فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال پانزدهم / شماره ۶۳/ زمستان ۱۳۹۸/ صفحات ۲۰۷-۱۷۳

ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار چنددوره‌ای برای برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی

محمود احمدی آذر
دانشجوی دکتری مدیریت تولید و عملیات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،
m.ahmadiazar@yahoo.com

بهروز دری[۱]
استاد گروه مدیریت صنایع، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ber_dorri@yahoo.com

اکبر عالم تبریز
استاد گروه مدیریت صنایع، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، a-tabriz@sbu.ac.ir

مسعود کسایی
استادیار گروه مدیریت صنایع، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،
massoudkass@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۴

چکیده

مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه در صنعت پتروشیمی موجب کسب منافع اقتصادی فراوان و همچنین رونق صنایع وابسته می‌گردد. در این تحقیق، برنامه‌ریزی فنی و عملیاتی در شبکه زنجیره عرضه محصولات پتروشیمی مورد بررسی قرار می‌گیرد و به نحوه اخذ تصمیمات دوره‌ای همچون موجودی مواد اولیه و محصولات، قیمت‌گذاری، حمل‌ونقل و جریان مواد و محصولات به‌صورت بهینه پرداخته می‌شود. برای این منظور یک مدل بهینه‌سازی ریاضی چنددوره‌ای جدید ارائه می‌شود که با استفاده از آن می‌توان تصمیمات مذکور در صنعت پتروشیمی را مدیریت کرد. مدل پیشنهادی، به عدم قطعیت پارامترها با رویکرد برنامه‌ریزی استوار مواجهه می‌شود تا پاسخ ارائه شده از ریسک کمتری برخوردار باشد. تابع هدف مدل پیشنهادی بیشینه‌سازی سود سالانه مجتمع‌های پتروشیمی است، به‌طوری‌که قیودی از جمله محدودیت ظرفیت تسهیلات تولید و حمل‌ونقل ارضاء شود. مدل پیشنهادی، پیوسته و قابل تبدیل به یک مسئله کوادراتیک محدب است، لذا حل بهینه آن توسط سالورهای تجاری از جمله CPLEX امکان‌پذیر است. به‌منظور نمایش کاربردپذیری مدل، در بخش پایانی تحقیق به یک مطالعه عددی پرداخته شده است و مبتنی بر آن چند تحلیل حساسیت انجام شده و نتایج عددی و بینش مدیریتی ارائه شده است.

طبقه‌بندی JEL: C02، C61، L11، Q41

کلید واژه‌ها: زنجیره تأمین صنعت پتروشیمی، بهینه‌سازی چنددوره‌ای، موجودی، قیمت‌گذاری، عدم‌قطعیت، برنامه‌ریزی استوار

---

۱. نویسنده مسئول

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

۱- مقدمه

صنعت پتروشیمی بخشی از صنایع شیمیایی است که مواد خامی همچون نفت‌خام و گازطبیعی را به‌منظور تولید مواد پتروشیمی اولیه مانند متانول، اتانول، بنزن و... فرآوری می‌کند. که پس از تبدیل به مواد پتروشیمی ثانویه و موادی همچون ونیل کلورایـد، استیک اسید، استرین و ... از آن‌ها استخراج شده و نهایتاً به محصولاتی همچون کاغذ، محصولات پلاستیکی و فیبر تبدیل می‌شوند که مواد اساسی تولیدات روزانه محصولات مصرفی را شکل می‌دهند. شکل ۱ زنجیره تأمین محصولات پتروشمی را نشان می‌دهد. صنایع پتروشیمی اثرات قابل توجهی بر اقتصاد یک کشور داشته و به‌عنوان صنعت مادر در هر کشور شناخته می‌شوند؛ چرا که خروجی آن‌ها تأمین‌کننده اصلی مواد مصرفی مورد نیاز، در بیشتر صنایع اعم از صنایع شیمیایی، الکترونیک، نساجی، پزشکی، خودروسازی، لوازم خانگی و ... خواهد بود (کادامبر و کوتچا[1]، ۲۰۱۵).

محصولات پتروشیمی در مجموعه‌ای از شبکه‌های بسیار پیچیده و در مقیاسی بزرگ تولید می‌شوند؛ از این رو محصولات آن‌ها از ارزش‌افزوده بالایی برخوردار می‌باشد و این مسئله یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های صنعت پتروشیمی را شکل می‌دهد (یوون و همکاران[2]، ۲۰۰۸). از دیگر ویژگی‌های این صنعت، تنوع محصولات و تأمین مواد اولیه فراوان کارگاه‌ها و کارخانجات صنایع پایین‌دستی آن می‌باشد که از این منظر نیز نقش بسیار مؤثری را در اشتغال‌زایی و کسب درآمد ارزی ایفا می‌کند. تخمین زده می‌شود این صنعت که امروزه تبدیل به بخش داخلی حوزه تولید شده است، به ارزش جهانی معادل با ۶۰۰ بیلیون دلار دست یابد (فارِس و آمِر[3]، ۲۰۰۲).

شرکت‌های پتروشیمی عموماً سازمان‌های چندملیتی جهانی هستند که در آن‌ها تصمیمات تجاری مرتبط با بخش‌های گوناگون این صنعت در قالب یک شبکه زنجیره تأمین بزرگ اتخاذ می‌گردد. تصمیماتی در ارتباط با منبع‌یابی چندگانه، تولیدات متنوع، توزیع در بازارهای چندگانه، برنامه‌ریزی در دوره‌های زمانی چندگانه و .... این مسئله اهمیت مدیریت کارای زنجیره تأمین و لجستیک را در بهینه‌سازی عملکرد شرکت‌ها در صنایع پتروشیمی، آشکار می‌گرداند؛ زیرا توسعه مطلوب و پایدار در صنایع پتروشیمی

1. Kadambur & Kotecha
2. Yoon et al.,
3. Alfares & Al-Amer

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

در گرو توجه مؤثر بر تمامی حلقه‌های تکمیلی زنجیره تـأمین محصـولات پتروشـیمی و فراهم نمودن زیرساخت‌های عمومی و تخصصی مرتبط با این صنعت می‌باشـد (لبابیـدی و همکاران[1]، ۲۰۱۹).

صنعت پتروشیمی به دلیل آن کـه از حجـم سـرمایه‌گـذاری بـالا، میـزان آلاینـدگی زیست‌محیطی بالا، مصرف انرژی بالا و همچنین سهم بالای مـواد خـام در ارزش سـتاده برخوردار است، نیازمند در فرآیندهای تصمیم‌گیری تولیـد وعرضـه محصـولات نیازمنـد مدیریت بهینه در شبکه زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی می‌باشد. درثانی، لازم است عدم‌قطعیت‌های موجود در ساختار شبکه زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی (از جملـه تقاضا، قیمت، هزینه تأمین مواد اولیه و ...) به دقت مورد توجه قرار گیرد تـا بـا انتخـاب راهکاری مناسب، توسعه آتی صنعت پتروشیمی و بهره‌برداری مؤثرتر از آن، ارزش‌افـزوده بالاتری از تولیدات این صنعت را به همراه آورد.

در حالت کلی، مدیران صنایع پتروشیمی با دو مسئله مهم در مدیریت شبکه زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی مواجه هستند. مسئله اول توجه به تصمیمات اسـتراتژیک و بلندمـدت در صـنعت پتروشـیمی (بـه‌منظـور تحقـق اهـداف اقتصـادی، اجتمـاعی و زیست‌محیطی در بلندمـدت) و مسـئله دوم اهمیـت تصـمیمات عملیـاتی مجتمـع‌هـای پتروشیمی می‌باشد. به عبارت دیگر، در مسئله اول، متغیرهـای تصـمیم‌گیـری همچـون تعیین مکان و ظرفیت مجتمع‌هـای پتروشـیمی و تسـهیلات آنهـا، انتخـاب تکنولـوژی، اشتغال و... باید به گونه‌ای باشد که اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطـی در حـد قابل قبولی تحقق یابند. در مسئله دوم نیز، با فرض اینکه تسهیلات تولید، حمل و نقـل، نگهداری و... همگی با ظرفیت محدود در دسترس هستند، در دوره‌هـای مختلـف (مـثلا ماه‌های سال) باید میزان تولید، موجودی و عرضه محصول به بازار داخلی توسط هر یـک از واحدهای تولید محصولات پتروشیمی تعیین گردد. به‌علاوه با توجـه بـه حجـم تولیـد انجـام گرفتـه و تـأمین تقاضـای داخلـی، ضـمن برنامـه‌ریـزی بـرای صـادرات و واردات محصولات، می‌بایست قیمت صادراتی و حجم واردات نیز تعیین گردد.

یکی از چالش‌های مهم در حل مسائل فوق‌الذکر، موضوع "عـدم‌قطعیـت در داده‌هـا" است. عدم‌قطعیت در سیستم‌های زنجیره تأمین، بـه دو گـروه عـدم قطعیـت محیطـی و

1. Lababidi et al.,

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

عدم قطعیت سیستمی مرتبط می‌باشد. عدم‌قطعیت محیطی به عملکرد عوامل اجرایی زنجیره تأمین مانند تأمین‌کننده و تولیدکننده و عدم قطعیت سیستمی به برخی فرآیندها مانند تولید و توزیع محصولات اشاره دارد (یوسفی-بابادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ لبابیدی و همکاران، ۲۰۱۹). بی‌توجهی به عدم قطعیت داده‌ها (و فقط در نظر گرفتن یک برآورد از میانگین آنها) ممکن است در عمل موجب اتخاذ تصمیماتی گردد که در بسیار از سناریوهای محتمل برای داده‌های غیرقطعی موجه و یا بسیار دور از بهینه باشد. لذا، در حل مسائل مدیریت زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی باید عدم‌قطعیت داده‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد تا ریسک تصمیم‌گیری بر اساس خروجی مدل پیشنهادی کمینه گردد.

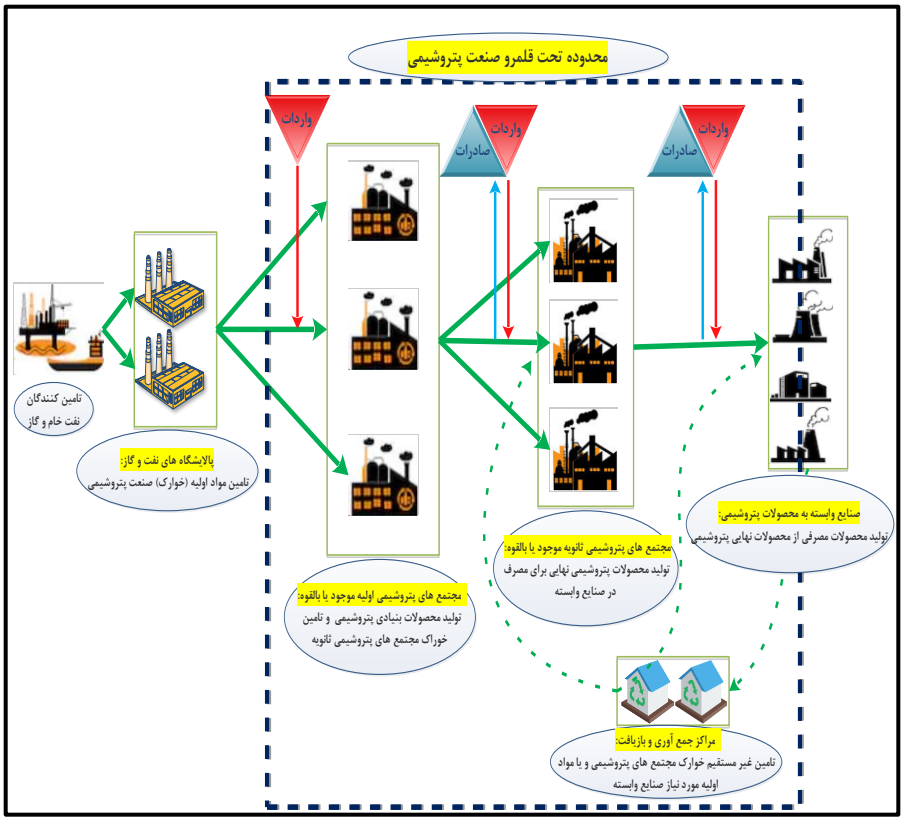
در این تحقیق، یک مدل بهینه‌سازی چنددوره‌ای جهت برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات عملیاتی و دوره‌ای تولید، موجودی، قیمت‌گذاری و لجستیک در شبکه زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی ارائه می‌گردد. در این مدل مقدار تولید، سطح موجودی، میزان کمبود، قیمت صادرات و سایر متغیرهای عملیاتی در برنامه‌ریزی دوره‌ای (مثلا ماه‌های سال) مجتمع‌های پتروشیمی به‌صورت بهینه به‌دست آورده می‌شود، به‌طوری‌که پاسخ به‌دست آمده تحت شرایط عدم‌قطعیت استوار باشد.

