- **شبیه‌سازی بخش ذخیره‌سازی:** برای بیان روابط بخش شبیه‌سازی ذخیره‌سازی، یک پارامتر مجازی به‌عنوان مقدار کلی گاز طبیعی در نظر گرفته شده که با استفاده از فرمول ۱ محاسبه می‌شود.

فرمول ۱

$$Total\ Natural\ Gas = Natural\ Gas\ production + Natural\ Gas\ import - Natural\ Gas\ consumption - Natural\ Gas\ export\ by\ pipeline$$

طبق تعریف این پارامتر، هر زمان مقدار آن مثبت باشد، مازاد گاز طبیعی در کشور وجود دارد و هر زمان مقدار آن منفی باشد، کمبود گاز طبیعی در شبکه سراسری گاز وجود دارد. مقدار مثبت این پارامتر، به‌عنوان جریان ورودی به بلوک ذخیره‌سازی در نظر گرفته شده است. خروجی بلوک ذخیره‌سازی نیز در دو بخش ذخیره‌سازی زیرزمینی و LNG وارد می‌شود؛ بنابراین بلوک ذخیره‌سازی مطابق فرمول ۲ تعریف شده است.

ذخیره‌سازی گاز طبیعی در قالب LNG، کل گاز طبیعی مازاد منهای گاز ذخیره‌شده در مخازن زیرزمینی تعریف شده است.

فرمول ۲

$$Total\ storage\ of\ Natural\ Gas = \int Storage\ flow - UGS\ inflow$$

که

$$Storage\ flow = MAX\ (0, Total\ natural\ Gas)$$ فرمول ۳

ذخیره‌سازی زیرزمینی برای ماه‌هایی که مازاد گاز طبیعی وجود دارد، به‌صورت تزریق به مخازن با نرخ ثابت (طبق داده‌های مخازن) است و برای ماه‌هایی که کمبود گاز طبیعی وجود دارد، به‌صورت برداشت از مخازن با نرخ ثابت در نظر گرفته شده است. در تعریف این پارامترها، سقف ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن نیز لحاظ شده است.

$$Total\ storage\ of\ UGS = \int UGS\ inflow - UGS\ outflow$$ فرمول ۴

که

$$UGS\ inflow = IF\ (total\ natural\ gas \geq 0, MIN(rate\ of\ injection, total\ storage\ of\ natural\ gas\ ),\ otherwise = 0\ )$$ فرمول ۵

و

$$UGS\ outflow = IF\ (total\ natural\ gas < 0, MIN(rate\ of\ withdraw, total\ UGS\ storage\ ),\ otherwise = 0\ )$$ فرمول ۶

خروجی مقدار ذخیره‌شده LNG نیز یک بخش به مصرف داخل می‌رسد و بخشی از کمبود گاز طبیعی در ماه‌های سرد سال را مرتفع می‌سازد و بخش باقی‌مانده نیز به سایر کشورها صادر می‌شود.

$$Total\ storage\ of\ LNG = LNG\ charge\ factor - self\ consumption\ of\ LNG$$ فرمول ۷

که

$$LNG\ charge\ factor = Total\ storage\ of\ Natural\ Gas$$ فرمول ۸

و

$$self\ consumption\ of\ LNG = IF\ (total\ natural\ gas < 0, MIN(total\ storage\ of\ LNG, MAX(\ ABS(total\ natural\ gas) - UGS\ outflow\ , 0\ )\ ),\ otherwise = 0\ )\ )$$ فرمول ۹

و مقدار LNG صادر شده نیز برابر مقدار LNG مازاد خواهد بود.

$$Export\ of\ LNG = Total\ storage\ of\ LNG$$ فرمول ۱۰

درنهایت یک پارامتر مقدار گاز طبیعی اصلاح شده تعریف شده است که منحنی میزان گاز طبیعی در دسترس با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد و به‌صورت فرمول ۹ تعریف شده است.

