

مدل برنامه‌ریزی تصادفی و رویکرد حل تجزیه بندرز برای برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری تعمیرات در سیستم تولید چندکارخانه‌ای

حامد جعفرزنجانی^۱، مصطفی زندیه^{۲*}، محمد خلیل‌زاده^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. استاد گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

خلاصه

عملکرد مناسب در مراکز تولید/عرضه یک شبکه تولید چندکارخانه‌ای (MFP) مستلزم عدم خرابی در تجهیزات آن است. طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم نگهداری و تعمیرات (نت) به دو دلیل حائز اهمیت است؛ نخست آنکه طول عمر تجهیزات افزایش یافته؛ و دوم آنکه احتمال اختلال در شبکه MFP و هزینه‌های ناشی از آن، کاهش می‌یابد. بهره‌وری بیشتر یک شبکه MFP، با یکپارچه‌سازی تصمیمات نت در کنار تصمیمات تولید حاصل می‌شود. در این پژوهش، با در نظر گرفتن عدم قطعیت سناریومحور در تقاضا و نرخ خرابی تجهیزات، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور (RSSP) استوار ارائه می‌شود. در مدل RSSP پیشنهادی، تصمیمات استراتژیک و عملیاتی تولید و نت به صورت یکپارچه آورده می‌شوند و هزینه‌های اختلال در سیستم نیز لحاظ می‌شود. در مدل پیشنهادی، استراتژی‌های نت همچون برون‌سپاری، استقرار تجهیزات پشتیبان و تعمیرات پیشگیرانه دوره‌ای در نظر گرفته می‌شود. تابع هدف، بیشینه کردن سود شبکه MFP است که در آن، قیود ظرفیت محدود تولید، ذخیره‌سازی، بودجه و دسترسی به مراکز خدمات نت در نظر گرفته می‌شوند. مدل پیشنهادی به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته است که در ابعاد کوچک با CPLEX Solver قابل حل می‌باشد؛ برای حل در ابعاد بزرگ نیز یک روش حل مبتنی بر تجزیه بندرز ارائه می‌شود. در پایان به یک مطالعه عددی برگرفته از ایستگاه‌های CNG به عنوان یک شبکه MFP پرداخته می‌شود تا کاربردپذیری مدل پیشنهادی نشان داده شود و تحلیل نتایج صورت پذیرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۱۰

پذیرش ۱۳۹۹/۴/۹

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری تعمیرات
تعمیرات پیشگیرانه
تولید چندکارخانه‌ای
برنامه‌ریزی تصادفی استوار
تجزیه بندرز

۱. مقدمه

ساختارهای غیرمتمرکز، مدل تولید خود را از ساختار تک کارخانه‌ای سنتی به ساختار چند کارخانه‌ای تغییر دهند [۱]. این سازمان‌ها جهت ارائه خدمات مناسب‌تر و کاهش زمان انتظار مشتری و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و ارائه زمان‌های تحویل کوتاه‌تر اقدام به تأسیس نمایندگی‌ها یا شرکت‌های مشابه در مکان‌های مختلف با توجه به پراکندگی جغرافیایی مشتریان خود انجام می‌دهند. چنین سیستم‌هایی را تولید چند کارخانه‌ای (MFP) نام‌گذاری می‌کنند [۲].

تغییرات فراوان در محیط‌های تولیدی و خدماتی، رقابت شدید در بازار جهانی کسب‌وکار، جابه‌جایی مکرر بازارها، ظهور پیوسته تکنولوژی‌های جدید و افزایش نیازهای مشتریان از مشخصه‌های بازارهای امروزی است؛ افزایش رقابت‌پذیری و پاسخگویی به این تغییرات بازار، بسیاری از شرکت‌ها را مجبور ساخته با ساخت کارخانجات جدید، ادغام و اکتساب کارخانجات و به‌طور کلی گذار از یک ساختار متمرکز به

* نویسنده مسئول: مصطفی زندیه

تلفن: ۰۲۱-۲۹۹۰۵۲۱۵؛ پست الکترونیکی: m_zandieh@sbu.ac.ir

در این تحقیق، با در نظر گرفتن عدم قطعیت سناریومحور در تقاضا و نرخ خرابی تجهیزات، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی استوار برای برنامه‌ریزی تولید و نت در یک شبکه MFP ارائه می‌شود که تصمیمات استراتژیک و عملیاتی تولید و نت را به صورت یکپارچه شامل می‌شود و هزینه‌های اختلال در سیستم MFP را نیز لحاظ می‌کند. از مهم‌ترین اهداف و نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ارائه یک مدل بهینه‌سازی جدید برای یکپارچه‌سازی تصمیمات بلندمدت و دوره‌ای تولید و نگهداری و تعمیرات در سیستم MFP
- در نظر گرفتن هزینه‌های اختلال در فعالیت کارخانه‌ها و عدم ارضاء تقاضا
- به‌کارگیری رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور استوار برای مواجهه با سناریوها محتمل برای تقاضا و نرخ خرابی تجهیزات
- ارائه رویکرد حل مبتنی بر تجزیه بندرز برای اجرای کاراتر مدل پیشنهادی
- اجرای مدل و رویکرد حل پیشنهادی روی یک مطالعه عددی از ایستگاه‌های CNG

محتوای این تحقیق در ۶ بخش سازمان‌دهی شده است؛ در بخش ۲، مرور منابع صورت می‌پذیرد. در بخش ۳، تشریح مسئله به صورت کامل آورده می‌شود و هدف، قیود، مفروضات و سایر جزئیات آن توضیح داده می‌شود. در بخش ۴ مدل استوار پیشنهادی و رویکرد حل تجزیه بندرز ارائه می‌شود. در بخش ۵ به تحلیل نتایج براساس یک مطالعه عددی و همچنین مسائل آزمایشی پرداخته می‌شود و نهایتاً در بخش ۶، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

۲. مرور ادبیات

در ادبیات موضوع تحقیق مقالات متعددی به بررسی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری و برنامه‌ریزی و زمان‌بندی یکپارچه این دو موضوع (تولید و تعمیرات و نگهداری) در سیستم‌های تولیدی و خدماتی پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه زمان‌بندی و برنامه‌ریزی توزیع شده با کارخانجات موازی در یک شبکه تولید با ارتباطات مجازی بین کارخانجاتی که مالکیت مستقل داشته و بیشتر بر منافع اقتصادی خود تمرکز دارند، در مقاله بهنامیان و قمی [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. یک بررسی جامع بر ادبیات موضوع زمان‌بندی چندکارخانه‌ای (MFP) توسط بهنامیان انجام شده است که در آن مسئله زمان‌بندی تولید در محیط‌های مختلف سیستم‌های چندکارخانه‌ای طبقه‌بندی و مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است [۱۰]. همچنین از این نویسنده در مقاله دیگری، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته خطی به‌منظور حل مسئله زمان‌بندی کارخانجات چندگانه ناهمگون در محیط کارخانه‌های موازی با در نظرگیری زمان حمل‌ونقل، توسعه‌یافته است که در آن از مجموعه‌ای از حامل‌ها به‌منظور جابه‌جایی کالاها بین کارخانجات با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های تولید استفاده شده است [۱۱] (همچنین برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های چندکارخانه‌ای در مقالات [۲، ۱۲-

یک شبکه MFP از لحاظ جغرافیایی در مکان‌های مختلف توزیع شده و با توجه به نزدیکی به مشتریان، به آن‌ها اجازه داده می‌شود، مطابق با شرایط محلی و بومی خدمات خود را به صورت مؤثرتر ارائه دهند تا بتوانند پاسخگوی بازار به سرعت در حال تغییر امروزه باشند.

در هر سیستم تولیدی و یا خدماتی استفاده کارا از تجهیزات، بهبود بهره‌وری و سودآوری آن سیستم را نتیجه می‌دهد که این مسئله به شدت بر استراتژی‌های تعمیر قابل‌اعتماد در آن سیستم متکی است [۳]. حفظ قابلیت اطمینان یک سیستم نه تنها در بهبود عملکرد آن سیستم مهم است، بلکه این مسئله در سیستم‌های MFP که، کارخانجات مختلف شامل انواع گوناگون ماشین‌های پیشرفته بوده و از هزینه‌های عملیاتی، زمان‌های تحویل محصول و کارایی مختلف برخوردار می‌باشند اهمیت بیشتری می‌یابد [۴].

از آنجا که برنامه‌ریزی تولید در یک سیستم تولیدی، تا حد بسیار بالایی به شرایط تجهیزات وابسته است، اختلال آن‌ها ممکن است فرآیند تولید را مختل کرده و باعث تأخیر در زمان‌بندی‌ها شود. لذا عدم اختلال و فعالیت بهینه در هر کارخانه در یک شبکه MFP تولیدی مستلزم عدم خرابی در تجهیزات و ماشین‌آلات آن است. علیرغم این وابستگی، مدل‌های کلاسیک زمان‌بندی تولید از خرابی ماشین‌ها چشم‌پوشی می‌کنند. این در حالی است که حفظ قابلیت اطمینان و استواری نسبت به اختلالات، در سیستم‌های تولید MFP می‌تواند باعث ایجاد واکنش‌های زنجیره‌ای شدیدی در کل شبکه گردد و اتفاقات غیرقابل جبرانی را منجر شود. لذا یکی از مهم‌ترین مواردی که در سیستم تولید/خدمات پراکنده باید مورد توجه قرار گیرد، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات (نت) تجهیزات است تا قابلیت اطمینان آن بالا باشد و مشتریان آن محصول یا سرویس مورد نظر خود را در هر بازه زمانی و با کمترین تأخیر تحویل بگیرند [۱، ۵]. علاوه بر این، برنامه‌ریزی مناسب نت می‌تواند از هزینه‌های اختلال در عرضه (فروش و اعتبار از دست‌رفته) جلوگیری کند.

اخیراً پژوهشگران نیز با تأکید بر لزوم بهبود مستمر در فرآیندها و با هدف حفظ رقابت‌پذیری در سیستم‌های تولیدی و خدماتی پیچیده امروزی، بر یکپارچگی برنامه‌ریزی تولید و نت تأکید فراوان دارند [۶] این ادغام و یکپارچگی می‌تواند ضمن حفظ پایداری سیستم باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها و استفاده بهتر از منابع همراه باشد [۷]. در واقع، بهره‌وری بیشتر یک سیستم MFP با یکپارچه‌سازی تصمیمات نت در کنار تصمیمات تولید حاصل می‌شود چراکه عملیات نت تجهیزات هر کارخانه وابسته به فعالیت تولید/عرضه آن است و تولید هر کارخانه نیز مستلزم نت مناسب و عدم خرابی تجهیزات آن است. به‌طور کلی برنامه‌ریزی تولید و نت در یک شبکه MFP را می‌توان اقدامات به هم پیوسته‌ای دانست که با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کلی و تأخیر در کارها به صورت مشترک برنامه‌ریزی می‌شوند [۵]. اهمیت موضوع فعالیت‌های نت و یکپارچه‌سازی با تصمیمات تولید به صورت قابل‌ملاحظه‌ای در همه بخش‌های شرکت‌های تولیدی و سازمان‌های خدماتی مورد توجه قرار گرفته است [۸].

۱۴] از این نویسندگان امکان بررسی بیشتر را فراهم می‌آورد. در زمینه زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری، مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی با چرخه‌های تعمیر دوره‌ای وابسته به ماشین، در مقاله ارائه شده توسط لی و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله با دو مدل برنامه‌نویسی ریاضی برای حل مسائل در اندازه کوچک و الگوریتم‌های هیوریستیک اصلاح شده برای حل در اندازه‌های بزرگ، هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل را دنبال می‌کند. مسئله زمان‌بندی غیرقطعی ماشین‌های موازی نامرتب با تعمیرات پیشگیرانه دوره‌ای در مقاله شن و ژو [۱۸] مورد مطالعه قرار گرفته است که به منظور مواجهه با پارامترهای غیرقطعی زمان پردازش و نگهداری، دو مدل برنامه‌نویسی ریاضی با مقادیر بدبینانه توسعه یافته و از رویکرد طولانی‌ترین زمان پردازش جهت حل آن استفاده شده است.