از مجموعه نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: در این تحقیق برای نخستین بار یک مدل بهینه‌سازی کوادراتیک محدب (قابل حل به‌صورت بهینه سراسری) ارائه می‌شود که عمده تصمیمات دوره‌ای مجتمع‌های پتروشیمی از جمله تصمیمات مربوط به موجودی، قیمت محصولات صادراتی و نحوه جریان بهینه مواد اولیه و محصولات را در یک شبکه زنجیره عرضه محصولات پتروشیمی شامل می‌گردد. لحاظ نمودن عدم قطعیت در پارامترهای مسئله و ارائه رویکرد برنامه‌ریزی استوار برای مواجهه با عدم‌قطعیت، دیگر نوآوری این تحقیق است. نهایتاً ارائه یک مطالعه عددی و استخراج نتایج عددی و بینش‌های مدیریتی بر جذابیت این تحقیق افزوده است.

محتوای این تحقیق به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دو پژوهش‌های مرتبط مرور می‌شود. در بخش سه بیان مسئله، مدل‌سازی ورویکردهای استواری پیشنهادی برای مواجهه با عدم قطعیت آورده می‌شود. در بخش چهار، نتایج عددی

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

تحلیل و بررسی و بینش‌های مدیریتی و در بخش پنج نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه می‌شود.



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی

۲- پیشینه پژوهش

همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق عمدتاً برنامه‌ریزی عملیاتی و نحوه اخذ بهینه تصمیمات دوره‌ای زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی مورد توجه است. در ادبیات تحقیق برنامه‌ریزی عملیاتی صنایع پتروشیمی، پژوهش‌ها با اهداف گوناگونی به انجام رسیده‌اند. برخی از تحقیقات گذشته، با توجه به عوامل مختلف موجود در صنایع پتروشیمی شامل (کادامبر و کوتچا، ۲۰۱۵): یکپارچه‌سازی پالایشگاه‌ها و کارخانجات

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

پتروشیمی (قهتانی و همکاران[1]، ۲۰۰۸) ، توسعه فضای کارای کارخانجات پتروشیمی (لیو و همکاران[2]، ۲۰۱۳)، زمان‌بندی کارای مشاغل (لی و همکاران[3]، ۲۰۰۹)، مدیریت زنجیره تأمین بهینه (لبابیدی و همکاران، ۲۰۱۹)، برنامه‌ریزی تولید کارا (فارِس و آمِر، ۲۰۰۲)، ادغام و همکاری‌های مؤثر (یوون و همکاران، ۲۰۰۸) شکل گرفته‌اند. علاوه بر این در مقالات مختلف و با هدف درنظرگیری چالش‌های پیچیده در یک کارخانه پتروشیمی، اهداف متنوعی در بهینه‌سازی صنعت پتروشیمی مدنظر بوده که از جمله این اهداف می‌توان به کمینه‌سازی هزینه کل (رود[4]، ۱۹۷۵)، کمینه‌سازی نیازمندی به مواد خام (استادسر و رود[5]، ۱۹۷۶)، کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی خطرناک (شراه و همکاران[6]، ۲۰۰۱)، بیشینه‌سازی درآمد سالانه (جیمِنز و همکاران[7]، ۱۹۸۲) اشاره نمود.

همچنین از بین نزدیک‌ترین تحقیقات صورت گرفته به اهداف تحقیق حاضر که طی سال‌های اخیر به چاپ رسیده، می‌توان به مقالات زیر اشاره نمود: در تحقیق توسط شولز و همکاران[8] که در سال ۲۰۰۴ انجام گرفته است، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در یک مجتمع پتروشیمی (شامل انواع کارخانجات فرآوری گاز مایع طبیعی، کارخانجات اتیلن، PVC و غیره) در قالب یک مدل برنامه‌نویسی غیرخطی عددصحیح آمیخته توسعه یافته است که در آن تدارکات مواد خام، تحویل محصول، مدیریت موجودی و تصمیماتی مانند سطح تولید مجزا برای هر محصول و همچنین شرایط عملیاتی برای هر کارخانه در مجتمع پتروشیمی مدل‌سازی شده است.

سالما و همکاران[9] (۲۰۰۷) مدلی احتمالی را برای شبکه‌های معکوس چند محصولی تحت عدم قطعیت‌های تقاضا، هزینه‌های حمل‌ونقل و تعداد محصولات مرجوعی با استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی عدد صحیح آمیخته ارائه داده‌اند.

1. Al-Qahtani et al.
2. Liu et al.
3. Lee et al.
4. Rudd
5. Stadtherr & Rudd
6. Al-Sharrah et al.
7. Jiménez et al.
8. Schulz et al.
9. Salema et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

آزاده و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعات خود به ارائه مدل برنامه نویسی چند هدفه فازی خطی جهت بهینه‌سازی زنجیره عرضه گازطبیعی از طریق یک رویکرد کاهش گازهای گلخانه‌ای، پرداخته‌اند. در این مدل، برای مقابله با عدم قطعیت، پارامترهای مشکل (از جمله تقاضا، ظرفیت و هزینه) به عنوان پارامترهای فازی در نظر گرفته شده‌اند. مسئله با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده و سپس تجزیه و تحلیل حساسیت بر پارامترهای آن انجام گشته است. همچنین در مقاله‌های کادامبر و کوتدها در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ فرمولی که قبلاً توسط فارِس و آمِر در سال ۲۰۰۲ جهت راهنمایی صنایع پتروشیمی در عربستان سعودی مدل‌سازی شده بود، بازنگری و محدودیت‌های آن مورد بحث قرار گرفته است. آنها در مقاله‌های خود به ترتیب یک "الگوریتم تکاملی" و "برنامه نویسی ریاضی" را جایگزین مدل ارائه شده قبلی کردند. از مزایای مدل‌های آن‌ها می‌توان به تعیین برنامه‌های تولید بهتر با سود بالاتر و عمومی بودن آن در استفاده به‌منظور تعیین برنامه تولید در سطوح چندگانه صنایع گوناگون اشاره نمود.

بهنامیان و متقی (۲۰۱۶) در مقاله خود به شناسایی مقتضیات لازم جهت دستیابی به مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنعت پتروشیمی پرداخته و با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و میانگین موزون مهم‌ترین اولویت‌ها و اقدامات لازم را ارائه کرده‌اند.

هلبیگ و همکاران[1] (۲۰۱۶) در مقاله خود با استفاده از روش ارزیابی پایداری چرخه عمر، به توسعه روش‌های ارزیابی ریسک عرضه ژئوپلتیک در زنجیره‌های تأمین پتروشیمی پرداخته و دریافتند که فاکتورهای ریسک عرضه ژئوپلتیک می‌تواند اطلاعات بیشتری را به چارچوب‌های ارزیابی زیست‌محیطی تصمیمات، در زنجیره‌های تأمین پتروشیمی فرامنطقه‌ای که اهداف پایداری را دنبال می‌کنند، اضافه نماید.

در مقاله بوتث و همکاران[2] (۲۰۱۷) تأثیر همکاری تأمین کننده و خریدار در تاب‌آوری یک زنجیره تأمین پتروشیمی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج در مقاله

1. Helbig et al.
2. Botes et al.,

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

نشان می‌دهد که همکاری بین تأمین کننده- خریدار به‌طور مستقیم منجر به تاب آوری زنجیره تأمین نمی‌شود، اما می‌تواند زمینه تاب آوری زنجیره تأمین را فراهم نماید.

یک مدل برنامه نویسی غیرخطی عدد صحیح آمیخته جهت بهینه‌سازی همزمان در دو بخش بالادستی و میانی زنجیره تأمین عرضه نفت‌خام توسط آزاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ ارائه شده است. تصمیمات بهینه در ساختار این مدل چندمحصولی و چند دوره‌ای، حول توسعه میادین نفتی، تبدیلات، حمل و نقل و توزیع اتخاذ شده است.

دی وارگاس مورس و همکاران[1] (۲۰۱۸) در مقاله خود به تحلیل فرآیندهای جدیدی پراختند که بتوان با تمرکز بر مدیریت زنجیره تأمین پایدار، فرآیند تولید پلاستیک در برزیل را از طریق تولید اتانول از نیشکر جایگزین تولید با منابع تجدیدناپذیر (تولید از نفتا) کرد.

در مقاله سیوی و همکاران[2] (۲۰۱۸) یک مدل ریاضی چند هدفه چند دوره‌ایی ارائه شده است که بهینه‌سازی برنامه‌ریزی استراتژیک در سطوح بالادستی، میانی و پایین دستی زنجیره‌های تأمین نفت و پتروشیمی را دنبال می‌کند. در این مقاله به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی میزان تولید نفت‌خام، رفتار مخازن نفتی غیرخطی فرض شده و مسئله با در نظرگیری تأثیرات زیست‌محیطی بر تولید زنجیره تأمین نفت و پتروشیمی مدل‌سازی شده است.

پاپی و همکاران (۱۳۹۷) با هدف بهینه‌سازی فعالیت‌های بخش بالادستی در زنجیره تأمین نفت‌خام یک مدل ریاضی چند دوره‌ای ارائه نمودند که هدف آن شبیه‌سازی سود حاصل از تولید و فروش نفت‌خام از طریق مدل‌سازی تصمیمات در سطوح استراتژیک و عملیاتی است.

محسنی و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله خود به شناسایی و تحلیل اقدامات مؤثر بر پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تأمین پایدار در صنعت پتروشیمی ایران پرداخته‌اند. در این مقاله هدف از مطالعه صنعت پتروشیمی ایران، بهبود عملکرد زنجیره تأمین و افزایش رقابت‌پذیری آن تعریف شده است. نتایج تحقیق نشان داد که اقدامات تولید به هنگام، می‌تواند اهداف تعیین شده در مسئله مورد بررسی را بهبود بخشد. در تحقیق ارائه شده

1. de Vargas Mores et al.,
2. Siwi et al.,

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

توسط لبابیدی و همکاران[1] (۲۰۱۹) یک مدل بهینه‌سازی برای زنجیره تأمین یک شرکت پتروشیمی تحت شرایط عدم قطعیت عملیاتی و اقتصادی توسعه یافته است. تابع هدف پیشنهادی در این مقاله کمینه‌سازی هزینه تولید کل، تدارکات مواد خام، تقاضای از بین رفته، پس افت، حمل‌ونقل و جریمه‌های ذخیره‌سازی است. همچنین عدم قطعیت مدنظر در این مقاله حول تقاضا، قیمت‌های بازار، هزینه‌های مواد خام و بازده‌های تولید تعریف شده است.

از جمله نوآوری‌های مقاله حاضر نسبت به پژوهش‌های شده این است که برای نخستین بار یک مدل جدید بهینه‌سازی استوار چنددوره‌ای برای برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات موجودی، قیمت‌گذاری و لجستیک در شبکه زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه می‌شود. همچنین لحاظ نمودن عدم قطعیت در پارامترهای مسئله و ارائه رویکرد برنامه‌ریزی استوار برای مواجهه با عدم‌قطعیت بر ارزش مدل و رویکرد حل پیشنهادی افزوده است.