فرمول ۱۱

$$\begin{aligned} Revised\ Total\ of\ Natural\ Gas \\ = total\ Natural\ Gas \\ + self\ consumption\ of\ LNG \\ + UGS\ outflow - Storage\ flow \end{aligned}$$

- **شبیه‌سازی بخش ثروت تجمعی:** در این بخش ثروت تجمعی به‌جای سودآوری در نظر گرفته شده است، زیرا ثروت تجمعی بیان شده در این بخش نشان‌دهنده میزان ارزآوری برای کشور خواهد بود.

مقدار این پارامتر به‌صورت مجموع ارزآوری ناشی از صادرات گاز طبیعی و LNG منهای مجموع خروج ارز از کشور به دلیل واردات گاز طبیعی است (فرمول ۱۰).

فرمول ۱۲

$$\begin{aligned} Total\ revenue = \ & revenue\ of\ export\ by\ pipeline \\ & + revenue\ of\ export\ of\ LNG \\ & - financial\ flow\ of\ Natural\ Gas\ import \end{aligned}$$

که

فرمول ۱۳

$$\begin{aligned} revenue\ of\ export\ by\ pipeline \\ = Natural\ Gas\ Export\ by\ pipeline \\ \times Natural\ Gas\ price \end{aligned}$$

و

فرمول ۱۴

$$revenue\ of\ export\ of\ LNG = Export\ of\ LNG \times LNG\ price$$

و

فرمول ۱۵

$$\begin{aligned} financial\ flow\ of\ Natural\ Gas\ import \\ = Natural\ Gas\ import \times Natural\ Gas\ price \end{aligned}$$

پرتال جامع علوم انسانی

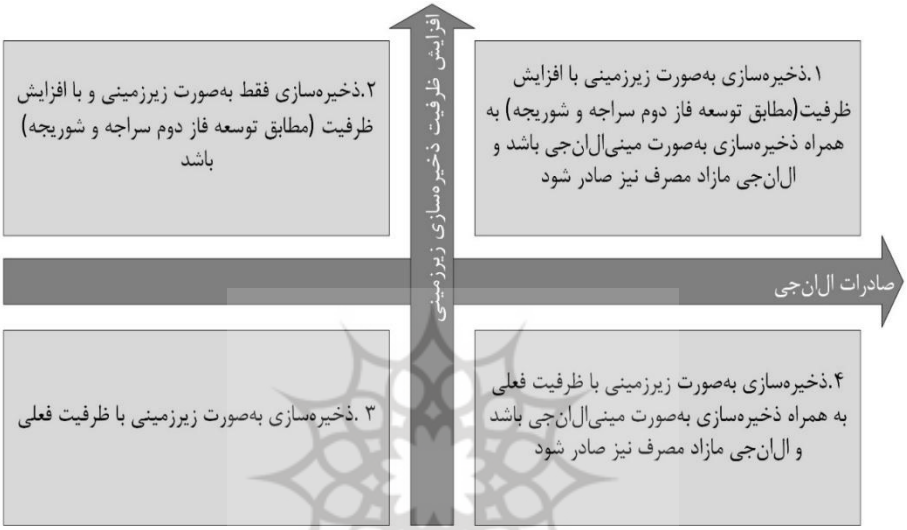
تعریف سناریوها

در تعریف سناریوها، دو پارامتر اصلی وضعیت ناترازی گاز کشور و صادرات گاز برای تعریف چهار حالت مختلف با توجه به این دو پارامتر در نظر گرفته شده است. در شکل ۴، خلاصه سناریوهای به‌کاررفته در این پژوهش ارائه شده است. هم‌چنین در جدول ۱، پارامترهای ورودی مدل نشان داده شده است.

