

توسعه مدل تصمیم‌سازی سه هدفه اقتصادی، زیست‌محیطی و توسعه پایدار به منظور بازیابی گازهای مشعل

زینب حمیدزاده

دانش آموخته دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، zeinabhamidzadeh@gmail.com

سورنا ستاری

استادیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، Sattari@sharif.ir

علی وطنی^۱

استاد، مؤسسه گاز طبیعی مایع شده (I-LNG)، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، avatani@ut.ac.ir

محمد سلطانیه

استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، msoltanieh@sharif.edu

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

چکیده

ایران به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین سوزانندگان گازهای همراه محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از سوزاندن گاز همراه در مشعل‌ها، در این پژوهش مدل بهینه انتخاب فناوری‌های بازیافت گازهای ارسالی به مشعل به کمک روش‌های تصمیم‌سازی پیشرفته توسعه داده شده است. این مدل دارای سه تابع هدف شامل: زمان بازگشت سرمایه، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و تابع هدف کیفی ترکیبی از معیارهای توسعه پایدار می‌باشد. فناوری‌های بازیافت گازهای مشعل شامل واحد NGL، تزریق گاز به خط لوله، واحدهای LNG، پالایشگاه GTL، تولید هیدرات‌های گازی، تولید گاز طبیعی فشرده، تزریق گاز به مخازن به‌منظور افزایش برداشت، تولید برق با استفاده از توربین گاز، توربین بخار و چرخه ترکیبی و تولید آب شیرین با روش MED در نظر گرفته شده است. مورد مطالعاتی شامل ۵ حلقه چاه نفت با مشخصات متفاوت در یک منطقه نفتی در جنوب ایران در نظر گرفته شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در حالت بهینه، میزان زمان بازگشت سرمایه به‌عنوان تابع هدف اقتصادی، ۱/۱ سال محاسبه شده است و میزان کاهش تولید دی‌اکسید کربن ۸۱۰۷۴۰ تن بر سال است.

طبقه‌بندی JEL: C610

کلیدواژه‌ها: بازیابی گازهای مشعل، مدل تصمیم‌سازی بهینه، توابع هدف سه گانه

۱- مقدمه

کشور ایران در سال ۲۰۱۵ با سوزاندن ۱۷/۳ میلیارد مترمکعب گاز همراه، حدود ۱۲ درصد از گازهای مشعل^۱ جهان را به خود اختصاص داده و هم اکنون در جایگاه سوم کشورهای سوزاننده گاز مشعل قرارداد (پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف، ۱۳۹۵). محاسبات سرانگشتی هزینه فرصت در اثر فرآیند فلرینگ، بررسی پیامدهای زیست‌محیطی انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای ناشی از فلرینگ و مرور الزامات بین‌المللی کاهش انتشار، اجتناب‌ناپذیری ضرورت تدوین برنامه تصمیم‌گیری در خصوص بازیابی و حذف گازهای مشعل را به‌روشنی بیان می‌کند. وجود فناوری‌های متعدد برای بازیافت گازهای ارسالی به برج مشعل و همچنین دینامیک بودن پارامترهای تصمیم‌گیری مانند قیمت نفت و گاز، قیمت ارز و همچنین شاخص‌های کیفی مرتبط با سیاست‌گذاری فناوری‌های بازیافت گازهای مشعل و بهره‌وری انرژی، منتج به پیچیده شدن انتخاب فناوری‌های بازیابی گازهای ارسالی به برج مشعل می‌شود. انتخاب بهترین فناوری در مسائل برنامه‌ریزی انرژی و بالاخص در بحث بازیابی و حذف ارسال گاز به برج مشعل، نیازمند در نظر گرفتن شاخص‌های کمی و کیفی -گاهی متعارض با یکدیگر- است. توسعه یک مدل جامع تصمیم‌سازی در مورد فناوری‌های بازیابی گازهای مشعل با در نظر گرفتن تمامی اهداف فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و شاخص‌های کیفی توسعه پایدار، می‌تواند دستیابی به سیاست‌گذاری مؤثر در بازیابی گازهای مشعل را میسر سازد. مدل ارائه شده در این تحقیق، یک مدل بهینه چندهدفه با در نظر گرفتن ابزارهایی مثل الگوریتم ژنتیک و روش‌های تصمیم‌سازی پیشرفته است که در نهایت منجر به دستیابی به بهترین انتخاب و ترکیب فناوری بازیابی گازهای مشعل خواهد شد.

۲- گازهای مشعل و وضعیت ایران

در مخازن نفتی همواره مقداری گاز طبیعی به‌صورت محلول در سیال وجود دارد. این گاز طبیعی را که به‌هنگام استخراج نفت از چاه خارج شده و در حقیقت محصول

1. Flaring

جانبی نفت تولید شده محسوب می‌گردد، گاز همراه نفت^۱ یا به‌اختصار گاز همراه می‌نامند. این گازها از جمله منابع هیدروکربوری است که در بسیاری از موارد سوزانده یا به‌اصطلاح فلر می‌شوند (سلطانیه و همکاران، ۲۰۱۶). براساس آخرین آمار بانک جهانی در سال ۲۰۱۸، حدود ۱۴۵ میلیارد مترمکعب گاز از طریق ۱۶ هزار مشعل در سراسر جهان سوزانده شده است. این میزان فلرینگ، باعث انتشار ۳۵۰ میلیون تن CO₂ شده است. تنها در قاره آفریقا سالانه بالغ بر ۳۵ میلیارد مترمکعب گاز از طریق فلرینگ به‌هدر می‌رود (بانک جهانی^۲، ۲۰۱۵) که برابر نصف کل میزان مصرف انرژی این قاره است. این میزان فلرینگ گاز، معادل تولید ۷۵۰ میلیارد کیلووات ساعت برق است که این رقم بیش از مصرف سالیانه برق قاره آفریقا است (بانک جهانی، ۲۰۱۵).

در ایران گازهای همراه نفت از جمله منابع گاز غنی می‌باشد. مجموع گازهای همراه نفت ایران تا سال ۱۳۹۳ در حدود ۲۷ میلیون مترمکعب در روز بوده است^۳ که بیشترین سهم متعلق به شرکت نفت فلات قاره می‌باشد. ایران در سال ۲۰۱۵ با تولید حدود ۶۳۰ میلیون تن گاز گلخانه‌ای یکی از ۱۰ کشور نخست منتشرکننده گازهای گلخانه‌ای در جهان بوده است. در این بین، حجم انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوزاندن گازهای مشعل معادل حدود ۳۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال است که سهمی معادل حدود ۵ درصد از مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای را شامل می‌شود (سازمان محیط‌زیست ایران^۴، ۲۰۱۵).

۳- مرور بر ادبیات نظری بازیابی گازهای مشعل

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه نحوه جمع‌آوری گازهای همراه صورت گرفته و در ذیل آن‌ها راهکارهای کاهش سوزاندن این گازها در مطالعات داخلی و خارجی ارائه شده است. حمیدزاده^۵ و همکاران (۲۰۲۰) به توسعه مدل تصمیم‌سازی چندهدفه بر مبنای پارامترهای صرفاً فنی پرداختند. در مدل توسعه داده شده، فناوری‌های بازیافت گازهای

1. Associated Petroleum Gas (APG)
2. World Bank

۳. پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف، ۱۳۹۵.

4. IRAN DOE
5. Hamidzadeh

مشعل صرفاً با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده نقطه بهینه اختصاص ۷۰ درصد از گاز همراه به مبحث ازدیاد برداشت^۱، ۲۶ درصد به نیروگاه چرخه ترکیبی و تولید بخار برای شیرین‌سازی آب و نیز ۴ درصد برای تولید برق در توربین گاز بوده است. لازم به ذکر است نبود پارامترهای کیفی و توابع هدف توسعه پایدار مهم‌ترین کمبود این مطالعه به نظر می‌رسد. سلطانیه^۲ و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله خود در سال ۲۰۱۶، مقدار انرژی تلف شده در فلر فرآیندهای نفتی و آلودگی‌های ناشی از آن را در ایران به‌عنوان سومین کشور فلر کننده گاز در دنیا، مورد بررسی قرار داده است. معروف نشاط (۱۳۸۹)، امکان‌سنجی فنی اقتصادی استفاده از گازهای فلر برای تبدیل به متانول را در ایران انجام داده است. در این پژوهش تولید متانول از گازهای فلر مورد ارزیابی اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی قرار گرفته است. بازگشت سرمایه این طرح برای گاز فلر مارون حدود ۶ سال و برای سیری حدود ۴ سال برآورد شده است. جعفریان (۱۳۹۱)، بررسی فنی اقتصادی تولید برق از گاز فلر را در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود انجام داده است. تولید توان از سه روش توربین گاز، توربین بخار و موتور احتراق داخلی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در پژوهش انجام شده توسط مارتین لیفیلد^۳ (۲۰۱۵)، با موضوع ایجاد ارزش افزوده برای فلر، فناوری‌های بازیافت گازهای ارسالی به فلر شامل میکروال‌ان‌جی^۴، فشرده‌سازی گاز طبیعی و هیدراته کردن گاز طبیعی، در آمریکا بررسی شده است. نتایج حاصل از انجام این مطالعه حاکی از آن است که به‌مرور هزینه نصب فناوری میکروال‌ان‌جی کاهش یافته و منتج به اقتصادی شدن آن برای مقدار گاز ورودی به میزان کمتر از ۱ میلیون استاندارد فوت مکعب در روز شده است. پژوهشی با موضوع یکپارچه‌سازی شبکه فلر با شبکه سوخت در پالایشگاه‌ها، در دانشگاه تهران توسط طهونی^۵ و همکاران (۲۰۱۶) انجام شده است. ترکیب شبکه فلر با شبکه سوخت یکی از رهیافت‌های مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ انرژی است. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که ترکیب این دو شبکه می‌تواند منتج به کاهش ۱۲ درصدی مصرف گاز طبیعی