۳- تبیین مسئله، مدل‌سازی و حل

در این بخش، نخست مسئله مورد نظر تحقیق به‌طور کامل تشریح شده و سپس مدل و رویکرد حل تحقیق ارائه می‌شود.

بیان مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات دوره‌ای زنجیره محصولات پتروشیمی

در تبیین مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات دوره‌ای زنجیره محصولات پتروشیمی (از این پس به اختصار مسئله (PSC_PD[2]) یک یا چند مجتمع پتروشیمی در نظر گرفته می‌شود که دربرگیرنده واحدهای تولید، نظارت، بسته‌بندی، انبار، حمل و نقل و ... هستند و در تولید و عرضه محصولات پتروشیمی برای تأمین تقاضای داخلی و یا صادرات فعالیت می‌کنند. فرض می‌شود که در زنجیره تأمین، ظرفیت، تکنولوژی و سایر ویژگی‌های تسهیلات تولید، نگهداری و ... مشخص هستند. تقاضای مشتریان در

1. Libabadi et al.
2. Petrochemical Supply Chain Periodic Pecitions

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

دوره‌های مختلف یکسان نیست. به‌عنوان مثال، اگر تقاضای کل برای محصولی ۱۲۰۰ واحد در سال باشد و دوره‌ها را ماهانه در نظر بگیریم، آنگاه لزوماً نرخ تقاضای ماهانه ۱۰۰ واحد نیست و ممکن است که تقاضا در ماه فرودین ۵۰ واحد و در اردیبهشت ماه بیش از ۱۵۰ واحد باشد. تقاضا در دوره‌های مختلف نوسان دارد و غیرقطعی است.

محصولات تولید زنجیره تأمین در مسئله PSC_PD مورد نظر به بازار داخلی عرضه و یا به بازار خارجی صادر می‌شود. قیمت عرضه محصول به بازار داخلی از قبل مشخص شده است، اما برای قیمت صادرات محصول می‌توان تصمیم‌گیری کرد. نکته حائز اهمیت آن است که تقاضای صادراتی وابسته به قیمت است (هرچه قیمت کمتر باشد، تقاضای صادراتی بیشتر می‌شود و بازارهای خارجی نیز بیشتر مایل به خرید محصول از این زنجیره تأمین می‌شوند). یک رابطه خطی با شیب منفی (y=a-bx) برای بیان رابطه تقاضای صادراتی و قیمت هر محصول در نظر گرفته می‌شود.

ظرفیت محدود تسهیلات مجتمع‌های پتروشیمی در هر دوره از یک سوء و نوسانات مقدار تقاضای داخلی و صادراتی از سوی دیگر، موجب ایجاد که یک چالش مدیریتی می‌شود که در پی برنامه‌ریزی عملیاتی بهینه برای تعیین متغیرهای دوره‌ای مانند مقدار تولید در هر دوره، مقدار موجودی در هر دوره، قیمت‌گذاری محصول برای صادرات، جریان محصول بین تسهیلات در هر دوره، مقدار تأمین تقاضای داخلی و کمبود در هر دوره است.

یک نمونه خیلی مهم از این مسئله، زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی پلیمری است که در آن چند نوع محصول پتروشیمی پلیمری بنیادی (مثل اتیلن) و یا نهایی (مثل گریدهای مختلف پلی اتیلن و ...) تولید و به بازار داخلی و خارجی عرضه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، در مسئله PSC_PD مورد نظر این تحقیق، مواد اولیه (نفتا، گاز اتان، کاتالیست‌ها و ...) در هر دوره به مقدار محدودی قابل سفارش‌دهی است. براساس مواد اولیه دریافتی و ظرفیت تسهیلات تولید، در هر دوره مقدار محدودی محصولات پتروشیمی بنیادی، تولید می‌شود که یا به مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه (برای تولید محصولات پتروشیمی نهایی) ارسال می‌شود یا صادر می‌شود و یا در واحد انبار نگهداری می‌شود و دوره‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور مشابه، با توجه به خوراک دریافتی مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه و در

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

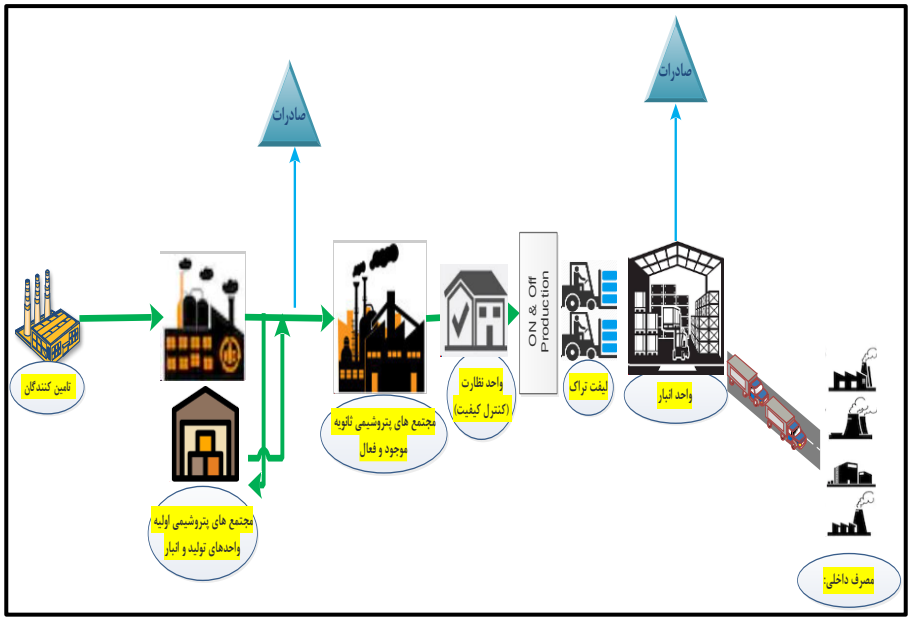
نظـر گـرفتن ظرفیـت محـدود واحـد تولیـد، در هـر دوره مقـدار محـدودی محصـولات پتروشیمی نهایی قابل تولید است که پس از کنترل کیفیت، بسته‌بندی و آماده‌سازی، یـا در همان دوره به بازار داخلی عرضه می‌شود یا صادر می‌شود و یا در واحد انبار نگهـداری و برای جبران کمبود در دوره‌های آتی ذخیره می‌شود.

در مسئله PSC_PD مورد نظر این تحقیق، با توجـه بـه هزینـه تـأمین مـواد اولیـه، هزینـه تولیـد محصـولات بنیـادی، هزینـه تولیـد محصـولات نهـایی، هزینـه نگهـداری محصولات بنیادی یا نهایی در واحدهای انبار، هزینه حمل و نقـل محصـولات بنیـادی از طریق خطوط لوله، هزینه حمل و نقل محصولات نهایی از واحد تولید بـه واحـد انبـار از طریق وسایل نقلیه (لیفت‌تراک و ...)، هزینه/جریمه عدم تأمین تقاضـای داخلـی، قیمـت فروش محصول به بازارهای داخلی و قیمـت‌گـذاری بهینـه بـرای صـادرات و بـا در نظـر گرفتن قیـودی همچـون ظرفیـت محـدود تسـهیلات تولیـد و نگهـداری بایـد در مـورد متغیرهای زیر در هر دوره تصمیم‌گیری شود:

- مقدار بهینه سفارش‌دهی مواد اولیه (خوارک) مجتمع‌های پتروشیمی اولیـه در هـر دوره؟
- مقدار بهینه تولید محصولات پتروشیمی بنیادی در واحدهای تولیـد مجتمـع‌هـای پتروشیمی اولیه در هر دوره؟
- سطح بهینه موجودی محصولات پتروشیمی بنیادی در واحدهای انبار مجتمع‌هـای پتروشیمی اولیه در هر دوره؟
- مقدار بهینـه تولیـد محصـولات پتروشـیمی پلیمـری نهـایی در واحـدهای تولیـد مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در هر دوره؟
- سطح بهینه موجودی محصـولات پتروشـیمی پلیمـری نهـایی در واحـدهای انبـار مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در هر دوره؟
- کمبود برنامه‌ریزی شده زنجیره در تأمین تقاضای داخلی؟
- مقدار حمل و نقل (جریان) محصولات بین تسهیلات زنجیره در هر دوره؟
- قیمت صادرات محصولات پتروشیمی و مقدار صادرات در هر دوره؟

جایی که هدف، بیشینه‌سازی سود فروش محصولات این زنجیره تأمین است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]



شکل ۲. ساختار شبکه در مسئله PSC_PD مورد نظر تحقیق

مهم‌ترین مفروضاتی که در این تحقیق برای حل مسئله PSC_PD در نظر گرفته می‌شود عبارت است از:

- تسهیلات مربوط به مجتمع‌های پتروشیمی (واحدهای تولید، انبار و ...) احداث و مستقر شده‌اند و مکان آنها مشخص است.
- در تأمین خوراک مجتمع‌های پتروشیمی در هر دوره محدودیت وجود دارد.
- خوراک مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه موجود در زنجیره، تأمین می‌شود.
- ظرفیت تولید واحدهای تولید در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و ثانویه در هر دوره محدود است.
- ظرفیت نگهداری (ذخیره‌سازی) در واحدهای انبار مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و ثانویه در هر دوره محدود است.
- ظرفیت تسهیلات (وسایل نقلیه) برای انتقال محصولات نهایی از واحدهای تولید به واحد انبار/توزیع در هر دوره محدود است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

- در هر دوره، درصورتی‌که در تأمین تقاضای بازارهای داخلی کمبود وجود داشته باشد، امکان صادرات وجود ندارد.

- در هر دوره، نرخ محصولات نهایی OFF (تولیداتی که پس از کنترل کیفیت، دقیقاً ویژگی موردنظر را ندارد) برای واحد تولید برآورد شده است. مثلاً بر اساس داده‌های تاریخی پیش‌بینی می‌شود که ۵ درصد محصولات یک واحد تولید از نوع OFF است و تقاضای بازار فقط از ۹۵درصد محصولات این واحد تولید قابل تأمین است تأمین تقاضا فقط از محصولات ON (محصولات که پس از کنترل کیفیت، دقیقا ویژگی موردنظر را دارد) صورت می‌پذیرد.

- هر مقدار از هر محصول OFF با قیمت کمتر به بازار داخلی عرضه می‌شود.

- صادرات از محصولات پتروشیمی بنیادی و فقط نوع ON از محصولات پتروشیمی پلیمری قابل انجام است.

- ذخیره‌سازی از محصولات پتروشیمی بنیادی و فقط نوع ON از محصولات پتروشیمی پلیمری قابل انجام است (با در نظر گرفتن نرخ زوال دوره‌ای).

- درصد مشخصی از تقاضای بازارهای داخلی هر دوره لزوماً باید تأمین گردد.

- قیمت عرضه محصولات پتروشیمی به بازار داخلی از پیش تعیین شده است اما برای صادرات، قیمت‌گذاری انجام می‌شود و تقاضای مشتریان خارجی (مقدار صادرات) وابسته به قیمت است.

- نرخ زوال دوره‌ای برای محصولات پتروشیمی اولیه و ثانویه در نظر گرفته می‌شود.

- کمبود هر دوره به‌صورت فروش از دست رفته است و در دوره بعدی قابل جبران نیست.