طبق جدول ۲، دو حالت برای قیمت فروش گاز طبیعی در نظر گرفته شده است. در حالت اول قیمت صادرات ۳۵ سنت برای هر مترمکعب با توجه به قراردادهای طولانی‌مدت صادرات گاز طبیعی تعریف شده است. با توجه به این‌که اگر گاز

طبیعی به‌صورت تک محموله به فروش برسد، قیمت آن تا ۷۰ سنت به ازای هر مترمکعب قابل‌افزایش خواهد بود؛ بنابراین در حالت ۲، قیمت ۷۰ سنت در نظر گرفته شده است.

شکل ۴. خلاصه سناریوهای به‌کاررفته در این پژوهش



جدول ۱. جدول پارامترهای ورودی مدل

		سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴
قیمت گاز طبیعی (دلار)	حالت اول	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵
	حالت دوم	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷
قیمت LNG (دلار)		۱/۵ برابر قیمت گاز طبیعی	۱/۵ برابر قیمت گاز طبیعی	۱/۵ برابر قیمت گاز طبیعی	۱/۵ برابر قیمت گاز طبیعی
نرخ تزریق به مخازن زیرزمینی (میلیارد مترمکعب در ماه)		۰/۹۶۹	۰/۹۶۹	۰/۵۶۴	۰/۵۶۴
نرخ برداشت از مخازن زیرزمینی (میلیارد مترمکعب در ماه)		۱/۹۵	۱/۹۵	۰/۹	۰/۹
صادرات LNG		مازاد گاز	-	-	مازاد گاز

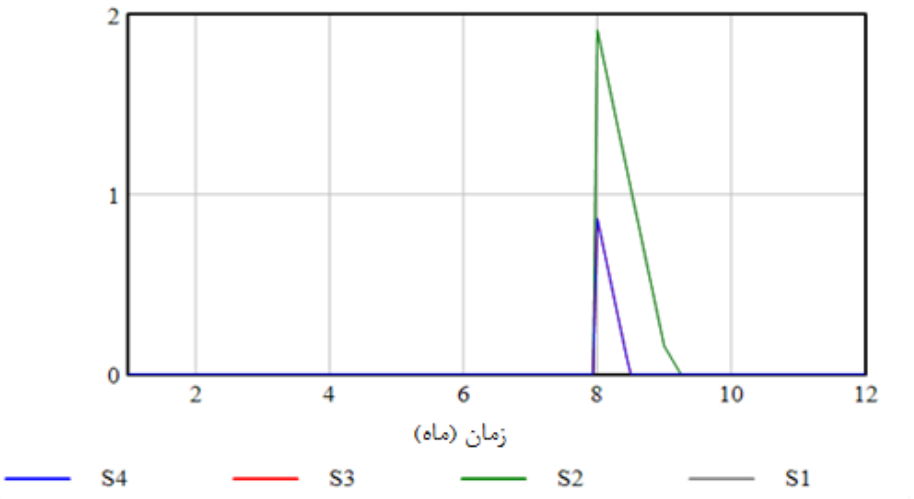
	ذخیره‌نشده در مخازن زیرزمینی			ذخیره‌نشده در مخازن زیرزمینی

یافته‌ها

با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، منحنی اصلاح شده گاز طبیعی در دسترس، مطابق شکل ۷ است. با توجه به این‌که در مدل تعریف شده در این پژوهش، تمام حجم گاز مازاد تا حدود ماه ۸، وارد بخش ذخیره‌سازی می‌شود، بنابراین تا ماه ۸، گاز مازاد دیگر وجود نخواهد داشت. در ماه‌های ۸ تا ۱۲، از گاز ذخیره شده چه در قالب ذخیره‌سازی زیرزمینی و چه مینیLNG ، با توجه به کمبود گاز و میزان نیاز استفاده خواهد شد.