همچنین در طی سال‌های اخیر با توجه به این موضوع مهم که تغییر و اختلال در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در شرایط اضطراری می‌تواند بسویار هزینه‌بر بوده و میزان خروجی (تولید/ خدمت) را دستخوش تغییرات چشمگیر نماید، ادغام و یکپارچه‌سازی مدیریت نگهداری با زمان‌بندی تولید مورد توجه قرار گرفته است؛ چرا که این موضوع می‌تواند، اثربخشی مدیریت را در پاسخگویی به تعهدات زمانی بهبود و ارتقا بخشیده و بدون یکپارچگی این دو مهم، پایداری و استواری یک برنامه زمان‌بندی تولید، تضمین نمی‌گردد. در ادبیات تحقیق، مقالات محدودی به یکپارچه‌سازی سیاست‌های توأم تولید و توزیع پرداخته‌اند؛ به‌عنوان نمونه یک زمان‌بندی استوار و ایستا برای سیستم تک‌ماشین با محدودیت سطح دسترس مورد بررسی قرار گرفته است که در آن توالی کارها و زمان‌های تعمیر و زمان‌های تکمیل کارها به‌صورت هم‌زمان و از پیش تعیین شده بوده و تأثیر عدم قطعیت بر عملکرد و موازنه بین دو هدف استواری و ایستایی مطالعه شده است [۲۰]. در زمینه یکپارچه‌سازی سیاست‌های تولید و تعمیرات پیشگیرانه در مقاله‌ای دیگر این مسئله در یک سیستم تولید با محصولات چندگانه جایگزین و با هدف تعیین مقدار بهینه تولید سالانه و جایگاه زمانی بهینه تعمیرات پیشگیرانه در مفروضات مختلف، به‌گونه‌ای مدل‌سازی شده است که سود مورد انتظار را بهینه نماید [۲۱]. همچنین ژیانگ و همکاران [۲۲]، در مقاله خود با ارائه دو مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح آمیخته به ادغام مسائل زمان‌بندی تولید و نگهداری پیشگیرانه در یک مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی یک‌سان با دو نوع محدودیت سطح دسترس پرداخته‌اند. در اولین مدل آن‌ها، اقدامات نگهداری به‌صورت دوره‌ای و هدف زمان‌بندی کارها با کمینه‌سازی زمان صرف شده و در مدل دوم، اقدامات نگهداری انعطاف‌پذیر و هدف کمینه‌سازی کل زمان انجام کارها تعریف شده است. همچنین موضوع زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه در سیستم تولید چندکارخانه‌ای در مقاله ارائه شده توسط کوستا و همکاران [۱۷]، بررسی شده است که در آن مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی یکنواخت با نگهداری دوره‌ای منظم و با هدف کمینه‌سازی کل تأخیرت مورد مطالعه قرار گرفته

است. در مقاله دیگری تابع هدف در حل همزمان مسئله زمان‌بندی تعمیر پیشگیرانه و تولید یکپارچه در صنایع با کالاهای سرمایه به شکل کلی‌تری در نظر گرفته شده و شامل هزینه‌های جریمه دیرکرد و زودکرد، هزینه‌های نگهداری تجهیزات، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، راه‌اندازی، تولید، انتقال و زمان بیکاری تولید نیز لحاظ می‌شود [۲۳]. همچنین مقالاتی در طی سال‌های اخیر به چاپ رسیده‌اند که ماهیت تصادفی بودن و عدم قطعیت در پارامترهای مختلف مسئله را در زمان‌بندی یکپارچه تولید و تعمیرات و نگهداری مورد مطالعه قرار داده‌اند؛ به‌عنوان نمونه مسئله برنامه‌ریزی تولید و تعمیرات پیشگیرانه در سفارش‌دهی به یک ماشین ظرفیت‌دار چندمحصولی مورد بررسی قرار گرفته است که در آن ماشین در معرض شکست‌های احتمالی است [۲۴]. در مقاله پاپروکا [۷] که به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی تعمیر و زمان‌بندی تولید هم‌زمان در زمان‌بندی تولید کارگاهی پرداخته است، از یک روش مبتنی بر تئوری احتمال در سطح دسترس به ماشین‌ها و اختلالات ممکن در آن‌ها جهت پیشینه‌سازی استواری در مدل برنامه‌ریزی تعمیر و زمان‌بندی تولید استفاده شده است که روش مؤثری را برای پیش‌بینی غیرقطعی و پرداختن به شکست‌های پیش‌بینی نشده ارائه می‌نماید. یک مدل یکپارچه استوار برای برنامه‌ریزی تولید و تعمیرات پیشگیرانه در سیستم‌های چند و ضعیفی ارائه شده است که در آن از رویکرد بهینه‌سازی ریاست برای حل مسئله‌ای با تقاضای غیرقطعی نوسانی و شکست در تجهیزات با علل معمول، استفاده شده است؛ همچنین این مدل امکان تصمیم‌گیری بین تعمیرات پیشگیرانه کامل و غیرکامل را فراهم آورده است [۲۵]. همچنین مشابه این مقاله در نوع تقاضا، در مسئله‌ای دیگر بهینه‌سازی توأم سیاست‌های تولید و تعمیرات نگهداری در نظر گرفتن کمبود از نوع پس‌افت آن و تقاضای احتمالی مطالعه شده که در آن از یک رویکرد عددی برای کمینه‌سازی هزینه کل، تعیین مقدار مطلوب سطح موجودی احتیاطی و زمان بهینه عملیات نگهداری و تعمیرات استفاده شده است [۲۶].

اخیراً نیز مسئله برنامه‌ریزی نت و تولید مورد توجه محققان بوده است؛ به‌عنوان نمونه یک مدل بهینه‌سازی هم‌زمان تولید و تعمیر در محیط تولید تک‌ماشین به کار گرفته شده است که در آن زمان فرآیندی و مصرف انرژی تحت تأثیر تنزیل ماشین و خرابی آن است که نرخ تنزیل آن، تابعی گسسته چندمرحله‌ای فرض شده است [۲۷]. همچنین در مدل مشابه دیگری که در آن زمان‌بندی تولید و برنامه‌ریزی تعمیر پیشگیرانه هم‌زمان انجام شده است، هدف کمینه‌سازی هزینه کل تأخیرت در یک خط تولید (تک‌ماشین) در نظر گرفته شده است [۲۸]. در مقاله دیگری زمان‌بندی کوتاه‌مدت برای فرآیندهای چندمحصولی در کارخانجات بسته‌بندی با زمان‌بندی در زمان پیوسته و زمان‌بندی پیشین‌سازی جهت گنجاندن مشخصه‌های واقعی در مدل پیشنهاد شده است [۲۹].

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، گرچه تحقیقات متعددی به مباحث برنامه‌ریزی نت و تولید پرداخته‌اند، یکپارچه‌سازی تصمیمات

قرارداد با تأمین‌کنندگان مواد/محصول و همچنین تعیین استراتژی‌های نت است؛ که این خود شامل عقد قرارداد با مراکز خدمات نت (MSC) برای برون‌سپاری کامل عملیات نت به آن‌ها و یا تعمیرات پیشگیرانه دوره‌ای است.

دسته دوم تصمیمات عملیاتی یا دوره‌ای (مرحله دوم) هستند که میزان سفارش یا اندازه انباشته محصول برای هر کارخانه و میزان عرضه آن در هر دوره و همچنین متغیرهای وابسته همچون احتمال خرابی هر تجهیز، احتمال اختلال در فعالیت هر کارخانه، هزینه‌های مربوط به اختلال و غیره را در برمی‌گیرد. تصمیمات مرحله دوم به تصمیمات مرحله اول و در ادامه به سناریوهای محتمل برای پارامترهای غیرقطعی تقاضا و نرخ شکست/خرابی تجهیزات وابسته است.

هدف از حل مسئله MFPMP موردنظر این تحقیق بیشینه‌سازی کل سود سیستم MFP است. درآمد حاصل فروش محصول در قیمت آن است که قیمت ثابت و از پیش مشخص است ولی میزان فروش وابسته به تقاضا و همچنین عدم اختلال در فعالیت هر مرکز است. هزینه‌ها شامل هزینه ثابت قرارداد با تأمین‌کنندگان، هزینه متغیر سفارش دوره‌ای، هزینه برون‌سپاری نت، هزینه استقرار تجهیزات پشتیبان، هزینه نت پیشگیرانه دوره‌ای و نهایتاً هزینه فروش از دست‌رفته ناشی از اختلال در فعالیت هر مرکز است.

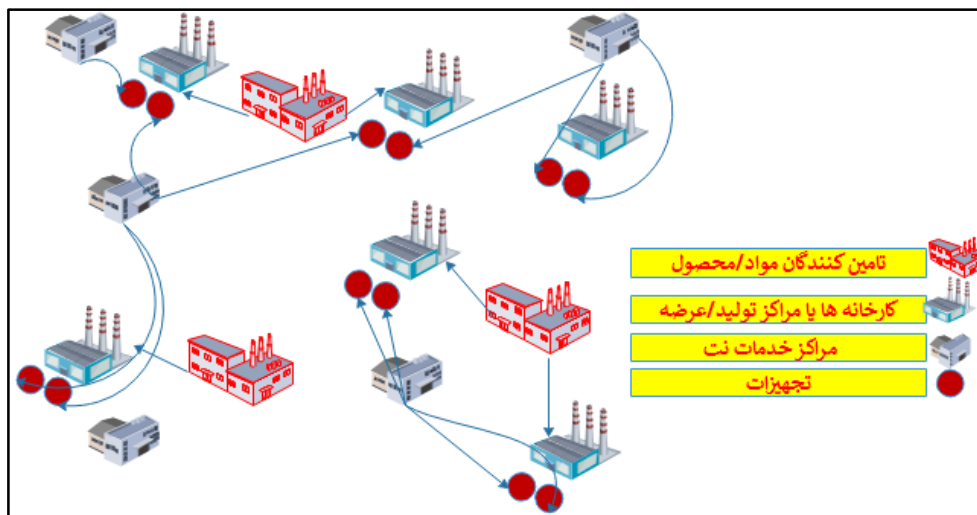
شکل ۱ یک مثال از شبکه MFP با هفت کارخانه را نشان می‌دهد که سفارش دوره‌ای آن‌ها با عقد قرار با سه تأمین‌کننده میسر می‌شود و عملیات نت دو تجهیز آن‌ها توسط پنج MSC انجام می‌شود.

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید و نت اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه تولید و نت در شبکه‌های MFP، علیرغم اهمیت فراوان، تا به اکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. ارائه یک مدل بهینه‌سازی تصادفی سناریو محور به همراه رویکرد حل تجزیه بندرز، برای حل مسئله یکپارچه‌سازی تصمیمات تولید و نت، با در نظر گرفتن تقاضا و نرخ خرابی تصادفی، برای نخستین بار در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

۳. تشریح مسئله

در تبیین مسئله موردنظر این تحقیق، یک شرکت تولیدی/خدماتی در نظر گرفته می‌شود که مبتنی بر سیستم MFP فعالیت می‌کند و کارخانه‌ها یا مراکز تولید/عرضه محصول آن از لحاظ جغرافیایی پراکنده هستند. هر یک از کارخانه در یک دوره مشخص ظرفیت محدودی دارند و استفاده از این ظرفیت نیز مشروط به عدم خرابی تجهیزات آن است. در هر کارخانه تجهیزات مختلفی وجود دارد که خرابی هر یک از آن‌ها موجب اختلال در فعالیت آن مرکز می‌شود. مدیران این سیستم MFP در پی یک برنامه یکپارچه برای تصمیمات تولید و نگهداری و تعمیرات (نت) تجهیزات اساسی کارخانه‌ها هستند به نحوی که بیشینه سود حاصل شود. در مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نت چندکارخانه‌ای (به اختصار MFPMP^۱)، تصمیمات به دو دسته افزایش می‌شوند.

دسته اول تصمیمات بلندمدت (مرحله اول) هستند و مربوط به عقد



شکل (۱): شبکه MFP موردنظر این تحقیق برای مسئله تولید و نت

- با توجه به پراکندگی جغرافیایی و همچنین برند شرکت‌های مختلف، هزینه تخصیص عملیات نت به هر MSC متفاوت است.
- تابع خرابی تجهیزات حالت خاص از توزیع بی حافظه نمایی پیروی می‌کند.
- میزان سفارش دوره‌ای و همچنین سطح ذخیره‌سازی محدود است.