فرمولاسیون و مدل‌سازی مسئله

نماد و علائم ریاضی به‌کارگرفته شده در این تحقیق به‌صورت زیر است:

مجموعه و اندیس	
$R^1 = \{1,2,\dots,r,\dots,\lvert R^1\rvert\}$	مجموعه مواد اولیه مورد نیاز برای مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
$P^1 = R^2 = \{1,2,\dots,r,\dots,\lvert R^2\rvert\}$	خوراک مورد نیاز برای تولید محصولات پلیمری (مجموعه تولیدات مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

$P^2 = \{1,2,\dots,p,\dots,\lvert P^2\rvert\}$	مجموعه محصولات پتروشیمی پلیمری که در زنجیره تولید می‌شود
$P = P^1 \cup P^2$	مجموعه محصولات پتروشیمی بنیادی و پلیمری
$F^1 = \{1,2,\dots,f,\dots,\lvert F^1\rvert\}$	مجموعه کارخانه‌های تولید محصولات پتروشیمی بنیادی (فعال)
$F^2 = \{1,2,\dots,f,\dots,\lvert F^2\rvert\}$	مجموعه کارخانه‌های تولید محصولات پتروشیمی (فعال)
$T = \{1,2,\dots,t,\dots,\lvert T\rvert\}$	مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی (مثلا T=12؛ ماه‌های یک سال می‌باشد)
متغیرهای تصمیم‌گیری	
rm_{rft}	مقدار تأمین ماده اولیه r برای واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه در دوره t
x^1_{pft}	مقدار تولید محصول پتروشیمی بنیادی p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه در دوره t
inv^1_{pft}	مقدار موجودی محصول پتروشیمی بنیادی p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه در دوره t
$t^{1\ f^1\to f^2}_{pt}$	مقدار عرضه (حمل و نقل) محصول بنیادی p ($p = r \in R^2$) از واحد تولید f1 از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به واحد تولید f2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در دوره t
x^2_{pft}	مقدار تولید محصول پتروشیمی پلیمری p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در دوره t
sup^{on}_{pft}	مقدار عرضه محصول پلیمری p از واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه به بازار (از نوع ON)
sup^{OFF}_{pt}	مقدار عرضه محصول پلیمری p از همه واحدهای تولیدی به بازار (از نوع OFF)
inv^2_{pft}	مقدار موجودی محصول پتروشیمی پلیمری p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در دوره t
Sl_{pt}	مقدار کمبود محصول پتروشیمی پلیمری p در بازار داخلی در دوره t
ex_{pft}	مقدار صادرات محصول پتروشیمی p از واحد تولید f در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و ثانویه در دوره t
dem^{EX}_{pt}	مقدار صادرات محصول پتروشیمی p از واحد تولید f در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و ثانویه در دوره t

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

$\mathrm{Price}_{\mathrm{pt}}^{\mathrm{EX}}$	قیمت صادرات محصول پتروشیمی p از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و ثانویه در دوره t
پارامترها (همه پارامترهای غیرقطعی هستند)	
$\mathrm{rmc}_{\mathrm{rt}}^{1}$	هزینه واحد تأمین ماده اولیه r برای مجتمع‌های پتروشیمی اولیه در دوره t
$\mathrm{cap}_{\mathrm{rt}}^{\mathrm{S}}$	ظرفیت تأمین (از طریق واردات یا پالایشگاه داخلی) ماده اولیه $r \in R^1$ مورد نیاز مجتمع‌های پتروشیمی اولیه در دوره t
$\mathrm{pc}_{\mathrm{pf}}^{1}$	هزینه واحد تولید محصول بنیادی p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
$\mathrm{tc}_{\mathrm{p}}^{1\,\mathrm{f}^1\to\mathrm{f}^2}$	هزینه واحد حمل و نقل از واحد تولید f1 از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به واحد تولید f2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$\mathrm{pc}_{\mathrm{pf}}^{2}$	هزینه واحد تولید محصول پلیمری p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$\mathrm{clt}_{\mathrm{p}}$	هزینه کنترل/بازبینی و توزیع با لیفت‌تراک محصول پلیمری p از واحدهای تولید به واحدهای انبار در مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$\mathrm{dem}_{\mathrm{pt}}$	تقاضا/نیاز بازار داخلی به محصول پتروشیمی پلیمری p در دور t
μ_{p}	درصدی از تقاضای محصول p که در هر دوره لزوماً باید تأمین گردد.
$\mathrm{rON}_{\mathrm{pf}}$	نرخ ON بودن محصولات p (مطابق با استاندارد تعریف‌شده) در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$\mathrm{rOFF}_{\mathrm{pf}}$	نرخ Off بودن محصولات p (عدم تطابق کامل با استاندارد تعریف‌شده) در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$\mathrm{price}_{\mathrm{pt}}$	قیمت مصوب محصول p برای عرضه به بازار داخلی (برای محصول نوع ON)
ϕ_{p}	ضریب تعدیل کننده قیمت محصولات نوع OFF به محصولات نوع ON
$\mathrm{cap}_{\mathrm{pf}}^{1\mathrm{P}}$	ظرفیت تولید محصول پتروشیمی بنیادی p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه در هر دوره
$\mathrm{cap}_{\mathrm{pf}}^{1\mathrm{Inv}}$	ظرفیت/گنجایش نگهداری/ذخیره‌سازی محصول پتروشیمی بنیادی p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
$\mathrm{cap}_{\mathrm{pf}}^{2\mathrm{P}}$	ظرفیت تولید محصول پتروشیمی پلیمری p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در هر دوره
$\mathrm{cap}_{\mathrm{pf}}^{2\mathrm{Inv}}$	ظرفیت/گنجایش نگهداری/ذخیره‌سازی محصول پتروشیمی پلیمری p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$\mathrm{ic}_{\mathrm{pf}}^{1\mathrm{Inv}}$	هزینه نگهداری/ذخیره‌سازی محصول پتروشیمی بنیادی p در واحد تولید f از

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

	مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
ic_{pf}^{2Inv}	هزینه نگهداری/ذخیره‌سازی محصول پتروشیمی پلیمری p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
ξ_p	نرخ زوال محصول پتروشیمی p در هر دوره
$cap^{T^{f^1 \to f^2}}$	ظرفیت حمل و نقل برای عرضه محصولات پتروشیمی بنیادی از واحد تولید f1 از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به واحد تولید f2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در هر دوره
a_{pt}	عرض از مبدأ در رابطه تقاضا-قیمت محصول پتروشیمی p در دوره t برای صادرات
b_{pt}	شیب (کشش) در رابطه تقاضا-قیمت محصول پتروشیمی p در دوره t برای صادرات

(۱)

$$\max Z = \left[\sum_t \sum_{p\in P} dem_{pt}^{EX}.Price_{pt}^{EX} + \sum_t \sum_{p\in P^2} price_{pt}\left[\left(dem_{pt} - Sl_{pt}\right) + \emptyset_p.sup_{pt}^{off}\right]\right] - \left(\left[\sum_r \sum_f \sum_t rmc_r^1 . rm_{rft}^1\right] + \left[\sum_{p\in P^1=R^2} \sum_{f\in F^1} \sum_t pc_{pf}^1.x_{pft}^1 + \sum_{p\in P^2} \sum_{f\in F^2} \sum_t pc_{pf}^2.x_{pft}^2\right] + \left[\sum_{p\in P^1=R^2} \sum_{f\in F^1} \sum_t ic_{pf}^{1Inv}.inv_{pft}^1 + \sum_{p\in P^2} \sum_{f\in F^2} \sum_t ic_{pf}^{2Inv}.inv_{pft}^2\right] + \left[\sum_{p\in P^1} \sum_{f^1\in F} \sum_{f^2\in F} tc_p^{1\,f^1\to f^2}.t_p^{1\,f^1\to f^2}\right] + \left[\sum_{p\in P^2} \sum_{f\in F^2} \sum_t clt_p.x_{pft}^2\right]\right)$$

رابطه (۱) تابع هدف مدل پیشنهادی برای مسئله PSC_PD است که به بیشینه کردن سود در پایان دوره‌های برنامه‌ریزی اشاره دارد. سود حاصل تفاضل مجموع هزینه‌ها از درآمد است. درآمد عبارت است از مجموع عایدی حاصل از عرضه محصولات پتروشیمی نهایی به بازار داخلی و عایدی حاصل از صادرات محصولات نهایی و اولیه به بازارهای خارجی. لازم به توضیح است که $\emptyset_p < 1$ ضریب تعدیل کننده قیمت

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

محصولات نوع OFF به محصولات نوع ON است. به‌عنوان مثال اگر قیمت محصول ON برابر با ۵۰۰ واحد باشد و ضریب تعدیل برابر با ۰.۹، آنگاه قیمت نوع OFF برابر با ۴۵۰ واحد است. هزینه‌ها از ۵ جزء تشکیل شده است که بر اساس رابطه فوق، جزء اول هزینه تأمین خوراک مجتمع‌های پتروشیمی اولیه را نشان می‌دهد، جزء دوم و سوم به ترتیب هزینه‌های تولید و نگهداری را نشان می‌دهد، در جزء چهارم هزینه حمل نقل محصولات از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به ثانویه لحاظ شده است و نهایتا در جزء پنجم هزینه بازبینی/کنترل و توزیع محصولات پلیمری از طریق لیفتراک به انبار را نشان دهد.

در ادامه محدودیت‌هایی که در تحقق تابع هدف مدل برنامه‌ریزی عملیاتی باید مورد توجه قرار گیرند آورده و توضیح داده می‌شود. این قیود عبارتند از قیود ظرفیت تولید و نگهداری و حمل و نقل، قیود تأمین تقاضا، رابطه تقاضا-قیمت صادراتی، قیود نیاز خوارک/مواد اولیه برای تولید محصولات پتروشیمی پلیمری و سایر قیود.

$$\sum_{f} rm_{rft} \leq cap^{S}_{rt} \; ; \; \forall r \in R^1 , t \in T \qquad (۲)$$

$$x^1_{pft} \leq cap^{1P}_{pf} \; ; \; \forall f \in F^1 , p \in P^1 , t \in T \qquad (۳)$$

$$x^2_{pft} \leq cap^{2P}_{pf} \; ; \; \forall f \in F^2 , p \in P^2 , t \in T \qquad (۴)$$

$$\rho^1_{rp} . x^1_{pft} \leq rm_{rft} \; ; \; \forall r \in R^1 , f \in F^1 , p \in P^1 \qquad (۵)$$

$$\rho^2_{rp} . x^2_{pft} \leq \sum_{f^1 \in F} t^{1\, f^1 \rightarrow f^2}_{rt} \; ; \; \forall r \in R^2 , f \in F^2 , p \in P^2 , t \in T \qquad (۶)$$

$$x^1_{pft} + \xi_p . inv^1_{pft-1} = \sum_{f^2 \in F} t^{1\, f^1 \rightarrow f^2}_{pt} + ex_{pft} + inv^1_{pft}; \; \forall \; f \in F^1 , p \in P^1 , t \in T \qquad (۷)$$

$$rON_{pf}\left(x^2_{pft} + \xi_p . inv^2_{pft-1}\right) = sup^{on}_{pft} + ex_{pft} + inv^2_{pft}; \; \forall \quad f \in F^2 , p \in P^2 , t \in T \qquad (۸)$$

$$\sum_{f \in F^2} sup^{on}_{pft} = dem_{pt} - Sl_{pt}; \; \forall \, p \in p^2 \; , t \in T \qquad (۹)$$

$$sup^{off}_{pt} = \sum_{f^2 \in F} rOFF_{pf} x^2_{pft} \; ; \; \forall \; p \in P^2 , t \in T \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{f \in F^2} sup^{on}_{pft} \geq \mu_p . dem_{pt} \; ; \; \forall \, p \in p^2 \; , t \in T \qquad (۱۱)$$

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

$$\sum_{p} t_{pt}^{1\,f^1\to f^2} \le cap^{T^{f^1\to f^2}};\ \forall\ f^1, f^2 \in F, t \in T \qquad (۱۲)$$

$$inv_{pft}^{1} \le cap_{pf}^{1Inv};\ \forall\quad f \in F^1, p \in P^1, t \in T \qquad (۱۳)$$

$$inv_{pft}^{2} \le cap_{pf}^{2Inv};\ \forall\quad f \in F^2, p \in P^2, t \in T \qquad (۱۴)$$

$$dem_{pt}^{EX} = \alpha_{pt} - \beta_{pt}.Price_{pt}^{EX};\ \forall\quad p \in P^2, t \in T \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{f} ex_{pft} = dem_{pt}^{EX};\ \forall\quad p \in P^2, t \in T \qquad (۱۶)$$

$$\text{if } Sl_{pt} > 0 \Longrightarrow \sum_{f} ex_{pft} = 0;\ \forall\quad p \in P^2, t \in T \qquad (۱۷)$$

$$k_{pt} \ge \frac{Sl_{pt}}{M};\ \forall\quad p \in P^2, t \in T \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{f} ex_{pft} \le (1 - k_{pt})M;\ \forall\quad p \in P^2, t \in T \qquad (۱۹)$$

$$rm_{rft}, x_{pft}^{1}, inv_{pft}^{1}, t_{pt}^{1\,f^1\to f^2}, x_{pft}^{2}, sup_{pft}^{on}, sup_{pt}^{OFF}, inv_{pft}^{2}, Sl_{pt}, ex_{pft}, \quad dem_{pt}^{EX}, Price_{pt}^{EX} \ge 0 \qquad (۲۰)$$

در رابطه (۲) قید ظرفیت محدود تأمین خوراک مجتمع‌های پتروشیمی اولیه در هر دوره اعمال می‌شود. رابطه (۳) تضمین می‌کند که در هر دوره مقدار تولید در هر کارخانه تولید از مجتمع‌های پتروشیمی از ظرفیت تولید آن بیشتر نمی‌شود. رابطه (۴) تضمین می‌کند که در هر دوره مقدار تولید در هر کارخانه تولید از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه از ظرفیت تولید آن بیشتر نمی‌شود.

رابطه (۵) به نیاز مواد اولیه برای تولید محصولات پتروشیمی بنیادی در هر کارخانه تولید از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه اشاره دارد. رابطه (۶) به نیاز مواد اولیه برای تولید محصولات پتروشیمی نهایی در هر کارخانه تولید از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه در هر دوره پرداخته است که این خوراک از طریق مجتمع‌های پتروشیمی اولیه تأمین می‌شود.

رابطه (۷) تعادل مقدار تولید، موجودی و عرضه در هر کارخانه تولید از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه را تضمین می‌کند. طبق این رابطه، تولیدات هر مجتمع پتروشیمی اولیه در دوره t و مقدار موجودی باقی‌مانده از دوره قبل، برابر با مجموع عرضه و موجودی دوره t آن است. لازم به ذکر است که عرضه محصولات یا به مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه است و یا صادرات را در بر می‌گیرد. رابطه (۸) تعادل مقدار تولید،

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

موجودی و عرضه در هر کارخانه تولید از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه را تضمین می‌کند. طبق این رابطه، مجموع تولیدات هر مجتمع پتروشیمی ثانویه در هر دوره t و مقدار موجودی باقی‌مانده از دوره قبل، برابر است با مجموع عرضه به بازار داخلی، صادرات و موجودی در پایان آن دوره.

رابطه (۹) به تأمین تقاضای بازار داخلی با عرضه محصولات نوع ON مجتمع‌های پتروشیمی اشاره دارد. در هر دوره، برای هر محصول پتروشیمی پلیمری، مجموع عرضه از طریق مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه برابر است با تقاضای آن دوره منهای کمبود در آن دوره. در رابطه (۱۰) مقدار تولید نوع OFF مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه که فقط قابل عرضه به بازار داخلی است محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است این مقدار قابل صادر یا ذخیره‌سازی نیست و فقط با قیمت کمتر به بازار داخلی عرضه می‌شود. رابطه (۱۱) تضمین می‌کند که در هر دوره حداقل مقدار مشخصی از تقاضای هر محصول در بازار داخلی باید از محصولات نوع ON تأمین گردد.

در رابطه (۱۲)، ظرفیت محدود حمل و نقل از طریق خطوط لوله بین مجتمع‌های پتروشیمی در هر دوره کنترل می‌شود. اگر بین دو واحد تولید خط لوله نصب نشده باشد و مدل دیگر حمل و نقل نیز مقدور نباشد، آنگاه $\mathrm{cap}^{\mathrm{T}^{f^1 \to f^2}} = 0$ و جریان بین این دو واحد تولید اولیه و ثانویه صفر می‌شود. در رابطه (۱۳) و (۱۴)، در هر دوره، ظرفیت/گنجایش نگهداری محصولات در واحدهای انبار مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و ثانویه برای هر محصول کنترل می‌شود.

در رابطه (۱۵)، ارتباط قیمت‌گذاری و تقاضای بازارهای خارجی برای صادرات محصولات آنها در هر دوره آورده می‌شود (تقاضای وابسته به قیمت). یک رابطه خطی با عرض از مبدأ و شیب معین در نظر گرفته شده است که در آن قیمت‌های کمتر تقاضای بیشتری شود و قیمت‌های بیشتر سهم صادرات محصولات به بازارهای خارجی را کاهش می‌دهد. لازم به توضیح است بخش اول تابع هدف به‌صورت $\sum_t \sum_{p\in P} \mathrm{dem}_{pt}^{EX}.\mathrm{Price}_{pt}^{EX}$ است که با جای‌گذاری در آن، مقدار تقاضا از رابطه فوق، رابطه مقعر $\sum_t \sum_{p\in P}(\alpha_{pt}\mathrm{Price}_{pt}^{EX} - \beta_{pt}.\mathrm{Price}_{pt}^{2})$. حاصل می‌شود که یک تابع درجه دوم مقعر است و بهینگی (بیشینه بودن) سراسری حاصل از حل مدل تضمین شده است. رابطه (۱۶) تضمین می‌کند که پس از قیمت‌گذاری و به وجود آمدن تقاضای بازارهای خارجی

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

برای صادر کردن محصول به آنها، صادرات به‌طور کامل باید صورت پذیرد و از طریق مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه محصول مورد نیاز آنها صادر گردد.

رابطه (۱۷) بیان می‌کند که در هر دوره اگر در تأمین تقاضای بازاری داخلی یک محصول با کمبود مواجه شود، آنگاه صادرات آن محصول در آن دوره امکان‌پذیر نیست. این رابطه غیرخطی است. برای خطی‌سازی آن، روابط (۱۸) و (۱۹) به‌کار می‌رود. متغیر باینری k_{pt} به این صورت تعریف می‌شود که اگر $Sl_{pt} > 0$ آنگاه $k_{pt} = 1$؛ و M یک عدد بزرگ است (حداقل به اندازه تقاضای بازار داخلی) در نظر گرفته می‌شود. پس از تعریف متغیر کمکی و رابطه (۱۸)، رابطه خطی (۱۹) جایگزین رابطه غیرخطی (۱۶) می‌شود که واضح است اگر $k_{pt} = 1$ گردد امکان صادرات وجود ندارد، در غیر این صورت صادرات امکان‌پذیر است.

در نهایت، در رابطه (۲۰) متغیرهای مدل برنامه‌ریزی چند دوره‌ای برای مدیریت زنجیره تأمین محصولات صنعت پتروشیمی آورده شده است.

رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت

در مدل PSC_PD پارامترهای مسئله غیرقطعی است. به‌منظور استوارسازی مدل و پاسخ حاصل از حل آن، رویکرد برنامه‌ریزی استوار در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بهینه‌سازی استوار، برای پارامترهای غیرقطعی یک فاصله بسته کران‌دار عدم‌قطعیت در نظر گرفته می‌شود. جواب استوار به گونه‌ای است که در اکثر حالات ممکن برای داده‌ها در فاصله‌های متناظر آنها شدنی است (بن‌تال و همکارانش[1]، ۲۰۰۹). به‌منظور روشن شدن روش مذکور، مسئله بهینه‌سازی غیر قطعی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \min\ z = \sum_{j} a_{.j} x_j + b_. \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j} a_{ij} x_j \le b_i \quad \forall i = ۱,۲,...,m \end{cases} \qquad (۲۱)$$

1. Ben Tal et al.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

که در آن $a_{ij} \in [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ و $b_i \in [b_i^L, b_i^U]$ پارامترهای غیرقطعی هستند که برای آنها فاصله در نظر گرفته می‌شود. حال تعریف می‌کنیم:

$$a_{ij} = a_{ij} + \xi_{ij}.a_{ij} \quad , \quad b_i = b_i + \xi_i.b_i \qquad (۲۲)$$

جایی‌که a_{ij} و b_i مقادیر اسمی داده‌ها و a_{ij} و b_i حداکثر اختلال/ انحراف[1] هر داده از مقدار اسمی هستند که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}^L + a_{ij}^U}{۲} \quad , \quad a_{ij} = a_{ij} - a_{ij}^L \; ; \; b_i = \frac{b_i^L + b_i^U}{۲} \quad , \quad b_i = b_i - b_i^L \qquad (۲۳)$$

با توجه به تعاریف فوق، به‌سادگی می‌توان نشان داد که تغییرات هر پارامتر/داده مدل (۳۰) در فاصله مربوط به آن، معادل با تغییر مقدار ξ متناظر با آن در فاصله $[-۱,۱]$ است. پس از نرمال‌سازی فاصله عدم قطعیت هر داده، می‌توان مدل (۲۱) را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} \min z = \sum_j a_{0j}x_j + b_0 + \sum_j \xi_j . a_{0j}x_j + \xi_0 . b_0 \\ \text{s.t.} \\ \sum_j a_{ij}x_j + \sum_j \xi_{ij} . a_{ij}x_j \le b_i + \xi_i . b_i \quad \forall i = 1,2,...,m \end{cases} \qquad (۲۴)$$

پس از نرمال‌سازی، مدل زیر به‌عنوان همتای استوار[2] مدل غیرقطعی (۲۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \min z = \max_{\xi_j, \xi_0} \left(\sum_j a_{0j}x_j + b_0 + \sum_j \xi_j . a_{0j}x_j + \xi_0 . b_0 \right) \\ \text{s.t.} \\ \sum_j a_{ij}x_j + \Theta_i . \max_{\xi_{ij}, \xi_i} \left(\sum_j \xi_{ij} . a_{ij}x_j - \xi_i . b_i \right) \le b_i \quad \forall i = 1,2,...,m \end{cases} \qquad (۲۵)$$

که در آن، Θ_i پارامتر کنترلی است که سطح ریسک‌گریزی یا پوشش عدم قطعیت را در پارامترهای هر قید نشان می‌دهد. توجه کنید که اگر $\Theta_i = ۰$ باشد به این معناست که مقادیر اسمی جایگزین داده‌های غیر قطعی می‌شوند؛ و اگر $\Theta_i = ۱$ باشد، آنگاه

1. Perturbation
2. Robust Counterpart

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

پوشش عدم قطعیت به‌صورت کامل لحاظ شده است. وابسته به فضا/مجموعه عدم قطعیت در نظر گرفته شده، همتای استور به‌صورت‌های مختلفی اعمال می‌شود که در این تحقیق سه حالت جعبه، بیضوی و چندوجهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در ادامه توضیح داده می‌شوند.

- فضا/مجموعه عدم‌قطعیت جعبه[1] (Box)

همتای استوار مدل در این حالت به‌صورت زیر می‌گردد (بن‌تال و همکارانش، ۲۰۰۹):

$$\begin{cases} \min z \\ \text{s.t.} \\ z \geq \sum_j a_{.j} x_j + b_. + \psi_. (\sum_j a_{.j} \left| x_j \right| + b_.) \\ \sum_j a_{ij} x_j + \psi_i \sum_j a_{ij} \left| x_j \right| \leq b_i - \psi_i . b_i \quad \forall i = 1,2,...,m \end{cases} \qquad (۲۶)$$

- فضا/مجموعه عدم‌قطعیت بیضوی[2] (ELL)

فرض کنید نسبت به حالت Box فضای عدم قطیت کوچکتری در نظر گرفته می‌شود که در آن ξ_{ij}های مربوط به هر قید به رابطه بیضی‌گون زیر محدود شوند،

$$\left\| \xi_{ij} \right\|_2 = \sqrt{\sum_j \xi_{ij}^2} \leq \Omega_i^2 \ \forall i = 0,1,2,...,m \ ; \ \xi_{ij} \in [-1,1] \qquad (۲۷)$$

آنگاه همتای استوار مدل در این حالت به‌صورت زیر می‌گردد (بن‌تال و همکارانش، ۲۰۰۹):

1. Box
2. Ellipsoidal

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

$$\begin{cases} \min z \\ s.t. \\ z \geq \sum_j a_{.j}x_j + b_{.} + \Omega_{.}\left(\sqrt{\sum_j (a_{.j}x_j)^2 + b_{.}^2}\right) \\ \sum_j a_{ij}x_j + \Omega_i \sum_j (a_{ij}x_j)^2 \leq b_i - \Omega_i . b_i^2 \quad \forall i = 1,2,...,m \end{cases} \qquad (۲۸)$$

- فضا/مجموعه عدم‌قطعیت چندوجهی[1] *(PH)*

فرض کنید باز هم نسبت به حالت Ell فضای عدم قطیت کوچکتری در نظر گرفته شود که در آن ξ_{ij} های مربوط به هر قید به چندوجهی زیر محدود شوند، -

$$\left\| \xi_{ij} \right\|_1 = \sum_j \left|\xi_{ij}\right| \leq \Gamma_i \quad \forall i = 0,1,2,...,m \; ; \; \xi_{ij} \in [-1,1] \qquad (۲۹)$$

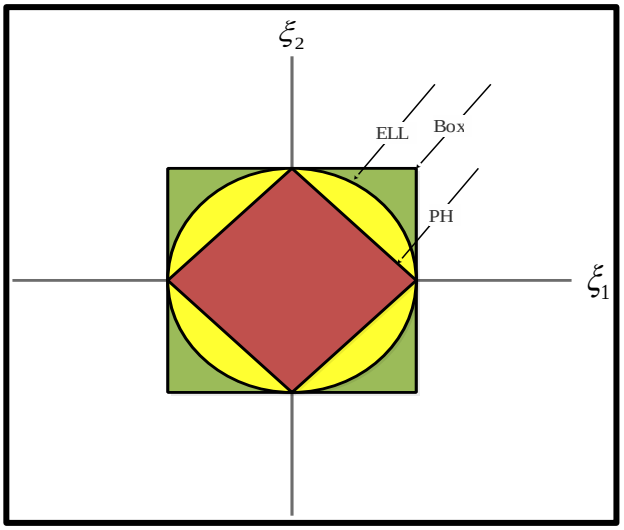
آنگاه همتای استوار مدل در این حالت به‌صورت زیر می‌گردد (بن‌تال و همکارانش، ۲۰۰۹):

$$\begin{cases} \min z \\ s.t. \\ z \geq \sum_j a_{0j}x_j + \Gamma_0 . t_0 \\ t_0 \geq a_{0j}\left|x_j\right| \text{ and } t_0 \geq b_0 \quad \forall j = 1,2,...,n \\ \sum_j a_{ij}x_j + \Gamma_i . t_i \leq b_i \\ t_i \geq a_{ij}\left|x_j\right| \text{ and } t_i \geq b_i \quad \forall j = 1,2,...,n \end{cases} \qquad (۳۰)$$

به ازای پارامترهای کنترلی برابر ($\Psi = \Omega = \Gamma$) حالت Box بیشترین عدم قطعیت را و حالت ELL فضایی کمتر از Box و بیشتر از PH را پوشش می‌دهد. شکل ۲ مجموعه عدم قطعیت را درصورتی‌که دو پارامتر غیرقطعی در یک قید باشند نشان داده و فضای حالت‌های Box، ELL و PH مقایسه می‌شوند.

1. Polyhedral

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]



شکل ۳. مجموعه عدم‌قطعیت در سه حالت BOX، ELL و PH

بر اساس روش‌های استوار توضیح‌داده شده، فرض کنید data نشان‌دهنده هر یک از این پارامترها/داده‌های غیرقطعی در مسئله PSC_PD مورد نظر تحقیق باشد. برای هر یک از این داده‌ها، یک فاصله عدم قطعیت به‌صورت $\text{data} \in [\text{data}^{L}, \text{data}^{U}]$ تعریف می‌کنیم که با توجه به آن مقدار اسمی $\text{data} = \frac{\text{data}^{L} + \text{data}^{U}}{۲}$ و مقدار انحراف $\text{data} = \text{data}^{U} - \text{data}$ برای این داده غیر قطعی به دست می‌آید. پس از مشخص شدن مقادیر اسمی و جزء انحراف هر داده غیر قطعی، همتای استوار بر اساس هر یک از روش‌های Box، Ell و PH به‌دست آورده تعیین می‌گردد، پاسخ استوار از حل آنها به‌دست آورده می‌شود.

۴- نتایج عددی و تحلیل

در این بخش، حل مطالعات عددی از مسئله PSC_PD تعریف شده و با استفاده از رویکرد حل پیشنهادی به گزارش خروجی‌ها و تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است، نرم‌افزار GAMS نسخه 24.7.1 و CPLEX solver برای اجرای مدل استفاده شده است که جواب بهینه سراسری مسئله را تضمین می‌کند. همچنین از نرم‌افزار

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

MATLAB برای رسم نمودارها و تحلیل حساسیت استفاده شده است. برای اجرای کدهای نرم‌افزاری از یک کامپیوتر شخصی استفاده شده‌است که مشخصات مهم آن "واحد پردازنده مرکزی[1] (CPU): Core™ i5 2.5 GHz" و " حافظه دسترسی تصادفی[2] (RAM): 6.0 GB" می‌باشد.

حل یک مطالعه عددی از مسئله *PSC_PD*

در این مثال عددی دو کارخانه (از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه) محصول اولیه (اتیلن) تولید می‌کنند و چهار کارخانه (از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه) برای تولید محصولات نهایی (گریدهای مختلف پلی اتیلن) موجود هستند. برنامه‌ریزی عملیاتی (از جمله مقدار تولید، موجودی، قیمت‌گذاری محصولات و ...) در دوره‌های ماهانه باید به‌صورت بهینه انجام شود که سود سالانه حداکثر شود.

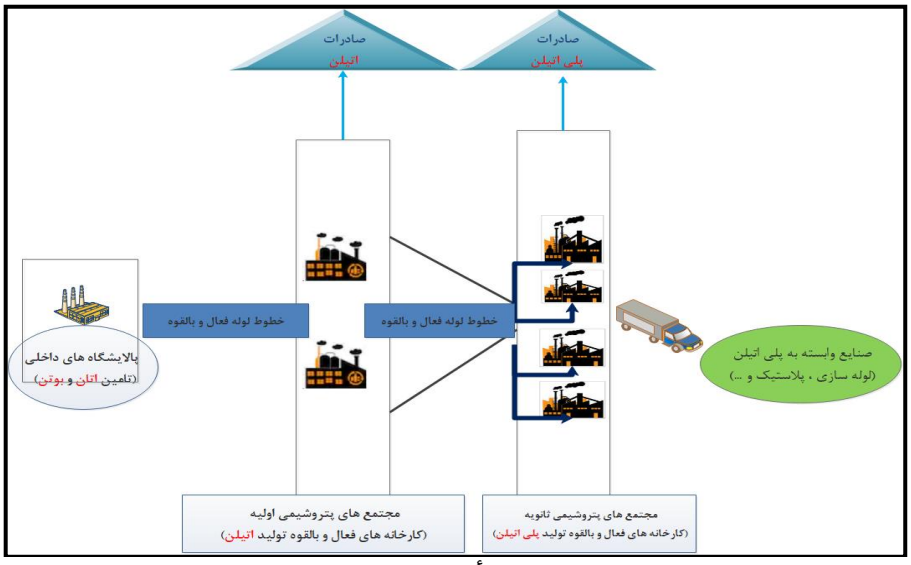
در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که اتان و بوتن به‌عنوان مواد اولیه از پالایشگاه‌های داخلی وارد کارخانه تولید اتیلن می‌شود؛ در هر ماه مشخص می‌شود چه میزان اتیلن تولید، چه میزان نگهداری و به مجتمع‌های پتروشیمی (برای تولید محصول پلی اتیلن مورد نیاز بازار داخل) عرضه می‌شود و در نهایت چه میزان و با چه قیمتی صادر می‌شود. در چهار کارخانه تولیدکننده گریدهای مختلف پلی اتیلن نیز تصمیمات مشابه (در مورد میزان تولید، موجودی، عرضه به بازار داخلی و صادرات و ...) باید در هر دوره/ماه اخذ شود. جدول ۱ داده‌های درنظرگرفته شده برای این مثال عددی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هزینه‌ها و قیمت به‌صورت هزار دلار و حجم و ظرفیت به‌صورت تن در نظر گرفته شده است.

1. Central Processing Unit
2. Random Access Memory

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

جدول ۱. داده‌های در نظر گرفته شده برای اجرای مثال عددی مسئله PSC_PD

rmc_{rt}^{1}	U(1,2)	pc_{pf}^{2}	U(1,1.2)	cap_{r}^{Ref}	U(100,150)
$\mathrm{cap}_{\mathrm{rt}}^{\mathrm{S}}$	U(200,300)	$\mathrm{mc}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{im}}$	U(5,10)	μ_{p}	0.5
$\mathrm{pc}_{\mathrm{pf}}^{1}$	U(0.5,0.7)	$\mathrm{dem}_{\mathrm{pt}}$	U(1000,1500)	$\mathrm{cap}_{\mathrm{pf}}^{1\mathrm{P}}, \mathrm{ccap}_{\mathrm{pf}}^{1\mathrm{Inv}}$	U(100,300)
$\mathrm{tc}_{\mathrm{p}}^{1\,\mathrm{f}^1\to\mathrm{f}^2}, \mathrm{tc}_{\mathrm{p}}^{2\,\mathrm{f}^2}$	U(0.2,0.3)	α_{p}	0.3	$\mathrm{cap}^{\mathrm{T}\,\mathrm{f}^1\to\mathrm{f}^2}$	U(50,100)
$\mathrm{rmc}_{\mathrm{r}}^{2\,\mathrm{im}}$	U(2,5)	β_{rp}	0.7	$\mathrm{cap}^{\mathrm{ex}}$	200
$\mathrm{clt}_{\mathrm{p}}$	U(0.01,0.02)	$\mathrm{dem}_{\mathrm{pt}}$	U(100,200)	$\mathrm{cap}^{\mathrm{im}}$	100
$\mathrm{rON}_{\mathrm{pf}}$	U(0.90,0.95)	$\mathrm{rOFF}_{\mathrm{pf}}$	$1-\mathrm{rON}_{\mathrm{pf}}$	$\mathrm{price}_{\mathrm{pt}}$	U(1,1.5)
ψ_{p}	0.7	$\mathrm{cap}_{\mathrm{pf}}^{2\mathrm{P}}, \mathrm{ccap}_{\mathrm{pf}}^{2\mathrm{Inv}}$	U(100,200)	$\mathrm{ic}_{\mathrm{pf}}^{1\mathrm{Inv}}, \mathrm{ic}_{\mathrm{pf}}^{2\mathrm{Inv}}$	U(0.2,0.3)
ξ_{p}	0.05	a_{pt}	U(200,220)	b_{pt}	U(8,12)