طبق شکل ۷، در سناریوی ۱ و ۲ که تنها در صادرات یا عدم صادرات LNG تفاوت دارند، منحنی‌ها به‌طور کامل مشابه است. برای این دو سناریو، در ماه ۸ تا اواسط ماه ۹، حتی مازاد گاز طبیعی نسبت به نیاز و مصرف وجود خواهد داشت. دو سناریوی ۳ و ۴ نیز تنها در صادرات یا عدم صادرات LNG تفاوت دارند، بنابراین دوباره منحنی‌ها به‌طورکامل مشابه است. تفاوت این دو سناریو، با دو سناریوی ۱ و ۲، در ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن زیرزمینی است. در این دو سناریو، فرض شده بود که نرخ تزریق، برداشت و ظرفیت ذخیره‌سازی تغییری نداشته باشد و مشابه مقدار کنونی باشد. در واقع توسعه مخازن زیرزمینی در این دو سناریو لحاظ نشده است؛ بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رود. این دو سناریو مقدار مازاد کم‌تری (درنتیجه مقدار ذخیره‌سازی کم‌تر) خواهند داشت.

شکل ۵. نمودار گاز طبیعی در دسترس اصلاح شده برای سناریوهای تعریف شده

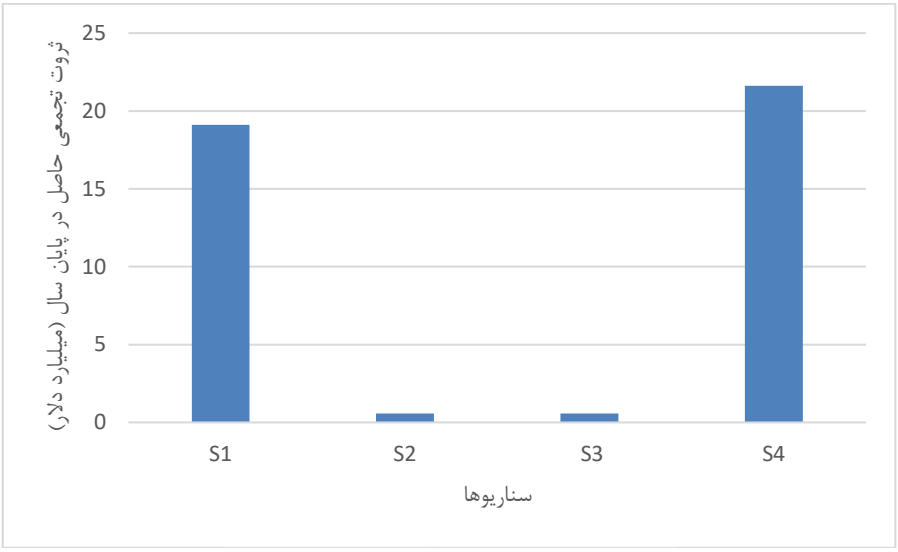


نکته مهم دیگر درباره این منحنی این است که در هر ۴ سناریوی تعریف شده، در ماه‌های سرد، دیگر کمبود گاز طبیعی رخ نخواهد داد.

نمودار ثروت تجمعی برای سناریوهای تعریف شده نیز برای دو حالت قیمت صادرات گاز طبیعی به ازای هر مترمکعب، ۳۵ و ۷۰ سنت در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است.

