

مدل سازی و حل مساله یکپارچه برنامه ریزی تولید ادغامی و تعمیرات و نگهداری در حالت دوهدفه و با رویکرد کاهش نارضایتی مشتریان

سید محمد حسن حسینی*

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۸/۶

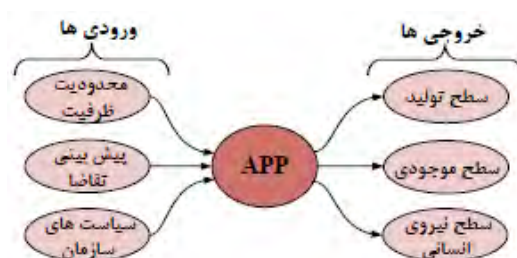
چکیده

امروزه تحقق برنامه‌های از پیش تعیین شده و تامین به موقع تقاضاها و سفارشات مشتریان یکی از اهداف مهم و استراتژیک سازمان‌ها و واحدهای تولیدی محسوب می‌شود. اهمیت این موضوع ریشه در جایگاه مشتریان و موضوع رضایت ایشان از تحویل به موقع تقاضاهایشان و همچنین بهره‌برداری مناسب از منابع تولیدی سازمان دارد. در تحقیق حاضر، مساله یکپارچه برنامه ریزی تولید و تعمیرات و نگهداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این مساله دو تابع هدف مدنظر می‌باشد. تابع هدف اول عبارتست از هزینه‌های کل سیستم که همه عوامل هزینه‌ای تولید را شامل می‌شود. تابع هدف دوم نیز میزان نارضایتی مشتریان است که در اثر تاخیر در تامین به موقع تقاضاها افزایش می‌یابد. باتوجه به اهمیت جایگاه و رضایتمندی مشتریان در دنیای رقابتی امروزی، اضافه کردن تابع هدف دوم مساله را به دنیای واقعی نزدیکتر می‌کند. ابتدا مساله تشریح و متغیرها و پارامترهای آن تعریف شده و براساس آن، مدل ریاضی این مساله در حالت دوهدفه توسعه داده شده است. سپس باتوجه به اینکه این مساله از نوع $NP-hard$ می‌باشد، یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب - بازنگری ۲ (NSGA-II) ارائه گردیده است. در پایان نیز این مساله با داده‌های استاندارد موجود در منابع با دو تکنیک محدودیت افسیلون و NSGA-II حل شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم NSGA-II در زمان حل و کیفیت جواب می‌باشد.

واژگان کلیدی: برنامه ریزی تولید یکپارچه، چند محصولی، تعمیر و نگهداری، دوهدفه، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II

مقدمه

امروزه ایجاد شرایط جدیدی از جمله جهانی شدن تجارت، اشباع بازار و افزایش رقابت بین تولید و عرضه کنندگان، شرایط اقتصادی و ... موجب شده تا سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی توجه مضاعفی به دو موضوع داشته باشند. اول برنامه‌ریزی مناسب جهت بهره‌برداری هرچه بهتر از منابع تولیدی و کاهش هزینه‌ها و دوم برنامه‌ریزی جهت تامین و تحویل به موقع تقاضاها جهت تامین رضایتمندی مشتریان و بقا در محیط رقابتی. بنابراین واحدهای تولیدی برای تحقق اهداف خود دیگر نمی‌توانند به روش‌های سنتی برنامه‌ریزی تولید بسنده کنند و می‌بایست پارامترها و اهداف جدید را در برنامه‌ریزی‌های خود لحاظ نمایند. در این میان یکی از برنامه‌ریزی‌های میان‌مدت زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی تولید ادغامی است که در آن، محصولاتی که از نظر ظاهر یا روند تولید مشابه یکدیگر هستند به عنوان یک خانواده محصول در نظر گرفته می‌شوند. برنامه‌ریزی تولید ادغامی به عنوان یک برنامه‌ریزی در سطح تاکتیکی مدیریت سعی می‌کند به منظور برآورده کردن تقاضای محصولات، مقدار بهینه تولید، سطح موجودی، نیروی انسانی و غیره را در هر دوره زمانی با توجه به تعدادی محدودیت، تعیین نماید (خیرخواه و همکاران، ۱۳۹۵، میرزاپور و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج برنامه‌ریزی تولید ادغامی می‌تواند اساس برنامه‌های دیگر سازمان نظیر برنامه‌ریزی نیازمندی‌های ظرفیت، زمانبندی تولید جامع، برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد، و همچنین برنامه‌ریزی توزیع باشد. از این رو، یک برنامه‌ریزی تولید ادغامی خوب، می‌تواند در مجموع، مدیریت زنجیره تأمین را تسهیل کند (ازدامر، ۱۹۹۸). از منظر سیستماتیک به برنامه‌ریزی تولید ادغامی می‌توان مطابق شکل (۱) محدودیت‌های ظرفیت، تقاضا، سیاست‌های شرکت و استراتژی‌ها را به عنوان ورودی برنامه‌ریزی تولید ادغامی و سطوح تولید، موجودی، نیروی انسانی و غیره را به عنوان خروجی‌های سیستم در نظر گرفت.