- مهم‌ترین مفروضات و قیودی که در مدل‌سازی و حل این مسئله در نظر گرفته می‌شود، عبارت است از:
- یک MSC ممکن است برای یک کارخانه در دسترس نباشد و هر MSC ظرفیت مشخصی در واحد زمان دارد.
- شبکه MFP تک‌محصولی است ولی چند تجهیز باید نت شوند.

۴. فرمولاسیون مسئله و رویکرد حل پیشنهادی

در این بخش، ابتدا مدل بهینه‌سازی پیشنهادی برای مسئله MFPM در ارائه می‌شود. سپس رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار توضیح داده می‌شود و نحوه بکارگیری آن برای کنترل تقاضا و خرابی تصادفی توضیح داده می‌شود. و نهایتاً روش حل تجزیه بندرز برای حل این مسئله توسعه داده می‌شود.

- بودجه در نظر گرفته شده برای برون‌سپاری نت، استقرار تجهیزات پشتیبان و نهایتاً هزینه‌های دوره‌ای نت، محدود است.
- تقاضا غیرقطعی و در سه سناریو با بالا/متوسط/کم بیان می‌شود.
- همچنین نرخ خرابی تجهیزات کارخانه‌ها نیز سناریومحور (بالا/متوسط/کم) بیان می‌شود و نهایتاً ۹ سناریو بر سیستم MFP حاکم است. می‌توان فرض کرد شناس این سناریوها یکسان است و با تصمیم‌گیرنده می‌تواند بر اساس اطلاعات گذشته برای هر سناریو یک احتمال وقوع در نظر بگیرد.

جدول (۱): نماد و علائم ریاضی

مجموعه‌ها و اندیس‌ها			
مجموعه کارخانه‌ها یا مراکز تولید/عرضه محصول شبکه MFP	$F = \{1, 2, \dots, f, \dots, F \}$		
مجموعه تجهیزات موجود در هر کارخانه	$E = \{1, 2, \dots, e, \dots, E \}$		
مجموعه مراکز خدمات نت (MSC ها)	$M = \{1, 2, \dots, m, \dots, M \}$		
مجموعه تأمین‌کنندگان	$S = \{1, 2, \dots, s, \dots, S \}$		
مجموعه سطوح ظرفیت برای عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان	$U = \{1, 2, \dots, u, \dots, U \}$		
مجموعه دوره‌های زمانی	$T = \{1, 2, \dots, t, \dots, T \}$		
پارامترها/داده‌های ورودی			
گنجایش/ظرفیت نگهداری محصول در کارخانه f	V_f	اگر کارخانه f مجهز به تجهیز e است؛ ۱؛ در غیر این صورت ۰	k_{fe}
حداکثر ظرفیت سفارش‌دهی به تأمین‌کننده s با قرارداد سطح u	cap_{su}	اگر تجهیز e قابل نت توسط MSC m است؛ ۱؛ در غیر این صورت ۰	b_{me}
قیمت فروش هر واحد محصول در هر یک از مراکز شبکه MFP	ρ	اگر MSC m برای کارخانه f در دسترس است؛ ۱؛ در غیر این صورت ۰	L_{mf}
حداکثر تعداد کارخانه که نت تجهیز e در آن‌ها توسط MSC m در هر دوره امکان‌پذیر است.	N_{em}	هزینه نت دوره‌ای تجهیز e کارخانه f توسط MSC m در دوره t	mc_{efm}^t
بودجه در نظر گرفته‌شده برای نت دوره‌ای در دوره t	B_t^1	هزینه واحد اختلال در عرضه کارخانه f در دوره t در اثر خرابی تجهیز e	dc_{ef}^t
بودجه در نظر گرفته‌شده برای برون‌سپاری نت	B^2	هزینه تجهیز پشتیبان e در کارخانه f	bc_{ef}
بودجه در نظر گرفته‌شده برای استقرار تجهیزات پشتیبان در مراکز شبکه MFP	B^3	هزینه برون‌سپاری تعمیرات و نگهداری تجهیز e در کارخانه f	oc_{ef}
نرخ خرابی تجهیز e کارخانه f (۱ به روی واحد زمان): غیرقطعی و سناریو محور	$\tilde{\lambda}_{ef}$	هزینه ثابت عقد قرارداد با تأمین‌کننده s برای قبول سفارشات تا سطح ظرفیت u	fc_{su}
تقاضا کارخانه f در دوره: غیرقطعی و سناریو محور	\widetilde{dem}_{ft}	هزینه واحد خرید محصول/مواد از تأمین‌کننده s برای کارخانه f	pc_{sf}
مدت زمان هر دوره (بر حسب واحد زمان)	Φ	هزینه واحد نگهداری محصول در کارخانه f	hc_f
متغیرهای تصمیم‌گیری			
اگر با تأمین‌کننده s تا سطح ظرفیت u قرار بسته شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است. (متغیر مرحله اول)			A_{su}
اگر برای تجهیز e در کارخانه f تجهیز پشتیبان در نظر گرفته شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است. (متغیر مرحله اول)			Y_{ef}
اگر عملیات نت تجهیز e در کارخانه f برون‌سپاری شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است. (متغیر مرحله اول)			Z_{ef}
اگر تجهیز e کارخانه f توسط MSC e در دوره t انجام شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است. (متغیر مرحله اول)			X_{efm}^t
مقدار سفارش کارخانه f به تأمین‌کننده s در دوره t (متغیر مرحله دوم)			O_{fst}
مقدار تولید/عرضه محصول کارخانه f در دوره t (متغیر مرحله دوم)			Q_{ft}
موجودی تولید/عرضه محصول از f در دوره t (متغیر مرحله دوم)			I_{ft}
احتمال خرابی تجهیز e در کارخانه f در دوره t (متغیر مرحله دوم)			FFP_{ef}^t
احتمال اختلال در فعالیت کارخانه f به علت خرابی تجهیزات در دوره t (متغیر مرحله دوم)			FFP_f^t

۴-۱. مدل پیشنهادی مسئله MFPMP تابع هدف

$$\begin{aligned} \max z = & \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \rho \cdot Q_{ft} \\ & - \left(\sum_{s \in S} \sum_{u \in U} f_{csu} \cdot A_{sfu} + \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} p_{csf} \cdot O_{fst} + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} h_{cf} \cdot I_{ft} + \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} m c_{efm}^t \cdot X_{efm}^t \right) \\ & + \left(\sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} d c_{ef}^t \cdot FFP_{ef}^t \cdot (1 - [Y_{ef} + Z_{ef}]) + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} b c_{ef} \cdot Y_{ef} + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} o c_{ef} \cdot Z_{ef} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{s \in S} O_{fst} + I_{ft-1} - I_{ft} = Q_{ft} \quad \forall f \in F, t \in T \quad (6)$$

$$I_{ft} \leq V_f \quad \forall f \in F, t \in T \quad (7)$$

$$Q_{ft} = \widetilde{dem}_{ft} \quad \forall f \in F, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M} X_{efm}^t \leq 1 \quad \forall f \in F, e \in E, t \in T \quad (9)$$

$$Y_{ef} + Z_{ef} \leq 1 \quad \forall f \in F, e \in E \quad (10)$$

$$X_{efm}^t \leq b_{me} \cdot L_{mf} \quad \forall f \in F, e \in E, m \in M, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{f \in F} X_{efm}^t \leq N_{em} \quad \forall e \in E, m \in M, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} m c_{efm}^t \cdot X_{efm}^t \leq B_1^t \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{f \in F} o c_{ef} \cdot Z_{ef} \leq B^2 \quad (14)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{f \in F} b c_{ef} \cdot Y_{ef} \leq B^3 \quad (15)$$

$$\begin{cases} X_{efm}^t \leq k_{fe} \quad \forall f \in F, e \in E, m \in M, t \in T \\ Y_{ef} \leq k_{fe} \quad \forall f \in F, e \in E \\ Z_{ef} \leq k_{fe} \quad \forall f \in F, e \in E \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} X_{efm}^t, Y_{ef}, Z_{ef}, A_{sfu} \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F, e \in E, m \in M, t \in T, s \in S, u \in U \\ O_{fst}, Q_{ft}, I_{ft}, FFP_{ef}^t, FFP_f^t \leq k_{fe} \quad \forall f \in F, e \in E, t \in T, s \in S \end{cases} \quad (17)$$

رابطه (۵) بیان می‌کند سفارش به هر تأمین‌کننده مستلزم آن است که با آن قرارداد بسته شده باشد و حداکثر سفارش نیز محدود است. رابطه (۶) تعادل جریان ورودی و خروجی در هر یک از کارخانه‌های شبکه MFP تضمین می‌کند. رابطه (۷) گنجایش ذخیره‌سازی هر کارخانه را محدود می‌کند. رابطه (۸) تعادل عرضه و تقاضا را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است. که مقدار تقاضا غیرقطعی است و در ارائه رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار به آن پرداخته می‌شود.

رابطه (۹) بیان می‌کند که در هر دوره تجهیزات هر کارخانه حداکثر توسط یک MSC نت می‌شود. براساس رابطه (۱۰)، از دو استراتژی مربوط به برون‌سپاری نت و قرار دادن تجهیز پشتیبان، حداکثر یک مورد برای هر تجهیز هر کارخانه استفاده می‌شود. رابطه (۱۱) بیان می‌کند عملیات نت تجهیزات هر کارخانه توسط هر MSC در هر دوره مستلزم آن است که MSC عملیات نت آن تجهیز را انجام دهد ($b_{me} = 1$) و امکان ارتباط بین کارخانه و MSC وجود داشته باشد ($L_{mf} = 1$). در رابطه (۱۲) قید ظرفیت هر MSC در هر دوره اعمال می‌شود. روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) به ترتیب محدودیت بودجه نت دوره‌ای، بودجه برون‌سپاری عملیات نت، و بودجه قراردادن تجهیزات

رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که در آن سود حاصل از همه مراکز عرضه شبکه MFP حداکثر می‌گردد. سود حاصل تقاضای هزینه‌ها از درآمد است. درآمد از میزان فروش در قیمت فروش محاسبه می‌شود و هزینه‌ها شامل هزینه‌های تولید است و هزینه‌های نت.

قیود و محدودیت

پیش از آنکه قیود بیان شود، فرض کنیم تابع خرابی/شکست تجهیزات موجود در کارخانه‌ها بعد از آخرین مرتبه نت، با توزیع نمایی با نرخ خرابی $\widetilde{\lambda}_{ef}$ بیان می‌شود. در این صورت، $\widetilde{\lambda}_{ef} \cdot e^{-\widetilde{\lambda}_{ef} \cdot \theta}$ تابع خرابی است که در آن $\theta \geq 0$ زمان گذشته‌شده از آخرین نت را نشان می‌دهد. بر این اساس، احتمال آنکه تجهیز e در کارخانه f در دوره t خراب شود به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} EFP_{ef}^t &= \int_{\Phi \tau_{eft}}^{\Phi(1+\tau_{eft})} \widetilde{\lambda}_{ef} \cdot e^{-\widetilde{\lambda}_{ef} \cdot \theta} d\theta \\ &= (1 - e^{-\widetilde{\lambda}_{ef} \cdot \Phi}) e^{-\widetilde{\lambda}_{ef} \cdot \Phi \tau_{eft}} \end{aligned} \quad (2)$$

جاییکه τ_{eft} نشان می‌دهد تا ابتدا دوره t چند دوره از آخرین مرتبه نگهداری و تعمیرات تجهیز e کارخانه f می‌گذرد.

توجه کنید که اگر در دوره t عملیات نت انجام شود، با توجه به آنکه فرض کرده‌ایم نت ابتدا دوره انجام می‌شود، در این صورت، $\tau_{eft} = 0$ و احتمال خرابی در دوره t برابر با $1 - e^{-\widetilde{\lambda}_{ef} \cdot \Phi}$ است. برای محاسبه τ_{eft} ، می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد که به خطی‌سازی آن در زیربخش بعدی پرداخته خواهد شد.

$$\begin{aligned} \tau_{eft} &= t - \max_{t' \in T | t' \leq t} t' \sum_{m \in M} X_{efm}^{t'} \\ &\quad \forall e \in E, f \in F, t \in T \end{aligned} \quad (3)$$

همان‌طور که اشاره شد، در یک کارخانه می‌تواند تجهیزات مختلفی را شامل شود. ما احتمال اختلال در فعالیت کارخانه را برابر بیشینه احتمال خرابی همه تجهیزات در نظر می‌گیریم. لذا، از رابطه (۴) برای محاسبه احتمال خرابی هر کارخانه در هر دوره استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} FFP_f^t &= \max_{e \in E} \{EFP_{ef}^t\} \rightarrow FFP_f^t \geq EFP_{ef}^t \\ &\quad \forall e \in E \end{aligned} \quad (4)$$

سایر قیود و روابط ریاضی حاکم بر تصمیمات برنامه‌ریزی تولید و نت به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{f \in F} O_{fst} \leq \sum_{u \in U} cap_{su} A_{su} \quad \forall s \in S, t \in T \quad (5)$$

$$\begin{aligned} EFP_{ef}^t &= (1 - e^{-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi}) e^{-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi \cdot \tau_{eft}} \\ &= (1 - e^{-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi}) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi \cdot \tau_{eft})^n}{n!} \\ &\cong (1 - e^{-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi}) (1 - \bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi \cdot \tau_{eft}) \end{aligned} \quad (24)$$

$\forall e \in E, fe \in F, te \in T$

۴-۳. رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور برای مواجهه با عدم قطعیت تقاضا و نرخ خرابی

در مدل پیشنهادی فوق، پارامترهای نرخ خرابی تجهیزات هر کارخانه ($\bar{\lambda}_{ef}$) و تقاضا (\widetilde{dem}_{ft}) غیرقطعی/تصادفی هستند و همان‌طور که در مفروضات مسئله اشاره شد، به‌صورت سناریومحور بیان می‌شوند. در ادامه نخست کلیات رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور استوار بیان می‌شود و سپس نحوه بکارگیری آن توضیح داده می‌شود. رویکرد "برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور (SSP)" از جمله رویکردهای حل مسئله تحت شرایط عدم قطعیت با داده‌های تصادفی سناریومحور است. در رویکرد SSP متغیرها به دو دسته افزای می‌شوند: متغیرهای مستقل از سناریو و متغیرهای وابسته به سناریو. متغیرهای مستقل از در تمام سناریوها مقدار ثابتی دارند و تحت هیچ‌یک از سناریوهای محتمل‌الوقوع، قابل تغییر نیستند. در مقابل، متغیرهای وابسته تحت هر سناریو و با توجه به متغیرهای مستقل از سناریو، مقدارشان تغییر می‌کند. رویکرد SSP در پی تعیین پاسخ برای متغیرهای مستقل از سناریو است به‌طوری‌که تحت هر سناریو محتمل با تغییر در متغیرهای وابسته به سناریو مسئله موجه باشد. تابع هدف در رویکرد SSP بهینه کردن متوسط عملکرد سیستم تحت همه سناریوها است [۳۰]. در حالت کلی، رویکرد SSP به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \text{Min } E(Z) = \sum_{s \in S} \pi_s \cdot Z_s \\ Z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T \cdot y \quad \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0 \end{cases} \quad (25)$$

که در آن مقدار هدف تحت سناریو s ، x_s متغیرهای وابسته به سناریو (معمولاً متغیر پیوسته و نامنفی) و y متغیرهای مستقل از سناریو (معمولاً متغیر باینری)، $(c_s, d_s, A_s, K_s, b_s)$ مقدار پارامترهای مسئله تحت سناریو s ، (R, q) مقدار پارامترهای قطعی، و نهایتاً π_s احتمال وقوع سناریو $s \in S$ است [۳۱، ۳۲].

در توسعه رویکرد SSP، مالوی و همکارانش [۳۰]، علاوه بر متوسط عملکرد سیستم، با تعریف دو مفهوم استواری حل^۲ یا استواری بهینگی^۳ و استواری مدل^۴ یا استواری شدنی بودن^۵، ابتدا واریانس مقدار تابع هدف را نیز در تابع هدف در نظر گرفتند و در ثانی در قیود وابسته به سناریو انعطاف لحاظ کردند که براساس آن می‌توان قیود با شانس

پشتیبان را اعمال می‌کند. در روابط (۱۶) بیان می‌شود که در هر کارخانه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دوره‌ای نت فقط برای تجهیزات موجود ($k_{fe} = 1$) انجام می‌شود. نهایتاً در رابطه (۱۶) متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله تعریف شده است.

۴-۲. خطی‌سازی مدل

رابطه (۳) برای تعیین آخرین دوره عملیات نت هر تجهیز (τ_{eft}) غیرخطی است.

برای بازنویسی خطی، ابتدا $u_{eft} = \max_{t' \in T | t' \leq t} t' \sum_{m \in M} X_{efm}^{t'}$ تعریف می‌شود و در رابطه (۳) قرار می‌گیرد. سپس تابع max به‌صورت زیر خطی‌سازی می‌شود:

$$u_{eft} \geq t' \sum_{m \in M} X_{efm}^{t'} \quad \forall t' \in T | t' \leq t \quad (18)$$

$\forall e \in E, fe \in F, te \in T$

$$u_{eft} = \sum_{t' \in T | t' \leq t} k_{eft'} \left(t' \sum_{m \in M} X_{efm}^{t'} \right) \quad (19)$$

$$\forall e \in E, fe \in F, te \in T$$

$$\sum_{t' \in T | t' \leq t} k_{eft'} = 1 \quad \forall e \in E, fe \in F, te \in T \quad (20)$$

جایی که $k_{eft'}$ یک متغیر باینری کمکی است.

در تابع هدف؛ عبارت ضرب $EFP_{ef}^t \cdot (1 - [Y_{ef} + Z_{ef}])$ موجب غیرخطی شدن مدل شده است. با تعریف $h_{eft} = EFP_{ef}^t \cdot (1 - [Y_{ef} + Z_{ef}])$ ، خطی‌سازی آن به‌صورت زیر انجام می‌شود.

$$h_{eft} \leq (1 - Y_{ef} - Z_{ef}) \text{BigM} \quad \forall e \in E, fe \in F, te \in T \quad (21)$$

$$h_{eft} \leq EFP_{ef}^t \quad \forall e \in E, fe \in F, te \in T \quad (22)$$

$$h_{eft} \geq EFP_{ef}^t - ([Y_{ef} + Z_{ef}]) \text{M} \quad \forall e \in E, fe \in F, te \in T \quad (23)$$

جای که BigM یک عدد به اندازه کافی بزرگ است. توجه شود که خطی‌سازی فوق مبتنی بر شرط $Y_{ef} + Z_{ef} \leq 1$ است.

نهایتاً، همان‌طور که در رابطه (۲) اشاره شد، با در نظر گرفتن توزیع نمایی برای بیان خرابی، احتمال خرابی تجهیزات هر کارخانه از رابطه غیرخطی $EFP_{ef}^t = (1 - e^{-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi}) e^{-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi \cdot \tau_{eft}}$ محاسبه می‌شود. با توجه به بسط مک‌لورن تابع $e^{-\bar{\lambda}_{ef} \cdot \Phi \cdot \tau_{eft}}$ ، می‌توان تقریب خطی زیر را برای محاسبه احتمال خرابی تجهیزات در نظر گرفت:

پیشنهادی این تحقیق بکار گرفته می‌شود. بر این اساس، تغییرات زیر در مدل پیشنهادی رخ می‌دهد:

تابع هدف به صورت متوسط سود منهای انحراف سود (در ضریب λ) منهای نقض قید تقاضا (در ضریب ω) تعریف می‌شود.

همه متغیرهای مرحله دوم و همچنین پارامترهای غیرقطعی ($\bar{\lambda}_{ef}$) و (\bar{dem}_{ft}) با اندیس سناریو (j) بیان می‌شوند

رابطه (۸) به صورت $Q_{ftj} = dem_{ftj} + (\xi_{ftj}^+ - \xi_{ftj}^-)$ بیان می‌شود. هر رابطه دیگر نیز که پارامتر و یا متغیر وابسته به سناریو داشته باشد به باید به ازای همه سناریوها موجه باشد. به عنوان مثال، رابطه (۵) به صورت $\sum_{f \in F} O_{fstj} \leq \sum_{u \in U} cap_{su} A_{su} \quad \forall s \in S, t \in T, j \in J$ بیان می‌شود.

هر رابطه که فقط متغیرهای مرحله اول داد و پارامترهای سناریومحور نیز ندارد (مثل روابط (۱۶)-(۹)) هیچ تغییری نمی‌کند.

۴-۴. رویکرد حل مبتنی بر تجزیه بندرز

مدل پیشنهادی برای حل مسئله MFPMP مورد نظر این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته ($MILP^2$) است که بعد از بکارگیری رویکرد RSSP برای مواجه با پارامترهای غیرقطعی MILP باقی می‌ماند ولی درجه پیچیدگی آن افزایش می‌یابد. روش تجزیه بندرز (BD^3) از جمله رویکردهای حل بسیار کارا در حل مسئله MILP تصادفی بر RSSP است که مورد توجه محققان متعددی قرار گرفته است [۳۵-۳۳]

به منظور توضیح دقیق‌تر روش BD فرض کنید مدل MILP پیشنهادی برای مسئله MFPMP در حالت فشرده به صورت بیان شده باشد:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MILP} \\ \text{Min } c^t x + f^t y \\ \text{s. t.} \\ Ax + Dy \geq b \\ Ky \geq e \\ x \geq 0, y \in S = \{0,1\} \end{array} \right. \quad (29)$$

در روش BD مدل MILP به دو زیر مسئله افزاز می‌شود زیر مسئله اول که MP^4 نامیده می‌شود $y \in S$ تولید می‌کند و از آن کران پایین یا LB به دست آورده می‌شود و زیرمسئله دوم که SP^5 نامیده می‌شود متغیرهای $x \geq 0$ و دوگان قیدها به دست آورده می‌شود که از آن کران بالا یا UB به دست آورده می‌شود. برای آنکه در برش جدید بر مسئله MP نیاز به برش بهینگی (OC^6) و برش شدنی (FC^7) براساس متغیرهای دوگان است، عموماً مستقیماً به جای SP از دوگان آن یعنی DSP^8 استفاده می‌شود. در ادامه SP، DSP و MP برای مدل پیشنهادی این تحقیق و همچنین برش‌های OC و FC آورده شده‌اند. مدل SP و DSP با ثابت شدن متغیرهای:

کمتر را تا حدی نقض کرد تا هم متوسط عملکرد سیستم بهبود یابد و هم انحراف جوابها کاهش یابد. مدل "برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور استوار" (RSSP) به صورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } E(Z) + \text{Var}(Z) + \text{Penalty} = \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \\ \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right)^2 + \omega \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \xi_s^2 \\ z_s = c_s^t \cdot x_s + d_s^t y \quad \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s + \xi_s \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0 \end{array} \right. \quad (26)$$

که در آن ξ_s متغیر کمبود/مازاد در سناریو $s \in S$ ، ω ضریب استواری مدل و λ ضریب اهمیت به واریانس جوابها در سناریوهای مختلف است. سایر نمادها در مدل SSP توضیح داده شد. مدل RSSP پیشنهادی مالوی یک مسئله بهینه‌سازی کوادراتیک (درجه دوم) است. یو و لی [۳۲] با جایگذاری تابع قدمطق به جای توان دوم، قابل خطی‌سازی مدل مالوی را توسعه داده‌اند که مدل پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left| z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right| + \\ \omega \sum_{s \in S} \pi_s \cdot |\xi_s| \\ z_s = c_s^t \cdot x_s + d_s^t y \quad \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s + \xi_s \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0 \end{array} \right. \quad (27)$$

و خطی‌سازی آن به صورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} + \right) + \\ \omega \sum_{s \in S} \pi_s (\xi_s^+ + \xi_s^-) \\ z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in S \\ z_s = c_s^t \cdot x_s + d_s^t y \quad \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y = b_s + (\xi_s^+ - \xi_s^-) \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0 \\ \xi_s^+, \xi_s^-, \theta_s \geq 0 \end{array} \right. \quad (28)$$

که در آن $\theta_s \geq 0$ یک متغیر کمکی برای خطی‌سازی است و مقدار انحراف معیار تحت سناریو s است.

در این تحقیق، رویکرد RSSP مبتنی بر فرم کلی (۲۸) روی مدل

6. Optimality Cut
7. Feasibility Cut
8. Dual Sup Problem

1. Robust Scenario-based Stochastic Programming
2. Mixed Integer /Linear Programming
3. Benders Decomposition
4. Master Problem
5. Sub Problem

$$\begin{aligned} & \max z_{SP} \\ & = - \left(\sum_{s \in S} \sum_{u \in U} fc_{su} \cdot A_{sfu} \right. \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} mc_{efm}^t \cdot X_{efm}^t \quad (43) \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} dc_{ef}^t \cdot (1 - [Y_{ef} + Z_{ef}]) \\ & + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} bc_{ef} \cdot Y_{ef} + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} oc_{ef} \cdot Z_{ef} \left. \right) + \theta \\ & \sum_{m \in M} X_{efm}^t \leq 1 \quad \forall f \in F, e \in E, t \in T \quad (44) \\ & Y_{ef} + Z_{ef} \leq 1 \quad \forall f \in F, e \in E \quad (45) \\ & X_{efm}^t \leq b_{me} \cdot L_{mf} \quad \forall f \in F, e \in E, m \in M, t \in T \quad (46) \\ & \sum_{f \in F} X_{efm}^t \leq N_{em} \quad \forall e \in E, m \in M, t \in T \quad (47) \\ & \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} mc_{efm}^t \cdot X_{efm}^t \\ & \leq B_t^1 \quad \forall t \in T \quad (48) \\ & \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} oc_{ef} \cdot Z_{ef} \leq B^2 \quad (49) \\ & \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} bc_{ef} \cdot Y_{ef} \leq B^3 \quad (50) \\ & \begin{cases} X_{efm}^t \leq k_{fe} \quad \forall f \in F, e \in E, m \in M, t \in T \\ Y_{ef} \leq k_{fe} \quad \forall f \in F, e \in E \\ Z_{ef} \leq k_{fe} \quad \forall f \in F, e \in E \end{cases} \quad (51) \\ & \{X_{efm}^t, Y_{ef}, Z_{ef}, A_{su} \\ & \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F, e \in E, m \in M, t \in T, s \in S, u \in U \quad (52) \end{aligned}$$

در هر تکرار، اگر DSP کران‌دار باشد برش بهینگی زیر،

$$\begin{aligned} \theta \leq & \sum_{s \in F} \sum_{t \in T} (u1_{st}) \sum_{u \in U} cap_{su} \bar{A}_{su} + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} (u3_{ft}) V_f \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} (u4_{ft}) dem_{ft} \end{aligned}$$

و اگر DSP نامتناهی باشد برش شدنی بودن زیر،

$$\begin{aligned} \sum_{s \in F} \sum_{t \in T} (u1_{st}) \sum_{u \in U} cap_{su} \bar{A}_{su} + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} (u3_{ft}) V_f \\ + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} (u4_{ft}) dem_{ft} \leq 0 \end{aligned}$$

به مدل MP اضافه می‌شود. لازم به توضیح است که در این مسئله بیشینه‌سازی، UB حاصل از MP نزولی و LB حاصل از DSP روند صعودی دارد و شرط توقف آن است که $\left| \frac{UB^{(k)} - LB^{(k)}}{LB^{(k)}} \right| < \delta$ باشد (که δ حداکثر خطای نسبی است). شکل ۲ روش BD را در سه فاز اصلی خلاصه می‌کند.

$$X_{efm}^t, Y_{ef}, Z_{ef}, A_{su} \in \{0, 1\}$$

به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \max z_{SP} \\ & = \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \rho \cdot Q_{ft} \\ & - \left(\sum_{s \in S} \sum_{u \in U} fc_{su} \cdot \bar{A}_{sfu} \right. \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} pc_{sf} \cdot O_{fst} + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} hc_f \cdot I_{ft} \quad (30) \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} mc_{efm}^t \cdot \bar{X}_{efm}^t \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} dc_{ef}^t \cdot FFP_{ef}^t \cdot (1 - [\bar{Y}_{ef} + \bar{Z}_{ef}]) \\ & + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} bc_{ef} \cdot \bar{Y}_{ef} + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} oc_{ef} \cdot \bar{Z}_{ef} \left. \right) \\ & \sum_{f \in F} O_{fst} \leq \sum_{u \in U} cap_{su} \bar{A}_{su} \quad \forall s \in S, t \in T \quad (u1_{st}) \quad (31) \end{aligned}$$

$$\sum_{s \in S} O_{fst} + I_{ft-1} - I_{ft} \quad (32)$$

$$= Q_{ft} \quad \forall f \in F, t \in T \quad (u2_{ft})$$

$$I_{ft} \leq V_f \quad \forall f \in F, t \in T \quad (u3_{ft}) \quad (33)$$

$$Q_{ft} = \widetilde{dem}_{ft} \quad \forall f \in F, t \in T \quad (u4_{ft}) \quad (34)$$

$$FFP_f^t \geq EFP_{ef}^t \quad \forall f \in F, e \in E \quad (u5_{fe}) \quad (35)$$

$$O_{fst}, Q_{ft}, I_{ft}, EFP_{ef}^t, FFP_f^t \geq 0 \quad \forall f \in F, e \in E, t \in T, s \in S \quad (36)$$

$$\begin{aligned} & \min z_{DSP} \\ & = \sum_{s \in F} \sum_{t \in T} (u1_{st}) \sum_{u \in U} cap_{su} \bar{A}_{su} \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} (u3_{ft}) V_f + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} (u4_{ft}) dem_{ft} \\ & - \left(\sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} mc_{efm}^t \cdot \bar{X}_{efm}^t \right. \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} dc_{ef}^t \cdot FFP_{ef}^t \cdot (1 - [\bar{Y}_{ef} + \bar{Z}_{ef}]) \\ & + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} bc_{ef} \cdot \bar{Y}_{ef} + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} oc_{ef} \cdot \bar{Z}_{ef} \left. \right) \quad (37) \end{aligned}$$

$$(u1_{st}) \geq -pc_{sf} \quad \forall s \in S, t \in T, f \in F \quad (38)$$

$$(u2_{ft}) + (u4_{ft}) \geq \rho \quad \forall f \in F, t \in T \quad (39)$$

$$(u2_{ft}) - (u2_{ft-1}) + (u3_{ft}) \geq -hc_f \quad f \in F \quad (40)$$

$$(u5_{fe}) \geq -dc_{ef}^t \quad \forall e \in E, f \in F, t \in T \quad (u4_{sf}) \quad (41)$$

$$(u1_{st}) \geq 0, \quad (u2_{ft}) = free, \\ (u3_{ft}) \geq 0, (u4_{ft}) = free, (u5_{fe}) \leq 0 \quad (42)$$

فاز ۱: تجزیه مسئله و مقداردهی اولیه به متغیرهای بفرنج/پیچیده‌ساز

- با در نظر گرفتن متغیرهای پیچیده‌ساز y (متغیرهای گسسته/اینری و ...) مدل SP از MP استخراج شود.
- مدل DSP یا دوگان SP، که فضای جواب آن مستقل از متغیرهای پیچیده‌ساز y است، تشکیل شود.
- مدل RMP از MP استخراج شود.
- در مدل RMP، مجموعه قیود حاصل از برش‌های بهینگی (OC) و برش‌های شدنی (FC) آن تهی باشد ($OC = \emptyset$, $FC = \emptyset$).
- $y = \bar{y}^k \in S; Ky \geq e$ به عنوان مقدار اولیه شدنی متغیرهای پیچیده‌ساز y باشد.
- مقدار حداکثر خطا (δ) به عنوان شرط توقف الگوریتم مشخص شود.
- قرار بده $k=1$ و فاز ۲ شروع شود.

فاز ۲: حل DSP و بدست آوردن برش شدنی یا بهینگی

مدل DSP شده:

- اگر مدل DSP نشدنی است، مدل SP نیز یا نشدنی است و یا جواب نامتناهی دارد؛ توقف.
- اگر جواب بهینه DSP نامتناهی باشد، آنگاه برش بهینگی $\Psi \geq u_1^k(b - Dy)$ به مجموعه OC اضافه شود. به فاز ۳ برو.
- اگر جواب بهینه DSP نامتناهی نباشد مدل MDSP (مدل همگن DSP و نرمال‌شده) تشکیل شود و از حل بهینه آن برش شدنی $u_1^k(b - Dy) \leq 0$ به مجموعه FC اضافه شود. به فاز ۳ برو.

فاز ۳: حل RMP و بررسی شرط توقف (همگرایی)

- مدل RMP مشروط به قیود اصلی $\{Ky \geq e, y \in S\}$ و مجموعه برش‌های بهینگی و شدنی OC و OF حل شود.
- اگر مدل RMP نشدنی است، MP نیز نشدنی است و مسئله پاسخ شدنی ندارد. توقف.
- اگر جواب بهینه RMP در شرط توقف ($\delta < \frac{|UB^{(k)} - LB^{(k)}|}{LB^{(k)}}$) صدق می‌کند توقف.
- اگر شرط توقف برقرار نیست،
- قرار بده $y = \bar{y}^{(k)}$ که از حل RMP بدست آورده شده است.
- قرار بده $k=k+1$ و به شروع فاز ۲ برگرد.

شکل (۲): شبه‌کد روش تجزیه‌بندرز (BD) در سه فاز اصلی

لازم به توضیح است که معمولاً جایگاه‌های CNG در مکان‌های پراکنده شده‌اند و از این رو یک نمونه عینی از شبکه MFP حاصل می‌شود. در ایران، مدیریت بخش عمده‌ای از جایگاه‌های CNG توسط "شرکت ملی بخش فرآورده‌های نفتی ایران" (NIOPDC) صورت می‌پذیرد و سطح عرضه هر یک از ایستگاه‌های CNG و همچنین برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نت تجهیزات آن‌ها می‌تواند به صورت یکپارچه توسط مدیران این شرکت انجام شود. برای انجام عملیات نت MSC‌های مختلفی وجود دارد که همچون جایگاه‌های CNG در مکان‌های مختلفی پراکنده هستند و ظرفیت مشخصی برای انجام عملیات نت تجهیزات مختلف دارند. همچنین سفارش دوره‌ای هر جایگاه با توجه به ظرفیت آن، می‌تواند از طریق یک یا چند منبع به آن تحویل داده شود. چالش مدیران NIOPDC نحوه یکپارچه‌سازی تصمیمات تولید و نت تجهیزات ایستگاه‌های CNG است که املا قابلیت اطمینان هر ایستگاه CNG باشد، هزینه‌ها نت کمتر شوند و نهایتاً بیشینه سود حاصل شود این مسئله را می‌توان به عنوان یک مطالعه عددی از مسئله MFPMP تعریف شده در این تحقیق دانست و آن را با استفاده از مدل و روش‌های حل پیشنهادی حل و نتایج را تحلیل نمود.

شکل ۴ یک نمونه با اندازه‌های برآوردی فوق ($|S| = 4, |F| = 10, |M| = 5, |E| = 5$) را نشان می‌دهد. فرض کنیم ۵ تجهیز آورده شده در شکل ۳ مهم‌ترین تجهیزات برای نیازمند نت هستند ($|E| = 5$) و برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نت برای دوره‌های

۵. نتایج عددی و تحلیل

در این بخش، به تحلیل یک مطالعه عددی از مسئله MFPMP پرداخته می‌شود و مدل و روش‌های حل پیشنهادی نیز با حل مسائل آزمایشی ارزیابی می‌گردد. برای پیاده‌سازی روش‌های حل، از نرم‌افزارهای CPLEX نسخه 12.9 و نرم‌افزار MATLAB نسخه 2018b روی یک کامپیوتر شخصی با Core™ i5 2.5 GHz CPU و 4.0 GB RAM استفاده شده است. از منظر پرداختن به عدم قطعیت، مسئله به دو طریق مختلف حل می‌شود. اول آنکه به عدم قطعیت پارامترها توجه نمی‌شود و براساس مقدار متوسط/اسمی آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود. دوم آنکه عدم قطعیت با رویکرد RSSP در نظر گرفته می‌شود. از منظر حل گر (سالور) نیز مسئله به دو طریق حل می‌شود، اول آنکه به صورت کلاسیک فقط از CPLEX استفاده می‌شود و دوم آنکه روش تجزیه‌بندرز برای تسریع در فرآیند حل به کار گرفته می‌شود.

۵-۱. مطالعه عددی

به عنوان یک مطالعه عددی، می‌توان به برنامه‌ریزی نت و تولید/عرضه محصول در جایگاه‌های CNG در ایران اشاره کرد. یعنی اگر جایگاه‌های مختلف CNG را به عنوان کارخانه‌ها (یا همان مراکز تولید/عرضه محصول در نظر بگیریم) که از چندین منبع/تأمین‌کننده سفارشات دوره‌ای آن‌ها تأمین می‌گردد؛ و توسط MSC‌های مختلف، عملیات نت تجهیزات آن‌ها (شکل ۳) انجام می‌شود، آنگاه یک مثال واقعی مسئله MFPMP مطالعه می‌شود.

\overline{dem}_{ft} تقاضا کارخانه f در دوره: غیرقطعی و سناریو محور
ما برای هر یک از این پارامترها، سه حالت کم، متوسط و زیاد را در نظر
گرفته‌ایم؛ در نتیجه 3×3 یعنی ۹ سناریو مختلف باید در نظر گرفته شود.

ماهانه در طول سال انجام می‌شود ($|T| = 12$). در این شبکه فرض
می‌شود $L_{mf} = b_{me} = a_{fe} = 1$. همچنین ظرفیت منابع تأمین
سفارش مراکز عرضه در دو سطح ($|U| = 3$) کم، متوسط و زیاد
تعریف می‌شود. جدول ۲ نحوه تولید تصادفی داده برای مسئله
MFPMP را نشان می‌دهد. شانس وقوع هر یک از ۹ سناریو محتمل
نیز یکسان در نظر گرفته شده است.

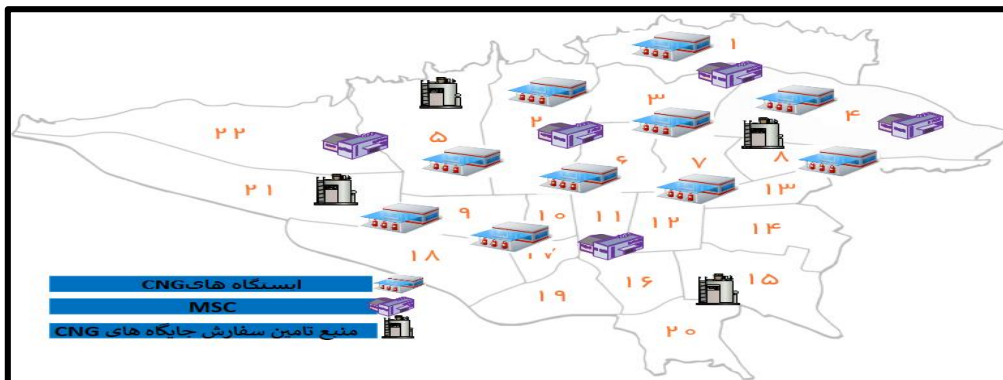
لازم به توضیح است که، در مدل پیشنهادی دو پارامتر زیر تصادفی
در نظر گرفته شده‌اند:

$\overline{\lambda}_{ef}$ نرخ خرابی تجهیز e کارخانه f (۱ به روی واحد زمان):

غیرقطعی و سناریو محور



شکل (۳): برخی از تجهیزات اصلی در ایستگاه‌های CNG



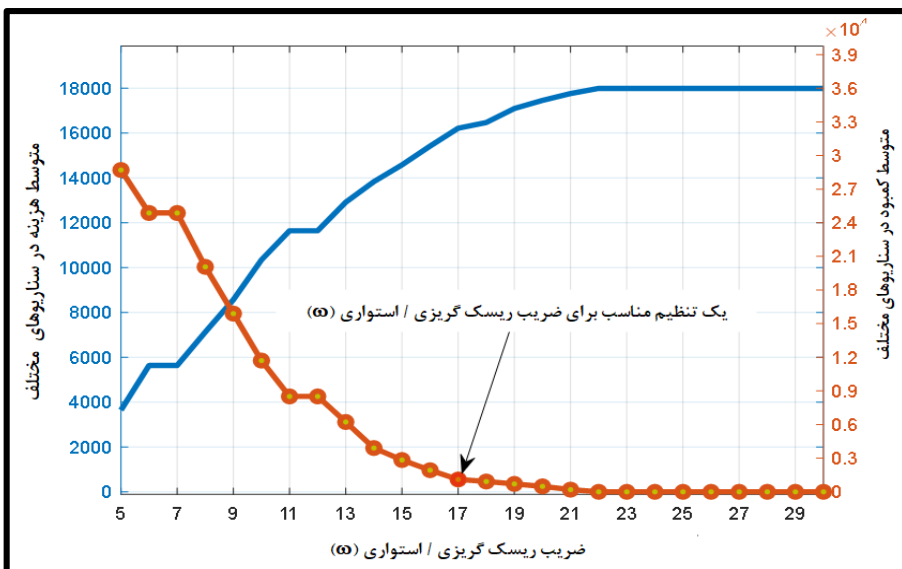
شکل (۴): یک شبکه MFP از جایگاه‌های CNG برای مطالعه عددی مسئله MFPMP

جدول (۲): داده‌های در نظر گرفته شده برای مطالعه عددی مسئله MFPMP مورد نظر تحقیق

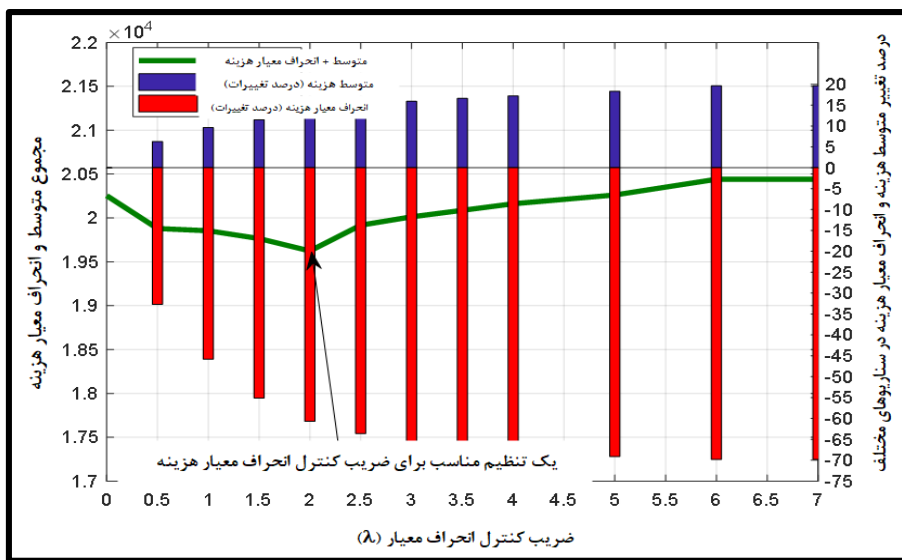
L_{mf} و b_{me} و k_{fe}	1	mc_{efm}^t	$U(100,200)$	dc_{ef}^t	$U(500,1000)$
bc_{ef}	$U(2000,2500)$	oc_{ef}	$U(1200,1500)$	fc_{su}	$U(300,500)$
pc_{sf}	$U(2,3)$	hc_f	$U(0.5,0.7)$	V_f	$U(50,100)$
cap_{su}	$U(200,500)$	ρ	$U(10,20)$	N_{em}	$\frac{1}{2} * E$
B_f^1	$U(1500,2000)$	B^2	$U(3000,5000)$	B^3	$U(4000,7000)$
$\overline{\lambda}_{ef}$	$U(30,90)$	\overline{dem}_{ft}	$U(50,100)$	Φ	30

کاهش می‌یابد درحالی‌که استواری مدل چندان از بین نرفته است و
کمبود مقدار ناچیزی است. اما برای $\omega < 17$ نیز گرچه هزینه کاهش
می‌یابد ولی کمبود افزایش می‌یابد و به عبارتی موجه بودن و استواری
مدل بیش از حد کاهش می‌یابد. از این رو $\omega = 17$ تنظیم مناسبی
برای این پارامتر است.

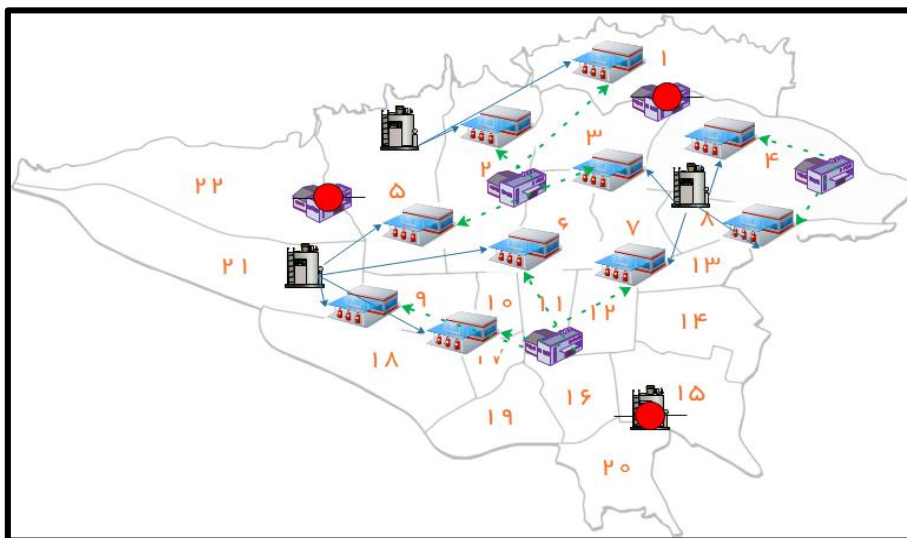
پیش از اجرای مدل RSSP پیشنهادی، دو پارامتر استواری حل (λ)
و استواری مدل (ω) باید تنظیم شود. در شکل ۵ تأثیر مقدار ω روی
متوسط هزینه و عدم تحقق تقاضا (کمبود) تحلیل شده است. ملاحظه
می‌شود که برای $\omega \geq 22$ مدل همواره شدنی است و بیشترین سخت-
گیری لحاظ می‌شود. اما برای $\omega \leq 22$ هزینه به‌طور قابل قبولی



شکل (۵): نمودارهای تحلیل حساسیت هزینه و کمبود نسبت به ω



شکل (۶): نمودارهای تحلیل حساسیت متوسط و انحراف معیار هزینه نسبت به λ



شکل (۷): شبکه بهینه تأمین سفارشات برای عرضه ایستگاه‌های CNG و برنامه نت

جدول (۳): تصمیمات بهینه برنامه‌ریزی نت

E \ F	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10
e1			Y					Z	Z	
e2		Z				Y	Z	Y	Z	Y
e3	Y	Z	Z	Y	Z	Z	Z	Z		Y
e4	Y	Y	Y			Y				Z
e5				Z	Y			Z		Y

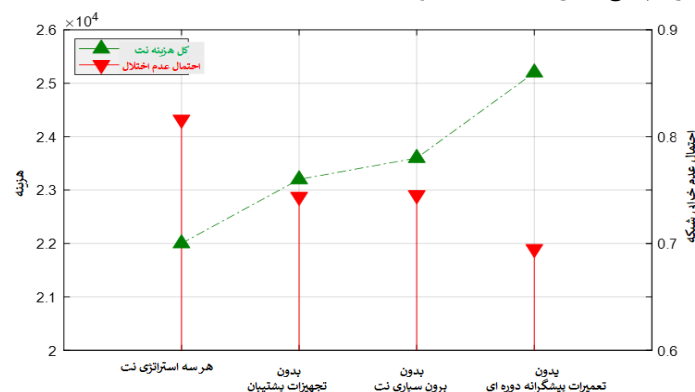
نت دوره‌ای=خالی، تجهیز پشتیبان=Z، برون‌سپاری=Y

دوره‌ای نت (B_1^1) و بودجه برون‌سپاری (B^2) و بودجه تجهیز پشتیبان (B^3) است. در ادامه چهار حالت مختلف برای این سه پارامتر بررسی می‌شود و نتایج تحلیل می‌شود. حالت اول، وضعیت فعلی مدل است یعنی ($B_1^1, B^2, B^3 > 0$) هستند و به عبارتی هر سه استراتژی نت ممکن است. در حالت دوم، $B^2 = 0$ می‌شود و برون‌سپاری انجام نمی‌شود. در حالت سوم، $B^3 = 0$ می‌شود و تجهیزات پشتیبان استفاده نمی‌شود و نهایتاً در حالت چهارم $B_1^1 = 0$ می‌شود و نت دوره‌ای صورت نمی‌پذیرد. در شکل ۸، نتیجه هر یک از حالات روی کل هزینه نت شبکه MFP و احتمال عدم اختلال شبکه آورده شده است. ملاحظه می‌شود که در صورت وجود این سه استراتژی هم هزینه کل کمتر است و هم احتمال عدم اختلال بیشتر است. این در صورتی است که حذف هر یک از این استراتژی‌ها باعث بیشتر شدن هزینه کل و همچنین احتمال اختلال در شبکه می‌شود. در این حالات، حذف استراتژی تعمیرات پیشگیرانه دوره‌ای بیشتر اثر منفی را بر عملکرد سیستم دارد.

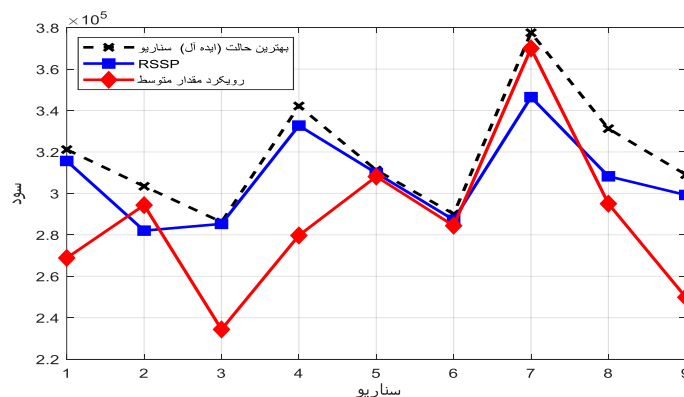
در شکل ۶ نیز تأثیر مقدار λ روی متوسط هزینه و انحراف معیار هزینه تحت سناریوها مختلف آورده شده است. واضح است که با افزایش مقدار λ همواره انحراف معیار هزینه کاهش می‌یابد در حالی که متوسط هزینه روند صعودی دارد. در نمودارهای عمودی سمت راست تغییرات این دو (یعنی درصد کاهش انحراف معیار و درصد افزایش متوسط هزینه) مشخص شده‌اند. برای توقف افزایش مقدار λ مجموع متوسط هزینه و انحراف معیار در نظر گرفته شده است.

در $\lambda < 2$ این مقدار روند نزولی دارد و برای مقادیر $\lambda \geq 2$ روند آن صعودی می‌شود؛ لذا، $\lambda = 2$ نیز می‌تواند یک تنظیم مناسب برای پارامتر کنترل انحراف معیار مقدار هزینه در سناریوهای مختلف باشد. همچنین با اجرای مدل RSSP پیشنهادی (با $\omega = 17$ و $\lambda = 2$)، نحوه تأمین سفارشات هر یک از جایگاه‌های CNG در شکل ۷ ملاحظه می‌شود. جدول ۳ مقدار بهینه تصمیمات برنامه‌ریزی نت را در جواب بهینه نشان می‌دهد.

از جمله پارامترهای تأثیر گذار بر پاسخ مدل MFPMP، بودجه



شکل (۸): مقایسه استراتژی‌های مختلف نت



شکل (۹): نمودار مقایسه عملکرد رویکرد RSSP پیشنهادی در مقابل رویکرد مقدار متوسط

۵-۲. ارزیابی رویکرد RSSP و رویکرد حل BD

به‌منظور ارزیابی عملکرد رویکرد RSSP پیشنهادی و نشان دادن ارزش آن در مواجهه با عدم قطعیت، هر یک از ۹ سناریو محتمل به‌صورت مجزا حل شده است و مقدار بهینه آن‌ها به‌دست آورده شده است. سپس مبتنی بر مقدار متوسط/اسمی مسئله حل شده است و پاسخ آن در هر یک از ۹ سناریو محاسبه و با پاسخ هر سناریو در رویکرد RSSP پیشنهادی مقایسه می‌شود. نتایج این مقایسه در جدول ۴ آورده شده است و نمودار مقدار تابع هدف تحت سناریوهای مختلف در شکل ۹ مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که رویکرد RSSP از دو منظر نسبت به رویکرد کلاسیک مقدار متوسط برتری دارد، اول آنکه، در عمده سناریوها، اختلاف مقدار تابع رویکرد RSSP نسبت به مقدار بهینه آن سناریو، کمتر از رویکرد مقدار متوسط است. دوم آنکه انحراف معیار مقدار تابع هدف تحت سناریوها مختلف به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. در جدول ۵ نتیجه این مقایسه به‌طور کامل آورده شده است. نهایتاً، به‌منظور ارزیابی عملکرد رویکرد حل BD پیشنهادی، چندین

مسئله آزمایشی در ابعاد مختلف تولید و هر یک از مسائل با استفاده از این رویکرد حل و همچنین حل‌گر CPLEX در GAMS حل شده‌اند. برای زمان اجرای هر یک از مسائل آزمایشی حداکثر ۷۲۰۰ هزار ثانیه (۲ ساعت) وقت در نظر گرفته شده است (با دستور Option Reslim=7200 در GAMS).

جدول ۶ ابعاد هر یک از مسائل آزمایشی و نتیجه اجرای آن‌ها با استفاده از رویکرد حل BD پیشنهادی این تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هر یک از ۱۰ مسئله آزمایشی در زمان مذکور با استفاده از روش BD یا به‌بدون شکاف بهینگی حل شده‌اند و یا حداقل یک جواب نزدیک به بهینه برای مسئله به‌دست آورده شده است؛ این در حالی است که اجرای این مسائل به‌صورت کلاسیک به CPLEX گرچه در ابعاد پایین امکان‌پذیر بود، ولی در ابعاد بزرگ‌تر یا شکاف بهینگی زیاد است و یا با گذشت حداکثر زمان مذکور هیچ جوابی بدست نیامده است. این نتایج، کارایی محاسباتی رویکرد حل تجزیه بندرز برای حل مدل RSSP مسئله MFPM موردنظر این تحقیق را تصدیق می‌کند.

جدول (۴): نتایج عملکرد رویکرد RSSP پیشنهادی در مقابل رویکرد مقدار متوسط تحت سناریوهای مختلف

شماره	احتمال وقوع	سناریو		رویکرد مقدار متوسط		رویکرد RSSP پیشنهادی	
		مقدار بهینه/آی‌ده آل تابع هدف	سود	اختلاف از سود بهینه	سود	اختلاف از سود بهینه	سود
۱	۱,۹	۳۲۱۱۵۶,۲	۲۶۸۸۲۵,۵	۵۲۳۳۰,۷۲	۳۱۵۶۵۸,۵	۵۴۹۷,۷۷	
۲	۱,۹	۳۰۳۴۳,۱	۲۹۴۴۳۲۸,۲	۹۱۰۲,۹۳۴	۲۸۲۰۰۷,۵	۲۱۴۲۳,۶۴	
۳	۱,۹	۲۸۶۱۷۵,۵	۲۳۴۳۳۲,۴	۵۱۸۴۳,۱	۲۸۵۲۶۴,۶	۹۱۰,۹۸	
۴	۱,۹	۳۴۲۱۹۶,۰	۲۷۹۶۸۵,۴	۶۲۵۱۰,۷۳	۳۳۲۷۱۹,۹	۹۴۷۶,۳۰	
۵	۱,۹	۳۱۱۲۴۴,۲	۳۰۸۱۳۱,۸	۳۱۱۲,۴۴۲	۳۰۹۸۰۷,۲	۱۴۳۷,۰۶	
۶	۱,۹	۲۹۰۰۵۴,۸	۲۸۴۳۹۶,۴	۵۶۵۸,۴۱۴	۲۸۷۲۳۷,۵	۲۸۱۷,۳۵	
۷	۱,۹	۳۷۷۵۴۹,۱	۳۶۹۹۹۸,۱	۷۵۵۰,۹۸۲	۳۴۶۴۵۹,۵	۳۱۰۸۹,۵۸	
۸	۱,۹	۳۳۱۲۵۴,۳	۲۹۵۰۲۲,۹	۳۶۲۳۱,۳۷	۳۰۸۲۳۷,۸	۲۳۰۱۶,۵۰	
۹	۱,۹	۳۰۹۰۴۴,۶	۲۴۹۸۶۱,۸	۵۹۱۸۲,۳۸	۲۹۹۲۴۴,۴	۹۷۹۹,۷۸	

جدول (۵): ارزیابی عملکرد رویکرد RSSP پیشنهادی

معیار	متوسط سود	انحراف معیار سود	متوسط سود از دست‌رفته	بیشینه سود از دست‌رفته
رویکرد مقدار متوسط	2.87E+05	3.87E+04	3.19E+04	6.25E+04
رویکرد RSSP پیشنهادی	3.07E+05	2.19E+04	1.17E+04	3.11E+04

جدول (۶): ارزیابی کارایی محاسباتی رویکرد حل BD پیشنهادی برای حل مسائل آزمایشی در اندازه‌های مختلف

مسائل آزمایشی						رویکرد حل پیشنهادی مبتنی بر تجزیه بندرز (BD)			حل کلاسیک با CPLEX در GAMS		
F	E	M	S	U	T	مقدار هدف	زمان (S)	شکاف (%)	مقدار هدف	زمان (S)	شکاف (%)
۵	۲	۳	۲	۱	۷	۳۴۴۴۶,۱	۱۳۵	۰	۳۴۴۴۶,۱	۴۲۱	۰
۷	۳	۳	۳	۱	۸	۱۸۸۶۸۷۲,۶	۳۲۱	۰	۱۸۸۶۸۷۲,۶	۱۱۳۲	۰
۹	۴	۴	۴	۲	۹	۳۸۱۱۵۵۸,۵	۸۲۱	۰	۳۸۱۱۵۵۸,۵	۳۵۴۱	۰
۱۱	۵	۴	۵	۲	۱۰	۴۳۸۷۴۴,۴	۱۰۰۳	۰	۴۳۸۷۴۴,۴	۵۴۸۳۱	۰
۱۳	۶	۵	۶	۲	۱۱	۴۴۵۵۸۶,۲	۲۴۵۱	۰	۸۹۱۱,۷	+۷۲۰۰	۲,۱
۱۵	۷	۵	۷	۳	۱۲	۴۸۹۷۶۴,۴	۳۵۴۱	۰	۲۴۴۸۸,۲	+۷۲۰۰	۵,۰۳
۱۷	۸	۶	۸	۳	۱۲	۶۴۶۳۱۳,۰	۴۰۵۷	۰	۴۵۲۴۱,۹	+۷۲۰۰	۷,۱۲
۲۰	۹	۶	۹	۳	۱۲	۷۶۵۵۷۶,۸	۶۳۱۲	۰		+۷۲۰۰	۱۳,۰۶
۲۵	۱۲	۷	۱۰	۳	۱۵	۷۵۹۱۹۹,۹	+۷۲۰۰	۳,۱۲	حل نشد	+۷۲۰۰	-
۳۰	۱۵	۷	۱۲	۴	۱۵	۹۵۰۲۲۲,۰	+۷۲۰۰	۵,۰۸	حل نشد	+۷۲۰۰	-

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تدریجی و چه تخفیف کامل. از آنجا که مسئله مورد نظر این تحقیق به صورت MFP در نظر گرفته شده است؛ این مورد را میتوان بر مسئله تطابق دارد.