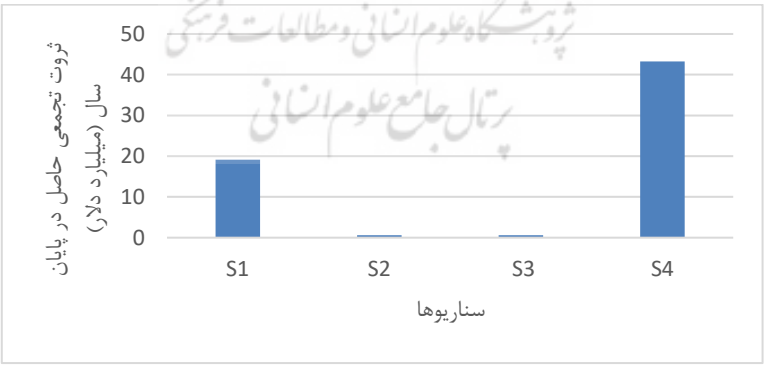
در سناریوی ۲ و ۳ با توجه با این‌که صادرات LNG وجود ندارد، ثروت تجمعی حاصل تنها مربوط به صادرات گاز طبیعی است. در دو سناریوی ۳ و ۴ که صادرات LNG در کنار صادرات گاز طبیعی وجود دارد، سناریوی ۴، مقدار ثروت تجمعی بیش‌تری نسبت به سناریوی ۱ تولید کرده است. دلیل این تفاوت این است که در سناریوی ۴، ذخیره‌سازی زیرزمینی طبق ظرفیت کنونی است و توسعه نیافته است، بنابراین مقدار گاز بیشتری نسبت به سناریوی ۱ (به‌دلیل توسعه ظرفیت ذخیره‌سازی زیرزمینی) برای ذخیره‌سازی به‌صورت LNG و درنهایت صادرات در دسترس است.

شکل ۶. نمودار ثروت تجمعی برای سناریوهای تعریف شده برحسب میلیارد دلار (فروش گاز طبیعی ۳۵ سنت)



در شکل ۹ نیز، به‌طور مشابه دو سناریوی ۲ و ۳ که صادرات LNG ندارند، ثروت تجمعی کمی تولید کرده است. در دو سناریوی ۱ و ۴ نیز که هر دو صادرات LNG دارند، سناریوی ۴ به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی زیرزمینی کم‌تر و گاز در دسترس بیش‌تر برای تبدیل به LNG و صادرات نسبت به سناریوی ۱، ثروت تجمعی بیش‌تری تولید کرده است.

شکل ۷. نمودار ثروت تجمعی برای سناریوهای تعریف شده برحسب میلیارد دلار (فروش گاز طبیعی ۷۰ سنت)



بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، موضوع انرژی و به‌طور ویژه گاز طبیعی به‌عنوان یکی از سوخت‌های فسیلی پاک مطرح شده است. با توجه به روندهای مصرف گاز در بخش‌های مختلف کشور،

در سال‌های اخیر معضل کمبود گاز طبیعی در ماه‌های سرد سال و همزمان با پیک مصرف گاز بخش خانگی کشور بسیار اهمیت یافته است. یک راهکار برای حل این چالش استفاده از روش‌های مختلف ذخیره‌سازی گاز طبیعی است. ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ایران تاکنون اغلب به‌صورت غیرفعال و در مخازن زیرزمینی هیدروکربوری انجام شده است. در این پژوهش، ذخیره‌سازی گاز به‌صورت فعال و در قالب LNG که امکان صادرات آن را نیز فراهم می‌کند، در کنار ذخیره‌سازی زیرزمینی مطرح شده است. طبق این دو روش ذخیره‌سازی ۴ سناریوی مختلف مطرح شده است.

در این پژوهش، زنجیره تأمین LNG به روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها و با استفاده از نرم‌افزار ونسیم مدلسازی شده است. در این مدلسازی، چهار سناریوی مختلف پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با هم مقایسه شده است. این نتایج شامل نمودار گاز طبیعی در دسترس در ۴ سناریوی مختلف و مقدار ثروت تجمعی حاصل در پایان سال در دو حالت قیمت صادرات گاز طبیعی ۳۵ سنت (فروش به‌صورت قرارداد طولانی‌مدت) و ۷۰ سنت (فروش به‌صورت تک محموله) محاسبه شده است. چهار سناریو شامل موارد زیر بود:

۱. ذخیره‌سازی به‌صورت زیرزمینی با افزایش ظرفیت (مطابق توسعه فاز دوم سراجه و شوریجه) به همراه ذخیره‌سازی به‌صورت مینی LNG باشد و LNG مازاد مصرف نیز صادر شود.

