

A Robust Optimization Model for the Strategic and Operational Design of the Oil Supply Chain

Naeme Zarrinpoor* , Zahra Omidvari**

Abstract¹

The oil industry has a great share in the energy structure and the global economy, and the planning of strategic and operational levels of its supply chain is done with the objective of improving the competitive status of countries on the global level and economic development. In this paper, a mathematical model is presented for designing the crude oil supply chain through considering related facility location, demand allocation, transportation planning, and distribution. In the proposed model, environmental requirements for emitted greenhouse gas are considered such that the greenhouse gas emission from the transportation of oil may not be greater than a given limit. Since the exact values of parameters can rarely be determined in the real world, therefore, the uncertainty associated with parameters such as budget, transportation capacity, production units capacity, export volume, the amount of crude oil extraction and production, demand for refinery products and their production rate are considered in the proposed model. To handle the uncertainty of the model parameters, the robust optimization approach is applied. Numerical results verify the efficiency of the proposed model and show that the profitability of oil industry can be guaranteed by handling the uncertainties of parameters and appropriate production and distribution management.

Keywords: Oil Supply Chain; Environmental Factors; Location – Allocation; Uncertainty; Robust Optimization.

Received: 3 November 2019, Accepted: 7 September 2020

* Assistant professor, Shiraz University of Technology (Corresponding Author).

E-mail: zarrinpoor@sutech.ac.ir

** M.Sc. student, Shiraz University of Technology.

ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار برای طراحی استراتژیک و عملیاتی زنجیره تأمین نفت

ناعمه زرین‌پور*، زهرا امیدواری**

چکیده

صنعت نفت در ساختار انرژی و اقتصاد جهانی سهم بسزایی دارد و برنامه‌ریزی سطوح استراتژیک و عملیاتی زنجیره تأمین آن با هدف ارتقای موقعیت رقابتی کشورها در سطح جهانی و توسعه اقتصادی صورت می‌گیرد. در این پژوهش یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین نفت خام با در نظر گرفتن مسائل مربوط به مکان‌یابی تسهیلات، تخصیص تقاضا، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و توزیع ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی، الزامات زیست‌محیطی مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته خواهد شد و به موجب آن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل نفت نمی‌تواند از یک مقدار مشخص فراتر رود. نظر به اینکه در دنیای واقعی به ندرت می‌توان مقدار دقیق پارامترها را مشخص کرد، عدم قطعیت پارامترهای بودجه، ظرفیت حمل‌ونقل، ظرفیت واحدهای بهره‌برداری، میزان صادرات، مقدار استخراج و تولید نفت خام، تقاضای محصولات پالایشگاهی و میزان تولید آن‌ها در مدل پیشنهادی لحاظ می‌شود. برای برخورد با عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده می‌شود. نتایج عددی کارایی مدل پیشنهادی را تأیید می‌کنند و نشان می‌دهند با افزایش سطح عدم قطعیت سودآوری کاهش می‌یابد؛ اما می‌توان با مهار عدم قطعیت پارامترها و مدیریت مناسب تولید و توزیع سودآوری زنجیره تأمین نفت را تضمین کرد.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین نفت؛ عوامل زیست‌محیطی؛ مکان‌یابی-تخصیص؛ عدم قطعیت؛ بهینه‌سازی استوار.

۱. مقدمه

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۱۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷.

* استادیار، دانشگاه صنعتی شیراز (نویسنده مسئول).

E-mail: zarrinpoor@sutech.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز.

صنعت نفت به عنوان یکی از صنایع تجاری جهانی، نقش ویژه‌ای در اقتصاد مدرن ایفا می‌کند؛ به طوری که ادامه حیات بسیاری از صنایع نظیر حمل‌ونقل، ساخت‌وساز، پزشکی و داروسازی، صنایع غذایی، کشاورزی و پتروشیمی به وجود نفت وابسته است. نفت سهم بسزایی در ساختار اصلی انرژی جهانی و امنیت اقتصادی یک کشور دارد و میزان تقاضای جمعیت دنیا برای آن به سرعت در حال افزایش است. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده، مصرف جهانی نفت از ۸۶ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۰۷، به ۱۰۴ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید؛ همچنین با توجه به محدود بودن ذخایر آن، در بلندمدت قیمت جهانی نفت افزایش زیادی خواهد داشت [۱۰، ۱۷].

نفت به عنوان یکی از حامل‌های انرژی فسیلی، موجب آزاد شدن مقادیر زیادی دی‌اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر می‌شود که تهدید بزرگی برای تغییرات آب‌وهوایی و اکوسیستم جهانی به شمار می‌رود [۲۷]. در این راستا، کشورهای مختلف سیاست‌های اجرایی جدیدی برای کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تدوین کرده‌اند که از آن جمله می‌توان سیاست‌های محدود کردن میزان انتشار ناشی از فعالیت‌های تولیدی، مالیات‌های کربن و طرح تجارت کربن را نام برد. در حال حاضر طراحان زنجیره تأمین نفت و مدیران تجاری بخشی از فعالیت‌های خود را معطوف به کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کرده‌اند تا علاوه بر افزایش فروش سودآور، بر نگرانی‌های زیست‌محیطی نیز فائق آیند [۶، ۱۳]. زنجیره تأمین نفت شامل سطوح اکتشاف، استخراج و پالایش نفت، تولید محصولات نفتی و انتقال محصولات نفتی از طریق تانکرهای نفت، خطوط لوله، راه‌آهن و حمل‌ونقل دریایی است. برای اخذ تصمیمات کارا در هر یک از سطوح زنجیره تأمین نفت می‌توان زنجیره تأمین آن را به سه بخش بالادستی، میان‌دستی و پایین‌دستی تقسیم‌بندی کرد [۲۴، ۳۴]. زنجیره تأمین نفت در بخش بالادستی به تصمیمات استراتژیک اکتشاف، تولید و حمل‌ونقل نفت خام می‌پردازد. در بخش میان‌دستی عملیات پالایش انجام می‌شود و بخش پایین‌دستی معطوف به توزیع محصولات پالایشگاه‌ها است که بر اساس آن نفت تصفیه شده در پالایشگاه‌ها به مخازن ذخیره‌سازی ارسال و سپس در بازارهای خرده‌فروشی توزیع می‌شود.

بازار جهانی نفت، محیطی بی‌ثبات و نامطمئن است که عدم قطعیت آن ناشی از عوامل اقتصادی، قوانین زیست‌محیطی، نوسانات در سطوح تولید، نوسان قیمت و تقاضاهای غیرقابل پیش‌بینی است. برای طراحی یک زنجیره تأمین نفت باید اثرات عدم قطعیت تا حد امکان مهار شود تا بتوان سودآوری عملیاتی را تضمین کرد [۲۵]. برای برخورد با عدم قطعیت می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی فازی و بهینه‌سازی استوار بهره‌گرفت که در سال‌های اخیر با اقبال پژوهشگران متعددی مواجه شده است. رشد روزافزون تولید و وابستگی اقتصاد جهانی به حامل‌های انرژی فسیلی، نیاز به نفت را به میزان زیادی افزایش داده

است. در کشور ایران تعداد زیادی میدان‌های نفتی و گازی شناسایی شده است که بهره‌برداری از آن‌ها نیازمند برنامه‌ریزی است. برای بهره‌برداری از مخازن نفتی باید مکان مناسب حفر چاه‌ها مشخص شود و سپس با استفاده از دکل‌ها و تأسیسات حفاری این چاه‌ها حفر شوند. در ادامه نفت استخراجی با استفاده از خطوط لوله به واحدهای بهره‌برداری منتقل می‌شود تا عملیات جدایی ناخالصی‌ها صورت گیرد. در نهایت نفت با استفاده از خطوط لوله یا تانکرها از واحدهای بهره‌برداری به پالایشگاه‌ها یا پایانه‌های صادراتی ارسال می‌شود. طراحی این زنجیره نیازمند هزینه‌های سرمایه‌گذاری بسیار زیادی است. ارائه مدلی که بتواند علاوه بر مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات، سود حاصل از منابع نفتی را بیشینه سازد و امکان اجرای آن در دنیای واقعی میسر باشد، ضروری است [۲۰، ۳۱]. در این پژوهش، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح برای طراحی زنجیره تأمین نفت با در نظر گرفتن اکتشاف، استخراج، حمل‌ونقل نفت خام، عملیات پالایش و توزیع محصولات پالایشگاه‌ها ارائه خواهد شد. بر اساس مدل ریاضی، تصمیمات مختلف مکان‌یابی و تخصیص برای سطوح مختلفی نظیر چاه‌ها، واحدهای بهره‌برداری، بازارهای خارجی متقاضی نفت خام، پالایشگاه‌ها و محل‌های ذخیره‌سازی محصولات تولیدی پالایشگاه‌ها اخذ می‌شود. الزامات زیست‌محیطی در مدل ریاضی برای محدود کردن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل در نظر گرفته می‌شود. نظر به اینکه در دنیای واقعی پارامترهای مهم و اثرگذار زنجیره تأمین نفت با عدم قطعیت زیادی همراه هستند، عدم قطعیت در مدل ریاضی پیشنهادی لحاظ خواهد شد. برای برخورد با عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده می‌شود.

ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم، مبانی نظری موضوع بررسی می‌شود و در بخش سوم، مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی زنجیره تأمین نفت خام تشریح و همچنین مدل بهینه‌سازی استوار مسئله برای برخورد با عدم قطعیت توسعه داده خواهد شد. در بخش چهارم نتایج عددی حل مدل و تحلیل حساسیت پارامترها ارائه می‌شود. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی اختصاص دارد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین همواره از موضوعات مورد اقبال پژوهشگران بوده است و برای نزدیک‌تر شدن پژوهش‌ها به مسائل دنیای واقعی، رویکردهای مختلفی نظیر اختلال در تسهیلات و مسیرهای ارتباطی، بازیافت محصولات و مسائل زیست‌محیطی با آن ادغام شده است [۱۴، ۱۶، ۲۶]. یکی از زنجیره‌های تأمین بسیار پرکاربرد و پیچیده، زنجیره تأمین نفت است که برای طراحی و بهینه‌سازی آن، پژوهشگران مسائل مختلفی نظیر مکان‌یابی تسهیلات، برنامه‌ریزی تولید، حمل‌ونقل، توزیع و صادرات را مورد توجه قرار داده‌اند.

بوسچتو^۱ و همکاران (۲۰۰۸)، یک مدل برای زمان‌بندی فعالیت‌های عملیاتی خطوط لوله نفت ارائه کردند. آن‌ها یک روش تجزیه بر مبنای تخصیص منابع، توابع مصرف و تولید برای تعیین پارامترهای حجم و پمپاژ پیشنهاد دادند [۹]. القحطانی^۲ و همکاران (۲۰۰۸)، یک مدل ریاضی برای طراحی و بهینه‌سازی شبکه فرآیندهای پتروشیمی با هدف بهینه‌سازی سود معرفی کردند. در مدل آن‌ها عدم قطعیت پارامترهای هزینه مواد خام، قیمت محصولات و تقاضای بازار محصولات در نظر گرفته شده و از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها استفاده شده است [۱]. ترهان^۳ و همکاران (۲۰۰۹)، برنامه‌ریزی زیرساخت‌های نفت و گاز میدان‌های شناور تحت عدم قطعیت را در قالب یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای با هدف بهینه‌سازی تصمیمات سرمایه‌گذاری و عملیاتی بررسی کردند [۳۵].

ریباس^۴ و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل برنامه‌ریزی استراتژیک برای زنجیره تأمین یکپارچه نفت با در نظر گرفتن سه منبع عدم قطعیت شامل تولید نفت خام، تقاضا برای محصولات پالایشگاهی و قیمت‌های بازار ارائه کردند و برای مقابله با عدم قطعیت از روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و بهینه‌سازی استوار بهره گرفتند [۳۳]. هران^۵ و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی چنددوره‌ای برای پالایش و تصفیه محصولات نفتی ارائه دادند که بر اساس آن توالی عملیات پمپاژ و نحوه حمل‌ونقل میسر می‌شود [۲۲]. کارنیرو^۶ و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل تصادفی دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی استراتژیک زنجیره تأمین نفت با هدف بهینه‌سازی میانگین ارزش فعلی سود موردانتظار ارائه دادند که در آن ریسک مسئله انتخاب پرتفولیو در زنجیره تأمین مدیریت می‌شود [۱۱].

گوپتا^۷ و گروسمن^۸ (۲۰۱۲)، مدلی برای بهینه‌سازی میادین نفتی شناور پیشنهاد کردند که در آن اخذ تصمیمات بهینه برنامه حفاری، میزان تولید، ذخیره‌سازی و تخلیه، برنامه‌ریزی ظرفیت و ارتباط بین تولیدات شناور با هدف بهینه‌سازی ارزش فعلی خالص در افق برنامه‌ریزی بلندمدت میسر می‌شود [۱۹]. البوریا^۹ و همکاران (۲۰۱۳)، یک روش آزادسازی لاگرانژ مبتنی بر سناریو برای حل مدل برنامه‌ریزی تصادفی زنجیره تأمین نفت در شرایط عدم قطعیت تقاضا و ریسک معرفی کردند [۲۹]. صاحبی و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین نفت خام بالادستی شامل توسعه میدان نفت و حمل‌ونقل نفت خام با در نظر گرفتن عوامل

1. Boschetto
2. Al-Qahtani
3. Tarhan
4. Ribas
5. Herran
6. Carneiro
7. Gupta
8. Grossmann
9. Oliveira

زیست‌محیطی معرفی کردند که در آن تصمیمات انتخاب فناوری، ایجاد شبکه خطوط لوله و برنامه‌ریزی تانکرهای نفت بهینه می‌شود [۳۴]. الیوریا و همکاران (۲۰۱۴)، از الگوریتم تجزیه بندرز^۱ تسریع‌سازی شده برای حل مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای سرمایه‌گذاری زنجیره تأمین محصولات نفتی استفاده کردند [۳۰].

لیما^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای برای بهینه‌سازی توزیع محصولات پالایشگاهی پیشنهاد کردند که در آن بر اساس تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی و تجزیه و تحلیل درخت سناریو، عدم قطعیت در پارامترهای قیمت نفت و تقاضا مدل‌سازی می‌شود [۲۵]. آزاده و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین نفت خام در سطوح بالادستی شامل چاه‌های نفت و سکوهای تولید و سطوح میان‌دستی شامل بازارهای خارجی و پالایشگاه‌ها با اهداف بیشینه‌سازی ارزش فعلی خالص و عوامل زیست‌محیطی ارائه کردند [۵]. قیطان^۳ و همکاران (۲۰۱۷)، مدلی برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین نفت و گاز برای سطح پایین‌دستی زنجیره شامل حمل و نقل، ذخیره‌سازی، پالایش، بازار، مشتریان، مراکز توزیع و پتروشیمی‌ها با اهداف کمینه‌سازی هزینه کل، بیشینه‌سازی درآمد کل و سطح خدمات ارائه کردند [۱۸]. فراهانی و رحمانی (۲۰۱۷)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای استخراج نفت، برنامه‌ریزی تولید، مکان‌یابی تسهیلات و توزیع نفت با در نظر گرفتن تزریق گاز به چاه‌ها ارائه دادند [۱۵]. بیرانوند و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین نفت خام شامل مراکز تولید، پالایشگاه‌ها، کارخانه‌های پتروشیمی و کارخانه‌های محصولات شیمیایی ارائه کردند و از روش بهینه‌سازی استوار برای به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان در زنجیره و عدم قطعیت قیمت و تقاضا بهره گرفتند [۷]. آسیس^۴ و همکاران (۲۰۱۹)، مدیریت عرضه نفت خام در سطح عملیاتی از مراکز شناور و ذخیره‌سازی به مراکز توزیع را در قالب یک مدل ریاضی بیان کردند که بر اساس آن مسیریابی موجودی و زمان‌بندی کشتی‌های حامل نفت خام میسر می‌شود [۳]. وانگ^۵ و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین نفت پایین‌دستی با تمرکز بر برنامه‌ریزی مسیر خطوط لوله، توزیع نفت پالایش شده و حمل و نقل بین مخازن ذخیره‌سازی ارائه دادند [۳۷]. آتیا^۶ و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای زنجیره تأمین نفت خام با اهداف بیشینه‌سازی درآمد، کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی نرخ کاهش ذخایر نفت با در نظر گرفتن میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن ارائه دادند [۴]. یوان^۷ و

1. Benders decomposition
 2. Lima
 3. Ghaiathan
 4. Assis
 5. Wang
 6. Attia
 7. Yuan

همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین نفت با توجه به عوامل اختلال در واردات نفت در سطح پایین دست ارائه دادند و بر اساس آن امنیت در تأمین نفت مورد نیاز چین را ارزیابی کردند [۳۸]. ژو^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن برای طراحی خطوط لوله نفت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایستگاه‌های پمپ و تنظیمات هیدرولیک خطوط لوله پیشنهاد دادند [۳۹]. پیشنهاد پژوهش بر اساس ویژگی‌های مختلف در جدول ۱، طبقه‌بندی شده است.

جدول ۱. خلاصه مرور مبانی نظری پژوهش

بخش مورد مطالعه	نوع مدل	عوامل پایداری		پارامترها		رویکرد برخورد با عدم قطعیت		عوامل مورد بررسی			
		اقتصادی	زیست‌محیطی	قطعی	تصادفی	فازی	تصادفی	استوار	پرده	تبادل	مکان‌یابی-تخصیص
[۱]	M	*	*		*	*					*
[۳۵]	H	*	*		*	*			*		*
[۳۳]	M,H	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۲۲]	L	*	*		*				*	*	*
[۱۱]	M,L	*	*		*	*			*		*
[۱۹]	H	*	*		*				*	*	*
[۲۹]	L	*	*		*	*			*		*
[۳۴]	H	*	*	*	*			*	*	*	*
[۲۰]	L	*	*		*	*			*		*
[۲۵]	L	*	*		*	*			*		*
[۵]	M,H	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[۱۸]	L	*	*		*				*		*
[۱۵]	H	*	*		*				*	*	*
[۷]	H,M,L	*	*		*	*	*	*	*	*	*
[۲]	H	*	*		*				*		*
[۳۷]	L	*	*		*	*	*	*	*		*
[۴]	H	*	*	*	*				*		*
[۳۸]	L	*	*		*	*	*	*	*		*
[۳۹]	L	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
مقاله	M,H	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

در این جدول حروف L، M و H به ترتیب نشان‌دهنده سطوح پایین‌دستی، میان‌دستی و بالادستی زنجیره تأمین نفت هستند. با توجه به جدول ۱ می‌توان بیان نمود که تعداد اندکی از

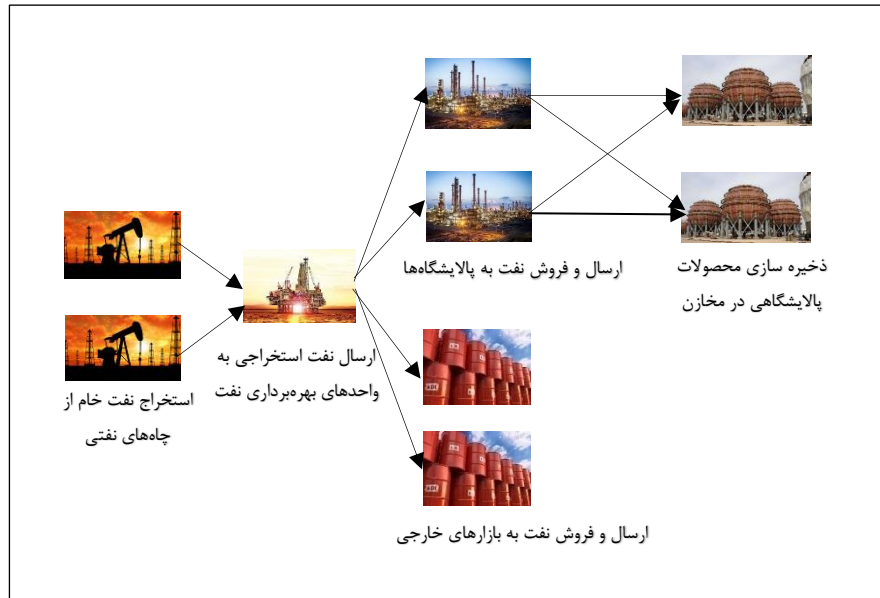
1. Zhou

مطالعات زنجیره تأمین نفت خام، سطوح بالادستی و میان‌دستی را به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار دادند. بیشتر پژوهش‌ها تنها عوامل اقتصادی را برای مدل‌سازی و طراحی زنجیره تأمین نفت بررسی کرده‌اند و عوامل زیست‌محیطی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مقالات با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها، بیشتر از رویکرد بهینه‌سازی تصادفی برای برخورد با عدم قطعیت استفاده شده است؛ درحالی‌که بهینه‌سازی تصادفی مستلزم اطلاعات و داده‌های تاریخی کافی از پارامترهای دارای عدم قطعیت است که با آن توزیع احتمالی پارامترها را به‌دست آورد؛ همچنین زمانی که تعداد سناریوها افزایش می‌یابد، کارایی خود را از دست خواهد داد. در تعداد محدودی از مطالعات، تخصیص تسهیلات و مکان‌یابی آن‌ها و محدودیت بودجه مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این پژوهش ارائه مدلی جدید برای زنجیره تأمین نفت خام در سطوح بالادستی و میان‌دستی با تأثیر عوامل زیست‌محیطی تحت عدم قطعیت پارامترها و در نظر گرفتن مکان‌یابی و تخصیص بهینه تسهیلات است. در سطر آخر جدول، ویژگی‌های پژوهش حاضر نشان داده شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله. در پژوهش حاضر، طراحی شبکه زنجیره تأمین نفت چندسطحی متشکل از چاه‌های نفتی، واحدهای بهره‌برداری نفت، پالایشگاه‌ها، بازارهای بین‌المللی و مخازن ذخیره‌سازی ارائه می‌شود. مدل برای سطوح بالادستی و میان‌دستی زنجیره تأمین نفت ارائه خواهد شد. ساختار پیشنهادی زنجیره تأمین نفت در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نفت خام از چاه‌های نفتی استخراج می‌شود؛ سپس به‌منظور جداسازی ناخالصی‌ها به وسیله خطوط لوله به واحدهای بهره‌برداری انتقال می‌یابد. انتقال نفت از واحدهای بهره‌برداری به پالایشگاه‌ها و بازارهای بین‌المللی به ترتیب با استفاده از خطوط لوله و کشتی صورت می‌گیرد. در پالایشگاه‌ها نفت خام به مشتقات نفتی تبدیل خواهد شد. در نهایت محصولات پالایشگاهی در مخازن ذخیره خواهند شد. با توجه به اینکه در طراحی شبکه زنجیره تأمین، پارامترهای زیست‌محیطی نقش مهمی ایفا می‌کنند، در مدل ریاضی پیشنهادی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد و اکسیدنیترژن ناشی از حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. در دنیای واقعی بسیاری از پارامترها ماهیت غیرقطعی دارند؛ بنابراین عدم قطعیت موجود در پارامترهای مسئله نیز بررسی شده است. تصمیماتی که در زنجیره تأمین نفت مورد بررسی باید اتخاذ شود، شامل ایجاد چاه، ایجاد واحد بهره‌برداری، ایجاد پالایشگاه و مخزن ذخیره‌سازی، تعیین میزان نفت خام انتقال‌یافته بین چاه نفت و واحد بهره‌برداری، میزان نفت خام انتقال‌یافته بین واحد بهره‌برداری و بازارهای خارجی، میزان نفت خام انتقال‌یافته بین واحد بهره‌برداری و پالایشگاه و میزان محصولات انتقال‌یافته بین پالایشگاه

و مخازن ذخیره‌سازی است. هدف اصلی مدل، بیشینه‌سازی سود کل زنجیره تأمین نفت است. در ادامه مفروضات مسئله، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی می‌شود و سپس مدل ریاضی پژوهش ارائه خواهد شد.



شکل ۱. شمای کلی زنجیره تأمین نفت

مفروضات مسئله. مفروضات استفاده شده در مدل به قرار زیر است:

- مکان‌های بالقوه برای حفر چاه‌ها، واحدهای بهره‌برداری، پالایشگاه‌ها، خطوط لوله و مخازن ذخیره مشخص است؛
- مکان بازارهای خارجی متقاضی نفت خام مشخص است؛
- انتقال نفت خام به واحدهای بهره‌برداری و پالایشگاه‌ها از طریق خطوط لوله انجام می‌شود؛ همچنین ارسال محصولات پالایشگاهی به مخازن ذخیره محصولات از طریق خطوط لوله صورت می‌گیرد؛
- انتقال نفت خام به بازارهای خارجی از طریق کشتی انجام می‌شود؛
- نفت استخراجی از یک چاه می‌تواند به چندین واحد بهره‌برداری اختصاص یابد؛ همچنین نفت استخراجی از چندین چاه می‌تواند به یک واحد بهره‌برداری اختصاص یابد؛
- نفت تولیدی در واحدهای بهره‌برداری می‌تواند به چندین بازار خارجی و پالایشگاه ارسال شود؛
- میزان استخراج نفت از چاه‌ها محدود است؛

- ظرفیت ذخیره‌سازی نفت در واحدهای بهره‌برداری و ظرفیت انتقال نفت از طریق خطوط لوله محدود است؛
- میزان انتقال نفت از چاه‌ها به واحدهای بهره‌برداری و از واحدهای بهره‌برداری به پالایشگاه‌ها محدود است؛
- میزان نفت مورد نیاز برای تولید هر یک از محصولات پالایشگاهی با هم متفاوت است؛
- با توجه به ارسال نفت به بازارهای خارجی و متفاوت بودن واحد پولی هر یک از این بازارها، تمام واحدهای پولی یکسان (بر اساس دلار) در نظر گرفته می‌شود.

مجموعه‌ها

J : مجموعه مکان‌های بالقوه برای چاه‌های نفتی

M : مجموعه مکان‌های بالقوه برای واحدهای بهره‌برداری

L : مجموعه مکان‌های بالقوه برای پالایشگاه‌ها

N : مجموعه مکان‌های بالقوه برای مخازن ذخیره‌سازی

R : مجموعه بازارهای خارجی

P : مجموعه محصولات

O : مجموعه انواع گازهای گلخانه‌ای

پارامترها

FC_j : هزینه ثابت استقرار چاه j

FC_m : هزینه ثابت استقرار واحد بهره‌برداری m

FS_m : هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای ذخیره‌سازی نفت در واحد بهره‌برداری m

FC_l : هزینه ثابت استقرار پالایشگاه l

FC_n : هزینه ثابت استقرار مخزن ذخیره‌سازی n

FT_{mr} : هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای انتقال نفت بین واحد بهره‌برداری m و بازار خارجی r

FT_{jm} : هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای انتقال نفت بین چاه j و واحد بهره‌برداری m

FT_{ml} : هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای انتقال نفت بین واحد بهره‌برداری m و پالایشگاه l

FT_{ptn} : هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای انتقال محصولات نفتی p بین پالایشگاه l و مخزن

ذخیره n

\widetilde{Bd} : حداکثر بودجه برای استقرار تسهیلات و انتقال

V_l : قیمت فروش هر واحد نفت به پالایشگاه l

V_r : قیمت فروش هر واحد نفت در بازار خارجی r

- V_{pn} : قیمت فروش هر واحد محصول p ذخیره‌شده در مخزن n
 ϑ_j : هزینه عملیاتی برای حفر چاه j
 cd_j : هزینه عملیاتی برای هر واحد نفت استخراج‌شده از چاه j
 CO_m : هزینه عملیاتی تولید هر واحد نفت در واحد بهره‌برداری m
 OS_m : هزینه عملیاتی ذخیره‌سازی هر واحد نفت خام در واحد بهره‌برداری m
 OP_p : هزینه عملیاتی تولید برای هر واحد محصول p
 d_{jm} : فاصله بین چاه j و واحد بهره‌برداری m
 d_{mr} : فاصله بین واحد بهره‌برداری m و بازار خارجی r
 d_{ml} : فاصله بین واحد بهره‌برداری m و پالایشگاه l
 d_{ln} : فاصله بین پالایشگاه l و مخزن ذخیره‌سازی n
 λ : هزینه عملیاتی برای انتقال هر واحد نفت از طریق خطوط لوله
 φ : هزینه عملیاتی برای انتقال هر واحد نفت از طریق کشتی
 $\tilde{\beta}_p$: نفت مصرفی برای تولید هر واحد محصول p
 ϵ_0 : میزان انتشار گاز گلخانه‌ای O به‌ازای هر واحد انرژی مصرف‌شده
 δ : میزان انرژی مصرف‌شده برای انتقال هر واحد نفت از طریق خطوط لوله
 \mathcal{L} : میزان انرژی مصرف‌شده برای انتقال هر واحد نفت از طریق کشتی
 σ_0 : میزان انتشار گاز گلخانه‌ای O برای انتقال هر واحد نفت از طریق خطوط لوله
 \mathcal{C}_0 : میزان انتشار گاز گلخانه‌ای O برای انتقال هر واحد نفت از طریق کشتی
 α_m : درصد تولید نفت در واحد بهره‌برداری m
 OR_j : شاخص نفت به آب برای نفت خام چاه j
 \tilde{A} : حداکثر نفت خام تولیدشده در واحدهای بهره‌برداری
 Π : حداکثر ظرفیت واحدهای بهره‌برداری برای ذخیره‌سازی نفت خام
 $\tilde{\Phi}_r$: حداکثر میزان انتقال نفت خام به بازار خارجی r
 $\tilde{\Lambda}_{pl}$: حداکثر میزان محصول تولیدشده p در پالایشگاه l
 \tilde{S}_{pn} : حداکثر میزان تقاضا برای محصول p ذخیره‌سازی شده در مخزن ذخیره n
 $\tilde{\mu}$: حداکثر میزان انتقال نفت و محصولات نفتی از طریق خطوط لوله
 $\tilde{\sigma}$: حداکثر میزان انتقال نفت از طریق کشتی
 \tilde{A}_j : حداکثر میزان استخراج نفت از چاه j
 \tilde{A}_m : حداکثر میزان انتقال نفت به واحد بهره‌برداری m
 \tilde{A}_l : حداکثر میزان انتقال نفت به پالایشگاه l
 Ω : حداکثر مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی

Δ : حداکثر مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از انتقال

متغیرهای تصمیم

x_j : متغیر باینری که در صورت ایجاد چاه j برابر یک و در غیر این صورت صفر است.
 y_m : متغیر باینری که در صورت ایجاد واحد بهره‌برداری m برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

z_l : متغیر باینری که در صورت تأسیس پالایشگاه l برابر یک و در غیر این صورت صفر است.
 h_r : متغیر باینری که در صورت تخصیص نفت به بازار خارجی r برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

u_n : متغیر باینری که در صورت ایجاد مخزن ذخیره‌سازی n برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

θ_{jm} : متغیر باینری که در صورت انتقال نفت بین چاه j و واحد بهره‌برداری m برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

q_{ml} : متغیر باینری که در صورت انتقال نفت بین واحد بهره‌برداری m و پالایشگاه l برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

v_{mr} : متغیر باینری که در صورت انتقال نفت بین واحد بهره‌برداری m و بازار خارجی r برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

τ_{ptn} : متغیر باینری که در صورت انتقال محصول p از پالایشگاه l به مخزن ذخیره n برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

ζ_{jm} : میزان نفت انتقال یافته بین چاه j و واحد بهره‌برداری m

ψ_{mr} : میزان نفت انتقال یافته بین واحد بهره‌برداری m و بازار خارجی r

ξ_{ml} : میزان نفت انتقال یافته بین واحد بهره‌برداری m و پالایشگاه l

ω_{ptn} : میزان محصول نوع p انتقال یافته بین پالایشگاه l و مخزن ذخیره n

مدل ریاضی. با توجه به پارامترها و متغیرهای تصمیم و همچنین مفروضات، مدل ریاضی به صورت زیر است:

تابع هدف (۱) حداکثرسازی سود زنجیره تامین نفت را مشخص می‌کند و از تفاضل درآمد کل و هزینه‌های متغیر به دست می‌آید. درآمد کل، از فروش نفت به پالایشگاه‌ها، فروش نفت به بازارهای خارجی و محصولات پالایشگاهی به مخازن حاصل می‌شود. هزینه متغیر کل نیز شامل هزینه حفاری چاه‌ها، هزینه‌های استخراج نفت، هزینه‌های عملیاتی تولید در واحدهای بهره‌برداری، هزینه‌های عملیاتی ذخیره‌سازی در واحدهای بهره‌برداری، هزینه‌های مربوط به تولید محصولات پالایشگاهی و هزینه‌های حمل‌ونقل بین سطوح مختلف زنجیره تامین است.

$$\max z = \left(\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M V_l \xi_{ml} + \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M V_r \psi_{mr} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P V_{pn} \bar{\omega}_{pln} \right) \quad (1)$$

$$- \left(\sum_{j=1}^J \vartheta_j x_j + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M cd_j \varsigma_{jm} x_j \right.$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J co_m \varsigma_{jm} y_m + \sum_{m=1}^M os_m \Pi y_m$$

$$+ \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P op_p \bar{\omega}_{pln} z_l + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \lambda d_{jm} \varsigma_{jm}$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \varphi d_{mr} \psi_{mr} + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \lambda d_{ml} \xi_{ml}$$

$$\left. + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \lambda d_{ln} \bar{\omega}_{pln} \right)$$

محدودیت ۲، هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری برای حفر چاه‌ها، ایجاد واحدهای بهره‌برداری، ایجاد مخازن ذخیره‌سازی، ایجاد پالایشگاه‌ها و هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری برای انتقال نفت را بر اساس بودجه در دسترس محدود می‌کند.

$$\sum_{j=1}^J FC_j x_j + \sum_{m=1}^M FC_m y_m + \sum_{m=1}^M FS_m y_m + \sum_{l=1}^L FC_l z_l + \sum_{n=1}^N FC_n u_n \quad (2)$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M FT_{jm} \theta_{jm} + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R FT_{mr} \gamma_{mr}$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L FT_{ml} \varrho_{ml} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P FT_{pln} \tau_{pln}$$

$$\leq \bar{B}d$$

محدودیت‌های ۳ و ۴، جریان نفت خام و محصولات را در زنجیره تامین نشان می‌دهند.

$$\sum_{j=1}^J \varsigma_{jm} or_j \geq \sum_{l=1}^L \xi_{ml} + \sum_{r=1}^R \psi_{mr} \quad \forall m \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^M \xi_{ml} \geq \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \omega_{pln} \tilde{\beta}_p \quad \forall l \quad (4)$$

محدودیت ۵، میزان ارسال نفت خام از چاه‌ها به واحدهای بهره‌برداری را به مقدار معینی محدود می‌کند.

$$\zeta_{jm} \leq \tilde{\mu} \theta_{jm} \quad \forall j, m \quad (5)$$

محدودیت‌های ۶ و ۷، به ترتیب میزان ارسال از واحدهای بهره‌برداری به پالایشگاه‌ها و بازارهای خارجی را به مقادیر معینی محدود می‌کنند.

$$\xi_{ml} \leq \tilde{\mu} \varrho_{ml} \quad \forall m, l \quad (6)$$

$$\psi_{mr} \leq \tilde{\sigma} \gamma_{mr} \quad \forall m, r \quad (7)$$

محدودیت ۸، میزان ارسال محصولات پالایشگاهی را به مقدار معینی محدود می‌کند.

$$\omega_{pln} \leq \tilde{\mu} \tau_{pln} \quad \forall l, n, p \quad (8)$$

محدودیت ۹، نشان می‌دهد که میزان نفت خام ارسالی از واحدهای بهره‌برداری به پالایشگاه‌ها و بازارهای خارجی باید کمتر یا مساوی میزان نفت خام واحدهای بهره‌برداری باشد.

$$\sum_{l=1}^L \xi_{ml} + \sum_{r=1}^R \psi_{mr} \leq \tilde{\Gamma} y_m \quad \forall m \quad (9)$$

محدودیت ۱۰، تضمین می‌کند که میزان نفت ذخیره‌شده در واحدهای بهره‌برداری برای انتقال به پالایشگاه‌ها و بازارهای خارجی کمتر یا مساوی ظرفیت ذخیره‌سازی در واحدهای بهره‌برداری باشد.

$$\alpha_m \left(\sum_{l=1}^L \xi_{ml} + \sum_{r=1}^R \psi_{mr} \right) \leq y_m \Pi \quad \forall m \quad (10)$$

محدودیت ۱۱، میزان نفت خام ارسالی از واحدهای بهره‌برداری به بازارهای خارجی را بر اساس سطح معینی از میزان انتقال به بازارها محدود می‌کند.

$$\sum_{m=1}^M \psi_{mr} \leq h_r \tilde{\vartheta}_r \quad \forall r \quad (11)$$

محدودیت ۱۲، میزان حداکثر تقاضا برای محصولات پالایشگاهی ذخیره‌سازی‌شده در مخازن را نشان می‌دهد.

$$\sum_{l=1}^L \bar{\omega}_{pln} \leq u_n \bar{S}_{pn} \quad \forall p, n \quad (12)$$

محدودیت ۱۳، میزان استخراج نفت خام از هر چاه در صورت حفر آن چاه را محدود می‌کند.

$$\sum_{m=1}^M \zeta_{jm} \leq x_j \bar{A}_j \quad \forall j \quad (13)$$

محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب میزان ظرفیت واحدهای بهره‌برداری و میزان ظرفیت پالایشگاه‌ها برای پذیرش نفت خام را مشخص می‌کنند.

$$\sum_{j=1}^J \zeta_{jm} \leq y_m \bar{A}_m \quad \forall m \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^M \xi_{ml} \leq z_l \bar{A}_l \quad \forall l \quad (15)$$

محدودیت ۱۶، میزان تولید محصولات پالایشگاهی را بر اساس ظرفیت هر یک از پالایشگاه‌ها محدود می‌کند.

$$\sum_{n=1}^N \bar{\omega}_{pln} \leq z_l \bar{\Lambda}_{pl} \quad \forall l, p \quad (16)$$

محدودیت ۱۷، بیان می‌کند که در صورت حفر چاه، نفت خام از چاه‌ها به واحدهای بهره‌برداری ارسال می‌شود.

$$\theta_{jm} \leq x_j \quad \forall m, j \quad (17)$$

محدودیت ۱۸، بیان می‌کند که در صورت ایجاد واحدهای بهره‌برداری، نفت از چاه‌ها به واحدهای بهره‌برداری انتقال می‌یابد.

$$\theta_{jm} \leq y_m \quad \forall m, j \quad (18)$$

محدودیت ۱۹، بیان می‌کند که در صورت ایجاد واحدهای بهره‌برداری، نفت به پالایشگاه‌ها ارسال می‌شود.

$$q_{ml} \leq y_m \quad \forall m, l \quad (19)$$

محدودیت ۲۰، بیان می‌کند که در صورت ایجاد پالایشگاه‌ها، نفت از واحدهای بهره‌برداری به آن‌ها ارسال می‌شود.

$$q_{ml} \leq z_l \quad \forall m, l \quad (20)$$

محدودیت ۲۱، بیان می‌کند که در صورت ایجاد واحدهای بهره‌برداری، نفت به بازارهای خارجی ارسال می‌شود.

$$\gamma_{mr} \leq \gamma_m \quad \forall m, r \quad (21)$$

محدودیت ۲۲، عنوان می‌کند که در صورت وجود بازارهای خارجی، نفت از واحدهای بهره‌برداری به بازارهای خارجی ارسال می‌شود.

$$\gamma_{mr} \leq h_r \quad \forall m, r \quad (22)$$

محدودیت ۲۳، نشان می‌دهد که در صورت ایجاد مخازن می‌توان محصولات را تولید و به مخازن فرستاد.

$$\tau_{pln} \leq u_n \quad \forall l, n, p \quad (23)$$

محدودیت ۲۴، نشان می‌دهد که در صورت ایجاد پالایشگاه‌ها می‌توان محصولات پالایشگاهی را ارسال کرد.

$$\tau_{pln} \leq z_l \quad \forall l, n, p \quad (24)$$

بر اساس محدودیت ۲۵، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی برای حمل‌ونقل نفت بین سطوح مختلف زنجیره تأمین به یک حد بیشینه محدود می‌شود.

$$\epsilon_o \times \left(\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \delta d_{jm} \varsigma_{jm} + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \delta d_{ml} \xi_{ml} + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \mathcal{L} d_{mr} \psi_{mr} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \delta d_{ln} \omega_{pln} \right) \leq \Omega \quad \forall o \quad (25)$$

محدودیت ۲۶، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از انتقال نفت را محدود می‌کند.

$$\left(\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sigma_o d_{jm} \varsigma_{jm} + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \sigma_o d_{ml} \xi_{ml} + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \mathcal{C}_o d_{mr} \psi_{mr} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \sigma_o d_{ln} \omega_{pln} \right) \leq \Delta \quad \forall o \quad (26)$$

محدودیت‌های ۲۷ و ۲۸، حدود متغیرهای تصمیم مسئله را مشخص می‌کنند.

$$\varsigma_{jm}, \xi_{ml}, \psi_{mr}, \omega_{pln} \geq 0 \quad \forall j, m, r, l, n, p \quad (27)$$

$$\theta_{jm}, \varrho_{ml}, \gamma_{mr}, \tau_{pln}, x_j, \gamma_m, z_l, h_r, u_n \in \{0, 1\} \quad \forall j, m, r, l, n, p \quad (28)$$

خطی‌سازی مدل پیشنهادی. مدل ریاضی پیشنهادی در بخش قبل غیرخطی است. هزینه‌های استخراج نفت، هزینه‌های عملیاتی تولید در واحدهای بهره‌برداری و هزینه‌های عملیاتی تولید

محصولات پالایشگاهی از اجزای غیرخطی تابع هدف هستند که در محاسبه هزینه متغیر کل از آن‌ها استفاده شده است. در این اجزای غیرخطی تابع هدف، یک متغیر پیوسته در یک متغیر باینری ضرب شده است. اگرچه بسیاری از مسائل دنیای واقعی غیرخطی هستند، یافتن جواب بهینه جهانی برای مسائل غیرخطی از لحاظ محاسباتی دشوار است. برای خطی‌سازی مدل از رویکرد چانگ^۱ و چانگ (۲۰۰۰) استفاده شده است [۱۲]. اگر متغیر باینری و متغیر پیوسته به ترتیب با α و β و حاصل ضرب آن‌ها با γ نشان داده شود، عبارت غیرخطی به صورت زیر خطی خواهد شد.

$$\gamma \leq M \alpha \tag{۲۹}$$

$$\beta - M (1 - \alpha) \leq \gamma \tag{۳۰}$$

$$\gamma \leq \beta \tag{۳۱}$$

با استفاده از این رویکرد، تابع هدف به صورت زیر خطی می‌شود و محدودیت‌های ۳۳ تا ۴۲

به مدل ریاضی اضافه خواهند شد:

$$\begin{aligned} \max z = & \left(\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M V_l \times \xi_{ml} + \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M V_r \times \psi_{mr} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P V_{pnl} \times \omega_{pnl} \right) \\ & - \left(\sum_{j=1}^J \vartheta_j \times x_j + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M cd_j \times \gamma_{1jm} \right) \tag{۳۲} \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J co_m \times \gamma_{2jm} + \sum_{m=1}^M os_m \times \pi \times y_m \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P op_p \times \gamma_{3pnl} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \lambda \times d_{jm} \times \zeta_{jm} \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R g \times d_{mr} \times \psi_{mr} + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \lambda \times d_{ml} \times \xi_{ml} \\ & + \left. \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \lambda \times d_{ln} \times \omega_{pnl} \right) \end{aligned}$$

st: (۲)-(۲۸)

$$\gamma_{1jm} \leq M x_j \quad \forall m, j \tag{۳۳}$$

$$\gamma_{1jm} \leq \zeta_{jm} \quad \forall m, j \tag{۳۴}$$

$$\zeta_{jm} - M(1 - x_j) \leq \gamma_{1jm} \quad \forall m, j \quad (35)$$

$$\gamma_{2jm} \leq M y_m \quad \forall m, j \quad (36)$$

$$\gamma_{2jm} \leq \zeta_{jm} \quad \forall m, j \quad (37)$$

$$\zeta_{jm} - M(1 - y_m) \leq \gamma_{2jm} \quad \forall m, j \quad (38)$$

$$\gamma_{3pln} \leq M z_l \quad \forall p, l, n \quad (39)$$

$$\gamma_{3pln} \leq \omega_{pln} \quad \forall p, l, n \quad (40)$$

$$\omega_{pln} - M(1 - z_l) \leq \gamma_{3pln} \quad \forall p, l, n \quad (41)$$

$$\gamma_{1jm}, \gamma_{2jm}, \gamma_{3pln} \geq 0 \quad \forall j, m, l, n, p \quad (42)$$

مدل بهینه‌سازی استوار. در مدل پیشنهادی ارائه شده برای طراحی زنجیره تأمین نفت، برخی از پارامترها دارای عدم قطعیت هستند. رویکردهای متعددی برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه داده شده است که از آن جمله می‌توان بهینه‌سازی تصادفی، بهینه‌سازی فازی، بهینه‌سازی استوار و رویکردهای ترکیبی را نام برد. در این پژوهش از رویکرد ریسک‌گریز و محافظه‌کارانه بهینه‌سازی استوار برای برخورد با عدم قطعیت و به‌دست‌آوردن مسئله معادل قطعی مدل پیشنهادی استفاده شده است. باید توجه داشت که رویکرد بهینه‌سازی استوار نیازمند شکل توزیع و یا تابع عضویت داده‌ها نیست و تنها باید دامنه تغییرات مشخص باشد. با استفاده از این روش، مقدار تابع هدف به ازای جواب استوار در تمامی حالات ممکن پارامترهای دارای عدم قطعیت، شدنی و نزدیک به مقدار بهینه خود خواهد بود و حداقل انحراف را از حالت بهینه خواهد داشت [۲۳]. در پژوهش حاضر از رویکرد بهینه‌سازی استوار ارائه‌شده توسط پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱)، استفاده شده است [۳۲]. این رویکرد، توسعه‌یافته رویکرد بهینه‌سازی استوار بنتال^۱ و همکاران (۲۰۰۹) است [۸] و به‌واسطه مبانی ریاضی قوی به‌طور موفقیت‌آمیز در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ریاضی نظیر زنجیره تأمین حلقه‌بسته، زنجیره تأمین با سیاست‌های انتشار کربن، برنامه‌ریزی تولید و طراحی شبکه لجستیک معکوس و روبه‌جلو استفاده شده است [۲، ۲۱، ۲۸، ۳۶]. در ادامه رویکرد بهینه‌سازی استوار پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱)، معرفی و سپس مدل بهینه‌سازی استوار مسئله ارائه خواهد شد [۳۲].

مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\min \quad fy + cx \quad (43)$$

$$\text{st:} \quad Ax \geq d \quad (44)$$

$$Hx = r \quad (45)$$

¹ Ben-Tal

$$Nx = 0 \quad (۴۶)$$

$$Mx \leq 0 \quad (۴۷)$$

$$Bx \leq Cy \quad (۴۸)$$

$$y \in \{0,1\}, x \in \mathbb{R}^+ \quad (۴۹)$$

در مدل بالا پارامترهای r, c و d دارای عدم قطعیت هستند. با فرض اینکه U مجموعه عدم قطعیت به شکل جعبه است و هر یک از پارامترهای غیرقطعی در مجموعه عدم قطعیت مفروض تغییر می‌کنند، شکل کلی این مجموعه محدود بسته به شکل جعبه را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$u_{Box} = \{\xi \in \mathbb{R}^n: |\xi_t - \bar{\xi}_t| \leq \rho G_t, \quad t = 1, 2, \dots, n\} \quad (۵۰)$$

$\bar{\xi}_t$ بردار ارزش اسمی n بعدی برای پارامتر ξ_t و G_t مقیاس عدم قطعیت و پارامتر مثبت ρ سطح عدم قطعیت را مشخص می‌کند؛ بنابراین همتای استوار مسئله می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\min Z \quad (۵۱)$$

$$fy + cx \leq Z \quad \forall c \in u_{Box}^c \quad (۵۲)$$

$$Ax \geq d \quad \forall d \in u_{Box}^d \quad (۵۳)$$

$$Hx = r \quad \forall r \in u_{Box}^r \quad (۵۴)$$

$$Nx = 0 \quad (۵۵)$$

$$Mx \leq 0 \quad (۵۶)$$

$$Bx \leq Cy \quad (۵۷)$$

$$y \in \{0,1\}, x \in \mathbb{R}^+ \quad (۵۸)$$

برای نمایش نسخه رام‌شدنی و قابل‌حل مدل مطرح‌شده باید عبارتهای ۵۲ تا ۵۴ به صورت زیر بیان شود:

$$cx \leq Z - fy \quad \forall c \in u_{Box}^c | u_{Box}^c = \{c \in \mathbb{R}^{n_c}: |c_t - \bar{c}_t| \leq \rho_c G_t^c, \quad t = 1, 2, \dots, n_c\} \quad (۵۹)$$

سمت چپ نامعادله ۵۲ شامل بردار پارامترهای غیرقطعی است؛ درحالی‌که پارامترهای سمت راست مشخص و قطعی هستند. بنابراین، نامعادله بالا می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\sum_t (\bar{c}_t x_t + \eta_t) \leq Z - fy \quad (۶۰)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \leq \eta_t \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, n_c\} \quad (۶۱)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \geq -\eta_t \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, n_c\} \quad (62)$$

به‌طور مشابه برای نامعادله ۵۳، خواهیم داشت:

$$a_i x \geq d_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n_d\}, \forall d \in u_{Box}^d | u_{Box}^d = \{d \in \mathfrak{R}^{n_d} : |d_i - \bar{d}_i| \leq \rho_d G_i^d, i = 1, 2, \dots, n_d\} \quad (63)$$

نامعادله بالا به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$a_i x \geq \bar{d}_i + \rho_d G_i^d \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n_d\} \quad (64)$$

به‌صورت مشابه برای معادله ۵۴، داریم:

$$h_j x = r_j, \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\}, \forall r \in u_{Box}^r | u_{Box}^r = \{r \in \mathfrak{R}^{n_r} : |r_j - \bar{r}_j| \leq \rho_r G_j^r, j = 1, \dots, n_r\} \quad (65)$$

برای تبدیل معادله بالا به فرم قابل‌حل، باید آن را به دو نامعادله به‌صورت زیر تبدیل کرد:

$$h_j x \geq \bar{r}_j - \rho_r G_j^r \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n_r\} \quad (66)$$

$$h_j x \leq \bar{r}_j + \rho_r G_j^r \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n_r\} \quad (67)$$

در نهایت مدل هم‌تای استوار می‌تواند به‌صورت زیر ارائه شود:

$$\min Z \quad (68)$$

$$\sum_t (\bar{c}_t x_t + \eta_t) \leq Z - fy \quad (69)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \leq \eta_t \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, n_c\} \quad (70)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \geq -\eta_t \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, n_c\} \quad (71)$$

$$a_i x \geq \bar{d}_i + \rho_d G_i^d \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n_d\} \quad (72)$$

$$h_j x \geq \bar{r}_j - \rho_r G_j^r \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n_r\} \quad (73)$$

$$h_j x \leq \bar{r}_j + \rho_r G_j^r \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n_r\} \quad (74)$$

$$Nx = 0 \quad (75)$$

$$Mx \leq 0 \quad (76)$$

$$Bx \leq Cy \quad (77)$$

$$y \in \{0,1\}, x, \eta_t \in \mathbb{R}^+ \tag{۷۸}$$

با توجه به توضیحات بالا، همتای استوار مدل پیشنهادی بخش قبل به صورت زیر خواهد بود و جدول ۲، نشان دهنده هر یک از پارامترهای مدل همتای استوار است.

جدول ۲. پارامترهای مدل همتای استوار

سطح عدم قطعیت	مقیاس عدم قطعیت	مقدار اسمی پارامترها	پارامترهای تحت عدم قطعیت
ρ_β	G_p^β	$\bar{\beta}_p$	$\tilde{\beta}_p$
ρ_μ	G^μ	$\bar{\mu}$	$\tilde{\mu}$
ρ_σ	G^σ	$\bar{\sigma}$	$\tilde{\sigma}$
ρ_r	G^r	\bar{r}	\tilde{r}
ρ_θ	G_θ^θ	$\bar{\theta}_r$	$\tilde{\theta}_r$
ρ_s	G_{pn}^s	S_{pn}	\tilde{S}_{pn}
ρ_{A1}	G_j^{A1}	\bar{A}_j	\tilde{A}_j
ρ_{A2}	G_m^{A2}	\bar{A}_m	\tilde{A}_m
ρ_{A3}	G_l^{A3}	\bar{A}_l	\tilde{A}_l
ρ_λ	G_{pl}^λ	$\bar{\lambda}_{pl}$	$\tilde{\lambda}_{pl}$
ρ_{Bd}	G^{Bd}	\bar{Bd}	\tilde{Bd}

$$\begin{aligned} \max Z = & \left(\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M V_l \xi_{ml} + \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M V_r \psi_{mr} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P V_{pn} \omega_{pln} \right) \tag{۷۹} \\ & - \left(\sum_{j=1}^J \vartheta_j x_j + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M cd_j \gamma_{1jm} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J co_m \gamma_{2jm} \right. \\ & + \sum_{m=1}^M os_m y_m \Pi + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P op_p \gamma_{3pln} \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \lambda \varsigma_{jm} d_{jm} + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \varphi \psi_{mr} d_{mr} \\ & \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \lambda \xi_{ml} d_{ml} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \lambda \omega_{pln} d_{ln} \right) \end{aligned}$$

ST:(۳), (۱۰), (۱۷)-(۲۸), (۳۳)-(۴۲)

$$\sum_{m=1}^M \xi_{ml} \geq \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \omega_{pln} (\bar{\beta}_p + \rho_\beta G_p^\beta) \quad \forall l \tag{۸۰}$$

$$\varsigma_{jm} \leq (\bar{\mu} - \rho_\mu G^\mu) \theta_{jm} \quad \forall j, m \tag{۸۱}$$

$$\xi_{ml} \leq (\bar{\mu} - \rho_\mu G^\mu) \varrho_{ml} \quad \forall m, l \tag{۸۲}$$

$$\psi_{mr} \leq (\bar{\sigma} - \rho_\sigma G^\sigma) \gamma_{mr} \quad \forall m, r \tag{۸۳}$$

$$\omega_{pln} \leq (\bar{\mu} - \rho_{\mu} G^{\mu}) \tau_{pln} \quad \forall l, n, p \quad (۸۴)$$

$$\sum_{l=1}^L \xi_{ml} + \sum_{r=1}^R \psi_{mr} \leq (\bar{\gamma} - \rho_{\gamma} G^{\gamma}) y_m \quad \forall m \quad (۸۵)$$

$$\sum_{m=1}^M \psi_{mr} \leq (\bar{\vartheta}_r - \rho_{\vartheta} G_r^{\vartheta}) h_r \quad \forall r \quad (۸۶)$$

$$\sum_{l=1}^L \omega_{pln} \leq (\bar{S}_{pn} - \rho_S G_{pn}^S) u_n \quad \forall p, n \quad (۸۷)$$

$$\sum_{m=1}^M \varsigma_{jm} \leq (\bar{A}_j - \rho_{A1} G_j^{A1}) x_j \quad \forall j \quad (۸۸)$$

$$\sum_{j=1}^J \varsigma_{jm} \leq (\bar{A}_m - \rho_{A2} G_m^{A2}) y_m \quad \forall m \quad (۸۹)$$

$$\sum_{m=1}^M \xi_{ml} \leq (\bar{A}_l - \rho_{A3} G_l^{A3}) z_l \quad \forall l \quad (۹۰)$$

$$\sum_{n=1}^N \omega_{pln} \leq (\bar{A}_{pl} - \rho_{\Lambda} G_{pl}^{\Lambda}) z_l \quad \forall l, p \quad (۹۱)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J FC_j x_j + \sum_{m=1}^M FC_m y_m + \sum_{m=1}^M FS_m y_m + \sum_{l=1}^L FC_l z_l + \sum_{n=1}^N FC_n u_n \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M FT_{jm} \theta_{jm} + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R FT_{mr} \gamma_{mr} \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L FT_{ml} \varrho_{ml} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P FT_{pln} \tau_{pln} \\ & \leq (\bar{B}d - \rho_{Bd} \times G^{Bd}) \end{aligned} \quad (۹۲)$$

طبق رویکرد بهینه‌سازی استوار چون در تابع هدف عدم قطعیت وجود ندارد، به همان صورت قبل نوشته شده است. در ادامه محدودیت ۸۰ جایگزین محدودیت ۴ می‌شود. محدودیت‌های ۸۱ تا ۸۵ نیز معادل قطعی محدودیت‌های ۵ تا ۹ هستند. محدودیت‌های ۸۶ تا ۹۱ جایگزین محدودیت‌های ۱۱ تا ۱۶ می‌شوند و محدودیت ۹۲ نیز معادل قطعی محدودیت ۲ را مشخص می‌کند. سایر محدودیت‌ها نیز به دلیل قطعی بودن، بدون تغییر در مدل باقی خواهند ماند.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش ابتدا یک مطالعه موردی در «شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب» بررسی می‌شود؛ سپس ۱۱ مسئله نمونه در سه سطح عدم قطعیت برای مدل ارائه شده بررسی و در انتها تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل انجام می‌شود. حل مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS(24.3.1) و سالور CPLEX انجام شده است.

مورد مطالعه. در این بخش از اطلاعات «شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب» برای بررسی اعتبار مدل استفاده شده است. شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب به عنوان بزرگ‌ترین شرکت تابع شرکت ملی نفت ایران با ۴۵ میدان و ۶۵ مخزن هیدروکربوری به وسعت ۴۰۰ هزار کیلومترمربع از استان بوشهر تا شمال خوزستان امتداد یافته است. این ناحیه حدود ۸۰ درصد نفت خام و ۱۶ درصد گاز کشور را تولید می‌کند. در این ناحیه میدان‌های نفتی اهواز، گچساران، مارون، آغاچاری، کرنج، پارسی و بی‌بی حکیمه قرار دارند. شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب خود از ۵ شرکت بهره‌برداری نفت و گاز شامل کارون، مارون، آغاچاری، گچساران و مسجدسلیمان تشکیل شده است که هر یک از آن‌ها از میدان‌های نفتی، نفت، گاز و مایعات گازی تولید می‌کنند.

«شرکت بهره‌برداری نفت و گاز کارون» از میدان‌های واقع در شهرستان اهواز و حومه شامل ۶۵۰ حلقه چاه، بیش از یک میلیون بشکه نفت تولید می‌کند. نفت خام و گاز تولیدی «شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مارون» از میدان‌های نفتی غرب رودخانه مارون حاصل می‌شود و میزان تولید این شرکت روزانه حدود ۶۱۴ هزار بشکه است. «شرکت بهره‌برداری نفت و گاز گچساران»، استخراج نفت خام را از میدان‌های پراکنده‌ای از جمله گچساران، بی‌بی حکیمه، سیاه‌مکان، رگ سفید، پازنان، منصورآباد، نرگسی و کیلور کریم بر عهده دارد و روزانه ۷۸۰ هزار بشکه نفت خام تولید می‌کند. «شرکت بهره‌برداری نفت و گاز آغاچاری»، نفت و گاز را از ۸ میدان نفتی و گازی آغاچاری، کرنج، پرنج، پارسی، رامشیر، پازنان، رگ سفید و بخشی از میدان مارون واقع در جنوب شرق استان خوزستان استخراج کرده و بیش از ۶۰۰ هزار بشکه نفت در روز تولید می‌کند. «شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مسجدسلیمان» به تولید نفت و گاز از میدان‌های نفت و گاز مناطق نفت‌خیز جنوب واقع در شمال خوزستان شامل مسجدسلیمان، پرسپاه، عنبل، کارون، زیلابی، نفت سفید، هفتکل، قلعه‌نار، کیود و لب سفید می‌پردازد [۴۰].

بخشی از نفت خام تولیدی این شرکت‌ها به پالایشگاه‌های آبادان، اصفهان، تبریز و تهران ارسال می‌شود. در این پژوهش «پالایشگاه امام خمینی شازند» و «پالایشگاه نفت آبادان» در نظر گرفته شده است. «پالایشگاه امام خمینی شازند» یکی از پالایشگاه‌های ایران است که در استان مرکزی و در شهرستان شازند واقع شده است. پالایشگاه شازند یکی از واحدهای فرعی شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران با ظرفیت ۲۵۰ هزار بشکه در روز است. واحدهای تولیدی این پالایشگاه شامل تقطیر در اتمسفر، تقطیر در خلأ، کاهش گرانیوی، گاز

مایع، تصفیه هیدروژنی نفتا، بنزین، نفت سفید، نفت گاز، تبدیل کاتالیستی احیای مداوم، آیزوماکس، گوگرد، هیدروژن، تولید هیدروژنی ایزومریزاسیون و تبدیل کاتالیستی ته‌مانده نفت خام است [۴۱،۴۲]. محصولات پالایشگاه نفت آبادان شامل بنزین، نفت سفید، گاز مایع، نفت گاز، مازوت، نفتای سبک و سنگین، روغن خام، قیر و گازوئیل است. ظرفیت این پالایشگاه هم‌اکنون ۴۰۰ هزار بشکه در روز است و بخشی از خوراک پتروشیمی بندر امام و آبادان را نیز تأمین می‌کند [۴۳].

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، تعداد ۸ حلقه چاه نفتی (j) که تاکنون حفر نشده‌اند و تعداد ۵ واحد بهره‌برداری (m) در نظر گرفته شده است؛ همچنین تعداد ۲ پالایشگاه با علامت l و ۲ بازار خارجی متقاضی نفت خام با علامت ۳ در نظر گرفته شده است. محصولات پالایشگاهی در این زنجیره تأمین شامل نفت گاز، نفت سفید، نفت کوره، نفت کوره سبک، بنزین یورو ۴ و بنزین پایه است که با علامت p در نظر گرفته شده‌اند. برای ذخیره‌سازی محصولات پالایشگاهی نیز ۲ مخزن ذخیره‌سازی با علامت n بررسی شده است. مقدار ظرفیت چاه‌ها در جدول ۳ و ظرفیت واحدهای بهره‌برداری بر اساس منبع [۳۱] در جدول ۴ نشان داده شده است. ظرفیت پالایشگاه‌ها و میزان تولید آن‌ها نیز بر اساس منابع [۴۱] و [۴۲] در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۳. ظرفیت هر یک از چاه‌ها

چاه حفاری نشده	ظرفیت کل (میلیون بشکه)
$j1$	۱۸/۳۲
$j2$	۱۲/۲۵
$j3$	۱۰/۳۲
$j4$	۱۷/۵۷
$j5$	۱۷/۳۲
$j6$	۱۱/۹۷
$j7$	۱۸/۱۲
$j8$	۱۳/۶۳

جدول ۴. اطلاعات مربوط به واحدهای بهره‌برداری

واحد بهره‌برداری	علامت	ظرفیت (۱۰۰۰ بشکه در روز)
اهواز ۱	m1	۶۵۰
اهواز ۲	m2	۵۵۰
منصوری	m3	۱۶۵
مارون	m4	۳۰۵
کرنج	m5	۴۵۰

جدول ۵. اطلاعات مربوط به پالایشگاه‌ها

محصولات	میزان ظرفیت (مترمکعب در روز)	پالایشگاه نفت امام خمینی سازند (I1)	پالایشگاه نفت آبادان (I2)
بنزین یورو ۴	۱۶۴۶۴	-	-
بنزین پایه	-	۱۴۹۱۶	-
نفت گاز	۹۳۱۷	۹۹۱۴	-
نفت سفید	۶۳۹۱	۱۲۰۶	-
نفت کوره	-	۶۰۵۰	-
نفت کوره سبک	۲۴۱۰	-	-

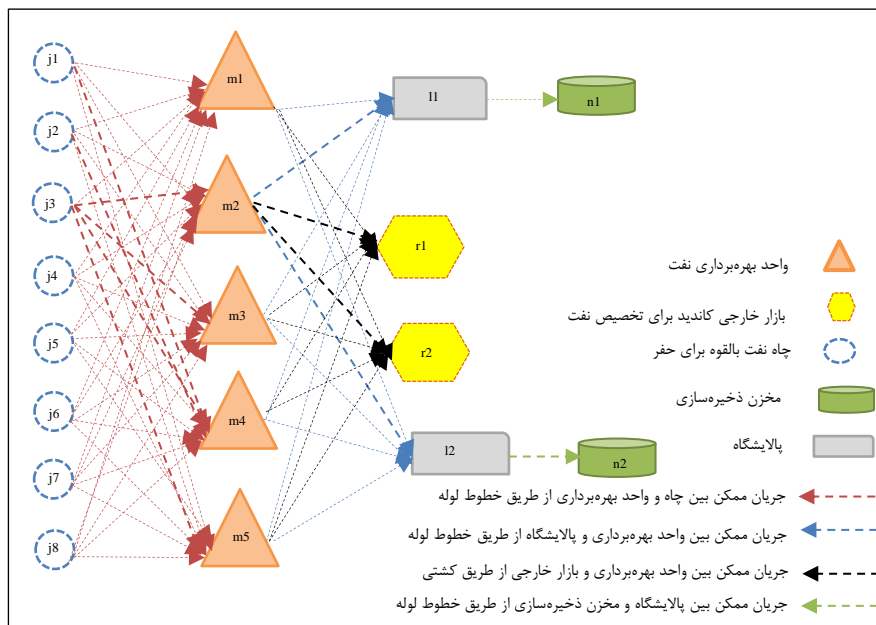
جدول ۶ نشان‌دهنده مقدار تابع هدف مطالعه موردی در شرایط قطعیت و عدم قطعیت پارامترها است. مقدار سود سالانه حاصل از زنجیره تأمین نفت طراحی شده در شرایط قطعی برابر با ۱۴۴۷۷۳۵۶۱ دلار است. با افزایش سطح عدم قطعیت، میزان سود کاهش یافته است و در سطح عدم قطعیت ۰/۹ سود سیستم به کمترین مقدار خود رسیده است.

جدول ۶. مقدار تابع هدف (سود حاصل از زنجیره تأمین)

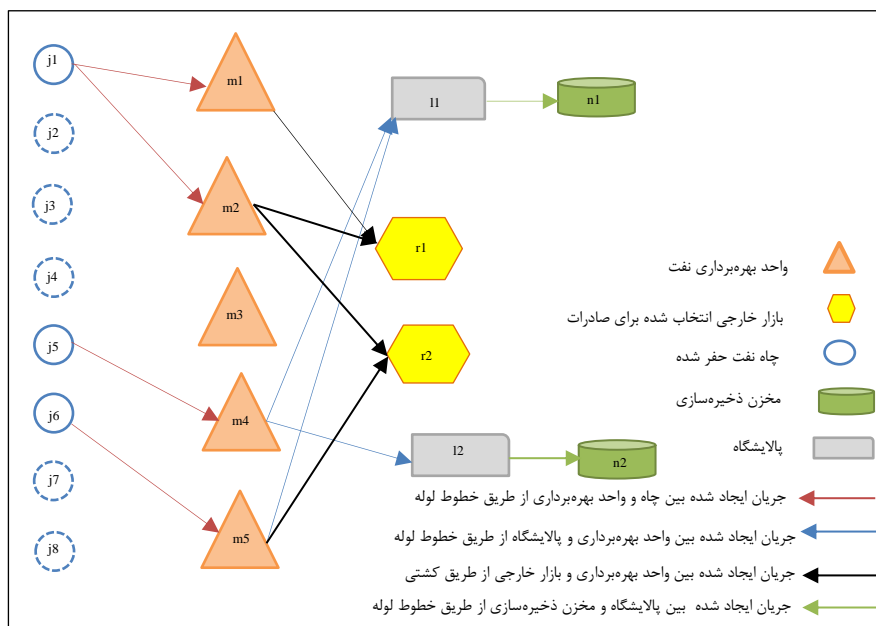
مقدار تابع هدف در شرایط قطعی	مقدار تابع هدف در شرایط عدم قطعیت		
	$\rho = 0.3$	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.9$
۱۴۴۷۷۳۵۶۱	۱۲۸۸۹۷۱۵۱	۱۰۵۴۸۳۹۸۶	۸۰۷۸۱۷۵۰

شکل ۲- الف، شبکه زنجیره تأمین قبل از حل مدل با در نظر گرفتن تسهیلات بالقوه و شکل ۲- ب، شبکه زنجیره تأمین بعد از حل مدل را نشان می‌دهند. شکل ۳، نشان‌دهنده مقدار هر یک از متغیرهای مدل است. همان‌طور که در شکل ۲- ب، مشاهده می‌شود، به دلیل وجود تقاضای داخلی و خارجی، چاه‌های نفتی شماره ۱، ۵ و ۶ حفر شده است. از واحد بهره‌برداری ۱ به بازار خارجی ۱، از واحد بهره‌برداری ۲ به بازارهای خارجی ۱ و ۲ و از واحد بهره‌برداری ۵ به بازار

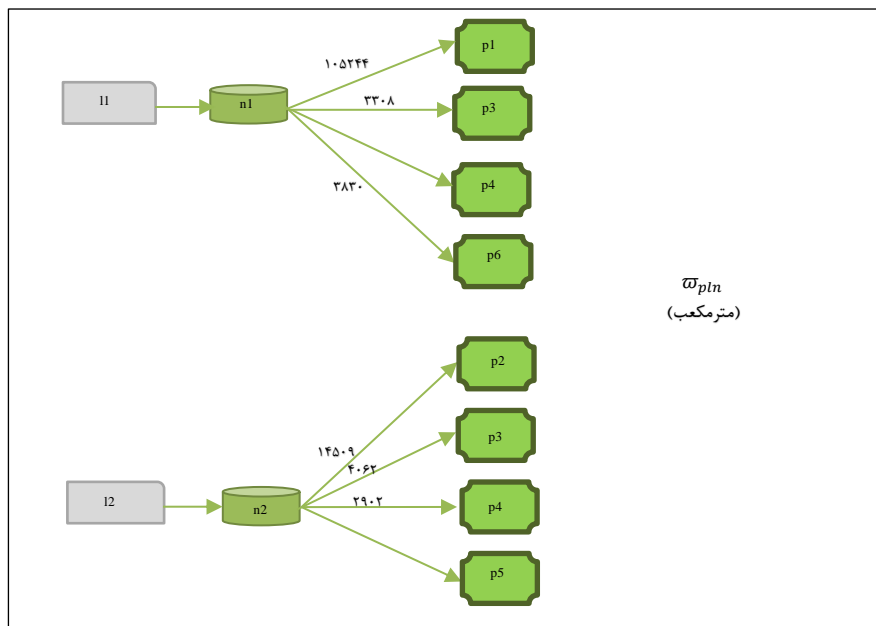
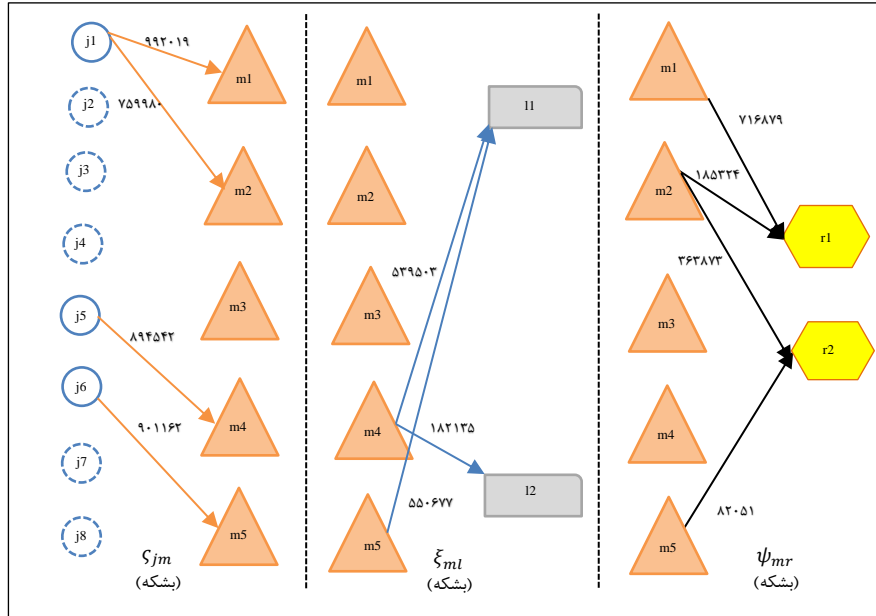
خارجی ۲ نفت ارسال می‌شود. از واحد بهره‌برداری ۵ به پالایشگاه شازند و از واحد بهره‌برداری ۴ به هر دو پالایشگاه آبادان و شازند نفت ارسال می‌شود.



شکل ۲-الف. شبکه قبل از حل مدل



شکل ۲-ب. شبکه بعد از حل مدل



نتایج مسائل نمونه. در این بخش نتایج حاصل از حل ۱۱ مسئله نمونه با اندازه‌های مختلف ارائه می‌شود. مقادیر پارامترها در جدول ۷ نشان داده شده است. در این جدول فاصله‌ها بر حسب

کیلومتر، هزینه‌ها و قیمت‌های فروش بر حسب دلار و ظرفیت‌ها و تقاضاها بر حسب هزار بشکه است. جدول ۸، ابعاد در نظر گرفته شده برای ۱۱ مسئله نمونه و جدول ۹، نتایج حل مدل در دو حالت عدم قطعیت و قطعیت پارامترها را نشان می‌دهد. برای حل مدل سه سطح عدم قطعیت مختلف در نظر گرفته شده است.

جدول ۷. مقادیر پارامترها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
V_l	[۲۰،۴۰]	d_{ml}	[۱۷۰،۵۰]	FT_{mr}	[۳۰۰،۱۲۰۰]
V_r	[۵۰،۴۰]	d_{ln}	[۲۰۰،۲۰]	FT_{ml}	[۱۲۰۰،۳۰۰]
V_{pn}	[۲۰۰،۴۰]	$\tilde{\phi}_r$	[۱۰۰،۶۰۰]	FT_{pln}	[۱۵۰۰،۴۰۰]
ϑ_j	[۵۰۰۰،۳۰۰۰]	π	[۴۰۰،۶۰۰]	$\tilde{\mu}$	[۸۵۰،۱۰۰]
cd_j	[۱،۳]	FC_j	$[۷۱،۹۹] \times ۱۰^۶$	\tilde{A}_m	[۱۰۰۰،۴۰۰]
co_m	[۶،۵]	FC_m	$[۸۷،۱۰۶] \times ۱۰^۶$	\tilde{A}_j	[۱۰۸۵۰، ۱۹۴۵۰]
os_m	[۱،۱/۵]	FS_m	$[۵۰،۷۰] \times ۱۰^۶$	\tilde{A}_l	[۱۰۰۰،۴۵۰]
opp	[۷۰،۲۰]	FC_l	$[۱۶۸] \times ۱۰^۸$	\tilde{S}_{pn}	[۱۰۰،۳۵۰]
d_{jm}	[۲۰،۳۰۰]	FC_n	$[۱۰،۵۰] \times ۱۰^۶$	$\tilde{\Lambda}_{pl}$	[۲۰۰،۵۰]
d_{mr}	[۴۰۰۰،۱۰۰۰]	FT_{jm}	[۳۰۰،۱۲۰۰]	$\tilde{\Gamma}$	[۶۵۰،۳۶۵]

جدول ۸. ابعاد مسائل نمونه

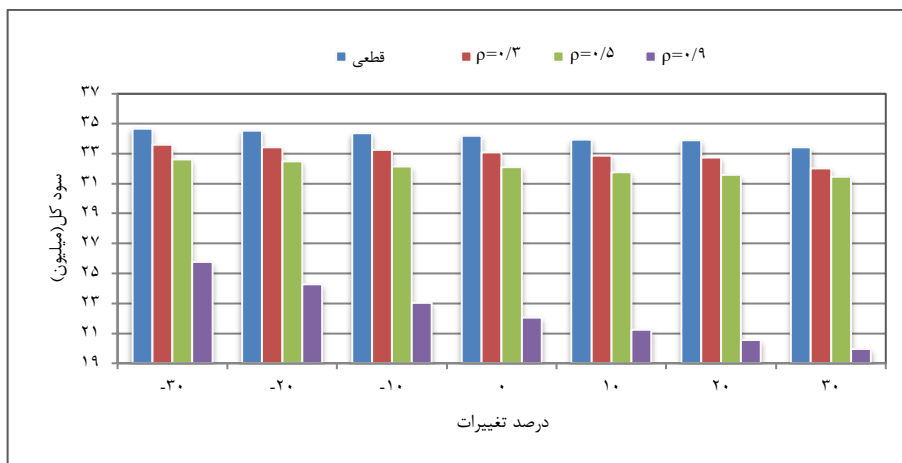
مسئله نمونه	مجموعه‌ها						
	$ J $	$ M $	$ L $	$ R $	$ N $	$ P $	$ O $
۱	۵	۴	۳	۳	۲	۳	۳
۲	۷	۵	۳	۳	۳	۴	۴
۳	۸	۶	۳	۴	۶	۶	۵
۴	۱۰	۸	۵	۶	۸	۸	۶
۵	۱۲	۱۰	۷	۸	۱۰	۱۰	۷
۶	۱۴	۱۲	۹	۱۰	۱۲	۱۲	۸
۷	۱۶	۱۴	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۹
۸	۱۸	۱۶	۱۳	۱۳	۱۵	۱۶	۱۰
۹	۲۰	۱۸	۱۵	۱۵	۱۷	۱۸	۱۱
۱۰	۲۲	۲۰	۱۷	۱۷	۱۹	۲۱	۱۲
۱۱	۲۴	۲۲	۱۹	۱۹	۲۱	۲۴	۱۳

جدول ۹. مقدار تابع هدف در شرایط قطعیت و عدم قطعیت پارامترها/هزار دلار

مسئله نمونه	مقدار تابع هدف در شرایط قطعیت	مقدار تابع هدف در شرایط عدم قطعیت		
		$\rho = 0.3$	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.9$
۱	۲۰۴۶۱	۱۹۲۷۲	۱۸۴۷۲	۱۰۷۵۹
۲	۳۴۲۱۳	۳۳۰۹۸	۳۲۱۰۳	۲۲۰۵۷
۳	۳۶۶۲۳	۳۵۳۵۸	۳۴۱۷۷	۲۴۵۵۶
۴	۴۱۰۳۹	۳۸۷۶۳	۳۶۸۹۱	۲۸۱۶۵
۵	۱۱۵۵۱۸	۱۱۱۱۹۱	۱۰۸۳۳۶	۸۷۷۵۸
۶	۳۶۱۱۰۳	۳۴۸۱۷۹	۳۳۸۳۷۷	۱۹۹۹۴۹
۷	۴۰۱۲۲۰	۳۸۷۱۸۰	۳۷۶۰۸۰	۲۲۵۲۴۳
۸	۴۳۱۳۱۹	۴۱۶۴۷۹	۴۰۳۰۸۷	۲۹۳۸۰۴
۹	۷۶۳۷۱۱	۷۳۶۶۰۵	۷۱۳۱۱۷	۴۷۰۶۲۹
۱۰	۱۱۴۴۳۷۸	۱۱۰۸۰۶۴	۱۰۸۲۸۵۱	۸۰۱۰۴۱
۱۱	۱۶۰۲۶۷۹	۱۵۵۱۸۶۶	۱۵۱۴۴۶۳	۹۵۶۰۳۹

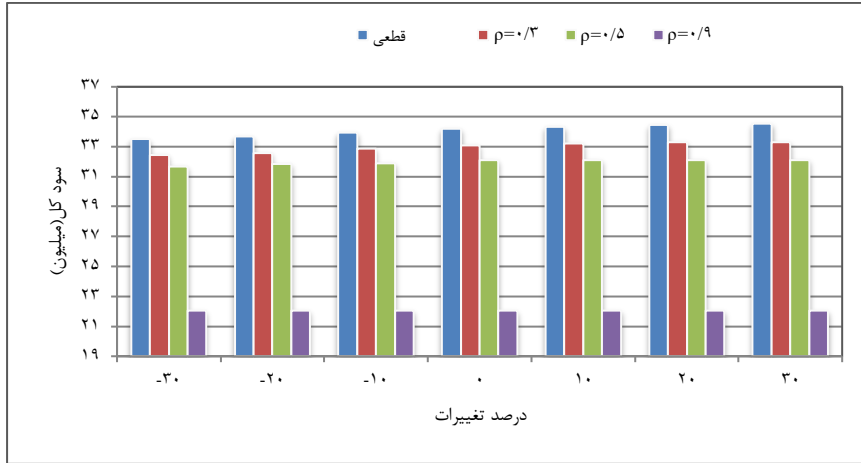
بر اساس نتایج مشخص می‌شود که مدل استوار مقدار محافظه‌کارانه‌ای برای سود کل سیستم زنجیره تأمین نفت ارائه می‌دهد؛ به طوری که سود حاصل در حالت عدم قطعیت پارامترها نسبت به حالت قطعی کمتر است. با افزایش سطح عدم قطعیت، میزان سود زنجیره تأمین نیز کمتر می‌شود. با توجه به اهمیت صنعت نفت در کشور بسیار حائز اهمیت است که میزان سود کل زنجیره تأمین و میزان تولید مشتقات نفتی به شیوه اصولی و درست تخمین زده شود؛ بنابراین، در صورت وجود عدم قطعیت پارامترها، حتماً باید تأثیر عدم قطعیت در مدل لحاظ و بررسی شود تا سیاست‌های اجرایی مناسبی برای برخورد با عدم قطعیت و حفظ سود زنجیره تأمین اتخاذ شود.

تحلیل حساسیت. برای تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی، مسئله نمونه شماره ۲، در نظر گرفته شده است و تأثیر پارامترهای کلیدی زنجیره تأمین نفت نظیر میزان نفت مصرفی برای تولید محصولات پالایشگاهی، میزان ظرفیت حمل‌ونقل، هزینه‌های انتقال نفت، هزینه‌های عملیاتی استخراج نفت، قیمت فروش نفت و قیمت فروش محصولات پالایشگاهی بر سود زنجیره تأمین بررسی شده است. تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات میزان استفاده از نفت برای هر نوع از محصولات پالایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۴. تأثیر پارامتر $\bar{\beta}_p$ بر تابع هدف

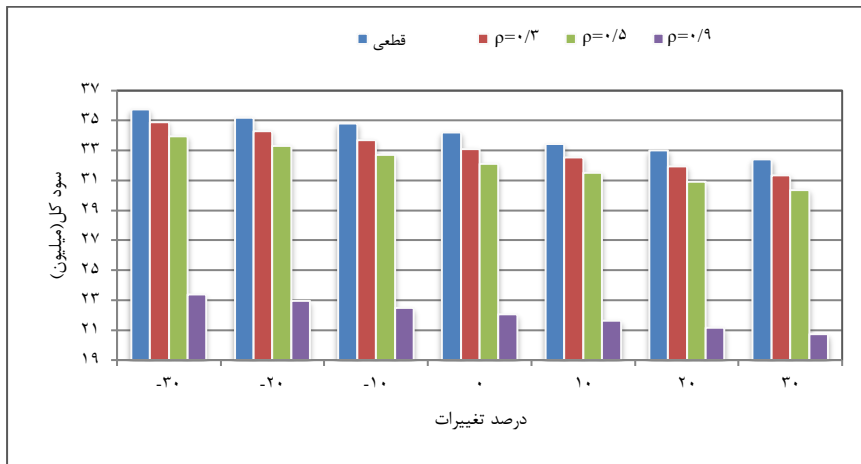
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در اثر کاهش ۳۰ درصدی پارامتر $\bar{\beta}_p$ در هر سه سطح عدم قطعیت، میزان سود کل افزایش یافته است؛ به طوری که میزان افزایش سود برای سطوح عدم قطعیت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۹ به ترتیب برابر با ۱/۴۶، ۱/۵۹ و ۱۶/۸۳ درصد است؛ همچنین با افزایش میزان درصد استفاده از نفت در تولید محصولات پالایشگاهی، میزان سود کل در هر سه سطح عدم قطعیت کاهش یافته است. دلیل کاهش سود، میزان افزایش هزینه‌های سیستم است که می‌توان با برنامه‌ریزی مناسب و نوع نیاز بازار، محصولاتی را تولید کرد که علاوه بر کاهش میزان مصرف نفت منجر به افزایش فروش سودآور شوند.

شکل ۵، تأثیر پارامتر ظرفیت حمل‌ونقل بر تابع هدف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر کاهش این پارامتر، روند تغییرات سود کل کاهشی و در اثر افزایش این پارامتر روند تغییرات سود کل افزایشی است؛ بنابراین باید ظرفیت حمل‌ونقل با استفاده از روش‌های مختلف حمل‌ونقل به صورت صحیح تعیین شود تا سود زنجیره تأمین نفت به میزان زیادی افزایش یابد.



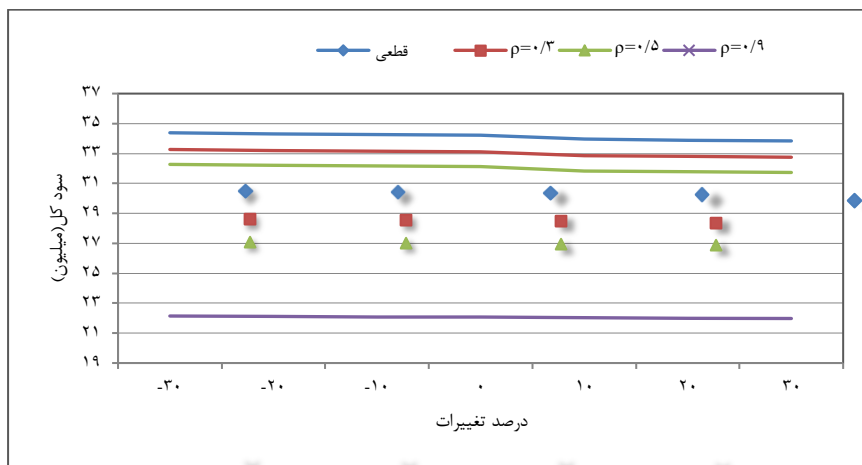
شکل ۵. تاثیر پارامتر λ بر تابع هدف

شکل ۶ نشان دهنده تغییرات تابع هدف نسبت به تغییر پارامتر هزینه انتقال نفت است. با توجه به این شکل می‌توان بیان کرد که با افزایش هزینه حمل‌ونقل، میزان سود کل در هر سه سطح عدم قطعیت کاهش یافته است؛ به گونه‌ای که با افزایش ۳۰ درصدی هزینه حمل‌ونقل در سطوح عدم قطعیت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۹ سود کل به ترتیب به میزان ۵/۵۵، ۵/۷۵ و ۶/۳۴ درصد کاهش یافته است؛ همچنین با کاهش ۳۰ درصدی هزینه حمل‌ونقل، مقدار سود کل به بیشترین مقدار ممکن خواهد رسید. به دلیل اهمیت پارامتر هزینه حمل‌ونقل باید برنامه‌ریزی مناسبی در انتخاب روش‌های مختلف حمل‌ونقل نفت و محصولات نفتی از طریق خطوط لوله، حمل‌ونقل جاده‌ای، ریلی و دریایی صورت گیرد تا با کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، سود زنجیره تأمین به میزان زیادی افزایش یابد.



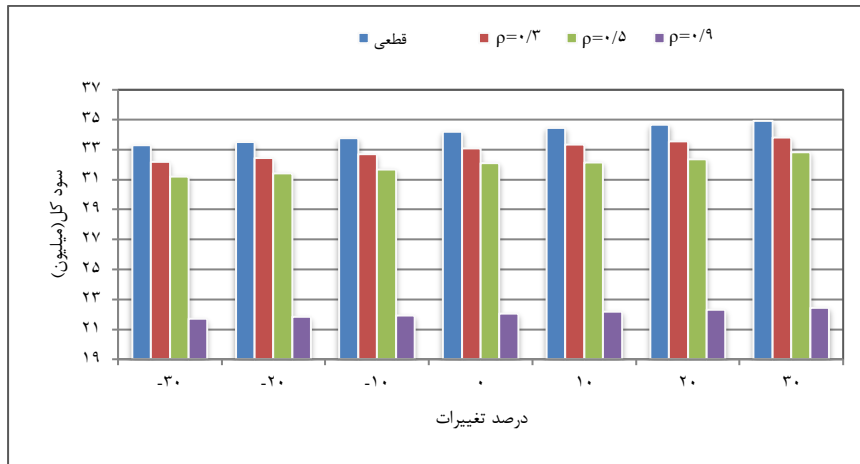
شکل ۶. تاثیر پارامتر λ بر تابع هدف

تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه عملیاتی استخراج نفت در شکل ۷، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، افزایش هزینه‌های استخراج موجب کاهش سود کل می‌شود؛ بنابراین طراحان و تصمیم‌گیرندگان زنجیره تأمین نفت باید با توجه به عدم قطعیت و هزینه‌های عملیاتی استخراج نفت، تصمیمات بهینه مربوط به استخراج و تأمین نیازهای بازار را اتخاذ کنند تا ریسک کل زنجیره تأمین حداقل و سود آن حداکثر شود.

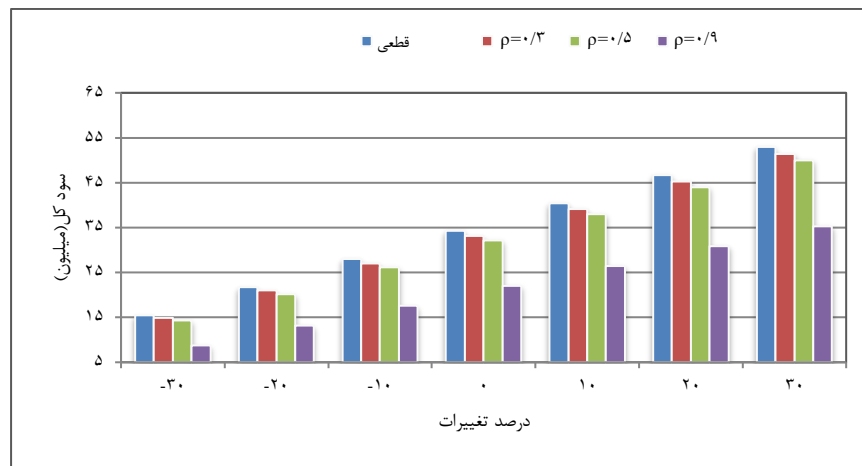


شکل ۷. تأثیر پارامتر cd_j بر تابع هدف

شکل ۸، تأثیر پارامتر قیمت فروش نفت خام به پالایشگاه‌ها را نشان می‌دهد. در اثر کاهش این پارامتر، روند تغییرات میزان سود کل زنجیره تأمین به صورت نزولی است. بیشترین کاهش سود در ازای کاهش ۳۰ درصدی این پارامتر مشاهده می‌شود و در اثر آن سود کل برای سطوح عدم قطعیت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۹ به ترتیب ۲/۷۷، ۲/۹۳ و ۱/۶۵ درصد کاهش یافته است. با توجه به اینکه روند تغییرات سود کل در اثر افزایش پارامتر V_1 به صورت صعودی است، می‌توان گفت که قیمت فروش تأثیر بسزایی در سودآوری زنجیره تأمین نفت خام دارد.

شکل ۸. تأثیر پارامتر V_1 بر تابع هدف

شکل ۹، میزان تغییرات تابع هدف نسبت به پارامتر قیمت فروش محصولات پالایشگاهی ذخیره شده در مخازن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ می‌توان گفت که پارامتر V_{pn} تأثیر زیادی بر میزان سود کل دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش ۳۰ درصدی قیمت فروش محصولات پالایشگاهی در سطوح عدم قطعیت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۹، سود کل به ترتیب به میزان ۵۵/۵۸، ۵۵/۰۴ و ۶۰/۱۶ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به روند کاهشی سود کل در اثر کاهش قیمت محصولات، باید طراحان زنجیره تأمین نفت با در نظر گرفتن سطوح قیمت تصمیمات مربوط به تولید محصولات پالایشگاهی را اخذ کنند تا در بلندمدت ریسک ناشی از عدم قطعیت جبران شود.

شکل ۹. تأثیر پارامتر V_{pn} بر تابع هدف

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین نفت خام در سطوح بالادستی و میان‌دستی با هدف بیشینه‌سازی سود با در نظر گرفتن درآمدهای حاصل از فروش نفت خام به بازارهای خارجی و پالایشگاه‌ها و فروش محصولات پالایشگاهی ارائه شد. ملاحظات زیست‌محیطی با محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل در مدل لحاظ شد. در مدل پیشنهادی، محدودیت‌های دنیای واقعی نظیر ظرفیت ارسال، ظرفیت واحدهای بهره‌برداری برای تولید نفت و ذخیره‌سازی و ظرفیت چاه‌ها برای استخراج در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه بسیاری از پارامترهای زنجیره تأمین نفت ماهیت غیرقطعی دارند، عدم قطعیت برخی از پارامترهای سیستم نظیر میزان سرمایه‌گذاری، ظرفیت تولید، میزان ذخیره‌سازی، میزان ارسال و تقاضای محصولات در نظر گرفته شد. برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شد. در پایان کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از مطالعه موردی و مثال‌های عددی بررسی و تحلیل حساسیت سود زنجیره تأمین نیز صورت گرفت. طبق نتایج عددی عدم قطعیت تأثیر بسزایی در سودآوری زنجیره تأمین نفت خام دارد و با تأثیر آن سودآوری سیستم کاهش می‌یابد. این کاهش سود در نتیجه کاهش میزان استخراج نفت، کاهش تولید محصولات پالایشگاهی و کاهش میزان تقاضا است. مدیران و طراحان زنجیره تأمین نفت می‌توانند با مدیریت مناسب عواملی که موجب عدم قطعیت در پارامترها می‌شوند، نظیر عوامل سیاسی و اقتصادی، پیش‌بینی میزان نیاز آینده صنایع مختلف به سوخت‌های فسیلی، تحریم‌ها و سایر عوامل، سودآوری این زنجیره را تضمین کنند.

بر اساس تجزیه و تحلیل حساسیت مدل مشخص شد که قیمت محصولات از عوامل بسیار تأثیرگذار بر سودآوری سیستم است. با توجه به روند کاهشی سود کل در اثر کاهش قیمت محصولات باید تصمیمات مربوط به استخراج نفت و فرآوری آن با توجه به سطوح قیمت نفت در بازارهای ملی و جهانی تعیین شود تا میزان درآمد حاصل از فروش آن، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تولید را در بلندمدت جبران کند. با توجه به تأثیر زیاد پارامترهای هزینه و ظرفیت حمل‌ونقل بر میزان سودآوری باید برنامه‌ریزی مناسبی در انتخاب روش‌های مختلف حمل‌ونقل نفت و محصولات نفتی صورت گیرد تا ضمن کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، سود زنجیره تأمین بیشینه شود.

برای پژوهش‌های آتی می‌توان عدم قطعیت پارامترهای مدل پیشنهادی را با استفاده از دیگر رویکردهای برخورد با عدم قطعیت نظیر برنامه‌ریزی تصادفی و نظریه فازی مهار کرد و نتایج را با رویکرد برنامه‌ریزی استوار مقایسه نمود؛ همچنین می‌توان قیمت فروش نفت را به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفت و با توجه به آن، میزان سود کل زنجیره تأمین نفت را مشخص کرد. بررسی سیاست‌های مختلف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر «طرح تجارت کربن» و

مالیات‌های کربن نیز برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود. در پژوهش حاضر عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی در طراحی زنجیره تأمین لحاظ شد و برای پژوهش‌های آتی تأثیر عوامل اجتماعی نظیر ایجاد مشاغل ثابت و دائم، توسعه اقتصاد منطقه‌ای، میزان رضایتمندی مشتریان نفت و غیره پیشنهاد می‌شود. برای توسعه مدل می‌توان دوره‌های زمانی را نیز در نظر گرفت و میزان برداشت از چاه‌های نفت و سودآوری زنجیره تأمین نفت را در هر دوره زمانی مشخص کرد.

منابع

1. Al-Qahtani, K., Elkamel, A., & Ponnambalam, K. (2008). Robust optimization for petrochemical network design under uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(11), 3912-3919.
2. Amiri, M., Barzegar, M., & Niknamfar, A.M. (2016). An integrated production–distribution planning via a robust set-based optimization approach in a three-level supply chain. *Journal of Industrial Management Perspective*, 23, 9-28. (In Persian)
3. Assis, L.S., Camponogara, E., Menezes, B.C., & Grossmann, I.E. (2019). An MINLP formulation for integrating the operational management of crude oil supply. *Computers and Chemical Engineering*, 123, 110-125.
4. Attia, A.M., Ghaithan, A.M., & Duffuaa, S.O. (2019). A multi-objective optimization model for tactical planning of upstream oil & gas supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, 128, 216-227.
5. Azadeh, A., Shafiee, F., Yazdanparast, R., Heydari, J., & Mohammadi Fathabad, A. (2017). Evolutionary multi-objective optimization of environmental indicators of integrated crude oil supply chain under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 152, 195-311.
6. Barari, S., Agarwal, G., Zhang, W.J., Mahanty, B. & Tiwari, M.K. (2012). A decision framework for the analysis of green supply chain contracts: an evolutionary game approach. *Expert Systems with Applications*, 39, 2965–2976.
7. Beiranvand, H., Ghazanfari, M., Sahebi, H., & Pishvae. M.S. (2018). A robust crude oil supply chain design under uncertain demand and market price: A case study. *Oil & Gas Science and Technology*, 73, 66.
8. Ben-Tal, A., El-Ghaoui, L., & Nemirovski, A. (2009). Robust optimization, Princeton university press.
9. Boschetto, S.N., Felizari, L.C., Yamamoto, L., Magatão, L., Stebel, S. L., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Lüders, R., Ribas, P.C., & Bernardo, L.F.G. (2008). An integrated framework for operational scheduling of a real-world pipeline network. *Computer Aided Chemical Engineering*, 25, 259-264.
10. Brink, J., & Marx, S. (2013). Harvesting of Hartbeespoort Dam micro-algal biomass through sand filtration and solar drying. *Fuel*, 106, 67-71.
11. Carneiro, M.C., Ribas, G.P., & Hamacher, S. (2010). Risk management in the oil supply chain: a CVaR approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(7), 3286-3294.
12. Chang, C.T., & Chang, C.C. (2000). A linearization method for mixed 0–1 polynomial programs. *Computers & Operations Research*, 27(10), 1005-1016.
13. Daryanto, Y., Wee, H.M., & Astanti, R.D. (2019) Three-echelon supply chain model considering carbon emission and item deterioration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 368–383.
14. Emadabadi, A.A., Teimoury, E. & Pishvae, M.S. (2019). Design of multi-periodical and multi-product supply chain network with regard to disruption of facilities and communication paths(Case study: subscription plan for publications). *Journal of Industrial Management Perspective*, 35, 135-163. (In Persian)
15. Farahani, M., & Rahmani, D. (2017). Production and distribution planning in petroleum supply chains regarding the impacts of gas injection and swap. *Energy*, 141, 991-1003.

16. Feizollahi, S., Soltanpanah, H., Farughi, H., & Rahimzadeh, A. (2019). Development of multi objective multi period closed-loop supply chain network model considering uncertain demand and capacity. *Journal of Industrial Management Perspective*, 32, 61-95. (In Persian)
17. Fuselli, D., Angelis, F., Boaro, M., Squartini, S., Wei, Q., Liu, D., & Piazza, F. (2013). Action dependent heuristic dynamic programming for home energy resource scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 48, 148-160.
18. Ghaithan, A.M., Attia, A., & Duffuaa, S.O. (2017). Multi-objective Optimization Model for a Downstream Oil and Gas Supply Chain. *Applied Mathematical Modelling*, 52, 689-708.
19. Gupta, V., & Grossmann, I.E. (2012). An efficient multiperiod MINLP model for optimal planning of offshore oil and gas field infrastructure. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(19), 6823-6840.
20. Habibi, A., Delshad, M. & Bastami, A. (2009). Investigating the activities of oil engineering in the field of nanotechnology. *Nanotechnology*, 10(147), 12-15. (In Persian)
21. Hasani, A., Zegordi, S.H., & Nikbakhsh, E. (2012). Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4649-4669.
22. Herran, A., De la Cruz, J., & De Andres, B. (2010). A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. *Computers & Chemical Engineering*, 34(3), 401-413.
23. Ho, C. (1989). Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. *International Journal of Production Research*, 27, 1115-1135.
24. Lima, C., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A.P.F.D. (2016). Downstream oil supply chain management: A critical review and future directions. *Computers & Chemical Engineering*, 92, 78-92.
25. Lima, C., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. (2017). Stochastic programming approach for the optimal tactical planning of the downstream oil supply chain. *Computers & Chemical Engineering*, 108, 314-336.
26. Manouchehri, S., Tajdin, A. & Shirazi, B. (2019). Robust integrated optimization for green closed loop supply chain. *Journal of Industrial Management Perspective*, 35, 55-85. (In Persian)
27. Mirhosseini, M., Sharifi, F., & Sedaghat, A. (2011). Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 449-459.
28. Mohammed, F., Selim, S.Z., Hassan, A., & Syed, M.N. (2017). Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 146-172.
29. Oliveira, F., Gupta, V., Hamacher, S., & Grossmann, I.E. (2013). A Lagrangean decomposition approach for oil supply chain investment planning under uncertainty with risk considerations. *Computers & Chemical Engineering*, 50, 184-195.
30. Oliveira, F., Grossmann, I.E., & Hamacher, S. (2014). Accelerating benders stochastic decomposition for the optimization under uncertainty of the petroleum product supply chain. *Computers & Operations Research*, 49, 47-58.
31. Papi, A., Pishvaei, M.S., Jabbarzadeh, A. & Ghaderi, S.F. (2018). Optimal crude oil supply chain planning and oilfield development under uncertainty: Case study of

- the National Iranian South Oil Company. *Quarterly Energy Economics Review*, 58, 27-64. (In Persian)
32. Pishvaei, M.S., Rabbani, M., & Torabi, S.A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637-649.
33. Ribas, G.P., Hamacher, S., & Street, A. (2010). Optimization under uncertainty of the integrated oil supply chain using stochastic and robust programming. *International Transaction in Operational Research*, 17(6), 777-796.
34. Sahebi, H., Nickel, S., & Ashayeri, J. (2014). Environmentally conscious design of upstream crude oil supply chain. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(28), 11501-11511.
35. Tarhan, B., Grossmann, I.E., & Goel, V. (2009). Stochastic programming approach for the planning of offshore oil or gas field infrastructure under decision-dependent uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(6), 3078-3097.
36. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., & Baboli, A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6), 1152-1168.
37. Wang, B., Liang, Y., Zheng, T., Yuan, M., & Zhang, H. (2019). Optimisation of a downstream oil supply chain with new pipeline route planning. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 300-313.
38. Yuan, M., Zhang, H., Wang, B., Huang, L., Fang, K., & Liang, Y. (2020). Downstream oil supply security in China: Policy implications from quantifying the impact of oil import disruption. *Energy Policy*, 136, 111077.
39. Zhou, X., Zhang, H., Xin, S., Yan, Y., Long, Y., Yuan, M., & Liang, Y. (2020). Future scenario of China's downstream oil supply chain: Low carbon-oriented optimization for the design of planned multi-product pipelines. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118866.
40. www.nisoc.ir
41. www.ikorc.ir
42. <https://niordc.ir/index.aspx?pageid=455&p=1>
43. www.abadan-ref.ir