شکل ۱. فرایند برنامه‌ریزی تولید ادغامی

اهمیت برنامه‌ریزی یکپارچه و ادغامی تا آنجاست که محققین اذعان دارند که این فرآیند یکی از هفت دسته تصمیمات اصلی برنامه‌ریزی تولید در واحدهای تولیدی محسوب می‌شود که می‌تواند در کنترل و کاهش هزینه‌های تولید و موجودی موثر باشد (چراغعلی خانی و همکاران، ۱۳۹۱).

اما امروزه علاوه بر اهمیت موضوع کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری و بهره‌برداری مناسب از منابع تولیدی، موضوعات مهم دیگری نیز مد نظر صاحبان شرکت‌ها و مدیران تولیدی می‌باشد تا بتوانند در صحنه رقابت تولید و عرضه موفق باشند. لذا رویکردهای جدید به برنامه‌ریزی تولید بصورت دو یا چند هدفه بوده و در این راستا تلاش می‌شود تا اهدافی همچون تحویل به موقع، رضایت مشتریان، کیفیت، جنبه‌های زیست محیطی، و ... نیز بهینه گردد.

در همین راستا در تحقیق حاضر مساله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات در یک واحد تولیدی چند محصولی با در نظر گرفتن دو تابع هدف در راستای حداقل کردن هزینه‌های کل سیستم و افزایش رضایت مشتریان مورد مطالعه و حل قرار می‌گیرد.

در ادامه و در بخش ۲، به تشریح و بیان مساله مورد مطالعه پرداخته می‌شود. خلاصه‌ای از پیشینه تحقیقات مرتبط با مطالعه حاضر و مقایسه آنها با یکدیگر در بخش ۳ ارائه می‌شود. در بخش ۴، روش تحقیق و مراحل انجام آن مشخص و تبیین می‌گردد. در بخش ۵ مقاله، پارامترها و متغیرهای تصمیم مربوط به مساله مورد مطالعه همراه با مدل ریاضی آن ارائه می‌گردد و توابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی توضیح داده می‌شوند. در بخش ۶،

روش‌های حل مساله که عبارتند از حل دقیق با محدودیت اپسیلون و الگوریتم فراابتکاری NSGA-II آمده است. در بخش ۷؛ نتایج حل مساله با دو روش فوق ارائه می‌گردد و همچنین نتایج حاصل از حل مساله با روش‌های پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات پژوهشی و کاربردی در بخش ۸ آمده است.

بیان مساله

مساله مورد مطالعه در این تحقیق عبارتست از برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات چند محصولی، و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن خرابی دستگاه‌ها و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری. با توجه به نتایج مطالعه تحقیقات پیشین و مرور ادبیات انجام شده، اغلب مدل‌های برنامه‌ریزی تولید ادغامی ارائه شده توسط محققان پیشین در حالت یک هدفه بوده، اما در تحقیق حاضر این مساله در حالت دو هدفه مدل‌سازی و حل می‌شود. بنابراین در مطالعه حاضر، مساله فوق در یک افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای با دو تابع مورد بررسی قرار می‌گیرد. تابع هدف اول عبارتست از هزینه‌های کل سیستم که همه عوامل هزینه‌ای تولید را شامل می‌شود. تابع هدف دوم نیز میزان نارضایتی مشتریان است که در اثر تاخیر در تامین به موقع تقاضاها افزایش می‌یابد. اگرچه عوامل زیادی بر رضایتمندی مشتریان تاثیرگذار است اما در سیستم‌های تولیدی سه عامل کیفیت، قیمت، و تحویل به موقع سه شاخص مهم برای ارزیابی عملکرد سازمان و جلب رضایت مشتریان محسوب می‌شود. لذا در این مطالعه تحویل به موقع تقاضا به عنوان یکی از عوامل مهم و مورد انتظار مشتریان مدنظر بوده و به عنوان شاخصی برای سنجش رضایت ایشان مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اهمیت جایگاه و رضایتمندی مشتریان در دنیای رقابتی امروزی، اضافه کردن این شاخص به عنوان تابع هدف دوم، مساله را به دنیای واقعی نزدیکتر می‌کند.