۲. ذخیره‌سازی فقط به‌صورت زیرزمینی و با افزایش ظرفیت (مطابق توسعه فاز دوم سراجه و شوریجه) باشد.

۳. ذخیره‌سازی به‌صورت زیرزمینی با ظرفیت فعلی به همراه ذخیره‌سازی به‌صورت مینی LNG باشد و LNG مازاد مصرف نیز صادر شود.

۴. ذخیره‌سازی به‌صورت زیرزمینی با ظرفیت فعلی.

در خصوص نمودار گاز طبیعی در دسترس، در هر ۴ سناریو با توجه به این‌که در مدل تعریف شده در این پژوهش، تمام حجم گاز مازاد تا حدود ماه ۸، وارد بخش ذخیره‌سازی می‌شود، بنابراین تا ماه ۸، گاز مازاد دیگر وجود نخواهد داشت. در ماه‌های ۸ تا ۱۲، از گاز ذخیره شده چه در قالب ذخیره‌سازی زیرزمینی و چه مینی LNG، با توجه به کمبود گاز و میزان نیاز استفاده خواهد شد.

در سناریوی ۱ و ۲ که تنها در صادرات یا عدم صادرات LNG تفاوت دارند، منحنی گاز طبیعی در دسترس به‌طور کامل مشابه است. برای این دو سناریو، در ماه ۸ تا اواسط

ماه ۹، حتی مازاد گاز طبیعی نسبت به نیاز و مصرف وجود خواهد داشت. دو سناریوی ۳ و ۴ نیز تنها در صادرات یا عدم صادرات LNG تفاوت دارند، بنابراین دوباره منحنی‌ها به‌طور کامل مشابه است. تفاوت این دو سناریو، با دو سناریوی ۱ و ۲، در ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن زیرزمینی است. این دو سناریو مقدار مازاد کمتری (درنتیجه مقدار ذخیره‌سازی کمتر) خواهند داشت. همچنین در هر ۴ سناریوی تعریف شده، در ماه‌های سرد، دیگر کمبود گاز طبیعی رخ نخواهد داد؛ بنابراین به‌ترتیب دو سناریوی ۱ و ۲ و سپس دو سناریوی ۳ و ۴ از لحاظ منحنی گاز طبیعی در دسترس اصلاح شده مطلوب خواهند بود.

در خصوص مقدار ثروت تجمعی حاصل در پایان سال نیز، در سناریوی ۲ و ۳ با توجه به این‌که صادرات LNG وجود ندارد، ثروت تجمعی حاصل تنها مربوط به صادرات گاز طبیعی است. در دو سناریوی ۳ و ۴ که صادرات LNG در کنار صادرات گاز طبیعی وجود دارد، سناریوی ۴، مقدار ثروت تجمعی بیشتری نسبت به سناریوی ۱ تولید کرده است. دلیل این تفاوت این است که در سناریوی ۴، ذخیره‌سازی زیرزمینی طبق ظرفیت کنونی است و توسعه نیافته است، بنابراین مقدار گاز بیشتری نسبت به سناریوی ۱ برای ذخیره‌سازی به‌صورت LNG و درنهایت صادرات در دسترس است. برای هر دو حالت فروش گاز طبیعی به قیمت ۳۵ و ۷۰ سنت این توضیح برقرار است. در حالت قیمت فروش بیشتر همان‌طور که انتظار می‌رود، مقدار ثروت تجمعی بیشتر از حالت ۳۵ سنت خواهد بود؛ بنابراین در خصوص مقدار ثروت تجمعی حاصل در پایان سال، ابتدا سناریوی ۴، سپس ۱ مطلوب است. دو سناریوی ۲ و ۳ نیز ثروت تجمعی کمی تولید می‌کند که مطلوب نیست.