1. EOR, Enhanced Oil Recovery
2. Soltanieh
3. Layfield
4. MicroLNG, Micro Liquefied Natural Gas
5. Tahouni

شود. در پژوهش انجام شده توسط حاجی‌زاده^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، موضوع ارزیابی فنی و اقتصادی بازیافت گازهای ارسالی به فلر در یک پالایشگاه بزرگ گاز، مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی اقتصادی انجام شده، نرخ بازگشت سرمایه روش‌های مایع‌سازی و تولید ال‌پی‌جی بیشتر از ۲۰۰ درصد است و در سناریوهای مختلف این دو روش بهتر از فشرده‌سازی است. در پژوهش انجام شده توسط ذوالفقاری^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، موضوع ارزیابی فنی-اقتصادی بازیافت گازهای فلر در فرآیندهای مختلف پالایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که تولید برق با استفاده از توربین گاز بهترین روش بازیافت برای گازهای فلر است.

استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی در تعیین ابعاد فناوری‌های تبدیل انرژی در مطالعات زیادی انجام شده است. آرندیان و اردهالی (۱۳۹۷) بهینه‌سازی اندازه، مکان و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت را با کمک الگوریتم هوشمند جهش غورباکه انجام دادند. احمدی آذر و همکاران (۱۳۹۸)، از مدل‌های بهینه‌سازی با هدف بیشینه‌سازی سود سالانه مجتمع‌های پتروشیمی استفاده نموده است. تکلیف و همکاران (۱۳۹۹)، سطح بهینه تولید نفت خام و گاز غنی را با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی پروژه‌های نفت و گاز را مطالعه نموده است.

الویج^۳ و همکاران (۲۰۱۸) در مرکز اطلاعات محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا، نقش فلرینگ در پتانسیل کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای گابن، الجزایر، ونزوئلا، ایران و سودان به ترتیب می‌تواند ۹۴، ۴۸، ۴۷، ۳۴ و ۳۳ درصد ارزیابی شده است. در رساله دکتری انجام شده توسط آنوسیک^۴ (۲۰۱۳) در دانشگاه کرنفیلد، موضوع ارزیابی فنی اقتصادی کاهش فلرینگ گاز طبیعی با روش توربین‌های گاز کوچک برای تأمین برق مورد نیاز در تأسیسات میدان استخراج نفت به‌عنوان یکی از راهکارهای مناسب برای بازیافت و کاهش فلرینگ مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش انجام شده

1. Hajizadeh
2. Zolfaghari
3. Elvidge
4. Nnamdi Benedict Anosike
5. Cranfield University

توسط حیدری^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، موضوع توسعه و تحلیل روش جدید برای تولید برق با استفاده ترکیبی از گازهای ارسالی به فلر و سوخت‌های متعارف از لحاظ فنی و اقتصادی انجام شده و نتایج نشان‌دهنده مطلوبیت طرح برای جریان‌های با نرخ جریان فلر بیشتر از ۰,۸ کیلوگرم بر ثانیه است. در پژوهش انجام شده توسط لاول^۲ و همکاران (۲۰۱۷) در شرکت کاوش و توسعه نفت نیجریه، موضوع ذخیره‌سازی گازهای همراه در مخازن نفت، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش حاکی از این است که براساس شاخص‌های فنی و اقتصادی بررسی شده، ذخیره‌سازی گازهای همراه در مخازن دست‌نخورده بهترین راه حل امکان‌پذیر برای حفظ آن‌ها است.

توجه به شاخص‌های توسعه پایدار در کنار توسعه اقتصادی امروزه در مطالعات مختلفی انجام شده است. خوشنویس و پژویان (۱۳۹۵)، اثر آلودگی محیط‌زیست بر امید به زندگی به‌عنوان مهم‌ترین عامل توسعه در ذیل توسعه پایدار را مورد بررسی قرار دادند. ضرغامی و همکاران (۱۳۹۹)، اجرای بازاریابی دوستدار محیط‌زیست به‌عنوان محرک توسعه پایدار در صنعت نفت را مطالعه نمودند.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، پژوهش‌های زیادی در رابطه با فناوری‌های بازیافت فلرینگ انجام شده و امکان‌سنجی فنی- اقتصادی بازیافت گازهای فلر به‌خوبی صورت پذیرفته است. اما نکته‌ای که به آن توجه نشده است، ترکیب بهینه فناوری‌هاست که مستلزم بررسی مسئله از دیدگاه کلان می‌باشد. همچنین در هیچ یک از این پژوهش‌ها، ارزیابی جامع از پتانسیل جمع‌آوری گازهای فلر در یک منطقه با چندین برج مشعل و نیز توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جامع برای انتخاب بهترین فناوری یا مکانیسم برای به صفر رساندن حجم گازهای ارسالی به فلر، انجام نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر سعی شده با در نظر گرفتن یک منطقه در جنوب ایران که در آن از پنج چاه نفت مختلف، گازهای ارسالی به فلر وجود دارد، یک بررسی سیستماتیک با مدل‌سازی فناوری‌های موجود با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه شامل کمترین زمان بازگشت سرمایه (اقتصادی)، حداکثر کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن (محیط‌زیستی) و اهداف توسعه پایدار انجام شود.

1. Heidari
2. Kazeem A.Lawal

۴- مدل‌سازی

مدل مفهومی فناوری‌های بازیافت گازهای مشعل

به‌منظور استفاده از فناوری‌های بازیافت گازهای همراه، ابتدا باید زنجیره تولید و دستیابی به محصولات قابل فروش از گازهای همراه توسط هریک از فناوری‌ها مشخص شود. به‌علت وجود ناخالصی‌های گوگردی و مایعات ارزشمند در گازهای همراه، در این پژوهش برای تمام راهکارهای فوق فرض بر این است که ابتدا باید گازهای همراه وارد یک واحد NGL^۱ شود تا پیش‌تصفیه و جداسازی مواد ارزشمند از گازهای همراه انجام گردد. به‌منظور بازیابی و کاهش میزان گازهای همراه ارسالی به سامانه فلرینگ، فناوری‌های متفاوتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این فناوری‌ها و مکانیزم‌ها عبارت‌اند از پالایش و شیرین‌سازی گازهای همراه (NGL) و ارسال گاز خشک به خط لوله، تولید گاز طبیعی مایع (ال‌ان‌جی^۲)، فناوری تبدیل گاز به مایع (GTL^۳)، ازدیاد برداشت از مخازن نفتی (EOR)، تولید برق در محل برداشت از مخزن، تولید برق در نیروگاه، تولید آب شیرین با روش MED^۴، فشرده‌سازی گاز طبیعی و تبدیل گاز طبیعی به هیدرات. از میان روش‌های موجود، برحسب اینکه حجم گازهای مشعل چه میزان است و در چه مکان جغرافیایی در حال سوزانده شدن است، می‌توان با برآورد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی از فناوری‌ها، یکی یا چند از آن‌ها را انتخاب نمود.

مدل بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری

در بازیابی گازهای مشعل می‌بایست براساس داده‌هایی مانند مشخصات ترمودینامیکی و ترکیب شیمیایی گاز، مشخصات جغرافیایی سایت، نیازمندی‌های انرژی، راهبردهای امنیت انرژی و زیست‌محیطی، شاخص‌های اجتماعی مانند اشتغال‌زایی و... ترکیب فناوری مناسب را انتخاب نمود. لذا در این تحقیق مقرر است، با روش‌هایی مبتنی بر علوم تصمیم‌گیری، مدلی جامع توسعه یابد که بتواند، به‌منظور دستیابی به اهداف توسعه پایدار، به تمامی شاخص‌های فوق بر اساس اهمیت معیارهای تأثیرگذار، وزن مناسب داده و ما را به بهترین تصمیم رهنمون سازد. تعدد پارامترهای

1. NGL, Natural Gas Liquids
2. LNG, Liquefied Natural Gas
3. GTL, Gas to Liquid
4. MED, Multi Effect Desalination

تصمیم‌گیری و دینامیک بودن برخی از آنها به پیچیدگی موضوع می‌افزاید؛ بنابراین در پژوهش حاضر از یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای تصمیم‌سازی استفاده شده است. در مدل بهینه‌سازی چندهدفه جواب حاصل از مدل به صورت یک جبهه جواب بهینه است که اصطلاحاً جبهه پارتو^۱ نامیده می‌شود. به این ترتیب نتایج حاصل از حل مدل، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه می‌باشد و لازم است که فرآیند تصمیم‌سازی برای انتخاب جواب بهینه از جواب‌های موجود در جبهه پارتو انجام شود. در بین روش‌های بهینه‌سازی، روش الگوریتم ژنتیک الهام گرفته از طبیعت، از تکامل یافته‌ترین روش‌ها با متغیرهای گسسته به‌شمار می‌رود. اصول اولیه این الگوریتم توسط هلند^۲ و همکارانش (۱۹۷۵) در دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۶۲ ارائه شد. این الگوریتم به‌طور خاص برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده با فضای جستجوی ناشناخته که روش‌های دقیق قادر به یافتن حل آن نیستند، مناسب است (طهماسب زاده^۳ و صیادی، ۲۰۱۶). در این پژوهش از الگوریتم اناس‌جی‌ای^۴ برای بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. الگوریتم اناس‌جی‌ای^۲ بهبود یافته الگوریتم NSGA است که پیشتر توسط دب^۵ و همکارانش (۲۰۰۲) ارائه شده بود.

انتخاب متغیرهای تصمیم و محدودیت متغیرها

با توجه به اینکه گازهای همراه ابتدا باید به واحد NGL فرستاده و پالایش شوند، خروجی‌های متان و اتان واحد NGL که در واقع ورودی فناوری‌های مختلف هستند به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب تمامی متغیرهای تصمیم در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است، تمام پارامترهای ارائه شده، براساس درصد گاز خروجی از واحد NGL است. به این ترتیب حد بالا و پایین این متغیرها بین ۰ تا ۱۰۰ است.

هم‌چنین محدودیت‌هایی برای برخی متغیرهای تصمیم وجود دارد که در مدل بازیابی گازهای مشعل باید اعمال شود. روابط ارائه شده در معادله‌های (۱) و (۲) به‌عنوان محدودیت برای متغیرها در مدل‌سازی استفاده شده است.

1. Pareto frontier
2. Holland
3. Tahmasebzadehbaie and Sayyaad
4. NSGAI
5. Deb

$$X_{inj} + X_{pp,gt} + X_{pp,sc} + X_{pp,cc} + X_{sb} + X_{GTL} + X_{LNG} + X_{CNG} + X_{NGH} + X_{selling} = 1 \quad (1)$$

$$0 \leq X_{HRSG,LP} \leq 1 \quad (2)$$

همچنین بعضی از فناوری‌ها از لحاظ فنی دارای محدودیت‌هایی هستند که در روابط (۳) و (۴) ارائه شده است (شیرمحمدی^۱ و صیادی، ۲۰۰۷).

$$V_{gas \text{ to LNG plant}} = 0 \text{ or } \geq 10000 \frac{m^3}{day} \quad (3)$$

$$V_{gas \text{ to GTL plant}} = 0 \text{ or } \geq 5000 \frac{m^3}{day} \quad (4)$$

با توجه به اینکه محدودیت ظرفیت برای بعضی از فناوری‌ها وجود دارد، در صورت کمبود گازهای مشعل به‌عنوان خوراک مورد نیاز فناوری، از ظرفیت گاز خط لوله برای تأمین تقاضا در سناریوی پایه استفاده شده است.

جدول ۱. متغیرهای تصمیم مربوط به گازهای مشعل هر چاه نفت

پارامتر	توضیح
X_{inj}	سه‌م گاز برای تزریق به چاه
$X_{pp,gt}$	سه‌م گاز برای تولید برق در نیروگاه با استفاده از توربین گاز
$X_{pp,sc}$	سه‌م گاز برای تولید برق در نیروگاه چرخه بخار
$X_{pp,cc}$	سه‌م گاز برای تولید برق در نیروگاه چرخه ترکیبی
X_{sb}	سه‌م گاز برای تولید بخار در بویلر
X_{GTL}	سه‌م گاز به‌عنوان خوراک پالایشگاه GTL
X_{LNG}	سه‌م گاز به‌عنوان خوراک پالایشگاه LNG
X_{CNG}	سه‌م گاز برای تولید CNG
X_{NGH}	سه‌م گاز برای تولید هیدرات گازی
$X_{selling}$	سه‌م گاز برای تزریق به خط لوله سراسری
$X_{HRSG, LP}$	سه‌م بازیافت حرارت از گازهای احتراق توربین گاز با استفاده از بویلر بازتاب حرارت

منبع: یافته‌های تحقیق

1. Shirmohammadi

توابع هدف کمی

دو تابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی در مدل توسعه یافته در نظر گرفته شده است. تابع هدف اقتصادی براساس مدت زمان بازگشت سرمایه مطابق مدل‌سازی اقتصادی TRR است که در ادامه در بخش مدل‌سازی و تحلیل اقتصادی ارائه شده است. تابع هدف کمی دوم نیز به صورت مقدار کاهش آلاینده‌گی ناشی از فلرینگ در صورت استفاده از فناوری‌های بازیافت می‌باشد که مطابق مدل زیست‌محیطی ارائه شده در بخش‌های آتی است.

تابع هدف اقتصادی

در این پژوهش مدل اقتصادی به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول مربوط به فناوری‌های بازیافت گازهای فلر و بخش دوم مربوط به پارامترهای خارجی اثرگذار بر فناوری‌های بازیافت می‌باشد. بعضی از محصولاتی که طی فرآیند بازیافت گازهای ارسالی به فلر توسط فناوری‌های مختلف تولید می‌شود، تابع قیمت‌های جهانی نفت و بعضی دیگر تابع قیمت‌های بازار داخلی است. به این ترتیب در پژوهش حاضر، قیمت نفت خام ۵۰ دلار به ازاء هر بشکه و قیمت گاز فلر ۳ سنت به ازاء هر مترمکعب در نظر گرفته شده است (شیرمحمدی و صیادی، ۲۰۰۷). همچنین قیمت در نظر گرفته شده در مدل تصمیم‌سازی برای سایر محصولات قابل تولید از بازیافت گازهای فلر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. قیمت در نظر گرفته شده برای حامل‌های انرژی در مدل تصمیم‌سازی بازیافت گازهای فلر

حامل انرژی	واحد	قیمت
نفت خام	$\frac{\$}{\text{barrel}}$	۵۰
برق	$\frac{\$}{\text{kWh}}$	۰/۰۶
گاز طبیعی (سوخت)	$\frac{\$}{\text{m}^3}$	۰/۰۱۲۵
آب شیرین	$\frac{\$}{\text{m}^3}$	۲/۳۳

قیمت	واحد	حامل انرژی
۰/۱	$\frac{\$}{m^3}$	اتان
۳۴۲	$\frac{\$}{Ton}$	ال پی جی
۴۶۷	$\frac{\$}{Ton}$	بنزین
۴۰۵	$\frac{\$}{Ton}$	نفثا
۴۹۶	$\frac{\$}{Ton}$	میعانات گازی
۴۱۵	$\frac{\$}{Ton}$	ال ان جی
۳۰۰	$\frac{\$}{Ton}$	هیدرات گازی
۸۰	$\frac{\$}{Ton}$	سی ان جی
۱۵/۰۲	$\frac{\$}{Ton}$	بخار
۰/۰۳	$\frac{\$}{Nm^3}$	گازهای ارسالی به فلر

منبع: شیرمحمدی و صیادی، ۲۰۰۷

بازگشت سرمایه به‌عنوان یکی از توابع هدف در مدل‌سازی، براساس سرمایه‌گذاری اولیه و مقدار سوددهی حاصل از فروش هر یکی از محصولات، طبق رابطه (۵) در نظر گرفته شده است (طهماسب زاده و همکاران، ۲۰۱۷).

$$t_{pb} = \frac{\left[\frac{1-k}{k(1-k^{BL})} \right] \left[\sum_{j=1}^{BL} \frac{TRR_j}{(1+i_{eff})^j} \right]}{\text{Annual Profit}} \quad (5)$$

پارامترهای استفاده شده در رابطه (۵) عبارتند از:

- TRR_j: کل سود لازم در ژامین سال بهره‌برداری از فناوری
- BL: طول عمر بهره‌برداری از سامانه (که ۱۵ سال در نظر گرفته می‌شود)
- t_{pb}: مدت زمان بازگشت سرمایه برحسب سال
- i_{eff}: نرخ بهره مؤثر

نرخ بهره مؤثر در رابطه (۵)، از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$i_{\text{eff}} = e^i - 1 \quad (۶)$$

پارامتر i در رابطه (۶)، نرخ بهره پولی است که در این پژوهش برای ایران، $۰/۱$ در نظر گرفته شده است. پارامتر k در رابطه (۵)، از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$k = \frac{1 + r_i}{1 + i_{\text{eff}}} \quad (۷)$$

پارامتر r_i در رابطه (۷)، نرخ تورم است که در این مطالعه برای ایران $۰/۱۶$ در نظر گرفته شده است. در رابطه (۵)، کل سود لازم در z امین سال بهره‌برداری از فناوری (TRR_j)، از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$TRR_j = \frac{CI_j}{BL} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، پارامتر CI ، عبارت است از سرمایه‌گذاری لازم برای فناوری. با مطالعه مقالات مختلف و بررسی داده‌های کتابخانه‌ای، هزینه‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری هریک از فناوری‌های بازیابی گازهای مشعل استخراج شده است که در جدول ۲ شده است.

تابع هدف زیست‌محیطی

به‌طور مشابه با مدل اقتصادی، مدل انتشار نیز متشکل از دو بخش است. بخش اول مرتبط با فناوری‌های بازیافت گاز مشعل و بخش دوم مرتبط با محاسبه مقدار انتشار آلاینده‌های ناشی از فلرینگ است. پارامترهای مهم مربوط به آلاینده‌گی و انتشار برای توسعه مدل تصمیم‌سازی در رابطه با فناوری‌های بازیافت گازهای ارسالی به فلر که به‌عنوان ورودی به مدل در نظر گرفته شده‌اند، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای فنی و اقتصادی فناوری‌های بازیافت گازهای ارسالی به مشعل

فناوری	مقیاس	مشخصات فنی			مشخصات اقتصادی	
		خوراک	بازده/ضریب تبدیل	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه بهره‌برداری	هزینه‌های متغیر بهره‌برداری
پالایشگاه ان‌جی‌ال	ساحل	گاز همراه	-	$74 \frac{\$}{m^3 day}$	$2/7 \frac{\$}{m^3 day}$	-
	فراساحل	گاز همراه	-	$82/6 \frac{\$}{m^3 day}$	$4/18 \frac{\$}{m^3 day}$	-
نیروگاه گازی	کمتر از ۳/۵ MW	گاز طبیعی و گاز همراه	۲۴ درصد	$817000 \frac{\$}{MW}$	$9 \frac{\$}{MW year}$	$3/6 \frac{\$}{MWh}$
	کمتر از ۱۰ MW	گاز طبیعی و گاز همراه	۲۸/۹ درصد	$618000 \frac{\$}{MW}$	$8/9 \frac{\$}{MW year}$	$3/1 \frac{\$}{MWh}$
	کمتر از ۲۱ MW	گاز طبیعی و گاز همراه	۳۳/۲۵ درصد	$662000 \frac{\$}{MW}$	$6/2 \frac{\$}{MW year}$	$3/1 \frac{\$}{MWh}$
	بیشتر از ۲۱ MW	گاز طبیعی و گاز همراه	۳۵/۹۷ درصد	$562000 \frac{\$}{MW}$	$6/2 \frac{\$}{MW year}$	$3 \frac{\$}{MWh}$
نیروگاه بخار	-	گاز طبیعی و گاز همراه	۴۸ درصد	$2700000 \frac{\$}{MW}$	$4 \frac{\$}{MW year}$	$4 \frac{\$}{MWh}$
نیروگاه چرخه ترکیبی	-	گاز طبیعی و گاز همراه	۶۰ درصد	$2100000 \frac{\$}{MW}$	$5 \frac{\$}{MW year}$	$5 \frac{\$}{MWh}$
جی‌تی‌ال	کمتر از ۱۰۰۰۰ $\frac{bbl}{day}$	گاز طبیعی	۳۲۲ $\frac{m^3 gas}{1 bbl}$	$40000 \frac{\$}{bbl}$	$1600 \frac{\$}{bbl year}$	$6 \frac{\$}{bbl year}$
	کمتر از ۳۵۰۰۰ $\frac{bbl}{day}$	گاز طبیعی		$250000-400000 \frac{\$}{bbl}$	$10000-16000 \frac{\$}{bbl year}$	$6 \frac{\$}{bbl year}$
	بیشتر از ۳۵۰۰۰ $\frac{bbl}{day}$	گاز طبیعی		$197000-250000 \frac{\$}{bbl}$	$7888-10000 \frac{\$}{bbl year}$	$6 \frac{\$}{bbl year}$
ال‌ان‌جی مقیاس کوچک	کمتر از ۰/۴ $\frac{Mton}{year}$	گاز طبیعی	$0/47-0/42 \frac{ton}{m^3}$	$420 \frac{\$}{ton year}$	$9/81 \frac{\$}{ton year}$	۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
ال‌ان‌جی مقیاس بزرگ	بیشتر از ۰/۴ $\frac{Mton}{year}$	گاز طبیعی	$0/47-0/42 \frac{ton}{m^3}$	$880 \frac{\$}{ton year}$	$9/81 \frac{\$}{ton year}$	۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
کارخانه ان‌جی‌اچ	کمتر از ۰/۴ $\frac{Mton}{year}$	گاز طبیعی	$0/9 \frac{ton}{m^3 water}$	$220 \frac{\$}{ton year}$	$7/26 \frac{\$}{ton year}$	۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
	بیشتر از ۰/۴ $\frac{Mton}{year}$	گاز طبیعی	$0/9 \frac{ton}{m^3 water}$	$680 \frac{\$}{ton year}$	$7/26 \frac{\$}{ton year}$	۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
سی‌ان‌جی	کمتر از ۱ $\frac{Mton}{year}$	گاز طبیعی و گاز همراه	$0/25-0/20 \frac{ton}{m^3}$	$106 \frac{\$}{m^3 day}$	$5/2 \frac{\$}{m^3 day}$	۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
تزریق به چاه	-	گاز طبیعی و گاز همراه	$189 \frac{m^3 gas}{1 bbl oil}$	$137/19 \frac{\$}{m^3 day}$		۵ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
تزریق به خط لوله	-	گاز طبیعی	۱۰۰ درصد	$1500000 \frac{\$}{km}$		۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
تولید بخار در بویلر	-	گاز طبیعی و گاز همراه	۹۰ درصد	$15000 \frac{\$}{ton hours}$		۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
بویلر بازیاب حرارت	-	حرارت گازهای داغ	-	$45900 \frac{\$}{ton hours}$		۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری
شیرین‌سازی آب	-	بخار	$17/9 \frac{kW}{m^3 water}$	$1400 \frac{\$}{m^3 day}$		$0/14 \frac{\$}{m^3 day}$

منبع: (کفرودی و همکاران، ۲۰۱۶) (سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، ۲۰۱۴) (هیمل^۱ و لای، ۲۰۰۹) (کاندا، ۲۰۰۶) (برتنوسکا^۱، ۲۰۰۹) (دشپنده^۱، ۲۰۰۴) (ای‌تی‌اس‌ای‌پی^۱، ۲۰۱۰) (طهماسب زاده و همکاران، ۲۰۱۷)

جدول ۳. پارامترهای زیست‌محیطی فناوری‌های بازیافت گازهای ارسالی به مشعل

مشخصات زیست‌محیطی	مقیاس	فناوری
CO ₂		
$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ gas refining}}$ ۰/۰۹	ساحل	پالایشگاه NGL
	فراساحل	
$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ NG consumption}}$ ۱/۸	کمتر از ۳/۵ MW	نیروگاه گازی
	کمتر از ۱۰ MW	
	کمتر از ۲۱ MW	
	بیشتر از ۲۱ MW	
	-	نیروگاه بخار
	-	نیروگاه چرخه ترکیبی
$\frac{\text{kg}}{\text{bbl GTL}}$ ۱۴۱/۳۶	کمتر از $\frac{\text{bbl}}{\text{day}}$ ۱۰۰۰۰	GTL
	کمتر از $\frac{\text{bbl}}{\text{day}}$ ۳۵۰۰۰	
	بیشتر از $\frac{\text{bbl}}{\text{day}}$ ۳۵۰۰۰	
$\frac{\text{kg}}{\text{ton LNG}}$ ۳۷۰	کمتر از $\frac{\text{Mton}}{\text{year}}$ ۰/۴	LNG
$\frac{\text{kg}}{\text{ton LNG}}$ ۳۷۰	بیشتر از $\frac{\text{Mton}}{\text{year}}$ ۰/۴	
$\frac{\text{kg}}{\text{ton NGH}}$ ۷۴۰	کمتر از $\frac{\text{Mton}}{\text{year}}$ ۰/۴	کارخانه NGH
$\frac{\text{kg}}{\text{ton NGH}}$ ۷۴۰	بیشتر از $\frac{\text{Mton}}{\text{year}}$ ۰/۴	
$\frac{\text{kg}}{\text{ton CNG}}$ ۱۸۵	کمتر از $\frac{\text{Mton}}{\text{year}}$ ۱	CNG
۱۵ (کیلووات ساعت مصرف برق)	-	تزریق به چاه
.	-	تزریق به خط لوله
$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ NG consumption}}$ ۱/۸	-	تولید بخار در بویلر
.	-	بویلر بازیاب حرارت
.	-	شیرین‌سازی آب

منبع: (کفرودی و همکاران، ۲۰۱۶) (سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، ۲۰۱۴) (هیمل و لائو، ۲۰۰۹) (کاندا، ۲۰۰۶) (برتنوسکا، ۲۰۰۹) (دشپنده، ۲۰۰۴) (ای‌تی‌اس‌ای‌پی، ۲۰۱۰) (طهماسب زاده و همکاران، ۲۰۱۷).

1. ENERGY TECHNOLOGY SYSTEM ANALYSIS PROGRAMME (ETSAP)

برای محاسبه میزان انتشار آلاینده‌های ناشی از فلرینگ، چندین پژوهش انجام شده است. این منظور در این پژوهش از رابطه (۹) استفاده شده است (طهماسب‌زاده و همکاران، ۲۰۱۷).

$$E_i = \sum_{n=1}^N ((Q_n) \times [1 - (f_{H_2O})_n] \times \left(\frac{T_0}{T_n}\right) \times \left(\frac{P_n}{P_0}\right) \times K_{eff} \times \frac{(C_{i,n} \times PMN_{i,n})}{100\%} \times \frac{MW_i}{MVC} \times K) \quad (9)$$

پارامترهای ارائه شده در رابطه (۹) عبارتند از:

- E_i : میزان انتشار آلاینده i بر حسب تن در دوره اندازه‌گیری
- N : تعداد دفعات اندازه‌گیری
- n : شاخص اندازه‌گیری دوره
- Q_n : حجم گاز فلر شده در مدت اندازه‌گیری دوره n^{th}
- $(f_{H_2O})_n$: میزان رطوبت گاز خروجی در مدت اندازه‌گیری دوره n^{th}
- T_0 : دمای استاندارد (528 ° R or 520 ° R)
- T_n : دما در شرایط اندازه‌گیری در مدت اندازه‌گیری دوره n^{th} بر حسب (° R)
- P_0 : میانگین فشار استاندارد (1 atm)
- P_n : میانگین فشار اندازه‌گیری شده جریان در مدت اندازه‌گیری دوره n^{th} بر حسب (atm)
- K_{eff} : ضریب بازده احتراق فلرینگ برای تولید آلاینده‌ها
- $C_{i,n}$: غلظت آلاینده i در مدت اندازه‌گیری دوره n^{th} (بر حسب درصد حجم خشک)
- $PMN_{i,n}$: نسبت استیوکیومتری یونیزاسیون
- MW_i : وزن مولکولی آلاینده i (kg/ kmol)
- MVC : ضریب انتقال حجم مولی در شرایط استاندارد (۸۴۶/۶ scf/kmol)
- K : ضریب تبدیل (۰/۰۰۱۱۰۲۳ US tones/ kg)

با محاسبه مقدار آلاینده تولید شده در فرآیند فلرینگ، می‌توان مقدار کاهش تولید این آلاینده‌ها را با استفاده از فناوری‌های بازیافت گازهای مشعل، به‌عنوان یکی از اهداف در مدل‌سازی در نظر گرفت.

تابع هدف کیفی و تصمیم‌سازی

تابع هدف کیفی براساس پرسشنامه بررسی فناوری‌های بازیابی گازهای مشعل مبتنی بر اهداف کیفی به کمک نظرات متخصصین امر، صورت می‌گیرد. نحوه کار به این صورت است که بر اساس چندین هدف کیفی که در بررسی و نتیجه‌گیری چگونگی

بازیافت گازهای مشعل مؤثر است، یک تابع هدف کیفی استخراج خواهد شد که در کنار توابع هدف کمی اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی، ملاک تصمیم‌سازی نهایی در ارزیابی فناوری‌های تبدیل انرژی به‌منظور بازیابی و حذف گازهای مشعل خواهد شد. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مورد بررسی در تحقیق پیش‌رو، اهداف کیفی و وزن‌دهی به اهداف در قالب روش تصمیم‌سازی سلسله‌مراتبی است. در واقع باید اهداف کیفی به توابع کمی در مدل تبدیل شده تا بتوان در قیاس با توابع کمی اقتصادی و زیست‌محیطی قابل مقایسه باشد. معیارهای کیفی برای بررسی فناوری‌های مورد بررسی و جداول مربوط به امتیازدهی به شرح زیر است:

- مطابقت با قوانین داخلی و اهداف چشم‌اندازهای توسعه کشور
 - میزان اشتغال‌زایی ناشی از به‌کارگیری فناوری
 - امکان استفاده از فناوری به‌صورت عملی (تأثیر تحریم‌ها بر فناوری‌ها و بومی بودن برخی دیگر از فناوری‌ها)
 - امکان بومی‌سازی فناوری و دستیابی به بازارهای جدید در کشور
 - دسترسی به بازار هدف محصولات تولیدی ناشی از به‌کارگیری فناوری‌ها
 - امکان جذب سرمایه‌ی خارجی در به‌کارگیری فناوری
- با امتیازدهی معیارهای کیفی با کمک پرسشنامه و نظرات متخصصین و سپس مقایسه سلسله‌مراتبی فناوری‌ها در هر یک از معیارها، مدل کمی سازی توابع کیفی حاصل شده و در نرم‌افزار متلب کدنویسی شد. در بخش نتایج نحوه چگونگی تأثیر چنین مدلی در تعیین جواب‌های بهینه توضیح داده شده است. محاسبه میزان ناسازگاری پارامترهای تصمیم‌سازی این پژوهش نشان‌دهنده میزان قابل اتکا بودن نظرات خبرگان و کارشناسانی است که از نظرات آن‌ها در فرآیند تصمیم‌سازی استفاده شده است. در مدل توسعه یافته در این پژوهش از روش‌های تصمیم‌سازی تاپسیس و سلسله‌مراتبی^۱ استفاده شده است. مدل‌سازی روش‌های تصمیم‌سازی و نحوه افزودن آن به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری در یافتن بهینه‌ترین پاسخ‌ها برای انتخاب فناوری‌های بازیابی گازهای مشعل یکی از مهم‌ترین اجزای مدل در تحقیق پیش‌رو است.

مشخصات میدان‌های نفتی مورد مطالعه

در این پژوهش، فلر گازهای همراه ۵ حلقه چاه نفت نزدیک به هم در یک منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات گازهای همراه ارسالی به فلر در این ۵ حلقه

چاه در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، گازهای همراه مشعل از هر چاه دارای حجم و ترکیبات متفاوت است. به این ترتیب با استفاده از مدل بهینه‌سازی، می‌توان بهترین راه بازیافت گازهای همراه ارسالی به فلر را در یک منطقه با حجم گاز و ترکیبات متفاوت، تعیین کرد.

جدول ۴. مشخصات گازهای همراه ارسالی به فلر در حلقه چاه‌های مورد مطالعه

میدان پنجم	میدان چهارم	میدان سوم	میدان دوم	میدان اول	مشخصات گاز
۰/۲۸۳	۰/۰۵۷	۰/۴۲۵	۰/۲۲۷	۰/۱۹۸	حجم (MMSCM/D)
۴۰	۴۵	۵۵	۴۰	۴۰	دما (°C)
۱	۱	۱	۱	۱	فشار (psig)
۵۸/۲۴	۶۲/۰۸	۶۰/۵۲	۸۰/۹۸	۸۳/۴۲	C ₁
۲۲/۲۱	۲۱/۱	۱۵/۶۵	۱۱/۷۵	۹/۳۴	C ₂
۱۲/۱۸	۱۰/۴	۷/۳۸	۴/۲۸	۴	C ₃
۱/۴۵	۱/۱۴	۰/۶۳	۰/۴۶	۰/۴۴	iC ₄
۳/۵۲	۲/۷۷	۱/۵۵	۱/۱	۰/۸۸	nC ₄
۰/۷۸	۰/۵۹	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۲۳	iC ₅
۰/۷۹	۰/۶	۰/۴۲	۰/۲۶	۰/۲۴	nC ₅
۰/۱	۰/۱	۱	۰/۲	۰/۱	nC ₆
۰/۳۸	۰/۸	۱۰	۰/۵	۱	C ₇₊
۰/۱	۰/۱۳	۰/۴	۰	۰/۱	N ₂
۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۱	CO ₂
۰/۱	۰/۰۲	۲	۰/۰۵	۰/۱	H ₂ O
۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۵	H ₂
nil	nil	nil	nil	nil	H ₂ S (ppm)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	کل

درصد ترکیبات گاز

منبع: مدیریت سرمایه‌گذاری و کسب و کار شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۷

با فرض تأمین برق مورد نیاز چاه‌های نفت مورد مطالعه توسط فناوری‌های بازیافت گازهای مشعل، مقدار برق مورد نیاز برای تولید هر بشکه نفت در ایران، ۱۵ کیلووات ساعت و میزان شدت فلرینگ (مترمکعب گاز فلر شده به ازاء هر بشکه نفت خام تولید

شده) در ایران ۱۰/۹ مترمکعب به ازاء هر بشکه نفت است (وهابپور^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). به این ترتیب مقدار برق مورد نیاز برای هر چاه نفت مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است.

به این ترتیب برای تولید برق، در مدل قید ارائه شده در رابطه (۱۰) باید در نظر گرفته شود. با این ترتیب با مشخص شدن متغیرها، قیدها و توابع هدف مدل، پارامترهای مدل‌سازی و رهیافت آن مشخص شده است.

$$\begin{aligned} \text{electricity production} &\geq 1637.6 \frac{\text{MWhr}}{\text{day}} * 330 \text{ day} \\ &= 540408 \frac{\text{MWhr}}{\text{year}} \end{aligned} \quad (10)$$

جدول ۵. برق مورد نیاز در چاه‌های نفت مورد مطالعه

مجموع	چاه پنجم	چاه چهارم	چاه سوم	چاه دوم	چاه اول	
۱/۱۹	۰/۲۸۳	۰/۰۵۷	۰/۴۲۵	۰/۲۲۷	۰/۱۹۸	حجم فلر (MMSCM.day ⁻¹)
۱۰۹۱۷۰	۲۵۹۶۳	۵۲۲۹	۳۸۹۹۰	۲۰۸۲۵	۱۸۱۶۵	تولید نفت (bbl.day ⁻¹)
۱۶۳۷/۶	۳۸۹/۴	۷۸/۴	۵۸۴/۹	۳۱۲/۴	۲۷۲/۵	تقاضای برق (MWhr.day ⁻¹)

منبع: یافته‌های تحقیق

۵- نتایج حاصل از مدل و تحلیل داده‌ها

از آنجا که در تحقیق پیش رو هدف توسعه مدل بهینه چندهدفه به منظور ارزیابی فناوری‌های بازیابی گازهای مشعل با روش‌های تصمیم‌سازی پیشرفته است، سعی بر آن بود تا ارزیابی فناوری‌ها با اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و شاخص‌های توسعه پایدار صورت پذیرد؛ بنابراین نوع داده‌های تحقیق، شامل داده‌های کمی و کیفی است. داده‌های کمی، اطلاعات استخراج شده از منابع مطالعاتی، مدل‌سازی و نتایج خروجی حاصل از مدل است، اما داده‌های کیفی، مرتبط با امتیازدهی به معیارهای مشخص شده در هدف توسعه پایدار است. نهایتاً، تمام داده‌ها کمی‌سازی و مقایسه پذیر شد تا موفقیت مدل در دستیابی به هریک از اهداف از پیش تعیین شده برآورد گردد.

در این تحقیق ابتدا بررسی‌های مرتبط با هریک از فناوری‌ها به صورت جامع صورت پذیرفت و اطلاعات ورودی مدل اعم از اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و شاخص‌های کیفی تعیین شده در توسعه پایدار استخراج و به عنوان ورودی مدل که تحت نرم‌افزار

متلب توسعه داده شده، استفاده گردید. سپس با مدل‌سازی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی هریک از فناوری‌ها در توابع جداگانه، مدل اولیه برای ارزیابی مجزای هریک از فناوری‌ها حاصل شد. نهایتاً با نوشتن کدهای الگوریتم ژنتیک و مدل‌های تصمیم‌سازی در توابع مختص به خود در نرم‌افزار متلب و افزودن آن به مدل اولیه، مدل بهینه چندهدفه موردنظر در تحقیق نهایی‌سازی شد. معیارهای اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی بر اساس آخرین نتایج حاصل شده در مطالعات بین‌المللی استخراج شده است و ملاک اصلی در استفاده از داده‌های موجود، داده‌های عملی و اجرایی بوده است؛ اما در مورد معیارهای کیفی این موضوع بر اساس شرایط کشور و اسناد بالادستی و اهداف سیاست‌گذاری کشور انتخاب شده است. در واقع این معیارها انتخابی است و نحوه امتیازدهی به این معیارها نیز برحسب نظر متخصصین استخراج شده است.

در این بخش تابع هدف کیفی با توضیحات و امتیازدهی بیان شده در بخش‌های قبلی، به‌عنوان تابع هدف سوم به توابع هدف قبلی افزوده شده است. با توجه به ملاک تصمیم‌سازی سلسله‌مراتبی و محاسبات انجام شده در این روش، نتایج نهایی وزن دهی فناوری‌ها بر اساس معیارهای کیفی محاسبه شده است. جدول ۶ ماتریس وزن معیارهای کیفی و جدول ۷ ماتریس وزن فناوری‌ها به معیارهای کیفی را نشان می‌دهد. در حالتی که تنها تابع هدف کیفی مدنظر باشد، امتیاز نهایی هریک از فناوری‌ها با توجه به امتیازدهی متخصصین و بر حسب شرایط کشور ایران، مطابق جدول ۸ است. همان‌طور که از جدول ۸ مشخص است، تولید آب و برق از بازیافت گازهای فلر، در اولویت معیارهای کیفی هستند.

جدول ۶. ماتریس وزن معیارهای کیفی

وزن	معیار کیفی
۰/۰۵۸۴۳	معیار کیفی ۱: مطابقت با قوانین داخلی و اهداف چشم‌اندازهای توسعه کشور
۰/۲۳۲۴۳	معیار کیفی ۲: میزان اشتغال‌زایی ناشی از به‌کارگیری فناوری
۰/۱۰۵۶۸	معیار کیفی ۳: امکان استفاده از فناوری به‌صورت عملی (تأثیر تحریم‌ها در ورود برخی فناوری‌ها و بومی بودن برخی دیگر از فناوری‌ها)
۰/۱۰۵۶۸	معیار کیفی ۴: امکان بومی‌سازی فناوری و دستیابی به بازارهای جدید در کشور
۰/۴۶۱۶۴	معیار کیفی ۵: دسترسی به بازار هدف محصولات تولیدی ناشی از به‌کارگیری فناوری‌ها
۰/۰۳۶۱۳	معیار کیفی ۶: امکان جذب سرمایه‌ی خارجی در به‌کارگیری فناوری

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۷. ماتریس وزن فناوری‌ها به معیارهای کیفی منتخب

معیار کیفی ۱	معیار کیفی ۲	معیار کیفی ۳	معیار کیفی ۴	معیار کیفی ۵	معیار کیفی ۶	
۰/۲۸۶۱۱	۰/۱۰۵۵۷	۰/۰۳۲۶۱	۰/۳۶۰۵۶	۰/۰۲۵۵۴	۰/۳۱۵۸۹	LNG/FLNG
۰/۱۶۸۲۰	۰/۰۹۵۷۹	۰/۰۷۹۳۸	۰/۱۲۸۱۷	۰/۰۵۷۲۷	۰/۱۱۹۶۸	CNG
۰/۰۲۰۷۸	۰/۰۷۹۱۳	۰/۰۱۸۵۲	۰/۱۲۱۰۶	۰/۰۱۷۷۶	۰/۱۴۰۸۷	NGH
۰/۰۵۱۲۱	۰/۲۸۴۶۲	۰/۲۶۹۵۹	۰/۰۲۳۵۰	۰/۲۶۶۱۸	۰/۰۳۹۸۴	تولید برق توربین گاز و سیکل ترکیبی
۰/۳۰۰۹۵	۰/۲۶۸۴۷	۰/۱۶۶۳۴	۰/۰۵۳۹۵	۰/۲۶۶۱۸	۰/۰۶۰۵۸	تولید آب
۰/۰۷۵۲۹	۰/۰۳۰۴۳	۰/۱۱۵۰۴	۰/۰۴۵۹۵	۰/۰۷۲۶۵	۰/۰۱۸۰۲	تزریق به چاه
۰/۰۷۳۶۲	۰/۱۰۴۵۵	۰/۰۲۹۳۹	۰/۲۴۴۷۷	۰/۱۱۰۳۳	۰/۲۷۰۱۱	GTL
۰/۰۲۳۸۴	۰/۰۳۱۴۴	۰/۲۸۹۱۳	۰/۰۲۲۰۴	۰/۱۸۴۰۸	۰/۰۳۵۰۲	تزریق به خط لوله

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۸. امتیاز نهایی هریک از فناوری‌ها بر حسب تابع هدف کیفی با معیارهای مشخص

رتبه	امتیاز	فناوری
۵	۰/۱۰۶	LNG/FLNG
۶	۰/۰۸۵	CNG
۸	۰/۰۴۸	NGH
۲	۰/۲۲۴	تولید برق توربین گاز و سیکل ترکیبی
۱	۰/۲۲۸	تولید آب
۷	۰/۰۶۳	تزریق به چاه
۴	۰/۱۱۸	GTL
۳	۰/۱۲۸	تزریق به خط لوله
-	۱	مجموع

منبع: یافته‌های تحقیق

به دلیل آنکه بررسی فناوری‌ها به صورت سه‌هدفه است و ترکیبی از فناوری‌ها انتخاب خواهد شد، بایستی تابعی متشکل از میانگین امتیاز فناوری‌های انتخاب شده، به عنوان تابع هدف سوم در نظر گرفته شود. میداین انتخابی در مجموع روزانه ۱/۱۹ میلیون مترمکعب گاز همراه را فلر می‌کنند. با در نظر گرفتن قیمت ۳ سنت به ازاء هر مترمکعب گاز همراه، فلر این گازها، سالانه ۱۱/۷۸ میلیون دلار اتلاف اقتصادی را به همراه دارد. علاوه بر این تلفات اقتصادی، آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از فلرینگ نیز تأثیر قابل

توجه بر محیط‌زیست این مناطق بر جای خواهد گذاشت. نتایج حاصل از مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های ناشی از فلرینگ در چاه‌های نفت مورد مطالعه در جدول ۹ ارائه شد. با توجه به اینکه اهداف تعریف شده در مدل مبتنی بر انتخاب فناوری با کوتاه‌ترین مدت زمان بازگشت سرمایه و همچنین کاهش بیشترین میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و منطبق‌ترین فناوری‌ها برحسب معیارهای کیفی با بیشترین امتیاز مدنظر است، جبهه پارتوی سه بعدی حاصل می‌شود. همچنین با استفاده از روش‌های تصمیم‌سازی تاپسیس جواب بهینه انتخاب شده است.

جدول ۹. نتایج حاصل از مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های ناشی از فلرینگ در چاه‌های نفت مورد مطالعه

میزان انتشار (تن بر سال)	دی‌اکسید کربن	منوکسید کربن	دی‌اکسید گوگرد	ذرات معلق	دی‌اکسید نیترژن	وی‌اوسی	ان‌ام‌وی‌اوسی	متان
۱۱۸۷۷۰۰	۲۱۲۳۹	۸۹۰۳/۸	۱۱۱۳	۶۳۰/۶۸	۷۸۸۴	۱۴۸۴	۶۴۰۰	

منبع: یافته‌های تحقیق

مقدار هر یک از متغیرهای مدل در نقطه بهینه تعیین شده توسط روش‌های تصمیم‌سازی تاپسیس، در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰. مقدار هر یک از متغیرهای مدل سه‌هدفه در نقطه بهینه

مقدار	پارامتر	توضیح
۰	X_{inj}	سهم گاز برای تزریق به چاه
۰/۳۷۰۷	$X_{pp,gt}$	سهم گاز برای تولید برق در نیروگاه با استفاده از توربین گاز
۰/۰۴۳۹	$X_{pp,sc}$	سهم گاز برای تولید برق در نیروگاه چرخه بخار
۰/۰۹۵۱	$X_{pp,cc}$	سهم گاز برای تولید برق در نیروگاه چرخه ترکیبی
۰/۰۵۱۷	X_{sb}	سهم گاز برای تولید بخار در بویلر
۰	X_{GTL}	سهم گاز به‌عنوان خوراک پالایشگاه GTA
۰	X_{LNG}	سهم گاز به‌عنوان خوراک پالایشگاه LNG
۰	X_{CNG}	سهم گاز برای تولید CNG
۰	X_{NGH}	سهم گاز برای تولید هیدرات گازی
۰/۵۶۱۴	$X_{selling}$	سهم گاز برای تزریق به خط لوله سراسری
۱	$X_{HRSG, LP}$	سهم بازیافت حرارت از گازهای احتراق توربین گاز با استفاده از بویلر بازیافت حرارت

منبع: یافته‌های تحقیق

همچنین نتایج نهایی حاصل از مدل توسعه داده شده در نقطه بهینه تصمیم‌گیری، در جدول ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول نتایج مدل در نقطه بهینه ارائه شده است، استفاده از فناوری‌های انتخاب شده براساس مدل منتج به کاهش ۸۱۰۷۴۰ تن دی‌اکسیدکربن در سال در چاه‌های نفت مورد مطالعه می‌شود. همچنین هزینه سرمایه‌گذاری لازم برای اجرای این پروژه ۲۵۳۸ میلیون دلار است و بازگشت سرمایه آن نیز در حدود ۱/۰۹ سال است. با مقایسه توابع هدف در مدل دوهدفه حمیدزاده و همکاران (۲۰۲۰)، میزان تابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی در مدل دوهدفه مطلوب‌تر از مدل سه هدفه با اهداف توسعه پایدار است که دلیل اصلی آن عدم در نظر گرفتن ملاک‌های کیفی است.

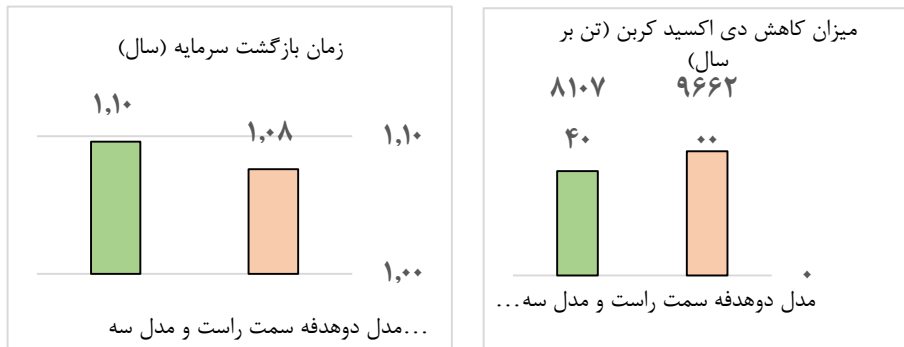
جدول ۱۱. نتایج نهایی حاصل از مدل سه‌هدفه توسعه داده شده در نقطه بهینه

مقدار	واحد	پارامتر	
۲۲۷	(تن بر روز)	میعانات گازی	محصولات
۲۲۱	(تن بر روز)	LPG	
۴۳۸۰۰۰	(مترمکعب بر روز)	ارسال گاز شیرین به خط لوله	
۱۶۵۵۶۰۰	(مترمکعب بر روز)	آب شیرین	
۲۰۹۷	(مگاوات-ساعت بر روز)	برق	
۱۳۸۳/۵	(میلیون دلار بر سال)	منافع اقتصادی حاصل از فروش محصولات	
۱/۱۹	(میلیون مترمکعب بر روز)	گاز فلر	خوراک
۱۱/۷۸	(میلیون دلار بر سال)	قیمت گاز فلر	
۲۵۳۸	(میلیون دلار)	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه‌های سرمایه‌گذاری
۸۹/۳۳۵	(میلیون دلار بر سال)	هزینه بهره‌برداری	
۸۱۰۷۴۰	(تن بر سال)	میزان کاهش انتشار دی‌اکسید کربن	توابع هدف
۱/۰۹۶	(سال)	مدت زمان بازگشت سرمایه	

منبع: یافته‌های تحقیق

شکل ۱ مقایسه توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی در دو مدل دوهدفه (حمیدزاده و همکاران، ۲۰۲۰) و سه هدفه کیفی توسعه داده شده را نشان می‌دهد.

میزان زمان بازگشت سرمایه به‌عنوان تابع هدف اقتصادی، در مدل دو هدفه ۱/۰۸ سال است که نسبت به زمان بازگشت سرمایه مدل سه هدفه کیفی که ۱/۱ سال است، میزان برتری ۱/۸۲ درصدی را نشان می‌دهد. همچنین میزان کاهش تولید دی‌اکسید کربن در مدل دو هدفه ۹۶۶۲۰۰ تن بر سال است که نسبت به میزان کاهش تولید دی‌اکسید کربن در مدل سه هدفه کیفی که ۸۱۰۷۴۰ تن بر سال است، میزان برتری ۱۹ درصدی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بررسی توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی بدون در نظر گرفتن معیارهای کیفی، نتایج مدل دو هدفه برتری کاملاً مشهودی دارد. این موضوع از طرفی رفتار شاخص‌های توسعه پایدار با تغییر میزان انتشار دی‌اکسید کربن و تأثیر معکوس آن بر تابع هدف اقتصادی را نشان می‌دهد که در مطالعات خوشنویس و پژویان (۱۳۹۵) نیز مورد مطالعه قرار گرفته بوده است و همخوانی کامل دارد.



منبع: حمیدزاده و همکاران (۲۰۲۰)

شکل ۱. مدت زمان بازگشت سرمایه مدل کاهش دی‌اکسید کربن در مقایسه با نتایج مدل دو هدفه کمی

۶- جمع‌بندی

در این پژوهش با مدل‌سازی اقتصادی، زیست‌محیطی و توسعه پایدار برای هر یک از فناوری‌ها در توابع جداگانه، مدل اولیه برای ارزیابی مجزای هر یک از فناوری‌ها حاصل شد. نهایتاً با نوشتن کدهای الگوریتم ژنتیک و مدل‌های تصمیم‌سازی در توابع مختص به خود در نرم‌افزار متلب و افزودن آن به مدل اولیه، مدل بهینه چندهدفه موردنظر در تحقیق نهایی‌سازی شد. در نهایت به‌منظور ارزیابی مدل جامع یکپارچه پیشنهادی، با

در نظر گرفتن تمامی پارامترهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و کیفی، مورد مطالعاتی با ۵ حلقه چاه نفت با مشخصات متفاوت در یک منطقه نفتی در جنوب ایران، بررسی شد.

در مدل دوهدفه با استفاده از فناوری‌های انتخاب شده، به‌کارگیری فناوری‌های منتخب در مدل منتج به کاهش ۸۱۰۷۴۰ تن دی‌اکسیدکربن در سال در چاه‌های نفت مورد مطالعه می‌شود. هم‌چنین هزینه سرمایه‌گذاری لازم برای اجرای این پروژه ۲۵۳۸ میلیون دلار است و بازگشت سرمایه آن نیز در حدود ۱/۰۹ سال است. در این سناریو نیز ترکیب فناوری‌های پالایشگاه ان‌جی‌ال (۱۰۰٪ گاز فلر)، توربین گاز (۳۷٪ گاز شیرین)، نیروگاه سیکل ترکیبی (۹/۵٪ گاز شیرین)، نیروگاه بخار (۴/۳٪ گاز شیرین)، بویلرهای تولید بخار به‌منظور تولید آب شیرین (۵/۲٪ گاز شیرین)، تزریق مستقیم گاز شیرین به خط لوله (۵۶٪) و سهم ۱۰۰٪ از بازیافت گازهای داغ خروجی توربین گاز به‌منظور تولید آب شیرین انتخاب شده است.

نتایج مدل‌سازی میزان برتری ۱/۸۲ درصدی در زمان بازگشت سرمایه در حالتی که از توابع هدف کیفی استفاده نشده را نشان می‌دهد؛ اما با کاربرد شاخص‌های توسعه پایدار میزان کاهش تولید دی‌اکسید کربن نسبت به مدل دوهدفه، برتری ۱۹ درصدی را نشان می‌دهد. نکته مهم بررسی معیارهای کیفی در مدل توسعه داده شده است؛ بنابراین مدل توسعه داده شده که قابلیت در نظر گرفتن توابع هدف کمی و کیفی را به‌طور هم‌زمان دارد، ثابت می‌کند که در نظر گرفتن پارامترهای کیفی تصمیم‌سازی در مقیاس برنامه‌ریزی کلان، لزوماً به لحاظ نتایج اقتصادی و زیست‌محیطی به نتایج بهتر منجر نمی‌شود و برای دستیابی به اهداف مطلوب سیاست‌گذاری فناوری و مدیریت بازیافت گازهای مشعل، باید به‌صورت نسبی از مزیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی صرف‌نظر شود.

یکی از عوامل تأثیرگذار در نتایج این مدل، قیمت فروش هر مترمکعب گاز مشعل است که در این مطالعه به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود مدل تعیین قیمت گازهای مشعل بر حسب حجم، ترکیب درصد، موقعیت جغرافیایی و بازار محصولات تولیدی فناوری‌های قابل استفاده و تأثیر متقابل آن بر

نتایج خروجی مدل سه هدفه این مطالعه مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه جهت ارزیابی تأثیر دیگر عوامل پیشنهاد‌های زیر ارائه می‌شود:

- ۱) اعمال جرائم زیست‌محیطی و هزینه‌های اجتماعی به‌عنوان پارامترهایی که اقتصاد پروژه‌های بازیابی گازهای مشعل را تحت تأثیر قرار می‌دهند، در توسعه مدل‌های جدید.
- ۲) بررسی انواع سناریوهای خرید تضمینی برق تولیدی گازهای فلر در رقابت با برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر.
- ۳) آینده‌پژوهی و امکان‌سنجی تأمین انرژی فناوری‌های نوین اقتصاد دیجیتال اعم از بلاک‌چین و استخراج رمز ارز به کمک بازیابی گازهای مشعل.

منابع

- آرندیان بهداد، محمدی اردهالی مرتضی (۱۳۹۷). بهینه‌سازی اندازه، مکان و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۴ (۵۷): ۱-۳۷.
- آزاده معروف مشاط (۱۳۸۹). امکان‌سنجی فنی اقتصادی استفاده از گازهای فلر برای تبدیل به محصولات دیگر در ایران. کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- احمدی آذر محمود، دری بهروز، عالم تبریز اکبر، کسای مسعود (۱۳۹۸). ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار چند دوره‌ای برای برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۵ (۶۳): ۱۷۳-۲۰۷.
- پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف (۱۳۹۵). گزارش فنی نقشه راه بازیابی و بهره‌برداری از گازهای مشعل ایران. تهران، پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف.
- تکلیف عاطفه، ارباب حمیدرضا، بویری منجی حسن (۱۳۹۹). استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی تحقیق در عملیات به‌منظور تعیین سطوح بهینه تولید نفت خام و گاز غنی در پروژه‌های صنعت نفت و گاز ایران- مطالعه موردی: پروژه فازهای ۱۷ و ۱۸ میدان گازی پارس جنوبی. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۶ (۶۴): ۱۹-۵۷.

خوشنویس مریم، پژوهان جمشید (۱۳۹۵). بررسی مقایسه‌ای اثر آلودگی زیست‌محیطی بر شاخص توسعه انسانی در کشورها با سطوح مختلف توسعه یافتگی. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۲ (۴۸): ۳۳-۶۱.

ضرغامی سید صادق، تبریزیان بیبا، طاهری کیا فریز (۱۳۹۹). نیل به توسعه پایدار در صنعت نفت کشور از طریق فعالیت‌های بازاریابی دوستدار محیط‌زیست. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۶ (۶۵): ۱۳۷-۱۵۳.

مدیریت سرمایه‌گذاری و کسب و کار شرکت ملی نفت ایران (۱۳۹۷). اطلاعات و فرم‌های مزایده فروش گازهای مشعل

<https://investment.nioc.ir/portal/home/?news/95655/210270/210045>

هامون جعفریان (۱۳۹۱). بررسی فنی اقتصادی تولید برق از گاز فلر. کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

Anosike, N. B. (2013). "Technoeconomic evaluation of flared natural gas reduction and energy recovery using gas-to-wire scheme."

Bortnowska, M. (2009). "Development of new technologies for shipping natural gas by sea." Polish Maritime Research 16(3): 70-78.

Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." IEEE transactions on evolutionary computation 6(2): 182-197.

Deshpande, A. and M. Economides (2004). CNG: A Competitive Technology to LNG for the Transport of Natural Gas, MS thesis, University of Houston, Department of Chemical Engineering

"ENERGY TECHNOLOGY SYSTEM ANALYSIS PROGRAMME (ETSAP), I. C. B., " May 2010. [Online]. Available: www.etsap.org.

Elvidge, C. D., M. D. Bazilian, M. Zhizhin, T. Ghosh, K. Baugh and F.-C. Hsu (2018). "The potential role of natural gas flaring in meeting greenhouse gas mitigation targets." Energy strategy reviews 20: 156-162.

Fei, Q., M. T. Guarnieri, L. Tao, L. M. Laurens, N. Dowe and P. T. Pienkos (2014). "Bioconversion of natural gas to liquid fuel: opportunities and challenges." Biotechnology Advances 32(3): 596-614.

Hajizadeh, A., M. Mohamadi-Baghmolaei, R. Azin, S. Osfouri and I. Heydari (2018). "Technical and economic evaluation of flare gas recovery in

- a giant gas refinery." *Chemical Engineering Research and Design* 131: 506-519.
- Hamidzadeh, Z., S. Sattari, M. Soltanieh and A. Vatani (2020). "Development of a multi-objective decision-making model to recover flare gases in a multi flare gases zone." *Energy* 203: 117815.
- Heidari, M., A. Ataei and M. H. Rahdar (2016). "Development and analysis of two novel methods for power generation from flare gas." *Applied Thermal Engineering* 104: 687-696.
- Heimel, S. and C. Lowe (2009). "Technology comparison of CO₂ capture for a gas-to-liquids plant." *Energy Procedia* 1(1): 4039-4046.
- Holland, J. (1975). "adaptation in natural and artificial systems, university of michigan press, ann arbor,." Cité page 100.
- IRANDOE (2015). Intended Nationally Determined Contribution, UNFCCC. Department of Environment Islamic Republic of Iran.
- Kafrudi, I. G., M. Amini and M. Ayazi (2016). Determine the Potential and Estimate the GHG emissions in gas refinery,. Second International Conference in New Research on Chemistry & Chemical engineering. Tehran.
- Kanda, H. (2006). Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. 23rd world gas conference, Amsterdam.
- Lawal, K. A., M. I. Ovuru, S. I. Eytayo, S. Matemilola and A. T. Adeniyi (2017). "Underground storage as a solution for stranded associated gas in oil fields." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 150: 366-375.
- Layfield, M. (2015). Creating Value from Flared Natural Gas. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Society of Petroleum Engineers.
- Pei, P., D. Laudal, J. Nasah, S. Johnson and K. Ling (2015). "Utilization of aquifer storage in flare gas reduction." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 27: 1100-1108.
- Shirmohammadi, M. and H. Sayyaadi (2007). Multi-objective exergetic, economic and environmental optimization of CGAM problem using genetic algorithm. Proceeding of 3rd International Energy, Exergy and environment Symposium, 1e5 July.
- Soltanieh, M., A. Zohrabian, M. J. Gholipour and E. Kalnay (2016). "A review of global gas flaring and venting and impact on the environment:

Case study of Iran." International Journal of Greenhouse Gas Control 49: 488-509.

Tahmasebzadehbaie, M. and H. Sayyaadi (2016). "Efficiency enhancement and NOx emission reduction of a turbo-compressor gas engine by mass and heat recirculations of flue gases." Applied Thermal Engineering 99: 661-671.

Tahmasebzadehbaie, M., H. Sayyaadi, A. Sohani and M. Z. Pedram (2017). "Heat and mass recirculations strategies for improving the thermal efficiency and environmental emission of a gas-turbine cycle." Applied Thermal Engineering 125: 118-133.

Tahouni, N., M. Gholami and M. H. Panjeshahi (2016). "Integration of flare gas with fuel gas network in refineries." Energy 111: 82-91.

VAHABPOUR, A., S. M. SHOJAEI, M. TAHMASEBZADEH and F. RASOULI (2018). "A Study on Environmental Effects of Gas Flaring in Iran and its Role for the Country's Commitments in Paris Agreement."

USEnvironmentalProtectionAgency (2014). Catalog of CHP Technologies, Combined Heat and Power Partnership, U.S. Environmental Protection Agency

WorldBank. (2015). ""www.worldbank.org", World Bank, Global Gas Flaring Reduction Program (GGFR). [Online]."

Zolfaghari, M., V. Pirouzfard and H. Sakhaeini (2017). "Technical characterization and economic evaluation of recovery of flare gas in various gas-processing plants." Energy 124: 481-491.

Development of a Three-Objective Economic, Environmental and Sustainable Development Decision-Making Model for Recovering Flared Gas

Zeinab Hamidzadeh

PhD Student, Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch of Azad University, zeinabhamidzadeh@gmail.com

Sourena Sattari

Assistant professor, Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Sattari@sharif.ir

Ali Vatani¹

Professor, Institute of Liquefied Natural Gas (I-LNG), School of Chemical Engineering, University of Tehran, avatani@ut.ac.ir

Mohammad Soltanieh

Professor, Chemical and Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology, msoltanieh@sharif.edu

Received: 2021/05/01 Accepted: 2021/07/03

Abstract

Iran is considered as one of the biggest burners of associated gas. Due to the importance of reducing the emission of pollutants from associated gas in flare systems, in this study we use advanced decision-making methods to select the optimal technologies for recycling associated gases that are currently burnt. The model has three objective functions, including minimum return on investment and maximum reduction in carbon dioxide emissions and qualitative target functions considering a combination of sustainable development criteria. In the developed model, we assess important flared gas recovery technologies including NGL units, gas injection into pipeline, LNG units, GTL refinery units, production of gas hydrates (NGH), CNG units, injection of gas into reservoirs to increase oil production (EOR), electricity generation using gas turbines, steam turbines and combined cycle and fresh water production. Our sample includes five oil wells in an oil region in southern Iran. The results show that in the optimal case, the investment undertakes pays for itself in 1.1 years and produces a reduction of 810740 tons of carbon dioxide per year.

JEL Classification: C610

Keywords: Flare Gas Recovery, Optimal Decision Making Model, Three-Objective Functions

1. Corresponding Author