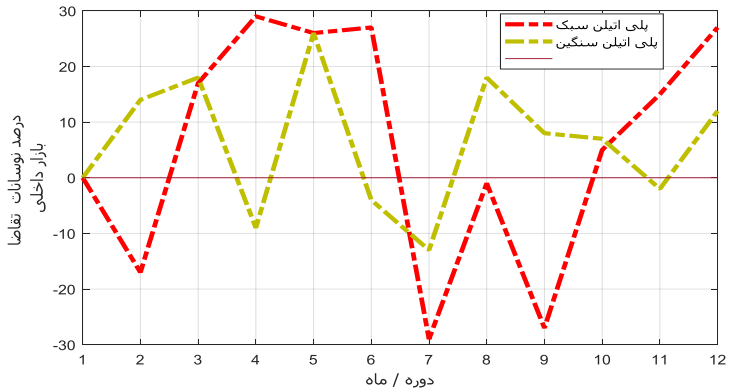


شکل ۴. ساختار شبکه زنجیره تأمین در مثال عددی مسئله PSC_PD

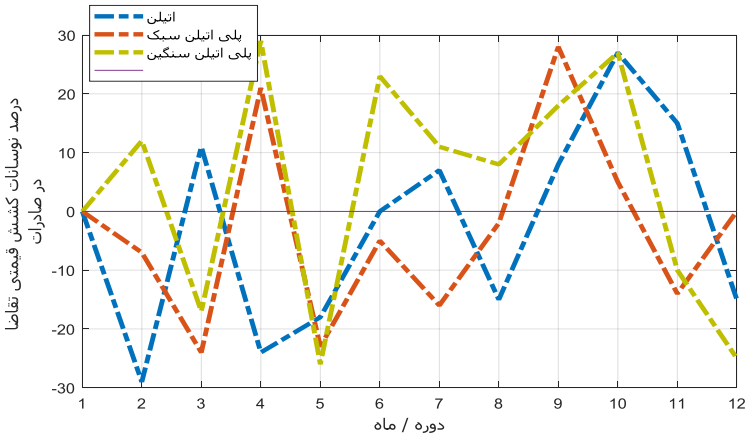
معمولاً، تقاضای محصولات پتروشیمی در ماه‌های مختلف سال یکسان نیست و در هر دوره/ماه نسبت به دوره قبل ممکن است نوسان رخ دهد. لذا، فرض شده است نوسانات مقدار تقاضا و کشش قیمتی صادرات تقاضا مطابق شکل‌های ۵ و ۶ می‌باشد. پس از اجرای مدل پاسخ بهینه سراسری این مثال عددی به‌دست آورده شده که در ادامه گزارش می‌شود و در بخش بعدی تحلیل حساسیت صورت می‌پذیرد. در جدول ۲ مقادیر تأمین مواد اولیه (اتان و بوتن) در هر دوره این مواد ملاحظه می‌شود. در جدول

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

۳ مقدار تولید، موجودی، قیمت و میزان صادرات و عرضه به پتروشیمی نهایی برای اتیلن آورده شده است. در جدول ۴ نیز میزان تولید، موجودی، کمبود داخلی، قیمت و میزان صادرات برای محصولات نهایی پلی اتیلن سبک و سنگین آورده شده است.



شکل ۵. درصد نوسانات در نظرگرفته‌شده برای تقاضا بازار داخلی



شکل ۶. درصد نوسانات در نظرگرفته‌شده برای کشش قیمتی تقاضا در بازار خارجی/صادرات

جدول ۲. مقدار تأمین مواد اولیه در هر دوره

دوره/ماه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
اتان (تن)	۲۳	۲۵	۱۶	۲۱	۲۲	۱۲	۱۲	۲۹	۲۶	۲۱	۲۶	۱۴
بوتن (تن)	۲۳	۲۵	۱۶	۲۱	۲۲	۱۲	۱۲	۲۹	۲۶	۲۱	۲۶	۱۴

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

جدول ۳. تولید، موجودی، صادرات و قیمت صادراتی اتیلن

دوره/ماه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
تولید (تن)	۶۰	۴۲	۴۶	۴۸	۳۶	۵۶	۳۳	۵۱	۵۴	۴۳	۳۵	۳۱
عرضه داخل (٪)	۸۴	۳۲	۳۱	۹۶	۴۱	۸۳	۹۳	۱۰۰	۳۷	۳۹	۵	۸۵
صادرات (٪)	۱۲	۴۳	۵	۴	۲۰	۱۷	۰	۰	۲۰	۲۵	۴۵	۱۵
موجودی (٪)	۴	۲۵	۶۴	۰	۳۰	۰	۷	۰	۴۳	۳۶	۵۰	۰
قیمت صادرات (دلار/تن)	۱۰۵۴	۱۰۱۹	۱۰۷۶	۱۰۸۳	۱۰۱۲	۱۱۰۱	-	-	۱۰۹۳	۱۰۲۲	۱۰۸۷	۱۰۲۱

جدول ۵. تولید، موجودی، فروش داخلی، صادرات و قیمت صادراتی (پلی اتیلن سبک و سنگین)

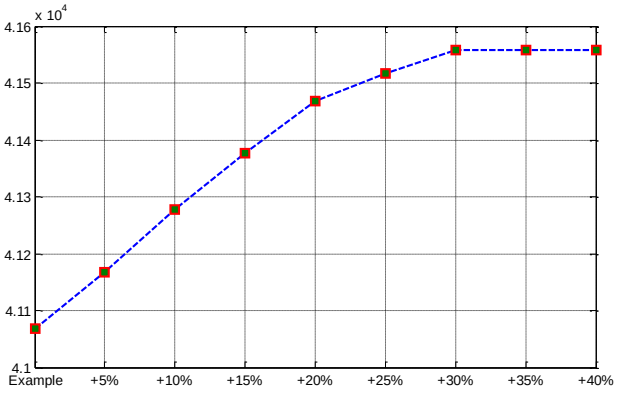
دوره/ماه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
تولید سبک	۲۷	۳۲	۲۵	۲۶	۳۳	۳۰	۱۸	۲۰	۳۷	۲۵	۱۶	۳۴
تولید سنگین	۲۳	۳۱	۳۵	۱۵	۱۳	۳۲	۲۲	۱۵	۲۸	۲۷	۲۳	۲۴
فروش داخلی سبک	۱۳	۱۵	۱۵	۱۲	۹	۱۶	۱۵	۲۰	۲۵	۱۴	۵	۲۰
فروش داخلی سنگین	۱۳	۱۵	۱۵	۱۲	۹	۱۶	۱۵	۱۰	۲۵	۱۴	۵	۲۰
صادرات سبک	۷	۵	۵	۸	۱۱	۱۴	۳	۰	۵	۰	۰	۱۴
صادرات سنگین	۵	۱۶	۵	۳	۰	۱۱	۰	۰	۰	۷	۰	۴
موجودی سبک	۷	۱۲	۵	۶	۱۳	۰	۰	۰	۷	۱۱	۱۱	۰
موجودی سنگین	۵	۰	۱۵	۰	۳	۵	۱۷	۵	۳	۶	۱۹	۰
قیمت صادرات سبک (دلار/تن)	۱۲۴۵	۱۲۰۲	۱۲۰۴	۱۱۸۹	۱۲۲۱	۱۲۱۲	۱۱۹۴	-	۱۱۵۱	-	-	۱۱۵۷
قیمت صادرات سنگین (دلار/تن)	۱۲۸۶	۱۲۶۷	۱۲۷۶	۱۲۰۵	-	۱۲۷۸	-	-	-	۱۳۰۳	-	۱۲۰۴

تحلیل حساسیت

ظرفیت تسهیلات از جمله پارامترهایی است که بر تصمیمات دوره‌ای میـزان تولیـد، موجـودی و ... تأثیرگـذار بـوده و بـه تبـع آن، هزینـه‌هـای زنجیـره عرضـه محصـولات

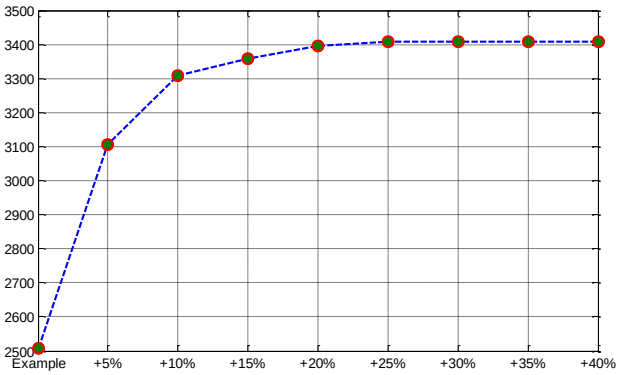
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

پتروشیمی هزینه تولید (PC)، هزینه نگهداری (HC)، هزینه کمبود (BC) و هزینه حمل‌ونقل (TC) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این بخش به تحلیل حساسیت هزینه‌های شبکه به ازای تغییرات این پارامتر پرداخته می‌شود. برای این منظور، مقدار این پارامتر در مثال عددی را به میزان ۴۰ درصد با طول گام ۵ درصد افزایش می‌دهیم. روند تغییر در هزینه‌ها در شکل‌های ۷ تا ۱۰ آمده است. ملاحظه می‌شود با افزایش ظرفیت، میزان تولید بیشتری انجام می‌شود (البته با توجه به اینکه در سیستم کمبود وجود داشت) و این سبب می‌گردد PC افزایش یابد. همچنین توجه کنید از میزان افزایش ۳۰ درصد به بعد تغییری در هزینه تولید رخ نمی‌دهد و دلیل این موضوع آن است که با وجود اینکه ظرفیت تولید وجود دارد ولی نیازی به تولید بیشتر نیست، چراکه کمبود تقاضای سیستم جبران شده است. روند افزایش هزینه‌های HC و TC نیز مشابه است؛ اما با افزایش ظرفیت تولید، تقاضای بیشتری از مشتریان ارضاء شده است و با افزایش تأمین تقاضا مشتریان میزان کمبود و به تبع آن BC کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است که چون میزان کاهش هزینه کمبود بیشتر از افزایش هزینه‌های تولید، موجودی و حمل و نقل است، نهایتا هزینه کل کاهش می‌یابد و از این رو افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه موجب به افزایش سود می‌شود.

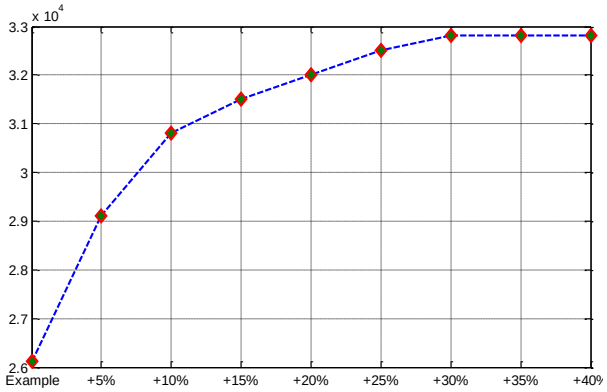


شکل ۷. تغییرات هزینه تولید (PC) با افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه عرضه

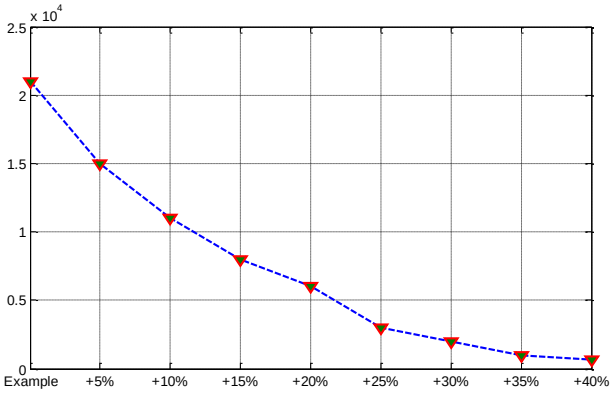
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]



شکل ۸. تغییرات هزینه نگهداری (HC) با افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه عرضه



شکل ۹. نمودار تغییرات هزینه حمل و نقل (TC) با افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه عرضه

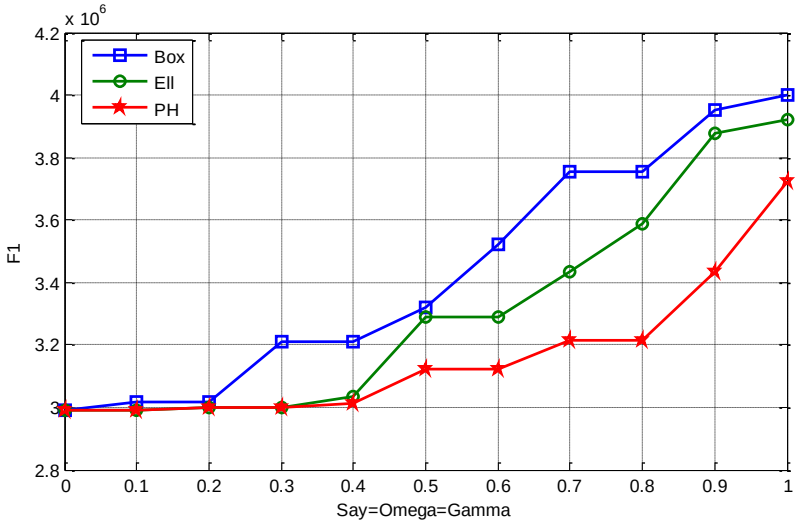


شکل ۱۰. نمودار تغییرات هزینه کمبود (BC) با افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه عرضه

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

تحلیل استواری مدل

در نهایت، در این بخش، به تحلیل ضرایب استواری مدل‌های BOX, ELL, PH پرداخته می‌شود و نشان می‌دهیم که به ازای هر میزان محافظه‌کاری در این مدل‌ها (که با پارامترهای Ψ, Ω, Γ کنترل می‌شوند) روند افزایش هزینه به چه صورت است. فرض کنید F1 بخش هزینه تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، با افزایش هر پارامتر کنترلی، گرچه فضای عدم قطعیت بیشتر پوشش داده می‌شود ولی هزینه بیشتری بر سیستم اعمال می‌گردد. همچنین، به ازای سطوح $\Psi = \Omega = \Gamma$، چون فضای BOX با سختگیری و محافظه‌کاری بیشتر مواجه است، پس هزینه بیشتری نسبت به دو حالت ELL و PH اعمال می‌شود. لازم به توضیح است که در این مثال عددی انتخاب رویکرد ELL با $\Omega = 0.6$ گزینه مناسبی برای کنترل استواری مدل است، چراکه اولا محافظه‌کاری آن مابین رویکرد بسیار ریسک‌گریز BOX و بسیار ریسک‌پذیر PH است و در ثانی با مقادیر $\Omega < 0.6$ کاهش چندانی در هزینه‌ها ندارد.



شکل ۱۱. مقایسه تأثیر روش‌های استوارسازی بر مقدار تابع هدف اول

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، برنامه‌ریزی فنی و عملیاتی مجتمع‌های پتروشیمی عرضه‌کننده محصولات پتروشیمی اولیه و نهایی مورد بررسی قرار گرفته و به نحوه اخذ تصمیمات دوره‌ای همچون موجودی مواد اولیه و محصولات، قیمت‌گذاری، حمل‌ونقل و جریان مواد و محصولات به‌صورت بهینه پرداخته شده است. برای این منظور یک مدل بهینه-سازی ریاضی چنددوره‌ای جدید ارائه شده که با استفاده از آن می‌توان تصمیمات مذکور در صنعت پتروشیمی را مدیریت کرد. یکی از چالش‌های مهم در مسئله مدیریت زنجیره تأمین در صنایع فرآیندی مانند صنعت پتروشیمی، موضوع عدم قطعیت در داده‌ها است که در مدل پیشنهادی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار به عدم قطعیت داده‌ها نیز مواجهه شده است.

با وجود نوسان در تقاضا و کشش قیمتی برای صادرات محصولات پتروشیمی اولیه و نهایی، مدیریت موجودی، مقدار تولید دوره‌ای/ماهانه و قیمت‌گذاری بهینه محصولات موجب می‌شود که اولا کمبود صنایع وابسته داخلی به محصولات پتروشیمی در دوره‌های مختلف کمتر شود و همچنین شرکت‌ها پتروشمی با قیمت‌گذاری مناسب سهم بیشتری از بازارهای خارجی کسب کنند و صادرات رونق پیدا کند. نتایج عددی نشان می‌دهد که با وجود محدودیت ظرفیت تسهیلات شبکه زنجیره تأمین و با در نظر گرفتن نوسانات تقاضای داخلی و کشش قیمتی، مقدار تولید و موجودی محصولات در دوره‌های مختلف در حالت بهینه باید غیریکنواخت باشد تا بتوان بازار داخلی و صادرات را به‌طور بهینه کنترل کرد و نهایتا سود بیشتری به‌دست آورد.

کمبود برای محصولات پتروشیمی نهایی با افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه (به‌خصوص تسهیلات تولیدی) قابل جبران است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت وجود کمبود در بازار داخلی، با افزایش ظرفیت، گرچه هزینه‌های PC، HC و TC افزایش می‌یابد اما کاهش قابل ملاحظه هزینه BC موجب می‌شود هزینه کل کاهش – یابد و سود کل بیشتر شود.

در تحلیل رویکردهای استوار ملاحظه می‌شود که به ازای سطوح برابر Ψ, Ω, Γ چون فضای BOX با سختگیری و محافظه‌کاری بیشتر مواجه است، پس هزینه بیشتری نسبت به دو حالت ELL و PH اعمال می‌شود. معمولاً رویکرد ELL گزینه مناسبی برای

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

کنترل استواری مدل است چراکه محافظه‌کاری آن مابین رویکرد بسیار ریسک‌گریز BOX و بسیار ریسک‌پذیر PH است.

پرداختن به چالش‌های اختلال در شبکه (به‌خصوص اختلال در تأمین مواد اولیه صنعت پتروشیمی) و لحاظ کردن این اختلالات در مدل مسئله موجب کاربردپذیری بیشتر مدل در دنیای واقعی می‌شود. مدیریت ریسک در صنعت پتروشیمی و تأثیر آن بر صنایع وابسته نیز از دیگر موضوعات جذابی است که پرداختن به آنها در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

بهنامیان، جواد و متقی، محبوبه (۱۳۹۶). راهکارهای ارتقای زنجیره تأمین سبز در صنایع پتروشیمی (مطالعه موردی: پتروشیمی مارون). نشریه علمی مدیریت زنجیره تأمین، ۱۸(۵۱), ۲۹-۳۹

پاپی، علی، پیشوایی، میرسامان، جبارزاده، آرمین و قادری، فرید (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی بهینه استوار زنجیره عرضه نفت‌خام و توسعه بهینه میادین نفتی در شرایط عدم قطعیت: مطالعه موردی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۴(۵۸), ۶۴-۲۷

Al-Qahtani, K., Elkamel, A., & Ponnambalam, K. (2008). Robust Optimization for Petrochemical Network Design under Uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 47(11), 3912-3919

Al-Sharrah, G. K., Alatiqi, I., Elkamel, A., & Alper, E. (2001 .(Planning an Integrated Petrochemical Industry with an Environmental Objective. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 40(9), 2103-2111

Alfares, H., & Al-Amer, A. (2002). An optimization model for guiding the petrochemical industry development in Saudi Arabia. *Engineering Optimization,* 34(6), 671-687

Azadeh, A., Raoofi, Z., & Zarrin, M. (2015). A multi-objective fuzzy linear programming model for optimization of natural gas supply chain through a greenhouse gas reduction approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* 26, 702-710

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

Azadeh, A., Shafiee, F., Yazdanparast, R., Heydari, J., & Keshvarparast, A. (2017). Optimum Integrated Design of Crude Oil Supply Chain by a Unique Mixed Integer Nonlinear Programming Model. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 56(19), 5734-5746

Bok, J.-K., Lee, H., & Park, S. (1998). Robust investment model for long-range capacity expansion of chemical processing networks under uncertain demand forecast scenarios. *Computers & Chemical Engineering,* 22(7)

Botes, A., Niemann, W., & Kotzé, T. (2017). Buyer-supplier collaboration and supply chain resilience: A case study in the petrochemical industry. *South African Journal of Industrial Engineering,* 28(4), 183-199

de Vargas Mores, G., Finocchio, C. P .S., Barichello, R., & Pedrozo, E. A. (2018). Sustainability and innovation in the Brazilian supply chain of green plastic. *Journal of Cleaner Production,* 177, 12-18

Helbig, C., Gemechu, E. D., Pillain, B., Young, S. B., Thorenz, A., Tuma, A., & Sonnemann, G. (2016). Extending the geopolitical supply risk indicator: Application of life cycle sustainability assessment to the petrochemical supply chain of polyacrylonitrile-based carbon fibers. *Journal of Cleaner Production,* 137, 1170-1178

Jiménez, A., Rudd ,D. F., & Meyer, R. R. (1982). A study of the development of a mexican petrochemical industry using mixed-integer programming. *Computers & Chemical Engineering,* 6(3), 219-229

Kadambur, R., & Kotecha, P. (2015). Multi-level production planning in a petrochemical industry using elitist Teaching–Learning-Based-Optimization. *Expert Systems with Applications,* 42(1), 628-641

Kadambur, R., & Kotecha, P. (2016). Optimal production planning in a petrochemical industry using multiple levels. *Computers & Industrial Engineering,* 100, 133-143

Lababidi, H., A El-Wakeel, M., Alatiqi, I., & F Al-Enzi, A. (2019). *Optimizing the supply chain of petrochemical products under uncertain operational and economical conditions*.

Lee, T., Ryu, J.-h., Lee, I.-B., & Lee, H.-k. (2009 .(A Synchronized Feed Scheduling of Petrochemical Industries Simultaneously Considering Vessel Scheduling and Storage Tank Management. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 48(5), 2721-2727

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

Liu, H., Jin, F., Liu, Y., Ding, J., & Xu, X. (2013). Evaluation and optimization of the spatial organization of the petrochemical industry in China. *Journal of Geographical Sciences,* 23(1), 163-178

Mohseni, M., Abdollahi, A., & Seyed Hossein, S. (2019). Sustainable Supply Chain Management Practices in Petrochemical Industry Using Interpretive Structural Modeling. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management (IJISSCM),* 12(1), 22-50

Rudd, D. F. (1975). Modelling the development of the intermediate chemicals industry. *The Chemical Engineering Journal,* 9(1), 1-20

Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research,* 179(3), 1063-1077

Schulz, E. P., Diaz, M. S., & Bandoni, J. A. (2004). Supply chain optimisation in a petrochemical complex *Computer Aided Chemical Engineering*.

Siwi, R. G., Aljumah, F., Li, J., & Xao, X. (2018). Optimal Strategic Planning of Integrated Petroleum and Petrochemical Supply Chain *Computer Aided Chemical Engineering*.

Stadtherr, M. A., & Rudd, D. F. (1976). Systems study of the petrochemical industry. *Chemical Engineering Science*

Yoon, S.-G., Park, S. B., Park, S., Lee, J., Verderame, P. M., & Floudas, C. A. (2008). Synergy in Mergers of Petrochemical Companies within a Complex Considering Purchasing and Selling Advantage with Process Integration. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 47(15), 5556-5567

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]

A Multi-Period Robust Optimization Model for Integrated Planning of Decisions in the Petrochemical Products' Supply Chain

Mahmoud Ahmadiazar
Ph.D. Student of Production and Operations Management Shahid Beheshti University, Tehran, m.ahmadiazar@yahoo.com

Behroz Dorri[1]
Professor of Industrial Management Departeman, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, ber_dorri@yahoo.com

Akbar Alam Tabriz
Professor of Industrial Management Departeman, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, a-tabriz@sbu.ac.ir

Massoud Kassai
Assistant Professor of Industrial Management Departeman, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, massoudkass@yahoo.com
Received: 2019/10/01 Accepted: 2019/10/09

Abstract

Optimal management and planning in the petrochemical industry will bring about many economic benefits, including depended industries. In this research we examine technical and operational planning in the petrochemical supply chain network to assess how to optimize periodic decisions such as inventory of raw materials and products, pricing, transportation and flow of materials and products. In the proposed mode we take into account the uncertainty of various parameters, in order to propose a low risk and robust planning approach. The objective function of the proposed model is to maximize the annual profit of petrochemical complexes, within the capacity constraints of production and transportation facilities. The proposed model is continuous and convertible into a quadratic convex problem, in order to allow the use of commercial programs such as CPLEX to find the optimal solution. In order to demonstrate the applicability of the model, we present a numerical study in the final section of the paper, which includes some sensitivity analysis, numerical results and managerial insights.

JEL Classification: C02 ،C61 ،L11 ، Q41

Keywords: Petrochemical products supply chain, Multi-period optimization, Inventory, Pricing, Uncertainty, Robustness

1. Corresponding Author

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-02-03]