مراجع

- [1] Chung, S. H., Chan, F. T., Chan, H. K. (2009a). "A modified genetic algorithm approach for scheduling of perfect maintenance in distributed production scheduling". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7): 1005-1014 .
- [2] Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S. M. T. (2013). "The heterogeneous multi-factory production network scheduling with adaptive communication policy and parallel machine". *Information Sciences*, 219: 181-196.
- [3] Wu, S.-j., Gebrael, N., Lawley, M. A., Yih, Y. (2007). "A neural network integrated decision support system for condition-based optimal predictive maintenance policy". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 37(2): 226-236 .
- [4] Chung, S. H., Lau, H. C., Ho, G. T., Ip, W. H. (2009b). "Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach". *Expert Systems with Applications*, 36(6): 10188-10196.
- [5] Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M., Rahim, A. (2012). "Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review". *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(1): 21-50.
- [6] Boudjelida, A. (2019). "On the robustness of joint production and maintenance scheduling in presence of uncertainties". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(4): 1515-1530 .
- [7] Paprocka, I. (2019). "The model of maintenance planning and production scheduling for maximising robustness". *International Journal of Production Research*, 57(14): 4480-4501 .
- [8] Vasili, M., Hong, T. S., Ismail, N., & Vasili, M. (2011). "Maintenance optimization models: a review and analysis". *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2(1): 1131-1138 .
- [9] بهنامیان، جواد، فاطمی قمی، سید محمدتقی. (۱۳۹۲). "ارائه الگوریتم ترکیبی بر پایه بهینه‌سازی گروه ذرات و روش هایپرهیوریستیک برای زمان‌بندی کارخانه‌های توزیع شده با اتحاد مجازی". *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۱(۱): ۱-۱۱.
- [10] Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S. M. T. (2016). "A survey of multi-factory scheduling". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(1): 231-249.
- [11] Behnamian, J. (2017). "Matheuristic for the decentralized factories scheduling problem". *Applied Mathematical Modelling*, 47: 668-684.
- [12] Behnamian, J., Ghomi, S. F. (2012). "Incorporating transportation time in multi-agent production network scheduling". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(12): 1111-1128 .

تولید و عرضه محصول مبتنی بر یک شبکه MFP موجب می‌شود پراکندگی بیشتر تحت پوشش شرکت قرار گیرد و سهم بازار آن بیشتر شود. اما در این شرایط با توجه به عدم تمرکز روی یک مرکز مشخص، برنامه‌ریزی تولید و نت هر کدام از آن‌ها باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد در عملکرد کلی شبکه دچار اختلال نشود. یکپارچه‌سازی تصمیمات تولید و نت در یک شبکه MFP (و حتی یک سیستم متمرکز) به این دلیل حائز اهمیت است. یک: تولید به نت و نت به تولید وابسته است و دو: می‌توان تصمیمات بهتری اخذ نمود که هزینه کمتری به کل سیستم اعمال شود. در این تحقیق مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نت در یک شبکه MFP با تقاضا تصادفی و نرخ خرابی تصادفی مورد توجه قرار گرفته است (به اختصار MFPMP).

برای مسئله MFPMP یک مدل بهینه‌سازی استوار سناریومحور ارائه شده است که تابع هدف آن بهینه‌سازی متوسط سود است در حالی که انحراف معیار سود نیز کنترل می‌شود. هزینه‌های مختلفی از جمله تعمیرات پیشگیرانه، برون‌سپاری نت، تجهیزات پشتیبان و اختلال در عرضه در کنار هزینه‌های تولید/سفرشات از درآمد کل فروش شبکه کسر شده است تا سود خالص آن محاسبه و حداکثر شود. مدل RSSP، بعد از اعمال خطی‌سازی‌ها، به صورت یک مدل MILP بیان شده است که قابل حل توسط CPLEX است. با این وجود، با توجه به کارایی خوب روش تجزیه بندرز برای حل مسائل برنامه‌ریزی تصادفی، روش حل BD برای مدل RSSP پیشنهادی نیز بکار گرفته شده است تا حل این مسئله در ابعاد بزرگ میسر باشد.

به منظور ارزیابی مدل RSSP پیشنهادی، پاسخ این روش با رویکرد کلاسیک مقدار متوسط مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در رویکرد RSSP پیشنهادی نه تنها متوسط عملکرد سیستم بهبود می‌یابد و سود دست آمده در مسئله MFPMP نسبت به رویکرد مقدار متوسط/اسمی بیشتر است، بلکه در معیارهای دیگری از جمله انحراف معیار جواب‌ها، بهینه‌سازی انحراف از بهینگی نیز بهتر عمل می‌کند و پاسخ آن برای متغیرهای مرحله اول تولید و نت با ارزش تر است. ، به منظور ارزیابی عملکرد رویکرد حل BD پیشنهادی، چندین مسئله آزمایشی در ابعاد مختلف تولید و هر یک از مسائل با استفاده از این رویکرد حل و همچنین حل گر CPLEX حل شده‌اند. هر یک از مسائل آزمایشی در زمان معقول با استفاده از روش BD با یک شکاف بهینگی ناچیز حل شده‌اند؛ اما اجرای این مسائل به صورت کلاسیک به CPLEX گرچه در ابعاد پایین امکان‌پذیر بود، ولی در ابعاد بزرگ‌تر یا شکاف بهینگی زیاد است و یا اصلاً مسئله حل نمی‌شود. به منظور توسعه پژوهش جاری پیشنهادی می‌شود که مسئله MFPMP در شرایط رقابتی مدل‌سازی و حل شود. همچنین در نظر گرفتن تخفیفات نت دسته‌ای نیز می‌تواند مدل پیشنهادی را جذاب‌تر کند در این تحقیق ما فرض کرده‌ایم تفاوتی ندارد که نت یک تجهیز را به یک MSC دهیم یا نت چند تجهیز را؛ این در صورتی است که در دنیای واقعی معمولاً اگر نت چند تجهیز به آن‌ها داده شود می‌توان تخفیف مقداری دریافت کرد (حال چه تخفیف

- H. (2020). "Integrated production and maintenance scheduling for a single degrading machine with deterioration-based failures". *Computers & Industrial Engineering*, 143: 106432.
- [28] Kolus, A., El-Khalifa, A., Al-Turki, U. M., Duffuaa, S. O. (2020). "An integrated mathematical model for production scheduling and preventive maintenance planning". *International Journal of Quality & Reliability Management*, DOI:[10.1108/IJQRM-10-2019-0335](https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2019-0335).
- [29] Wu, O., Dalle Ave, G., Harjunkoski, I., Bouaswaig, A., Schneider, S. M., Roth, M., Imsland, L. (2020). "Optimal production and maintenance scheduling for a multiproduct batch plant considering degradation". *Computers & Chemical Engineering*, 135: 106734.
- [30] Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., Zenios, S. A. (1995). "Robust optimization of large-scale systems". *Operations research*, 43(2): 264-281.
- [31] Salehi, F., Mahootchi, M., Husseini, S. M. M. (2017). "Developing a robust stochastic model for designing a blood supply chain network in a crisis: A possible earthquake in Tehran". *Annals of Operations Research*, 1-25.
- [32] Yu, C.-S., Li, H.-L. (2000). "A robust optimization model for stochastic logistic problems". *International Journal of Production Economics*, 64(1-3): 385-397.
- [33] Rahmaniani, R., Crainic, T. G., Gendreau, M., Rei, W. (2017). "The Benders decomposition algorithm: A literature review". *European Journal of Operational Research*, 259(3): 801-817.
- [34] Belieres, S., Hewitt, M., Jozefowicz, N., Semet, F., Van Woensel, T. (2020). "A Benders decomposition-based approach for logistics service network design". *European Journal of Operational Research*, 286(2): 523-537.
- [35] Keyvanshokoh, E., Ryan, S. M., Kabir, E. (2016). "Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition". *European Journal of Operational Research*, 249(1): 76-92.
- [13] Behnamian, J., Ghomi, S. F. (2015). "Minimizing cost-related objective in synchronous scheduling of parallel factories in the virtual production network". *Applied Soft Computing*, 29: 221-232.
- [14] Behnamian, J., Zandieh, M., Ghomi, S. F. (2009). "Parallel-machine scheduling problems with sequence-dependent setup times using an ACO, SA and VNS hybrid algorithm". *Expert Systems with Applications*, 36(6): 9637-9644.
- [15] Li, G., Liu, M., Sethi, S. P., Xu, D. (2017). "Parallel-machine scheduling with machine-dependent maintenance periodic recycles". *International Journal of Production Economics*, 186: 1-7.
- [16] Chang, H.-C., Liu, T.-K. (2017). "Optimisation of distributed manufacturing flexible job shop scheduling by using hybrid genetic algorithms". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(8): 1973-1986.
- [17] Costa, A., Cappadonna, F. A., Fichera, S. (2016). "Total tardiness minimization in a parallel machine system with flexible periodic maintenance". *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(7): 485-494.
- [18] Shen, J., Zhu, Y. (2018). "A parallel-machine scheduling problem with periodic maintenance under uncertainty". *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-9.
- [19] Elsayed, E., Dhillon, B. S. (1979). "Repairable systems with one standby unit". *Microelectronics Reliability*, 19(3): 243-245.
- [20] Lu, Z., Cui, W., Han, X. (2015). "Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty". *Computers & Industrial Engineering*, 80: 236-244.
- [21] Liu, X., Wang, W., Peng, R. (2015). "An integrated production, inventory and preventive maintenance model for a multi-product production system". *Reliability Engineering & System Safety*, 137: 76-86.
- [22] Jiang, C., Lu, Z., Cui, W. (2016). "Heuristics for the identical machine scheduling problem with preventive maintenances". *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 21(1): 112-120.
- [23] Chansombat, S., Pongcharoen, P., Hicks, C. (2019). "A mixed-integer linear programming model for integrated production and preventive maintenance scheduling in the capital goods industry". *International Journal of Production Research*, 57(1): 61-82.
- [24] Hnaien, F., Yalaoui, F., Mhadhbi, A., & Nourelfath, M. (2016). "A mixed-integer programming model for integrated production and maintenance". *IFAC-PapersOnLine*, 49(12): 556-561.
- [25] Alimian, M., Saidi-Mehrabad, M., & Jabbarzadeh, A. (2019). "A robust integrated production and preventive maintenance planning model for multi-state systems with uncertain demand and common cause failures". *Journal of Manufacturing Systems*, 50: 263-277.
- [۲۶] بابایی مراد، سمانه، فتاحی، پرویز، باقری، حسن. (۱۳۹۸). "بهینه‌سازی توأم سیاست زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن کمبود از نوع پس‌افت و تقاضا به‌صورت احتمالی". نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۷(۱۴): ۴۷-۵۷.
- [27] Ghaleb, M., Taghipour, S., Sharifi, M., Zolfagharinia,



Stochastic Programming Model and Benders decomposition approach for Integrated Production and Maintenance Planning in Multi-Factory Production

H. Jafarzanjani¹, M. Zandieh^{2*}, M. Khalilzadeh³

^{1,3} Industrial Engineering Department, Science and Research Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Industrial Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 February 2020

Accepted 29 June 2020

Keywords:

Integrated Production Planning
and Preventive Maintenance
Multi-Factory Production
Robust Stochastic Programming
Benders Decomposition
Approach

ABSTRACT

Proper performance of production/supply centers in a multi-factory production (MFP) network requires undisrupted equipment. The design and implementation of a maintenance system is important for two reasons - firstly, extending the life of the equipment, and second, reducing the MFP network disruption and associated costs. The greater productivity of an MFP system is achieved by integrating maintenance and production decisions. In this study, considering a scenario-based uncertainty in the demand and failure rate, a robust scenario-based stochastic programming (RSSP) model has been presented. Proposed RSSP model integrates the strategic and operational decisions of production and the maintenance, and takes into account the MFP disruption costs. We suggest three preventive maintenance strategies such as maintenance outsourcing, deployment of backup equipment, as well as periodic preventive maintenance for the MFP network. The objective function of the proposed model is to maximize the total profit, subject to, constraints such as limited capacity of production, storage, access to service centers, and budget should be satisfied. The proposed RSSP model is formulated as mixed linear program which can be solved in small-scale instances by the CPLEX Solver. Furthermore, Benders decomposition solution method is proposed for large-scale instances. Finally, a numerical study of CNG stations, as an MFP network, is conducted to demonstrate the applicability of the proposed model and analyze the results.

* Corresponding author. M. Zandieh
Tel.: 021-29905215; E-mail address: m_zandieh@sbu.ac.ir