در این پژوهش برای رفع چالش کمبود گاز طبیعی در کشور و در ماه‌های سرد سال راهکار ذخیره‌سازی پیشنهاد شد. در کنار این راهکار سایر راهکارها ازجمله کاهش مصرف از طریق بهینه‌سازی در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده گاز طبیعی کشور می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. با توجه به هم‌بستگی برق و گاز به‌دلیل استفاده از گاز طبیعی برای تولید برق، راهکارهای کاهش مصرف برق نیز می‌تواند مصرف گاز طبیعی را نیز در پی داشته باشد. به‌عنوان مثال، ذخیره‌سازی برق در واحدهای ذخیره‌سازی تلمبه ذخیره‌ای (به‌دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی بالا) یا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق به‌عنوان‌مثال انرژی خورشیدی می‌تواند مدنظر باشد. یک مزیت مهم راهکاری مانند استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید برق و به‌طور ویژه برای کشور ایران، پتانسیل بالای

ایران در دریافت انرژی خورشیدی است (Kazem et al., 2022).

بنابراین، می‌توان در مدلسازی‌های پیچیده‌تر، روش‌های مؤثر دیگری را در کنار ذخیره‌سازی گاز طبیعی، در مدلسازی لحاظ کرد و میزان تأثیرگذاری هرکدام را مشاهده کرد.

منابع

کاسبی، س. (۱۳۹۲). بررسی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مخازن هیدروکربنی تخلیه شده. *ماهنامه علمی ـ ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز*، شماره ۱۰۸، ۲۰–۲۶.

مدیریت برنامه‌ریزی تلفیقی امور سیستم‌های اطلاعات. (۱۴۰۰). *گزارش ماهانه شرکت ملی گاز ایران*.

bp Statistical Review of World Energy. (2022).

Doymus, M., Denktas Sakar, G., Topaloglu Yildiz, S., & Acik, A. (2022). *Small-scale LNG supply chain optimization for LNG bunkering in Turkey*. Computers and Chemical Engineering, 162, 107789. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107789

Energy, F., & Commission, R. (2004). Under ground Natural Gas Storage.

Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., & Gholami, A. (2022). A systematic review of solar photovoltaic energy systems design modelling, algorithms, and software. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44(3), 6709–6736. https://doi.org/10.1080/ 15567036.2022.2100517

Le Fevre, C. (2018). A review of demand prospects for LNG as a marine transport fuel (Issue June). https://doi.org/10.26889/9781784671143%0Ahttps://www.oxfordenergy.org/publications/review-demand-prospects-lng-marine-fuel/

Li, J., Dong, X., Shangguan, J., & Hook, M. (2011). Forecasting the growth of China's natural gas consumption. Energy, 36(3), 1380–1385. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.003

LNG Market Trends and Their Implications. (2019). LNG Market Trends and Their Implications, June. https://doi.org/10.1787/90c2a82d-en

Meza, A., Ari, I., Al-Sada, M. S., & Koç, M. (2021). Future LNG competition and trade using an agent-based predictive model. Energy Strategy Reviews, 38(August), 100734. https://doi.org/10.1016/ j.esr.2021.100734

Meza, A., Ari, I., Sada, M. Al, & Koç, M. (2022). Disruption of maritime trade chokepoints and the global LNG trade: An agent-based modeling approach. Maritime Transport Research, 3(May), 100071. https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100071

Shin, K., Son, S., Moon, J., Jo, Y., Kwon, J. S. I., & Hwang, S. (2022). Dynamic modeling and predictive control of boil-off gas generation during LNG loading. Computers and Chemical Engineering, 160, 107698. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107698

The 13th Five-Year-Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China. (2013). National Development Reform Commission. https://en.ndrc.gov.cn/policies/index_2.html

Vensim. (2015). 2015 Ventana Systems.

Yin, Y., & Lam, J. S. L. (2022). Bottlenecks of LNG supply chain in energy transition: A case study of China using system dynamics simulation. Energy, 250, 123803. https://doi.org/10.1016/j. energy.2022.123803

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی