فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال بیست و دوم / شماره ۸۹/ تابستان ۱۴۰۵ / صفحات ۲۵۹-۲۲۳

بهینه‌سازی چند هدفه تصمیمات تولید، موجودی و قیمت‌گذاری در صنعت نفت‌وگاز تحت عدم قطعیت

حسین عباس‌پور

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (hossein_haah@yahoo.com)

مرضیه مظفری[1]

استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (m_mozafari@iau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

چکیده

در سال‌های اخیر، شرکت‌های فعال در صنعت نفت و گاز با نوسانات اقتصادی و عدم قطعیت تقاضا مواجه بوده‌اند که اتخاذ تصمیمات هماهنگ در حوزه تولید و مدیریت درآمد را با چالش جدی روبه‌رو کرده است. در این پژوهش، یک مدل چندهدفه فازی برای تصمیم‌گیری هم‌زمان در زمینه تولید، موجودی و قیمت‌گذاری فرآورده‌های نفت و گاز ارائه می‌شود. دامنه کاربرد مدل، مجتمع‌های بزرگ تولیدی صنعت نفت و گاز با ساختار عملیاتی مشابه پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های گازی ایران بوده و مدل در یک افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای توسعه یافته است. اهداف مدل شامل حداکثرسازی سود و بهبود سطح آمادگی فنی واحدهای تولیدی براساس شاخص‌هایی نظیر سطح فناوری، نیروی انسانی فنی و عمر تجهیزات است. به‌منظور لحاظ عدم قطعیت تقاضا، از تقاضای فازی مثلثی استفاده شده و مدل به‌صورت چندمحصولی و پویا تدوین گردیده است. مدل پیشنهادی برای یک مسئله شبیه‌سازی شده نزدیک به واقعیت در یک مجتمع بزرگ گازی با استفاده از رویکرد چندهدفه پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) حل شده و نتایج حاصل به طور جامع مورد تحلیل و بحث قرار گرفته‌اند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است توازن مناسبی میان اهداف اقتصادی و فنی برقرار کرده و ضمن افزایش سود کل، سطح آمادگی فنی واحدهای تولیدی را به‌طور معناداری بهبود دهد. تحلیل حساسیت نیز نقش تعیین‌کننده چند پارامتر کلیدی در رفتار سود و قیمت محصولات را نشان می‌دهد.

طبقه‌بندی JEL: C61، C63، L71

کلیدواژه‌ها: تصمیمات تولید و موجودی، قیمت‌گذاری محصولات نفت و گاز، برنامه‌ریزی چندهدفه فازی، الگوریتم NSGA-II.

---

۱. نویسنده مسئول

۱- مقدمه

صنعت نفت و گاز به‌عنوان یکی از ارکان اصلی نظام انرژی جهانی، نقش تعیین‌کننده‌ای در رشد اقتصادی، امنیت انرژی و پایداری مالی کشورها ایفا می‌کند. تصمیمات تولید، ذخیره‌سازی و قیمت‌گذاری در این صنعت نه‌تنها پیامدهای فنی و عملیاتی دارند، بلکه مستقیماً بر متغیرهای کلان اقتصاد انرژی نظیر تعادل عرضه و تقاضا، نوسانات قیمت، رفاه مصرف‌کننده، درآمد دولت و رفتار سرمایه‌گذاری بنگاه‌ها اثر می‌گذارند. ازاین‌رو، تحلیل این تصمیمات بدون اتکا به چارچوب‌های اقتصاد انرژی، تصویری ناقص از عملکرد و کارایی سیستم ارائه می‌دهد. ازجمله ویژگی‌ها و چالش‌های خاص این صنعت می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عدم قطعیت در تقاضا: یکی از ویژگی‌های برجسته صنعت نفت و گاز، نوسانات شدید تقاضا به‌ویژه در بازارهای جهانی است. تقاضا برای محصولات نفتی و گازی معمولاً تحت تأثیر فاکتورهای اقتصادی، سیاسی و محیطی قرار دارد.
- محدودیت‌های پیچیده ظرفیت و زمان تولید: ظرفیت تولید هر واحد تولیدی معمولاً محدود است و زمان تولید برای هر محصول به‌طور مستقیم بر استفاده از ظرفیت‌ها و بهره‌وری تأثیر می‌گذارد. از طرفی منابع انسانی و ظرفیت تولید محدود در این صنعت نیازمند تخصیص ظرفیت‌ها و نیروی کار به‌طور مؤثر برای تولید محصولات مختلف است.
- هزینه‌های تولید و کمبود خاص صنعت نفت‌وگاز: هزینه‌های تولید در این صنعت شامل هزینه‌های استخراج و فرآوری، هزینه‌های انرژی و هزینه‌های نگهداری تجهیزات است. هزینه‌های کمبود محصولات با توجه به نیاز تأمین منابع در دوره‌های اوج تقاضا در نظر گرفته شده است.
- نگهداری و بهره‌برداری از تجهیزات پیچیده: در صنعت نفت و گاز، عمر مفید تجهیزات و سطح تکنولوژی و به‌طور خاص به آمادگی فنی و نگهداری و تعمیرات واحدهای تولیدی تأثیر زیادی بر عملکرد و بهره‌وری دارند و می‌توانند تأثیر مستقیم بر زمان‌بندی تولید بگذارند.
- نیاز به قیمت‌گذاری پویا: ازآنجایی‌که قیمت‌گذاری محصولات تحت تأثیر عرضه و تقاضا، رقابت‌های جهانی، نوسانات قیمت جهانی نفت و مقررات دولتی قرار دارد،

این ویژگی‌ها نیازمند یک مدل قیمت‌گذاری پویا است که به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد تا در هر دوره قیمت‌های محصولات را برای حداکثر کردن سود تنظیم کنند.

از سوی دیگر، برخلاف صنایع متعارف، قیمت در صنعت نفت و گاز صرفاً یک متغیر تصمیمی کوتاه‌مدت نیست، بلکه ابزاری برای هموارسازی درآمد، مدیریت نوسانات بازار و ارسال سیگنال‌های سرمایه‌گذاری در بلندمدت به‌شمار می‌رود. بنابراین، مدل‌سازی یکپارچه تولید، موجودی و قیمت‌گذاری می‌تواند چارچوبی تحلیلی برای بررسی رفتار اقتصادی بنگاه‌های انرژی در مواجهه با عدم قطعیت فراهم آورد. علاوه بر ملاحظات اقتصادی، شاخص‌های فنی نظیر آمادگی و قابلیت اطمینان تجهیزات تولیدی، از دیدگاه اقتصاد انرژی اهمیت ویژه‌ای دارند؛ چراکه این شاخص‌ها مستقیماً بر هزینه نهایی، ریسک وقفه تولید و توان پاسخ‌گویی بنگاه به شوک‌های تقاضا اثر می‌گذارند. نادیده‌گرفتن این عوامل می‌تواند منجر به برآورد بیش‌ازحد سودآوری و تصمیمات غیربهینه اقتصادی شود.

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه فازی پویا برای بهینه‌سازی هم‌زمان تصمیمات تولید، موجودی و قیمت‌گذاری در صنعت نفت و گاز ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی، علاوه بر حداکثرسازی سود اقتصادی، شاخص آمادگی فنی را به‌عنوان یک معیار کلیدی مؤثر بر عملکرد اقتصادی سیستم در نظر می‌گیرد. در این چارچوب، عدم قطعیت تقاضا به‌صورت فازی مدل‌سازی شده و محدودیت‌های ظرفیت، هزینه‌های تولید، کمبود و ویژگی‌های فنی واحدها لحاظ می‌شود. این رویکرد امکان تحلیل رفتار اقتصادی مجتمع‌های بزرگ انرژی، نظیر مجتمع‌های گازی، را در یک افق چنددوره‌ای فراهم می‌سازد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری تحلیلی برای تصمیم‌سازی مدیریتی و سیاست‌گذاری در حوزه اقتصاد انرژی مورد استفاده قرار گیرد

ادامه این مقاله به صورت زیر ساختار یافته است: ابتدا مروری بر ادبیات موضوع بهینه‌سازی تصمیمات تولید، نگهداری و قیمت‌گذاری در صنعت نفت و گاز ارائه می‌شود. سپس یک رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه فازی برای بهینه‌سازی همزمان تصمیمات تولید، موجودی و قیمت‌گذاری با دو هدف حداکثرسازی سود و آمادگی فنی ارائه شده و رویکرد حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب پیشنهاد

می‌گردد. در نهایت، نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل و تحلیل‌های عددی ارائه شده و تفسیر اقتصادی نتایج و مسیرهای پژوهشی آتی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مرور ادبیات

ادبیات موجود در حوزه صنعت نفت و گاز را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: الف) مطالعات اقتصاد انرژی و رفتار بنگاه‌های انرژی در شرایط عدم قطعیت و ب) مطالعات بهینه‌سازی و مدل‌سازی تصمیمات عملیاتی و زنجیره تامین. اگرچه هر یک از این جریان‌ها به‌طور مستقل توسعه یافته‌اند، هم‌پوشانی آن‌ها در قالب مدل‌های یکپارچه اقتصادی - عملیاتی که به‌صورت همزمان تصمیمات تولید، موجودی، قیمت‌گذاری و شاخص‌های فنی را در نظر بگیرند، همچنان محدود است.

۲-۱- مطالعات اقتصاد انرژی و رفتار بنگاه‌های انرژی در شرایط عدم قطعیت

در حوزه اقتصاد انرژی، مطالعات متعددی به تحلیل تصمیمات تولید و قیمت‌گذاری بنگاه‌های انرژی در شرایط عدم قطعیت بازار پرداخته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که نوسانات قیمت و تقاضا، ساختار هزینه سرمایه‌بر و محدودیت‌های ظرفیت کوتاه‌مدت، منجر به رفتارهای احتیاطی در تولید و نگهداری موجودی می‌شود و قیمت‌گذاری نقش کلیدی در هموارسازی درآمد و مدیریت ریسک بازار ایفا می‌کند. در این چارچوب، تصمیمات قیمت‌گذاری به‌عنوان بخشی از استراتژی بهینه‌سازی سود بین‌دوره‌ای تحلیل می‌شوند، نه صرفاً یک متغیر کنترلی کوتاه‌مدت. هسنلی[1] (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های پویا نشان می‌دهد که رابطه میان قیمت نفت خام و گاز طبیعی در طول زمان ناپایدار بوده و تحت تأثیر شرایط ساختاری بازار تغییر می‌کند. این نتایج اهمیت لحاظ‌کردن پویایی‌های بین‌دوره‌ای قیمت و وابستگی متقابل حامل‌های انرژی را در تصمیمات تولید و قیمت‌گذاری بنگاه‌ها برجسته می‌سازد. از سوی دیگر، نقش ذخیره‌سازی و محدودیت‌های ظرفیت به‌عنوان یک عامل کلیدی در مدیریت ریسک قیمتی مورد توجه فزاینده قرار گرفته است. آگلند و لپه[2] (۲۰۲۵) نشان می‌دهند که کمبود ظرفیت ذخیره‌سازی می‌تواند عدم قطعیت قیمت نفت را تشدید کرده و رفتار

1. Hasanli
2. Oglend & Kleppe

احتیاطی بنگاه‌ها در تولید و عرضه را تقویت کند. این یافته‌ها با نتایج پیشین در اقتصاد انرژی که ذخیره‌سازی را ابزاری برای هموارسازی درآمد و کاهش نوسانات می‌دانند همسو می‌باشد. در سطح کلان‌تر، مطالعات سیاست‌گذاری انرژی بر مفاهیمی نظیر امنیت انرژی، تاب‌آوری و قابلیت اطمینان سیستم‌ها تأکید دارند. گزارش IEA در ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان تجهیزات و نگهداری مناسب، نه‌تنها یک مسئله فنی، بلکه یک متغیر کلیدی اقتصادی و سیاستی است که بر هزینه نهایی انرژی، ریسک وقفه تولید و رفاه اجتماعی اثر می‌گذارد. در راستای این دیدگاه، اشمیتز[1] و همکاران (۲۰۲۵) بر لزوم ادغام شاخص‌های تاب‌آوری و امنیت انرژی در مدل‌های برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی یکپارچه تأکید می‌کنند. این دسته مطالعات همچنین پیوند میان امنیت انرژی، ریسک‌های بازار و سیاست‌های زیست‌محیطی را بررسی کرده‌اند. برای مثال عثمان[2] و همکاران (۲۰۲۴) و ژانگ[3] و عثمان (۲۰۲۵) نشان می‌دهند که سیاست‌های یارانه‌ای سوخت‌های فسیلی، ریسک‌های امنیت انرژی و ناپایداری ژئوپلیتیکی می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر رفتار بنگاه‌ها و ساختار بازار انرژی اثرگذار باشند. این مطالعات بر ضرورت تحلیل تصمیمات بنگاه‌ها در یک چارچوب اقتصاد سیاسی انرژی تأکید دارند.

۲-۲- مطالعات بهینه‌سازی و مدل‌سازی تصمیمات عملیاتی و زنجیره تامین

در مقابل، بخش عمده‌ای از مطالعات مهندسی و مدیریت عملیات در صنعت نفت و گاز، تمرکز خود را بر توسعه مدل‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه برای کاهش هزینه‌ها، افزایش درآمد یا بهبود شاخص‌های پایداری قرار داده‌اند. اگرچه این مدل‌ها ابزارهای قدرتمندی برای حل مسائل پیچیده عملیاتی هستند، اما در بسیاری از موارد فاقد تفسیر اقتصادی روشن از نتایج بوده و ارتباط تصمیمات بهینه با مفاهیمی نظیر کارایی اقتصادی، رفتار بازار و پیامدهای سیاستی به‌طور محدود بررسی شده است. در بخش پایین‌دستی صنعت نفت‌وگاز مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور کاهش هزینه‌ها، افزایش درآمد و بهبود سطح خدمات توسعه یافته‌اند. بهینه‌سازی چندهدفه

1. Schmitz
2. Usman
3. Zhang

ابزاری قدرتمند است که در صنایع مختلف برای متعادل‌سازی اهداف متناقض استفاده می‌شود. این مدل‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا به‌طور همزمان تعادل میان اهدافی مانند سودآوری، کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی منابع را مدنظر قرار دهند. در سال‌های اخیر رویکرد مدل‌سازی چندهدفه در صنعت نفت‌وگاز برای درنظرگیری موازنه میان اهداف متناقض بسیار مورد توجه قرار گرفته است (رستمیان[1] و همکاران، ۲۰۲۵). قایتان[2] و همکاران، (۲۰۱۷) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه چند دوره‌ای با هدف حداقل کردن هزینه کل، حداکثر کردن درآمد کل و حداکثر کردن سطح خدمت برای شرکت‌های پایین‌دستی صنعت نفت‌وگاز ارائه نمودند و محدودیت‌های عملی مانند تعادل جرم، تقاضا، ظرفیت‌ها و سهمیه اوپک را در نظر گرفتند. آن‌ها برای به دست آوردن مرز پارتو در مطالعه موردی کشور عربستان از روش ε-محدودیت استفاده کردند و مدل را با انجام تحلیل‌های حساسیت مورد آزمایش و ارزیابی قرار دادند. این مدل توسط آتیا[3] و همکاران (۲۰۱۹) در بخش بالادستی صنعت نفت‌وگاز با در نظر گرفتن اهداف پایداری، محیط‌زیست، هزینه کل و درآمد توسعه داده شده و راه‌حل‌های مؤثری برای ارزیابی تصمیمات جایگزین در زنجیره تأمین نفت و گاز پیشنهاد گردیده است. سلطانی و همکاران (۱۴۰۳) طراحی مدل شبکه زنجیره‌تأمین سه‌سطحی با دو هدف کمینه‌سازی در هزینه‌های اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی را موردنظر قرار دادند. محققان به بررسی اختلال در عرضه مواد اولیه با رویکرد سناریوپردازی جهت ارائه یک مدل تاب‌آور پرداخته‌اند. مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تحت عدم‌قطعیت فازی است و یک مطالعه موردی در استان تهران بررسی شده است. آتیا (۲۰۲۱) با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار و برنامه‌ریزی چندهدفه مدلی را ارائه کرد که تأثیر رفتار نامشخص بازار را حذف نموده یا کاهش می‌دهد. اهداف اقتصادی به حداقل رساندن هزینه کل و به حداکثر رساندن درآمد است، درحالی‌که هدف غیراقتصادی به حداقل رساندن نرخ تخلیه است. این مدل جنبه زیست‌محیطی را با محدود کردن انتشار CO2 و جنبه پایداری را با کاهش نرخ تخلیه منابع طبیعی در نظر گرفته و رفتار نامطمئن بازار نفت بر اساس نمایش سناریو مدل‌سازی شده است. در

1. Rostamian
2. Ghaithan
3. Attia

مقاله دیگری آماده و همکاران (۱۴۰۱) از برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی براساس برش «آلفا» پارامترهای فازی استفاده نمودند. هدف این تحقیق، استخراج تولید بهینه هریک از محصولات به نحوی است که به‌طور همزمان حداکثرسازی سود، حداقل‌سازی ریسک و حداکثرسازی ارزش افزوده حاصل گردد و محدودیت‌های مختلفی از جمله محدودیت‌های زیست‌محیطی، محدودیت‌های منابع، تکنولوژیک، بازاری و مالی لحاظ گردد. این روش برای مواردی مطلوب است که دارای معاوضه‌های محدودی بین توابع هدف هستند. در یک نمونهٔ عددی برای نشان دادن امکان به‌کارگیری روش مذکور در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه برای تولید اولفین‌ها از گاز طبیعی استفاده شده است. جامعه مورد مطالعه شرکت‌های پتروشیمی جم و مسجد سلیمان می‌باشد. گودرزی و غلامیان (۱۴۰۳) به ترسیم یک ساختار تصمیم‌گیری گروهی، جهت انتخاب تأمین‌کنندگان سبز در پالایشگاه‌های تولیدکننده فرآورده‌های نفتی در ایران پرداختند. ۸ معیار شامل قیمت، کیفیت، حمل و نقل، مصرف انرژی، سیستم مدیریت محیط‌زیست، تولید سبز، کنترل انتشار گاز کربن و مدیریت پسماند به عنوان معیارهای نهایی تصمیم‌گیری انتخاب شده و از ترکیب مدل ابری مبتنی بر متغیرهای زبانی نامعین با روش پرومته در حل مسئله برون‌سپاری تولید محصول پارافین در پالایشگاه استفاده نمودند. نتایج نهایی با موفقیت بصورت گراف ترجیحات ارائه گردید که دید بسیار مناسبی جهت ارزیابی تأمین‌کنندگان به مدیران شرکت ارائه می‌دهد. یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی چندهدفه توسط دل واله[1] و همکاران (۲۰۲۰) برای تحلیل گزینه‌های مختلف سرمایه‌گذاری (در خطوط لوله گاز طبیعی و پایانه‌های گازی‌سازی مجدد) در چارچوب اتحادیه اروپا تحت چشم‌انداز بازار، با در نظر گرفتن علایق مختلف شرکت‌کنندگان در بازار و معیارهای متعددی که باید انجام شوند، پیشنهاد شده است. این مدل شامل اهداف مدیریت شبکه در سطح بالای بهینه‌سازی به‌صورت یک تابع چندهدفه است و در سطح پایین بازار پایین‌دستی گاز اروپا را در نظر گرفته است. مدل پیشنهادی برای ارزیابی سرمایه‌گذاری بهینه زیرساخت در اتصالات گازی شمال-جنوب در اروپای غربی استفاده شده است. در مقاله دمیسه[2] و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل

1. del Valle
2. Demissie

ریاضی برای پیکربندی‌های مختلف شبکه، یعنی توپولوژی‌های خطی، شاخه‌ای و حلقه‌ای ایجاد شده است. دو هدف متناقض، به حداقل رساندن مصرف برق و به حداکثر رساندن نرخ جریان تحویل گاز، تحت محدودیت‌های خط لوله و کمپرسور در نظر گرفته می‌شوند. مجموعه‌ای از محدودیت‌ها براساس معادلات جریان گاز و شرایط عملکرد کمپرسور ایجاد شده است. باتوجه به غیرخطی بودن محدودیت‌ها و هدف، مدل توسعه‌یافته یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی است که جهت بهینه‌سازی از الگوریتم NSGA-II بهره گرفته است. نظری و مصطفایی (۱۳۹۸) یک مدل ریاضی چندهدفه فازی برای زنجیره تأمین نفت خام و گاز در سطوح بالادستی و میان دستی در شرایط عدم قطعیت با درنظرگیری دو هدف اقتصادی و کاهش آسیب آلاینده‌های نفت و گاز بر انسان و محیط‌زیست به منظور تشخیص بهینه فناوری و تکنولوژی استخراج، تولید، ذخیره سازی نفت و گاز خام و محصولات تولید شده از آنها ارائه کردند. تعیین مکان و ظرفیت تسهیلات، پالایشگاه‌ها و مراکز توزیع، تخصیص تجهیزات و تعیین میزان جریان بین هر یک از واحدها و نوع وسایل حمل ونقل در شبکه به گونه‌ای صورت می‌گیرد که تعادل مناسبی بین هزینه و میزان انتشار گازهای آلاینده برقرار شود. برای حل مساله، از روش محدودیت اپسیلون در اندازه‌های کوچک و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه بر پایه ناچیرگی برای اندازه‌های بزرگ استفاده شده است. در مقاله دیگری پورخاقان شاهرضایی و همکاران (۱۴۰۴) به بهینه‌سازی سبد تولید برق، ترکیبی از گروه انرژی‌های فسیلی، تجدیدپذیر و هسته‌ای با بکارگیری روش الگوریتم ژنتیک در دو حالت تک‌هدفه و چندهدفه برای ایران طی دوره ۱۴۰۳-۱۳۹۷ پرداخته و نشان دادند که ترکیب سبدهای بهینه‌سازی شده با روش بهینه‌سازی چند هدفه، نسبت به روش‌های تک هدفه مناسب‌تر است. در مرجع (لیو[1] و همکاران، ۲۰۱۵) مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای فرآیند تولید نفت و گاز توسعه داده شده است که اهداف آن شامل حداکثرسازی تولید نفت، حداقل‌سازی تولید آب و کاهش مصرف انرژی کل به ازای هر تن نفت است. برای حل این مدل، نویسندگان نسخه‌ای بهبودیافته از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب سریع را معرفی کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در یک میدان واقعی تولید نفت نشان داد که الگوریتم پیشنهادی از نظر تنوع، همگرایی

1. Liu

و کیفیت جبهه پارتو عملکرد بهتری نسبت به NSGA-II استاندارد دارد و می‌تواند ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید نفت و گاز باشد.

گروه دیگری از مطالعات، با تمرکز بر عدم قطعیت ذاتی در بازارهای انرژی، از رویکردهای فازی، استوار و تصادفی برای مدل‌سازی تقاضا و قیمت استفاده کرده‌اند. این تحقیقات نشان می‌دهند که لحاظ‌کردن عدم قطعیت می‌تواند منجر به تصمیمات اقتصادی محافظه‌کارانه‌تر و پایدارتر شود. در تحقیق احمدی آذر و همکاران (۱۳۹۸) برنامه‌ریزی فنی و عملیاتی در شبکه زنجیره عرضه محصولات پتروشیمی جهت اخذ تصمیمات دوره‌ای شامل موجودی مواد اولیه و محصولات، قیمت‌گذاری، حمل‌ونقل و جریان مواد و محصولات به‌صورت بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور یک مدل بهینه‌سازی ریاضی چنددوره‌ای استوار ارائه گردید تا پاسخ ارائه شده از ریسک کمتری برخوردار باشد. تابع هدف مدل پیشنهادی بیشینه سازی سود سالانه مجتمع-های پتروشیمی است، به‌طوری‌که قیودی از جمله محدودیت ظرفیت تسهیلات تولید و حمل ونقل ارضاء شود. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های فازی برای مقابله با عدم قطعیت در داده‌ها به‌ویژه در صنعت نفت و گاز مؤثر هستند (پاپی و همکاران، ۱۳۹۷؛ اک‌وو و نواچوکو[1]، ۲۰۱۹ و آتیا و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از کاربردهای اصلی مدل‌های فازی در صنعت نفت و گاز، برنامه‌ریزی تولید است. این مدل‌ها برنامه‌های تولیدی را به‌گونه‌ای بهینه می‌کنند که همزمان محدودیت‌های ظرفیت تولید و تقاضای بازار در نظر گرفته شوند (جمالنیا و سوخاکیان[2]، ۲۰۰۹؛ وانگ و لیانگ[3]، ۲۰۰۴). به‌عنوان مثال، در پژوهش وانگ و ژانگ[4]، (۲۰۱۳) به توسعه یک سیستم برنامه‌ریزی تولید انعطاف‌پذیر و واکنش‌گرا برای مواجهه با این عدم‌قطعیت‌ها پرداخته شده است. در این مطالعه با بهره‌گیری از نظریه مجموعه‌های فازی، تقاضا و هزینه‌های غیرقطعی مدل‌سازی شده و یک مدل برنامه‌ریزی خطی فازی برای دستیابی به حداکثر سود همراه با سطح رضایت مشخص طراحی گردید. این مدل در شرکت CPC تایوان مورد استفاده قرار گرفت و نتایج تجربی نشان داد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند اطلاعات

1. Okwu & Nwachukwu
2. Jamalnia, & Soukhakian
3. Wang & Liang
4. Wang & Zheng

ارزشمندی را برای تصمیم‌گیری در خصوص استراتژی‌های تولید سودآور در شرایط عدم‌قطعیت فراهم آورد. در یکی از پژوهش‌های اخیر چن[1] و همکاران، (۲۰۲۱)، یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر شبیه‌سازی برای بهبود برنامه‌ریزی تولید در زنجیره‌های تأمین انرژی ارائه شده است. در این رویکرد، از یک مدل عامل‌محور جامع برای شبیه‌سازی رفتارهای نامطمئن بازیگران زنجیره و فرآیندهای معاملاتی در ساختارهای پویا استفاده شده است؛ جنبه‌ای که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه بوده است. شبیه‌سازی توسعه‌یافته در یک الگوریتم NSGA-II تعبیه شده تا راه‌حل‌های پارتو را با هدف حداکثرسازی سود کل زنجیره و حداقل‌سازی عدم‌تعادل میان سود عامل‌ها شناسایی کند، درحالی‌که عدم قطعیت از طریق نمونه‌گیری مونت‌کارلو در نظر گرفته می‌شود. کاربرد این چارچوب در یک زنجیره تأمین پنج‌لایه نفت و گاز نشان داده است که این روش می‌تواند در مدیریت کارآمد و پایدار تولید، با در نظر گرفتن تعاملات نامطمئن و تغییرات ساختاری، بسیار اثربخش باشد. در مطالعه دیگری لیما[2] و همکاران، (۲۰۲۱) به برنامه‌ریزی استراتژیک و تاکتیکی زنجیره تأمین پایین‌دستی نفت تحت منابع مختلف عدم قطعیت پرداخته شده است. در این تحقیق، مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) فرموله شده و عدم قطعیت با استفاده از برنامه‌ریزی با قیود شانسی و پارامترهای فازی مدیریت شده است. هدف مدل، طراحی شبکه و برنامه‌ریزی توزیع محصولات به شیوه‌ای مقرون‌به‌صرفه است. اعتبارسنجی مدل با استفاده از یک مطالعه موردی واقعی در صنعت نفت برزیل انجام شده و نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم در فرآیند تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و تاکتیکی مسائل واقعی بسیار ارزشمند باشد.

در سال‌های اخیر، برخی پژوهش‌ها تلاش کرده‌اند شاخص‌های فنی و قابلیت اطمینان تجهیزات را در مدل‌های تصمیم‌گیری وارد کنند (ابراهیمی و باقری[3]، ۲۰۲۱). وانگ[4] و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از شاخص اثربخشی کلی تجهیزات، استراتژی‌های بهینه نگهداری را برای تجهیزات صنعت نفت و گاز ارزیابی کرده و نشان می‌دهند که

1. Chen
2. Lima
3. Ebrahimi & Bagheri
4. Wang

تصمیمات نگهداری اثر مستقیمی بر عملکرد اقتصادی سیستم دارند. بااین‌حال، این شاخص‌ها غالباً به‌صورت قیود مهندسی لحاظ شده‌اند و نقش آن‌ها به‌عنوان متغیرهای مؤثر بر هزینه نهایی، ریسک وقفه تولید و سود اقتصادی به‌طور صریح تحلیل نشده است .همان‌گونه که هلم[1] (۲۰۱۷) نیز تأکید می‌کند، ارتباط صریح میان قابلیت اطمینان تجهیزات، هزینه نهایی تولید، ریسک وقفه و سود اقتصادی بنگاه‌ها هنوز به‌طور نظام‌مند در مدل‌های بهینه‌سازی ادغام نشده است.

جمع‌بندی ادبیات نشان می‌دهد که شکاف اصلی پژوهشی، فقدان مدل‌هایی است که تصمیمات تولید، موجودی و قیمت‌گذاری را به‌صورت یکپارچه و در چارچوب مفهومی اقتصاد انرژی تحلیل کنند و هم‌زمان شاخص‌های فنی مؤثر بر عملکرد اقتصادی سیستم را لحاظ نمایند. مقاله حاضر با هدف پرکردن این خلأ، یک مدل چندهدفه فازی ارائه می‌دهد که در آن تعامل میان اهداف اقتصادی (حداکثرسازی سود) و عوامل فنی (آمادگی تجهیزات) به‌صورت صریح بررسی شده و امکان استخراج نتایج قابل تفسیر از دیدگاه اقتصاد انرژی و سیاست‌گذاری فراهم می‌شود. طراحی مدل به‌صورت پویا و چندمحصولی است و از الگوریتم ژنتیک NSGA-II برای حل مدل در ابعاد بزرگ و تولید جبهه پارتو بهره گرفته شده است.

۳- مدل‌سازی مسئله

برای مدل‌سازی ریاضی مسئله تحقیق، ابتدا به بیان مفروضات مسئله پرداخته می‌شود. در این مسئله زنجیره تأمین فرآورده‌های نفت‌وگاز به‌صورت چند محصولی و چند دوره‌ای در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری‌که تقاضا برای محصولات مختلف غیرقطعی است و از اعداد فازی استفاده می‌شود. قیمت فروش محصولات مختلف می‌تواند در هر دوره متفاوت باشد. هزینه‌ها اعم از هزینه‌های تولید، تعمیر و نگهداری، انتقال و ... می‌تواند در هر دوره متفاوت باشد. ظرفیت در هر دوره برای هر واحد تولیدی می‌تواند متفاوت باشد. امکان نگهداری موجودی برای هر مرکز تولیدی وجود دارد و همچنین کمبود برای هر محصول مجاز است.

1. Helm

۳-۱- علائم ریاضی

علائم ریاضی جهت فرموله‌سازی مدل به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

اندیس‌ها	
$i = 1, \dots, n$	واحدهای تولیدی
$p = 1, \dots, m$	محصولات
$t = 1, \dots, T$	دوره‌های زمانی
پارامترها	
$\widetilde{DEM}_{pt}$	تقاضای محصول p در دوره زمانی t
MC_{ipt}	هزینه تولید محصول p در دوره زمانی t در واحد تولید
$MCAP_{ipt}$	ظرفیت تولید محصول p در واحد تولید i در دوره زمانی t
TC_{ti}	هزینه انتقال محصول در دوره زمانی t در واحد تولید i
NSC_{ti}	هزینه حقوق و دستمزد کارکنان غیر ماهر در واحد تولید i در دوره زمانی t
SC_{ti}	هزینه حقوق و دستمزد کارکنان فنی در واحد تولید i در دوره زمانی t
$NETC_{ti}$	هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات در واحد تولید i در دوره زمانی t
IC_{ipt}	هزینه نگهداری محصول p در دوره زمانی t در واحد تولید i
LC_{ipt}	هزینه کمبود محصول p در دوره زمانی t در واحد تولیدی i
UA_i	میانگین عمر مفید تجهیزات تولیدی در واحد تولیدی i
TL_i	سطح تکنولوژیکی تجهیزات تولیدی در واحد تولید i
TE_{ti}	تعداد کارکنان فنی در واحد تولیدی i در دوره زمانی t
M	یک عدد خیلی بزرگ
متغیرهای تصمیم	
X_{ipt}	اگر محصول p در واحد تولید i در دوره زمانی t تولید شود ۱ و در غیر این صورت صفر
Y_{ipt}	میزان تولید محصول p در واحد تولید i در دوره زمانی t
Z_{ipt}	میزان کمبود محصول p در واحد تولید i در دوره زمانی t
U_{ipt}	موجودی پایان دوره محصول p در واحد تولید i در دوره زمانی t
P_{pt}	قیمت فروش محصول p در دوره زمانی t

۳-۲- توابع هدف و محدودیت‌ها

هدف اول حداکثر کردن سود کل می‌باشد که در آن هزینه کل شامل هزینه تولید، هزینه تعمیرات و نگهداری[1]، هزینه نگهداری موجودی[2] و سایر هزینه‌ها از درآمد کل کسر می‌شود (رابطه ۱) و هدف دوم به دنبال حداکثر ساختن آمادگی فنی است که سه شاخص عمر مفید تجهیزات، سطح تکنولوژیکی و همچنین تعداد کارکنان به‌عنوان شاخصه‌های اثرگذار بر انتخاب واحد تولیدی با حداکثر آمادگی محسوب می‌شود (رابطه ۲).

$$\text{Max}\,\Pi_1 = \sum_i \sum_p \sum_t (P_{pt} - MC_{ipt}).Y_{ipt} - \sum_i \sum_p \sum_t (TC_{ti} + NSC_{ti} + SC_{ti}.TE_{ti} + NETC_{ti}).X_{ipt} - \sum_i \sum_p \sum_t IC_{ipt}.U_{ipt} - \sum_i \sum_p \sum_t LC_{ipt}.Z_{ipt} \quad (۱)$$

$$\text{Max}\,\Pi_2 = \sum_i \sum_p \sum_t (UA_i + TL_i + TE_{it}).X_{ipt} \quad (۲)$$

مجموعه محدودیت‌های مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sum_i X_{ipt} \leq 1 \quad (۳)$$

$$Y_{ipt} \leq M.X_{ipt} \quad (۴)$$

$$Y_{ipt} \leq MCAP_{pti} \quad (۵)$$

$$Z_{ipt} = \widetilde{DEM}_{pt} - U_{ipt-1} - Y_{ipt} \quad (۶)$$

$$U_{ipt} = U_{ipt-1} + Y_{ipt} - \widetilde{DEM}_{pt} \quad (۷)$$

$$Z_{ipt} \leq M.X_{ipt} \quad (۸)$$

$$U_{ipt} \leq M.X_{ipt} \quad (۹)$$

$$X_{ipt} \in \{0,1\} \quad (۱۰)$$

$$\begin{aligned} &Y_{ipt} \geq 0 \\ &Z_{ipt} \geq 0 \\ &U_{ipt} \geq 0 \\ &P_{pt} \geq 0 \end{aligned} \quad (۱۱)$$

محدودیت (۳) بیان می‌کند که هر محصول در هر دوره زمانی حداکثر در یک واحد تولیدی تولید می‌شود. محدودیت (۴) نشان می‌دهد در صورتی حجم تولید برای هر

1. Maintenance and repair cost
2. Inventory holding cost

واحد تولید در نظر گرفته می‌شود که این واحد تولید انتخاب شده باشد. محدودیت (۵) بیانگر ظرفیت تولید محصول است. رابطه (۶) نشانگر میزان کمبود محصول هست. رابطه (۷) میزان موجودی پایان دوره را محاسبه می‌کند. محدودیت (۸) نشان می‌دهد کمبود در صورتی برای یک واحد تولیدی وجود دارد که آن واحد تولیدی برای تولید محصول در یک دوره مشخص انتخاب شده باشد. محدودیت (۹) بیان می‌کند موجودی در صورتی برای یک واحد تولیدی وجود دارد که آن واحد تولیدی انتخاب شده باشد. رابطه (۱۰) نشانگر محدودیت متغیر باینری مسئله است. رابطه (۱۱) نشانگر بازه متغیرهای پیوسته مسئله هست.

۳-۳- خطی سازی مدل

با توجه به اینکه تابع هدف اول دارای عبارتی است که از ضرب دو متغیر پیوسته تشکیل می‌شود، لذا در این بخش به خطی سازی تابع هدف اول می‌پردازیم. برای این منظور از روش سه مرحله‌ای که در تحقیق ویدال و گتشالاکس[1] (۲۰۰۱) استفاده شده است بهره گرفته می‌شود.

در مرحله اول برای هر یک از متغیرهای پیوسته تابع هدف یک حد بالا و یک حد پائین مطابق با محدودیت‌های مدل ارائه می‌گردد.

$$LP_{pt} \leq P_{pt} \leq UP_{pt} \qquad (۱۲)$$

در مرحله دوم حاصل‌ضرب دو متغیر پیوسته مربوط به رابطه فوق در همدیگر برابر یک متغیر پیوسته دیگر قرار می‌گیرد و در مدل به‌جای حاصل‌ضرب دو متغیر پیوسته این متغیر ایجاد می‌گردد.

$$x1_{pt} = P_{pt} \cdot \sum_i Y_{ipt} \qquad (۱۳)$$

در مرحله سوم متغیرهای تعیین شده در مرحله دوم به‌صورت محدودیت به مسئله اضافه شده و در نهایت به‌جای متغیرهای غیرخطی این محدودیت‌ها به تابع هدف افزوده می‌گردند.

$$0 \leq x1_{pt} \leq P_{pt} \cdot \sum_i Y_{ipt} \qquad (۱۳)$$

$$LP_{pt} \cdot \sum_i Y_{ipt} \leq x1_{pt} \leq UP_{pt} \cdot \sum_i Y_{ipt} \qquad (۱۴)$$

1. Vidal & Goetschalckx

و بر این اساس تابع هدف اول به‌صورت رابطه (۱۵) بازنویسی می‌شود.

$$\text{Max}\,\Pi_1 = \sum_p \sum_t x1_{pt} - \sum_i \sum_p \sum_t (TC_{ti} + NSC_{ti} + SC_{ti}.TE_{ti} + NETC_{ti}).X_{ipt} - \sum_i \sum_p \sum_t IC_{ipt}.U_{ipt} - \sum_i \sum_p \sum_t LC_{ipt}.Z_{ipt} \quad (۱۵)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تابع هدف غیرخطی به‌صورت خطی تبدیل می‌شود تا بدین‌وسیله محاسبه آن ساده گردد.

۳-۴- فازی‌زدایی

به‌منظور فازی‌زدایی محدودیت‌های دارای پارامتر فازی در تحقیق حاضر از روش خیمنز[1] و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. محدودیت‌های فازی‌زدایی شده به شرح ذیل می‌باشند.

$$Z_{ipt} = \frac{DEM1_{pt} + 2DEM2_{pt} + DEM3_{pt}}{4} - U_{ipt-1} + Y_{ipt} \quad (۱۶)$$

$$U_{ipt} = U_{ipt-1} + Y_{ipt} - \widetilde{DEM}_{pt} \quad (۱۷)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود رابطه‌های (۶) و(۷) دارای پارامتر فازی تقاضا می‌باشند که به ترتیب با استفاده از رابطه (۱۶) و (۱۷) فازی‌زدایی می‌شوند. با حذف پارامترهای فازی، مدل حاصل به مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط تبدیل می‌شود که در ادامه به حل آن می‌پردازیم.

۴- الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب NSGA-II

الگوریتم NSGA-II یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های فراابتکاری موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است (ما[2] و همکاران، ۲۰۲۳). این الگوریتم توسعه‌ای از الگوریتم فراابتکاری NSGA است که نکات برجسته‌ای که در مورد آن وجود دارند: (۱) جوابی که هیچ جواب دیگری، به‌طورقطع بهتر از آن نباشد، دارای امتیاز بیشتری است. جواب‌ها براساس این که چند جواب بهتر از آن‌ها وجود داشته باشند، رتبه‌بندی و مرتب

1. Jiménez
2. Ma

می‌شوند. (۲) شایستگی (برازندگی) برای جواب‌ها، برحسب رتبه آن‌ها و عدم غلبه سایر جواب‌ها، اختصاص می‌یابد. (۳) از شیوه اشتراک برازندگی برای جواب‌های نزدیک استفاده می‌شود تا به‌این‌ترتیب پراکندگی جواب‌ها به نحو مطلوبی تنظیم شود و جواب‌های به‌طور یکنواخت در فضای جستجو پخش شوند.

با توجه به حساسیت نسبتاً زیادی که نحوه عملکرد و کیفیت جواب‌های الگوریتم NSGA به پارامترهای اشتراک برازندگی و سایر پارامترها دارند، نسخه دوم این الگوریتم با نام الگوریتم فراابتکاری NSGA-II معرفی گردید. در کنار تمام کارایی‌هایی که الگوریتم فراابتکاری NSGA-II دارد، می‌توان آن را الگوی شکل‌گیری بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه دانست. این الگوریتم و شیوه منحصربه‌فرد آن در برخورد با مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، بارها توسط افراد مختلف برای ایجاد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه جدیدتر، مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی‌های عمده این الگوریتم عبارت‌اند از:

۱. تعریف فاصله تراکمی به‌عنوان ویژگی جایگزین برای شیوه‌هایی مانند اشتراک برازندگی،
۲. استفاده از عملگر انتخاب تورنمنت دو-دویی و
۳. ذخیره و آرشیو کردن جواب‌های نامغلوب که در مراحل قبلی الگوریتم به‌دست‌آمده‌اند (نخبه‌گرایی).

درواقع الگوریتم NSGA-II الگوریتم ژنتیک چندهدفه می‌باشد که بر اساس جواب‌های نامغلوب طراحی شده است. در این الگوریتم مقایسه نتایج بین دو یا چند جواب برای هر کروموزوم صورت گرفته و بهترین جواب‌ها به دست می‌آید که این جواب‌ها منجر به تشکیل جبهه پارتو یا منحنی پارتو می‌شوند. در این منحنی یا جبهه بهترین جواب‌ها که جواب‌های غالب در نظر گرفته شده و هیچ جوابی اصطلاحاً نتوانسته آن را مغلوب کند قرار گرفته و هیچ تفاوتی بین نقاط به‌دست‌آمده در این جبهه با یکدیگر وجود ندارد. تفاوت این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک سنتی در این است که در این الگوریتم عملیات چندهدفه که شامل مرتب سازی نامغلوب و همچنین تشکیل جبهه پارتو و مقایسه بین پاسخ‌ها است صورت می‌گیرد، درحالی‌که در الگوریتم ژنتیک سنتی یا تک هدفه چنین وضعیتی وجود ندارد.

۴-۱- نحوه نمایش جواب

نمایش جواب شامل نحوه ترسیم جواب با توجه به متغیرهای یک مدل می‌باشد. درواقع در مسائل چندهدفه هر مدل شامل یک یا چندهدف می‌باشد و هر متغیر تصمیم به‌صورت یک ژن در این کروموزم در نظر گرفته می‌شود. اما درمجموع سه نوع متغیرتصمیم یا ژن برای تشکیل کروموزوم قابل‌توجه می‌باشند.

نوع اول متغیرهای تصمیم یا ژن از نوع باینری می‌باشد که در آن اعداد به‌صورت صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. این نوع کروموزوم در تحقیق حاضر برای متغیرهای تصمیم X_{ipt} جهت انتخاب یا عدم‌انتخاب واحد تولیدی به‌منظور اجرای تولید محصول p در دوره زمانی t از این نوع متغیر استفاده می‌شود.

۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	.....	۱

نوع دیگر متغیر یا ژن که در تحقیق حاضر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، درنظرگیری بردار جواب عدد صحیح یا نوع پیوسته می‌باشد. متغیرهای Y_{ipt}و Z_{ipt} و U_{ipt} و P_{pt} در مدل تحقیق حاضر از نوع پیوسته می‌باشند که در زیرمجموعه‌ای از اعداد حقیقی نامنفی تعریف می‌شوند.

۴-۲- تولید جمعیت اولیه

تولید جمعیت اولیه، اولین قدم در هر الگوریتم فراابتکاری به شمار می‌رود. برای این کار به‌صورت تصادفی به متغیرهای تصمیم در بازه‌های باینری و عددصحیح مقدار تخصیص می‌یابد. اما این مقدار در ادامه با توجه به محدودیت‌های مسئله حاضر و با استفاده از تابع برازش دچار تغییر شده و سپس با استفاده از عملیات به‌روزرسانی نظیر عملگرهای تقاطع و جهش بازهم دچار تغییر می‌شود. به‌عنوان مثال تولید جمعیت اولیه برای یکی از متغیرهای تحقیق حاضر که باینری است ارائه می‌گردد. برای برازش مدل ارائه شده ابتدا می‌بایست مقادیر اولیه به‌صورت تصادفی به متغیرهای باینری و سپس متغیرهای پیوسته تخصیص یافته و با توجه به محدودیت‌های مدل که در تابع برازش مدل پیاده‌سازی می‌شود، متغیرها دچار تغییر شده و بهترین جواب به دست آید.

۴-۳- عملگر تقاطع

پس از تولید جواب اولیه مرحله بعدی در الگوریتم ژنتیک مرحله به‌روزرسانی است که در این مرحله می‌توان انتظار داشت که جواب به‌دست‌آمده بهبود می‌یابد. البته ممکن است این بهبود نیز حاصل نشود و جواب تولیدشده به‌صورت تصادفی بهتر از جواب به‌روزرسانی شده باشد، اما معمولاً به‌واسطه عملگرهای به‌روزرسانی شاهد بهبود در جواب مسئله هستیم. مرحله به‌روزرسانی خود شامل دو بخش عملگر تقاطع و جهش می‌شود. با استفاده از عملگر تقاطع در الگوریتم ژنتیک دو والد انتخاب شده و برخی ویژگی‌های والد اول به فرزند و برخی ویژگی‌های والد دوم به فرزند دیگر منتقل می‌شود. برای روشن‌تر شدن موضوع عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای که برای متغیرهای باینری در مسئله حاضر و عملگری که ویژه متغیرهای عدد صحیح است معرفی می‌گردد. در عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای یک نقطه برش به‌طور تصادفی در بردار جواب باینری برای دو والد انتخابی تعیین شده و بر این اساس جای ژن‌ها دچار تغییر می‌شود و دو فرزند تشکیل می‌شوند. به‌عبارت دیگر از قسمت برش داده شده، ژن‌های سمت راست برش با ژن‌های سمت چپ برش جابجا شده و تشکیل یک کروموزم جدید را می‌دهد که البته ماهیت جایگشتی آن نیز دچار تغییر نشده است. اما این تقاطع ویژه بردار جواب‌های باینری بوده و برای بردار متغیرهای پیوسته مناسب نمی‌باشد. نوع تقاطع مورد استفاده در بردار جواب پیوسته به شرح ذیل می‌باشد. برای تقاطع متغیرهای عدد صحیح در مسئله حاضر از عملگر تقاطع آریتماتیک [1] استفاده می‌شود که فرمول آن به شرح ذیل می‌باشد:

(۱۸)

$$OFFSPRING\ 1 = a * PARENT1 + (1 - a) * PARENT\ 2$$
$$OFFSPRING\ 2 = (1 - a) * PARENT1 + a * PARENT\ 2$$

به‌طوری‌که a یک مقدار تصادفی بین صفر و یک به‌صورت پیوسته می‌باشد.

۴-۴- عملگر جهش

عملگر جهش عملگر دوم در به‌روزرسانی جواب اولیه در الگوریتم ژنتیک می‌باشد که منجر به تغییر در مقادیر اولیه می‌شود. عملگر جهش نیز به تفکیک متغیرهای باینری و

1. Arithmetic

متغیرهای پیوسته متفاوت می‌باشد. عملگر جهش برای متغیرهای باینری در مسئله حاضر عملگر تبادل می‌باشد که در آن دو ژن به‌طور تصادفی انتخاب شده و جای آن‌ها با یکدیگر عوض می‌شود. عملگر جهش فوق مناسب متغیرهای باینری یا جایگشتی بوده و برای مسائل پیوسته کاربردی ندارد. به‌منظور اعمال جهش در متغیرهای عددصحیح از جهش با توزیع احتمالی استفاده می‌شود. برای این منظور از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$x'_i = x_i + (u_i - l_i)\delta_i \quad (۱۹)$$

در فرمول فوق x'_i نشانگر فرزند جهش‌یافته ، x_i نشانگر والد،u_i حد فوقانی و l_i حد تحتانی است، ضمن اینکه δ_i نشانگر بازه احتمالی تعیین شده به‌صورت یکنواخت یا گاوسی می‌باشد. در این تحقیق از بازه احتمالی به‌صورت یکنواخت استفاده شده است. لازم به ذکر است که در صورت عدم موجه بودن جواب‌ها پس از اعمال عملگرها نیاز به اصلاح بهینه جواب می‌باشد که در الگوریتم پیشنهادی تحقیق حاضر نیز از این روش استفاده شده است. برای انتخاب عملگر تقاطع و جهش از روش چرخه رولت استفاده می‌شود. بر اساس این روش در هر تکرار شانس بیشتری برای انتخاب توسط چرخه رولت وجود دارد. همچنین تخصیص یک میزان احتمال به هر یک از روش‌های تقاطع و جهش باعث می‌شود یک پارامتر برای آن در نظر گرفته شده و با تخصیص میزان بهینه جواب‌های مطلوب‌تری به دست می‌آید.

برای انتخاب والدین جهت عملیات تقاطع و جهش از تکنیک انتخاب مقایسه‌ای باینری استفاده می‌شود. بدین ترتیب که کروموزوم‌ها به‌صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه می‌شوند. رتبه پایین‌تر معیار برتری است و هر کروموزمی که رتبه آن از دیگری کمتر باشد انتخاب می‌گردد. چنانچه رتبه هر دو کروموزم انتخابی برابر باشد از معیار دوم یعنی فاصله ازدحامی استفاده می‌شود و اولویت با کروموزومی است که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد. الگوریتم نمی‌تواند بی‌پایان بوده و حتماً می‌بایست شرطی برای توقف الگوریتم تعیین شود. در بسیاری از تحقیقات شرط خاتمه دفعات تکرار الگوریتم می‌باشد و با توجه به اینکه شرط مشخصی غیر از دفعات تکرار وجود ندارد، لذا در این تحقیق نیز از دفعات تکرار الگوریتم به‌عنوان شرط خاتمه الگوریتم استفاده می‌شود.

۵- نتایج محاسباتی

مسئله مورد بررسی با الهام از شرایط عملیاتی مجتمع‌های بزرگ گازی ایران، مشابه مجتمع گاز پارس جنوبی، تعریف شده است. این مجتمع‌ها نقش کلیدی در تأمین گاز طبیعی، محصولات جانبی و صادرات انرژی کشور ایفا می‌کنند و هم‌زمان با محدودیت‌های ظرفیت، فرسودگی تجهیزات، نوسانات هزینه و عدم‌قطعیت تقاضا مواجه‌اند. جامعه آماری پژوهش شامل یک مجتمع گازی بزرگ با ۱۰ واحد تولیدی و ۵ محصول بوده و افق زمانی مطالعه سه دوره سالانه متوالی معادل سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ در نظر گرفته شده است. به دلیل محرمانگی داده‌های واقعی و عدم دسترسی به اطلاعات تفصیلی عملیاتی، پارامترهای مدل به‌صورت شبیه‌سازی‌شده، اما در مقیاس کاملاً واقع‌گرایانه و بر اساس گزارش‌های رسمی صنعت انرژی، مطالعات اقتصاد انرژی و منابع آماری معتبر تعیین شده‌اند. دامنه مقادیر پارامترها به‌گونه‌ای انتخاب شده است که رفتار اقتصادی و فنی سیستم تولید انرژی را به‌درستی بازتاب دهد. تقاضای محصولات به‌صورت یک پارامتر فازی مثلثی مدل‌سازی شده تا عدم‌قطعیت‌های رایج در بازار انرژی منعکس گردد.

جدول ۱. مقادیر پارامترها در مسئله مورد مطالعه

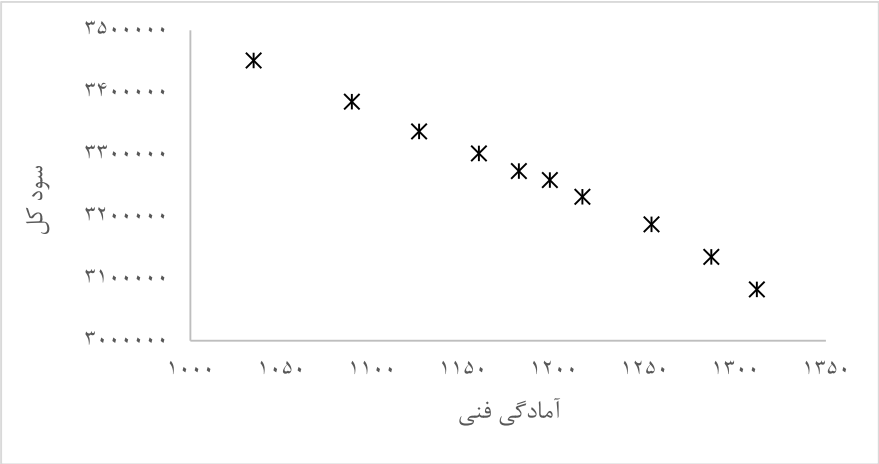
پارامترها	مقدار	مأخذ
MC_{ipt}	توزیع یکنواخت بین ۱۳۵۰ تا ۱۸۵۰	داده‌های مالی شرکت‌های پالایشگاهی و پتروشیمی، گزارش‌های بانک مرکزی
$MCAP_{ipt}$	توزیع یکنواخت بین ۱۲۰ تا ۱۸۰	شرکت ملی پالایش و پخش، گزارش‌های OPEC
TC_{ti}	توزیع یکنواخت بین ۱۱۰۰ تا ۱۷۵۰	شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران، مطالعات حمل‌ونقل انرژی
NSC_{ti}	توزیع یکنواخت بین ۱۲۵۰ تا ۱۸۰۰	داده‌های وزارت کار و رفاه اجتماعی، مرکز آمار ایران
SC_{ti}	توزیع یکنواخت بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۵۰	گزارش‌های داخلی شرکت‌های نفتی
$NETC_{ti}$	توزیع یکنواخت بین ۱۲۰۰ تا ۱۸۵۰	گزارش‌های شرکت ملی گاز ایران، مطالعات فنی تجهیزات

پارامترها	مقدار	مأخذ
IC_{ipt}	توزیع یکنواخت بین ۹۰۰ تا ۱۴۰۰	داده‌های انبارداری و لجستیک شرکت‌های پتروشیمی
LC_{ipt}	توزیع یکنواخت بین ۱۴۰۰ تا ۲۰۰۰	مطالعات اقتصادی انرژی، مدل‌های هزینه کمبود (Attia et al., 2019)
UA_i	توزیع یکنواخت بین ۱۰ تا ۲۰	مطالعات فنی تجهیزات، گزارش‌های تعمیرات اساسی
TL_i	توزیع یکنواخت بین ۱ تا ۵	مقالات علمی و گزارش‌های توسعه فناوری در صنعت نفت و گاز
TE_{ti}	توزیع یکنواخت بین ۵ تا ۱۵	داده‌های منابع انسانی شرکت‌های نفتی، وزارت کار

$\widetilde{DEM}_{pt}$ یک پارامتر فازی مثلثی با کران پایین ۱۱۰ و کران بالای ۲۱۰ در نظر گرفته شده است که این مقادیر با توجه به گزارش‌های وزارت نفت، آمار صادرات/مصرف داخلی، IEA (۲۰۲۲) تعیین گردید.

۵-۱- نتایج محاسباتی

در ادامه مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شده و نتایج مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی NSGA-II به کمک نرم‌افزار MATLAB کد و پیاده‌سازی شده و مرز پاراتو برای اهداف سود و آمادگی فنی مطابق شکل ۱ بدست آمده است. همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود مجموعه‌ای از ۱۰ راه‌حل نامغلوب، مرز پارتویی هموار میان اهداف سود کل و آمادگی فنی واحدهای تولیدی ایجاد می‌کند که نشان می‌دهد با افزایش سود، سطح آمادگی فنی به‌صورت غیرخطی کاهش می‌یابد.



* محاسبات محقق

نمودار ۱. مرز پاراتو در مسئله مورد بررسی

در میان راه‌حل‌های نامغلوب راه حل سازشی با میزان سود کل ۳۲۷۳۱۳۲ واحد پولی و شاخص آمادگی فنی ۱۱۸۱ واحد و میانگین قیمت ۱۴۵ واحد پولی به عنوان راه‌حل کارا در نظر گرفته شده است و مقادیر متغیرهای تصمیم در این را حل گزارش می‌شود.

جدول ۲. مقادیر متغیرهای تصمیم در راه‌حل سازشی مسئله مورد مطالعه

محصول	میزان تولید			میزان تولید			قیمت		
	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳
محصول ۱	۱۴۵	۱۵۰	۱۵۵	۰	۰	۰	۱۴۰	۱۴۵	۱۵۰
محصول ۲	۳۶	۳۸	۴۱	۱/۶۰	۱/۳۰	۱/۱۰	۵۱۰	۵۲۵	۵۴۰
محصول ۳	۱۷	۱۷	۱۸	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۵۰	۴۶۵	۴۸۰	۴۹۵
محصول ۴	۱۳	۱۴	۱۵	۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۴۰	۴۵۰	۴۶۵	۴۸۰
محصول ۵	۱۲	۱۲	۱۳	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۳۶	۴۳۵	۴۵۰	۴۶۵

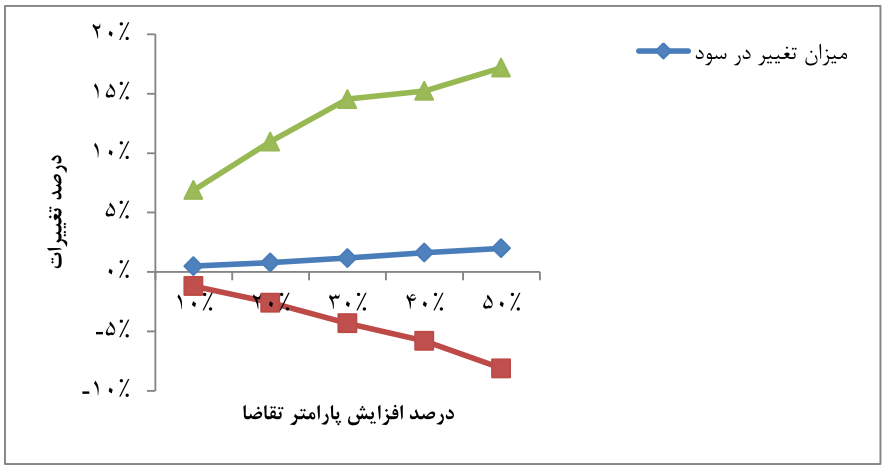
نتایج نشان می‌دهد که در هر سه دوره برنامه‌ریزی، گاز طبیعی با وجود افزایش تدریجی تولید، همچنان با کمبود محدود مواجه است، در حالی که برای سایر محصولات جانبی کمبودی مشاهده نمی‌شود. از منظر اقتصاد انرژی، این رفتار بیانگر اولویت امنیت عرضه در بازار گاز داخلی است. گاز طبیعی به‌دلیل نقش حیاتی در

گرمایش خانگی، تولید برق و صنایع بالادستی، دارای کشش قیمتی تقاضای پایین بوده و افزایش قیمت به‌تنهایی قادر به تعدیل کامل تقاضا نیست. برخلاف گاز طبیعی، محصولات جانبی با موجودی مثبت، اما محدود مدیریت می‌شوند. از منظر اقتصادی، این امر منعکس‌کننده قابلیت ذخیره‌سازی، انعطاف‌پذیری در زمان فروش و پیوند این محصولات با بازارهای صادراتی و پتروشیمی است. نگهداری موجودی برای این محصولات امکان هموارسازی درآمد بین‌دوره‌ای و کاهش ریسک ناشی از نوسانات قیمت جهانی را فراهم می‌کند. بنابراین مدل به‌جای بیشینه‌سازی صرف حجم فروش در کوتاه‌مدت، راهبردی را انتخاب می‌کند که ارزش فعلی جریان‌های درآمدی را در افق چنددوره‌ای افزایش می‌دهد. وجود رابطه مبادله‌ای میان سود کل و سطح آمادگی فنی واحدهای تولیدی، از منظر اقتصادی، بیانگر تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری بین‌دوره‌ای است. انتخاب راه‌حل سازشی نشان می‌دهد که حداکثرسازی کوتاه‌مدت سود از طریق بهره‌برداری فشرده از تجهیزات، می‌تواند به کاهش آمادگی فنی و افزایش ریسک اختلال در عرضه انرژی در آینده منجر شود.

از منظر سیاست‌گذاری انرژی، نتایج حاکی از آن است که بهبود هماهنگی میان تصمیمات تولید، موجودی و قیمت‌گذاری می‌تواند بدون نیاز به سرمایه‌گذاری فوری در ظرفیت‌های جدید، به افزایش کارایی اقتصادی و بهبود امنیت انرژی منجر شود. همچنین، تفکیک راهبردی میان مدیریت گاز طبیعی و محصولات جانبی می‌تواند مبنایی برای طراحی سیاست‌های قیمت‌گذاری تفاضلی، قراردادهای صادراتی منعطف و برنامه‌ریزی تعمیرات مبتنی بر ریسک در مجتمع‌های گازی بزرگ فراهم آورد.

۵-۲- تحلیل حساسیت

در ادامه تحلیل حساسیت پارامتری صورت می‌گیرد تا مشخص می‌شود که واکنش مدل در سطح سود، آمادگی فنی و قیمت فروش نسبت به تغییرات در پارامترهای مدل پیشنهادی در چه حد است. پارامترهای مورد بررسی مشتمل بر ۹ پارامتری هستند که امکان تغییر در آن‌ها وجود دارد و مبنای تحلیل حساسیت راه‌حل سازشی است.



* محاسبات محقق

نمودار ۲. تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات پارامتر تقاضا

همان‌گونه که در نمودار (۲) دیده می‌شود افزایش در پارامتر تقاضا منجر به افزایش قیمت فروش محصولات می‌شود که این امر از تئوری عرضه و تقاضا تبعیت می‌کند، اما تغییر در سود نیز تا ۲ درصد مشاهده می‌شود. افزایش تقاضا منجر به افزایش سود تا ۲ درصد می‌شود، اما در خصوص آمادگی فنی مشاهده می‌شود که افزایش تقاضا می‌تواند آمادگی فنی را کاهش دهد، چرا که تکنولوژی موجود و نیروی کار موجود احتمالاً محقق‌کننده تقاضای افزوده نبوده و لذا می‌توان انتظار کاهش آمادگی فنی تا ۸ درصد را داشت.

جدول ۳. تحلیل حساسیت نسبت به تغییر در پارامترهای هزینه‌ای

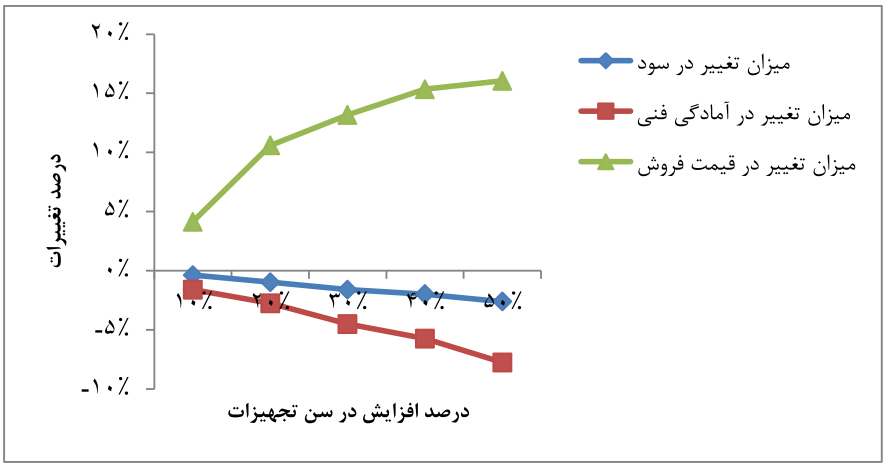
میزان تغییر در پارامتر هزینه	سود	آمادگی فنی	قیمت فروش	میزان تغییر در سود	میزان تغییر در آمادگی فنی	میزان تغییر در قیمت فروش
	میزان تغییرات ناشی از تغییر در هزینه تولید			**میزان تغییرات ناشی از تغییر در هزینه انتقال**		
۱۰٪	۰,۰۰۳۶-	۰,۰۰۸۵-	۰,۰۶۲۱	۰,۰۰۳۶-	۰,۰۱۶۱-	۰,۰۴۱۴
۲۰٪	۰,۰۰۷۹-	۰,۰۲۳۱-	۰,۰۹۰۹	۰,۰۰۸۴-	۰,۰۳۱۰-	۰,۰۸۶۱
۳۰٪	۰,۰۱۳۸-	۰,۰۳۵۸-	۰,۱۱۹۰	۰,۰۱۳۱-	۰,۰۴۵۳-	۰,۱۳۴۱
۴۰٪	۰,۰۱۷۲-	۰,۰۵۳۵-	۰,۱۴۳۶	۰,۰۱۸۰-	۰,۰۶۱۴-	۰,۱۶۶۷
۵۰٪	۰,۰۲۲۹-	۰,۰۷۳۸-	۰,۱۵۸۱	۰,۰۲۳۷-	۰,۰۸۵۲-	۰,۱۷۹۷
	میزان تغییرات ناشی از تغییر در هزینه نگهداری			**میزان تغییرات ناشی از تغییر در هزینه کمبود**		
۱۰٪	۰,۰۰۵۱-	۰,۰۱۲۷-	۰,۰۴۸۳	۰,۰۰۶۱-	۰,۰۱۳۶-	۰,۰۴۸۳
۲۰٪	۰,۰۰۸۳-	۰,۰۲۷۴-	۰,۰۸۵۵	۰,۰۱۱۷-	۰,۰۲۴۹-	۰,۰۷۸۹
۳۰٪	۰,۰۱۲۱-	۰,۰۳۸۸-	۰,۱۲۷۳	۰,۰۱۵۱-	۰,۰۴۰۵-	۰,۱۱۵۹
۴۰٪	۰,۰۱۷۱-	۰,۰۵۸۷-	۰,۱۵۰۵	۰,۰۱۹۶-	۰,۰۵۳۲-	۰,۱۳۶۶
۵۰٪	۰,۰۲۱۹-	۰,۰۷۵۱-	۰,۱۷۲۹	۰,۰۲۵۵-	۰,۰۶۸۸-	۰,۱۵۸۷
	میزان تغییرات ناشی از تغییر در هزینه تعمیرات			**میزان تغییرات ناشی از تغییر در هزینه دستمزد**		
۱۰٪	۰,۰۰۵۹-	۰,۰۰۸۵-	۰,۰۶۲۱	۰,۰۰۴۵-	۰,۰۱۳۶-	۰,۰۵۵۲
۲۰٪	۰,۰۰۹۲-	۰,۰۱۹۶-	۰,۱۱۰۴	۰,۰۱۰۶-	۰,۰۲۷۵-	۰,۰۹۸۰
۳۰٪	۰,۰۱۳۶-	۰,۰۳۵۷-	۰,۱۴۰۴	۰,۰۱۵۵-	۰,۰۴۴۱-	۰,۱۴۲۹
۴۰٪	۰,۰۱۷۳-	۰,۰۵۳۳-	۰,۱۶۴۱	۰,۰۲۰۱-	۰,۰۶۲۸-	۰,۱۷۱۹
۵۰٪	۰,۰۲۱۷-	۰,۰۷۴۴-	۰,۱۶۳۰	۰,۰۲۵۳-	۰,۰۷۹۸-	۰,۱۸۲۲

*** محاسبات محقق**

همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود افزایش هزینه تولید منجر به افزایش قیمت فروش می‌شود که این افزایش به سبب افزایش در نهاده‌های تولید تا بیش از ۱۵ درصد رخ می‌دهد این در حالی است که کاهش در میزان سود به سبب این افزایش تا ۲,۵ درصد و کاهش در آمادگی فنی تا ۷ درصد قابل‌انتظار است. افزایش هزینه انتقال

نیز منجر به افزایش قیمت و کاهش در میزان سود و آمادگی فنی می‌شود. نتایج حساسیت مدل نسبت به افزایش هزینه انتقال نظیر افزایش در هزینه تولید هست، صرفاً افزایش در قیمت فروش بیش از تغییرات نسبت به هزینه تولید است. در خصوص تأثیر هزینه نگهداری موجودی، افزایش هزینه تا سطح ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت که الگویی شبیه به قبل ایجاد شد. کاهش در سود و کاهش در آمادگی فنی به‌واسطه افزایش در هزینه نگهداری و افزایش در قیمت فروش تا ۱۷ درصد در صورت افزایش ۵۰ درصدی پیش‌بینی می‌شود. هزینه کمبود نیز از هزینه‌های اثرگذار بر میزان سود و آمادگی فنی محسوب می‌شود، به‌عبارت‌دیگر کمبود اثر منفی بر میزان دو تابع هدف مزبور داشته و موجب بدتر شدن عایدی می‌شود. از سوی دیگر هزینه‌های کمبود بر قیمت محصولات اثرگذار بوده و می‌تواند باعث افزایش قیمت شود. البته این افزایش قیمت به دلیل افزایش در نهاده‌های تولید می‌باشد و نه افزایش در تقاضا. براساس پیش‌بینی‌ها ۵۰ درصد افزایش در هزینه کمبود می‌تواند تا بیش از ۱۵ درصد موجب افزایش قیمت شود. افزایش هزینه تعمیر و نگهداری موجب کاهش آمادگی فنی و سود می‌شود و قیمت‌ها را افزایش می‌دهد، اما به نظر می‌رسد با افزایش درصد تغییرات شتاب افزایش قیمت نسبت به افزایش هزینه تعمیرات و نگهداری کمتر می‌شود.

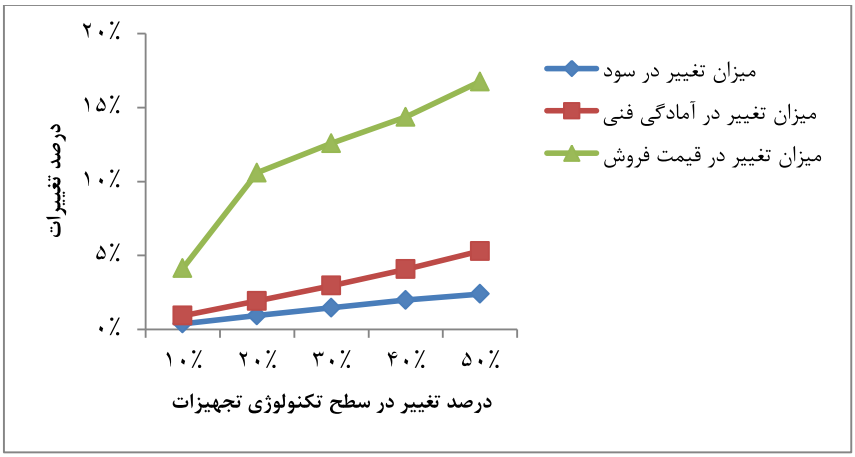
در نمودار (۳) پارامتر میانگین عمر تجهیزات بررسی می‌شود. درواقع این پارامتر نشان‌دهنده میزان فرسودگی تجهیزات می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که اگر عمر تجهیزات افزایش یابد چه اتفاقی برای سود و آمادگی فنی رخ می‌دهد. نتیجه تحلیل نشان می‌دهد افزایش عمر تجهیزات می‌تواند منجر به کاهش سود و به‌طور طبیعی کاهش آمادگی فنی و از سوی دیگر می‌تواند باعث افزایش قیمت شود. براساس برآوردها اندکی بیش از ۱۵ درصد پیش‌بینی افزایش قیمت به سبب افزایش ۵۰ درصدی در عمر تجهیزات باشد.



* محاسبات محقق

نمودار ۳. تحلیل حساسیت نسبت به میانگین عمر تجهیزات

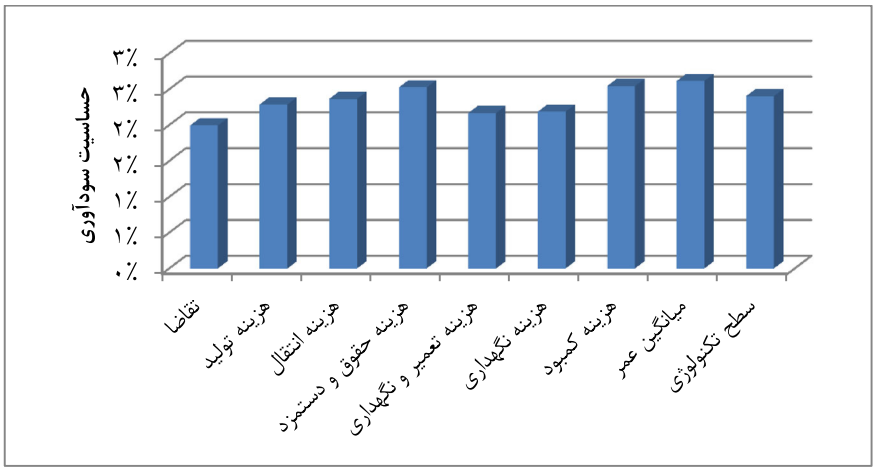
در نمودار ۴ تغییرات نتایج نسبت به میزان تغییر در سطح تکنولوژیکی تجهیزات نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش سطح تکنولوژیکی میزان آمادگی فنی و میزان سود به‌طور خطی افزایش می‌یابد. افزایش در قیمت با افزایش سطح تکنولوژیکی به دلیل اثری که بر هزینه خواهد داشت تا بیش از ۱۶ درصد قابل پیش‌بینی است که نسبت به پارامترهای قبلی میزان این افزایش بیشتر است.



* محاسبات محقق

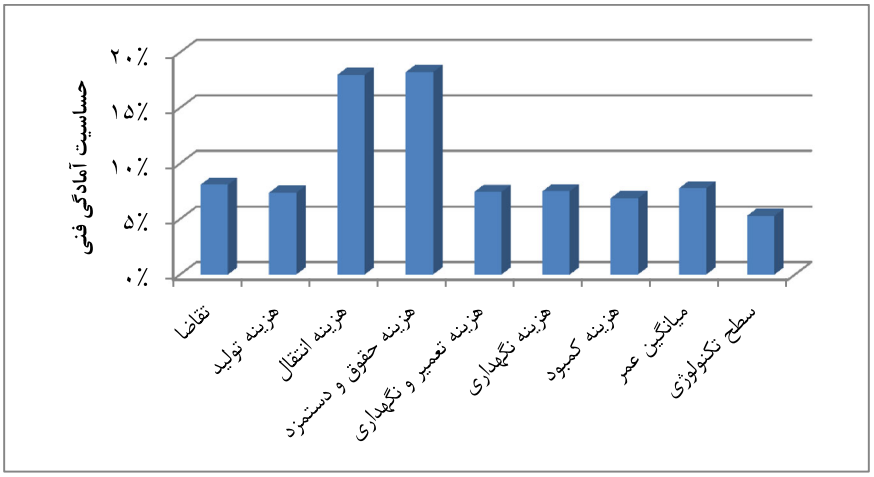
نمودار ۴. تحلیل حساسیت سطح تکنولوژیکی

در نمودار (۵) میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر تابع سود به‌صورت مقایسه‌ای آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین عمر دارای بیشترین اثرگذاری بر سود بوده و می‌تواند تا ۲/۵ درصد سود را کاهش دهد. پس‌ازآن هزینه کمبود و هزینه حقوق و دستمزد در مرتبه بعدی قرار دارند. کمترین تأثیر مربوط پارامتر تقاضا بوده که افزایش ۵۰ درصدی آن کمتر از ۲ درصد افزایش سود را حاصل می‌کند.



* محاسبات محقق

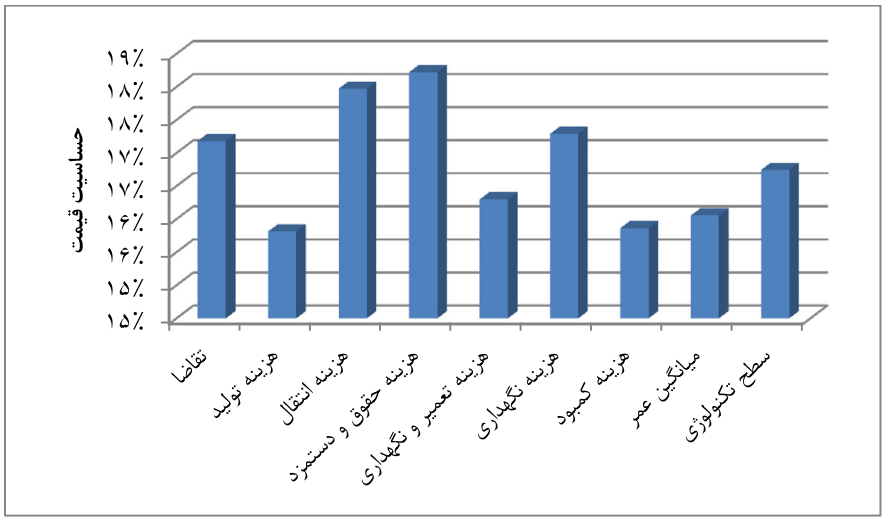
نمودار ۵. مقایسه میزان اثرگذاری پارامترها بر سود



* محاسبات محقق

نمودار ۶. مقایسه پارامترهای اثرگذار بر میزان آمادگی فنی از نظر میزان اثرگذاری

در نمودار (۶) میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر میزان آمادگی فنی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فاصله اثرگذاری هزینه حقوق و دستمزد و هزینه انتقال با سایر پارامترها بسیار زیاد هست. به‌عبارت‌دیگر پارامتر هزینه حقوق و دستمزد به میزان ۱۸ درصد و پارامتر هزینه انتقال به میزان ۱۷/۵ درصد باعث کاهش آمادگی فنی می‌شود. این در حالی است که سایر پارامترها اثری بیش از ۸ درصد ندارند.



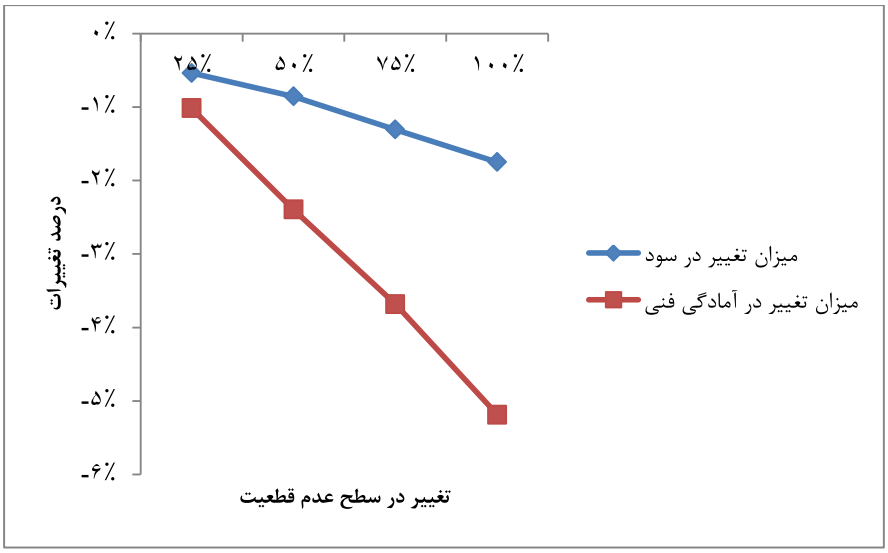
* محاسبات محقق

نمودار ۷. مقایسه پارامترهای اثرگذار بر قیمت محصولات

در نمودار (۷) میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر قیمت محصولات نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود هزینه حقوق و دستمزد دارای بیشترین میزان اثرگذاری بر قیمت محصولات می‌باشد، به‌گونه‌ای که تا بیش از ۱۸ درصد منجر به افزایش قیمت می‌شود. بنابراین قیمت محصول به این پارامتر بسیار حساس می‌باشد. پس‌ازآن هزینه انتقال قرار دارد که اثری نزدیک به ۱۸ درصد را نشان می‌دهد. کم اثرترین پارامتر هزینه تولید است، به‌عبارت‌دیگر هزینه تولید به میزان ۱۵/۷ درصد کمترین اثر را بر قیمت محصولات در صورت افزایش ۵۰ درصدی نشان می‌دهد.

تغییرات سطوح عدم قطعیت در مدل می‌تواند تغییرات قابل‌توجهی را در نتایج ایجاد کند. همان‌طور که در نمودار (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش عدم قطعیت، آمادگی فنی بیش از سود متأثر می‌شود. افزایش عدم قطعیت تا ۱۰۰ درصد می‌تواند تا

بیش از ۵ درصد آمادگی فنی را کاهش دهد درحالی‌که این اثرگذاری بر میزان سود نزدیک به ۲ درصد است. بنابراین عدم قطعیت در مسئله حاضر موجب بدتر شدن جواب و کاهش سود و آمادگی فنی می‌گردد.



* محاسبات محقق

نمودار ۸- تغییرات در سطح عدم قطعیت

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که عملکرد سیستم تولید و عرضه در مجتمع‌های گازی به‌طور معناداری تحت تأثیر ساختار هزینه‌ها، قیود فنی و شرایط نهادی بازار انرژی قرار دارد، امری که با ماهیت سرمایه‌بر و ظرفیت‌محدود صنعت گاز طبیعی سازگار است. افزایش تقاضا مطابق با تئوری عرضه و تقاضا موجب افزایش قیمت فروش می‌شود، اما اثر آن بر سود محدود بوده و هم‌زمان به کاهش آمادگی فنی می‌انجامد که بیانگر فعالیت سیستم در نزدیکی مرز ظرفیت و افزایش فشار عملیاتی بر تجهیزات است.

در خصوص پارامترهای هزینه‌ای، افزایش هزینه‌های تولید، انتقال، نگهداری، کمبود، تعمیرات و دستمزد همگی موجب کاهش سود و آمادگی فنی و افزایش قیمت محصولات می‌شوند. این نتایج حاکی از انتقال ناقص فشار هزینه‌ای به قیمت در بازارهای تنظیم‌گری شده انرژی است که به دلیل محدودیت‌های نهادی، امکان جبران

کامل افزایش هزینه‌ها از طریق قیمت وجود ندارد. در این میان، هزینه انتقال و هزینه نیروی کار به‌دلیل نقش کلیدی زیرساخت و نیروی انسانی متخصص، اثرگذاری بیشتری بر قیمت و آمادگی فنی نشان می‌دهند.

افزایش میانگین عمر تجهیزات نیز با کاهش بهره‌وری، افزایش توقف‌های ناخواسته و رشد هزینه‌های عملیاتی همراه بوده و در نهایت به کاهش سود و آمادگی فنی و افزایش قیمت منجر می‌شود؛ موضوعی که اهمیت نوسازی و سرمایه‌گذاری جایگزینی را در بلندمدت برجسته می‌سازد. در مقابل، ارتقای سطح تکنولوژیکی تنها عاملی است که هم‌زمان موجب بهبود سودآوری و آمادگی فنی می‌شود و از مسیر افزایش بهره‌وری و کاهش نرخ خرابی، امکان خلق سود واقعی را فراهم می‌آورد.

در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح عدم قطعیت بیش از آنکه سود را متأثر کند، قابلیت اطمینان فنی سیستم را تضعیف می‌کند؛ امری که بیانگر نقش پررنگ ریسک‌های عملیاتی، نهادی و بازار در کاهش پایداری سیستم‌های انرژی است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که بهبود عملکرد اقتصادی و فنی در مجتمع‌های گازی مستلزم کنترل هزینه‌های عملیاتی، کاهش ریسک‌ها و تمرکز بر ارتقای فناوری و نوسازی زیرساخت‌ها است.

۵-۳- بحث و بررسی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش قیمت به‌عنوان یک ابزار اقتصادی برای مدیریت تقاضا، در شرایط محدودیت ظرفیت و عدم‌قطعیت بازار، اگرچه سود عملیاتی را در کوتاه‌مدت افزایش می‌دهد، اما فشار مضاعفی بر تجهیزات تولیدی وارد کرده و در صورت فقدان سرمایه‌گذاری مکمل در نگهداشت و فناوری، موجب کاهش سطح آمادگی فنی می‌شود. این نتیجه با ادبیات اقتصاد انرژی که بر وجود یک رابطه غیرخطی میان قیمت، ظرفیت و قابلیت اطمینان عرضه تأکید دارد، همخوانی دارد (هسنلی، ۲۰۲۴). از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که تخصیص بهینه منابع به نگهداشت و فناوری، حتی در شرایطی که به‌ظاهر هزینه‌بر است، از طریق کاهش هزینه‌های توقف تولید، کمبود عرضه و نوسانات شدید قیمت، منجر به بهبود شرایط اقتصادی کل سیستم می‌شود. این یافته تأیید می‌کند که آمادگی فنی را می‌توان به‌عنوان یک متغیر اقتصادی درون‌زا در نظر گرفت که مستقیماً بر ساختار هزینه نهایی و رفتار قیمت‌گذاری اثرگذار است (وانگ

و همکاران، ۲۰۲۵). تحلیل حساسیت نیز نشان می‌دهد که پارامترهای مرتبط با عدم‌قطعیت تقاضا و هزینه‌های نگهداشت، بیشترین اثر را بر شکل جبهه پارتو دارند؛ نتیجه‌ای که با شواهد تجربی بازارهای انرژی در مواجهه با شوک‌های تقاضا و محدودیت ذخیره‌سازی همسو است (آگلند و لپه، ۲۰۲۵).

یافته‌های این مطالعه پیامدهای سیاستی مهمی برای سیاست‌گذاران و نهادهای تنظیم‌گر بازار انرژی به همراه دارد:

نخست، نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های قیمت‌گذاری که صرفاً بر حداکثرسازی سود کوتاه‌مدت متمرکز هستند، می‌توانند به تضعیف آمادگی فنی واحدهای تولیدی و افزایش ریسک اختلال در عرضه منجر شوند. از این‌رو، چارچوب‌های تنظیمی باید قیمت‌گذاری را به‌گونه‌ای طراحی کنند که سیگنال‌های اقتصادی لازم برای سرمایه‌گذاری در نگهداشت، نوسازی تجهیزات و ارتقای فناوری را فراهم آورد؛ موضوعی که در ادبیات اقتصاد انرژی به‌عنوان شرط لازم برای امنیت عرضه و پایداری بازار شناخته می‌شود (روزن و ژانگ[1]، ۲۰۲۵).

دوم، نتایج مدل تأکید می‌کند که در بازارهای انرژی با عدم‌قطعیت بالای تقاضا، وجود سازوکارهای تشویقی برای نگهداشت ظرفیت آماده و ذخیره‌سازی استراتژیک می‌تواند از نوسانات شدید قیمت جلوگیری کند. این موضوع به‌ویژه برای کشورهایی با ساختار تولید متمرکز و وابستگی بالا به درآمدهای انرژی اهمیت دارد، زیرا نوسانات قیمت می‌تواند آثار منفی قابل‌توجهی بر ثبات اقتصاد کلان داشته باشد.

در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام شاخص‌های فنی نظیر آمادگی تجهیزات در مدل‌های تصمیم‌گیری اقتصادی، می‌تواند ابزار تحلیلی قدرتمندی برای ارزیابی سیاست‌های قیمت‌گذاری، سرمایه‌گذاری و تنظیم‌گری در صنعت نفت و گاز فراهم آورد. این رویکرد امکان گذار از سیاست‌های واکنشی کوتاه‌مدت به سیاست‌های پیش‌نگر و مبتنی بر پایداری را فراهم می‌سازد که از اهداف اصلی سیاست‌گذاری در اقتصاد انرژی مدرن به‌شمار می‌رود (هلم، ۲۰۱۷ و IEA، ۲۰۲۰).

1. Rosen & Zhang

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای تصمیم‌گیری همزمان در زمینه تولید، موجودی و قیمت‌گذاری در صنعت نفت و گاز تحت عدم‌قطعیت تقاضا ارائه می‌دهد که همزمان ملاحظات اقتصادی و عملیاتی را مدنظر قرار می‌دهد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که مرز پارتو قادر است سود و آمادگی فنی واحدهای تولیدی را بهبود دهد و توازن مناسبی میان اهداف اقتصادی و فنی ایجاد کند. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که پارامترهای هزینه‌ای شامل هزینه‌های تولید، نگهداشت، کمبود، تعمیرات و دستمزد بیشترین اثر را بر سود، آمادگی فنی و قیمت دارند، در حالی که اثر افزایش تقاضا بر سود محدود است ولی می‌تواند آمادگی فنی را کاهش دهد. علاوه بر این، افزایش عدم‌قطعیت بازار بیش از آنکه سود را تحت تأثیر قرار دهد، از طریق کاهش آمادگی فنی بر پایداری سیستم اثر می‌گذارد، که اهمیت مدیریت ریسک عملیاتی و نگهداشت تجهیزات در سیاست‌گذاری انرژی را برجسته می‌سازد. از منظر اقتصاد انرژی، این یافته‌ها نشان‌دهنده وجود قیود ظرفیت و بازده نزولی تقاضا در مجتمع‌های گازی است، به‌گونه‌ای که رشد تقاضا و فشار هزینه‌ای بدون سرمایه‌گذاری مکمل در فناوری و نگهداشت، منجر به افزایش قیمت‌ها و فشار عملیاتی بر سیستم می‌شود بدون آنکه سود کوتاه‌مدت به‌طور چشمگیری افزایش یابد.

براساس نتایج این مطالعه، سیاست‌های قیمت‌گذاری و تصمیمات تولید باید به‌صورت یکپارچه با سیاست‌های سرمایه‌گذاری در فناوری و نگهداشت تجهیزات طراحی شوند. چارچوب پیشنهادی با پیوند دادن تصمیمات عملیاتی به پیامدهای اقتصادی و پایداری عرضه، ابزاری تحلیلی برای ارزیابی سیاست‌ها، مدیریت ریسک و طراحی استراتژی‌های بلندمدت در صنایع نفت و گاز فراهم می‌آورد. یافته‌ها همچنین تأکید می‌کنند که توجه به ظرفیت ذخیره‌سازی، نگهداشت پیشگیرانه و ارتقای فناوری، نه‌تنها موجب افزایش سود واقعی می‌شود، بلکه ریسک اختلال در عرضه را کاهش داده و ثبات بازار انرژی را ارتقا می‌دهد. توسعه آتی مدل این پژوهش با درون‌زایی سرمایه‌گذاری، رقابت بازار و سیاست‌های کربنی، می‌تواند درک عمیق‌تری از تعامل بین تصمیمات عملیاتی، اقتصادی و سیاست‌گذاری انرژی ارائه دهد.

منابع

- آماده, حمید , قاسمی, عبدالرسول , میرزائی, حجت‌الله و بختیاری, حمید . (۱۴۰۱). تحلیل زنجیره ارزش تولید محصولات پتروشیمی و ارائه الگوی بهینه تولید محصولات پتروشیمی: کاربرد برنامه‌ریزی چند هدفه فازی در تولید محصولات پتروشیمی. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران۱۲ (۴۵):۴۱-۶۹.
- احمدی آذر محمود، دری بهروز، عالم تبریز اکبر، کسایی مسعود (۱۳۹۸). ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار چنددوره‌ای برای برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی ۱۵ (۶۳) :۱۷۳-۲۰۷.
- پاپی علی، پیشوایی میرسامان، جبارزاده آرمین، قادری سیدفرید (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی بهینه استوار زنجیره عرضه نفت خام و توسعه بهینه میادین نفتی در شرایط عدم قطعیت: مطالعه موردی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی۱۴ (۵۸) :۲۷-۶۴.
- پورخاقان شاهرضایی زهرا، اسماعیل نیا گتابی علی اصغر، طیبی سید کمیل، دامن کشیده مرجان (۱۴۰۴). مقایسه روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه (GA) و چند هدفه (NSGA-II) در بهینه‌سازی سبد تولید انرژی برق ایران.. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی ۲۱ (۸۴) :۲۳۵-۲۶۶.
- سلطانی, محمدرحیم , افشارکاظمی, محمدعلی و رادفر, رضا . (۱۴۰۳). بهینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده در شرایط عدم قطعیت. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران۱۳ (۵۲): ۱۳۳-۱۵۶.
- گودرزی,علی و غلامیان,محمدرضا . (۱۴۰۳). انتخاب تأمین‌کنندگان سبز با روش نوین تصمیم‌گیری گروهی پرومته-ابری؛ موردمطالعه: یک شرکت تولیدکننده فرآورده‌های نفتی. پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری۹ (۲) :۶۳-۹۷.
- نظری، رویا و مصطفائی، امین(۱۳۹۸). بهینه‌سازی چند هدفه مدل زنجیره تأمین سبز در شرایط عدم قطعیت : مطالعه موردی صنایع نفت و گاز، پنجمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی شیمی و نفت، تهران.

- Attia, A. M. (2021). A multi-objective robust optimization model for upstream hydrocarbon supply chain. Alexandria Engineering Journal, 60(6), 5115-5127.
- Attia, A., Ghaithan, A., & Duffuaa, S. (2019). A multi-objective optimization model for tactical planning of upstream oil & gas supply chains. Comput. Chem. Eng., 128, 216-227.
- Attia, A., Ghaithan, A., & Duffuaa, S. (2021). Multi-Objective optimization of the Hydrocarbon supply chain under price and demand uncertainty. International Journal of Sustainable Engineering, 14, 1525 - 1537 .
- Chen, S., Wang, W., & Zio, E. (2021). A Simulation-Based Multi-Objective Optimization Framework for the Production Planning in Energy Supply Chains. Energies, 14, 2684 .
- del Valle, A., Wogrin, S., & Reneses, J. (2020). Multi-objective bi-level optimization model for the investment in gas infrastructures. Energy Strategy Reviews, 30, 100492.
- Demissie, A., Zhu, W., & Belachew, C. T. (2017). A multi-objective optimization model for gas pipeline operations. Computers & Chemical Engineering, 100, 94-103 .
- Ebrahimi, S., & Bagheri, E. (2021). Optimizing profit and reliability using a bi-objective mathematical model for oil and gas supply chain under disruption risks. Comput. Ind. Eng., 163, 107849 .
- Ghaithan, A., Attia, A., & Duffuaa, S. (2017). Multi-objective optimization model for a downstream oil and gas supply chain. Applied Mathematical Modelling, 52, 689-708 .
- Hasanli, M. (2024). Re-examining crude oil and natural gas price relationship: Evidence from time-varying regime-switching models. Energy Economics, 133, 107510.
- Helm, D. (2017). The role of reliability and maintenance in energy policy: Lessons for modern energy systems. Energy Policy, 109, 642–651. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.014
- IEA, P. (2022). World energy outlook 2022. Paris, France: International Energy Agency (IEA.(

- Jamalnia, A., & Soukhakian, M. (2009). A hybrid fuzzy goal programming approach with different goal priorities to aggregate production planning. Comput. Ind. Eng., 56, 1474-1486 .
- Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodrı, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. European journal of operational research, 177(3), 1599-1609.
- Lima, C., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. (2021). Designing and planning the downstream oil supply chain under uncertainty using a fuzzy programming approach. Comput. Chem. Eng., 151, 107373.
- Liu, T., Gao, X., & Wang, L. (2015). Multi-objective optimization method using an improved NSGA-II algorithm for oil–gas production process. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 57, 42-53.
- Ma, H., Zhang, Y., Sun, S., Liu, T., & Shan, Y. (2023). A comprehensive survey on NSGA-II for multi-objective optimization and applications. Artificial Intelligence Review, 56(12), 15217-15270
- Oglend, A., & Kleppe, T. S. (2025). Storage scarcity and oil price uncertainty. Energy Economics, 144, 108393 .
- Okwu, M. O., & Nwachukwu, A. N. (2019). A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9(2), 1555-1568.
- Rostamian, A., de Moraes, M. B., Schiozer, D. J., & Coelho, G. P. (2025). A survey on multi-objective, model-based, oil and gas field development optimization: Current status and future directions. Petroleum Science, 22(1), 508-526.
- Rosen, C., & Zhang, X. (2025). Energy security and resilience: Revisiting concepts and advancing planning perspectives for transforming integrated energy systems. Energy Policy, 207, 114796. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114796
- Schmitz, R., Flachsbarth, F., Plaga, L. S., Braun, M., & Härtel, P. (2025). Energy security and resilience: Revisiting concepts and advancing planning perspectives for transforming integrated energy systems. Energy Policy, 207, 114796
- Usman, O., Ozkan, O., & Alola, A. A., et al. (2024). Energy security-related risks and the quest to attain USA’s net-zero emissions targets by

2050: A dynamic ARDL simulations modeling approach. Environmental Science and Pollution Research, 31, 18797–18812.

- Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (2001). A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation. European Journal of Operational Research, 129(1), 134-158.
- Wang, R., & Liang, T. (2004). Application of fuzzy multi-objective linear programming to aggregate production planning. Comput. Ind. Eng., 46, 17-41 .
- Wang, C. N., Lin, Y. C., & Yen, N. H. (2025). Optimal maintenance strategy selection for oil and gas industry equipment based on overall equipment effectiveness. Processes, 13(5), 1389.
- Wang, H. F., & Zheng, K. W. (2013). Application of fuzzy linear programming to aggregate production plan of a refinery industry in Taiwan. Journal of the Operational Research Society, 64(2), 169–184.
- Zhang, J., & Usman, M. (2025). Redefining energy policy for sustainable growth: The interplay of fossil fuel subsidies, energy security risks, and energy balances in shaping geopolitical stability. Energy, 322, 135620

Multi-Objective Optimization of Production, Inventory, and Pricing Decisions in the Oil and Gas Industry under Uncertainty

Hossein Abbaspour
M.Sc., Department of Industrial Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, (hossein_haah@yahoo.com)

Marzieh Mozafari [1]
Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, (m_mozafari@iau.ac.ir)

Received: 2025/10/02 Accepted: 2025/11/02

Abstract

In recent years, firms operating in the oil and gas industry have faced increasing economic volatility and demand uncertainty, which has posed significant challenges to the coordination of production decisions and revenue management strategies. This study proposes a fuzzy multi-objective optimization model for the simultaneous decision-making of production, inventory, and pricing of oil and gas products. The model is developed for large-scale production complexes in the oil and gas sector, with operational structures comparable to refineries and gas processing complexes in Iran, and is formulated within a multi-period planning horizon. The objectives of the model include profit maximization and enhancement of the technical readiness level of production units, based on indicators such as technological level, skilled technical workforce, and equipment lifetime. To account for demand uncertainty, triangular fuzzy demand is employed, and the model is formulated as a dynamic, multi-product system. The proposed model is solved for a realistically simulated large-scale gas complex using tailored evolutionary algorithm based on the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) and the obtained solutions are thoroughly analyzed and discussed. Computational results demonstrate that the proposed framework effectively establishes a balanced trade-off between economic and technical objectives, leading to a significant increase in total profit while simultaneously improving the technical readiness of production units. Sensitivity analysis further reveals the decisive role of several key parameters in shaping profit behavior and product pricing dynamics.

JEL Classification: C61, C63, L71.

Keywords: Production and inventory decisions, Oil & gas products pricing, Fuzzy multi-objective programming, NSGA-II algorithm.

---

1. Corresponding Author