با توجه به اهمیت جایگاه و رضایتمندی مشتریان در دنیای رقابتی امروزی، اضافه کردن تابع هدف دوم مساله را به دنیای واقعی نزدیکتر می‌کند.

در مدل ارایه شده در صورتی که نگهداری و تعمیرات در دوره t انجام شود در همان دوره تنها هزینه نگهداری و تعمیرات به مدل تحمیل شده و زمان مورد نیاز انجام عملیات نگهداری و تعمیرات از ظرفیت زمان ماشین‌آلات کسر می‌گردد و در صورتی که در دوره t عملیات نگهداری و تعمیرات انجام نشود هزینه و زمان آن در مدل اعمال نمی‌شود ولی در عوض در دوره $t+1$ هزینه خرابی به مدل تحمیل شده و زمان خرابی از ظرفیت در دسترس ماشین‌آلات کسر می‌شود. در ادامه پارامترها، توابع هدف و محدودیت‌های مدل پیشنهادی آمده است.

مبانی نظری و مروری بر مطالعات گذشته

مدیریت تولید با روش‌های سنتی که یکپارچگی کمتری را در فرایندهایشان برقرار می‌کنند، کارایی خود را از دست داده‌اند و سیستم‌های برنامه‌ریزی تولید یکپارچه و ادغامی که به صورت هم‌زمان برای چند نوع محصول انجام می‌شود جایگزین آنها شده‌اند. در این رویکردهای نوین، موضوع مدیریت مناسب جریان مواد، کالا، اطلاعات، مالی، در دسترس بودن منابع، انواع فاکتورهای جدید هزینه‌ای، توانایی پاسخگویی به شرایط مختلف را دارد. یک سیستم برنامه‌ریزی تولید مناسب باید بتواند تمامی فعالیت‌های درگیر در زنجیره تامین و چرخه تولید محصولات، از تأمین کنندگان تا مصرف کنندگان نهایی را برنامه‌ریزی کند چرا که مدیریت نامناسب زنجیره تأمین می‌تواند منجر به شکست سازمان در رقابت‌های داخلی و جهانی شود (مقدم و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از برنامه‌ریزی‌های میان‌مدت در حوزه تولید که افق برنامه‌ریزی ۳ الی ۱۸ ماه را در برمی‌گیرد، برنامه‌ریزی تولید ادغامی است که در آن محصولاتی که از نظر ظاهر یا روند تولید مشابه یکدیگر هستند به عنوان یک خانواده محصول در نظر گرفته می‌شوند. برنامه‌ریزی تولید ادغامی به عنوان یک رویکرد جدید برنامه‌ریزی در سطح تاکتیکی مدیریت سعی می‌کند به منظور برآورده کردن تقاضای، مقدار/تعداد بهینه تولید محصولات، سطح موجودی، نیروی انسانی و غیره را در هر دوره زمانی مشخص نماید (میرزاپور و همکاران، ۲۰۱۲).

انواع مدل‌ها و روش‌های برنامه‌ریزی و کنترل تولید از دهه ۱۹۵۰ به بعد توسعه یافتند. با توجه به اهمیت و نقش برنامه‌ریزی تولید در تحقق اهداف میان مدت و بلند مدت سازمان‌ها، تحقیقات انجام شده در این حوزه بسیار گسترده و متنوع می‌باشد (کاسادیم و کوتانوگلو، ۲۰۰۳). مک کال (۱۹۶۵) یک مرور کلی بر روی مدل‌های برنامه‌ریزی تولید با لحاظ عملیات تعمیرات و نگهداری ارائه کرده است. همچنین دکر (۱۹۹۶) تحقیقات انجام شده در خصوص بهینه‌سازی برنامه تولید با استفاده از مدل‌های ریاضی و همچنین رویکردهای شبیه‌سازی را بررسی و خلاصه‌ای از آنها را در مقاله خود منتشر کرده است. در این میان مبحث برنامه‌ریزی تولید ادغامی که به برنامه‌ریزی کالاها و محصولات مشابه در یک واحد تولیدی می‌پردازد با توجه به کاربرد فراوان آن در صنایع تولیدی امروزی طی چند سال اخیر مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است.

در این راستا، اولین بار هولت و همکاران (۱۹۵۵ و ۱۹۵۶) این مساله را با استفاده از مدل‌سازی ریاضی خطی تعریف و ارائه نمودند. تابع هدف تحقیق ایشان عبارت بود از کمینه کردن هزینه‌های تولید بعلاوه اینکه محدودیت دسترسی به منابع نیز به عنوان محدودیت مدل لحاظ شده بود. بعد از ایشان، هانسمن و هس (۱۹۶۰) یک مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی را مورد بررسی و مطالعه قرار داده و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی خطی، روشی برای حل آن ارائه نمودند. مدل آنها در ادامه، برای سیستم‌های چند محصولی، چند مرحله‌ای با محدودیت‌های ظرفیت نیز توسعه یافت. مسعود و هوانگ (۱۹۸۰) مساله برنامه‌ریزی تولید ادغامی را با استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره بررسی و چند روش حل برای آن ارائه نمودند. برای آشنایی بیشتر این مساله و روش‌های حل آن، خوانندگان عزیز را به مطالعه مقاله ارائه شده توسط نام و لاگندران (۱۹۹۲) توصیه می‌کنم. ایشان مدل‌های مختلف برنامه‌ریزی تولید ادغامی تا سال ۱۹۹۲ را مورد بررسی و مطالعه قرار داده و روش‌های حل موجود را در ۶ گروه دسته‌بندی نموده‌اند. همچنین در این مقاله، نقاط ضعف و نقاط قوت روش‌های مختلف حل مساله برنامه‌ریزی تولید ادغامی نیز تشریح شده است.

همچنین حجتی و همکاران (۱۳۷۸) برنامه‌ریزی خطی فازی را در برنامه‌ریزی تولید ادغامی بررسی کرده و یک مدل جدید مبتنی بر اعداد فازی برای حل آن ارائه کردند. مدل پیشنهادی آنها برای حل مساله تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند محصولی، در محیط فازی به کار برده شد. هدف تحقیق ایشان کاهش هزینه‌های تولید، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، مجموع سفارشات عقب افتاده، و میزان نوسان و تغییرات تعداد نیروی کار می‌باشد. چراغعلی‌خان و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیق خود یک مدل یکپارچه‌نگه برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی با هزینه نگهداری و تعمیرات ارائه دادند. در مدل پیشنهادی ایشان میزان تولید بهینه و زمان بهینه انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به صورت هم‌زمان تعیین می‌شوند. در تحقیق دیگری، جبارزاده و همکاران (۱۳۹۲) مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی توسعه دادند که هدف آن عبارت است از حداکثر کردن سود و کاهش نوسانات تولید. در مدل توسعه داده شده توسط ایشان محدودیت‌های تولید، نیروی انسانی، مقادیر موجودی، و محدودیت‌های مربوط به استخدام و اخراج نیروی کار نیز لحاظ شده است.

میرزاپور و همکاران (۲۰۱۳) مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی در یک زنجیره تأمین سبز را با توجه به زمان تأخیر و با توابع هزینه کمبود ارائه کردند. ایشان در تحقیق خود به توسعه یک روش جدید برنامه‌ریزی تولید ادغامی برای چند دوره، و چند محصول در افق زمانی میدان مدت پرداختند. در ادامه، غلامیان و همکاران (۲۰۱۵) به مطالعه مساله برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند محصول در یک زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت پرداخته و لذا از رویکرد فازی برای توسعه مدل خود استفاده کردند. در مدل ایشان پارامترهای هزینه هر ساعت عادی و اضافه‌کاری، هزینه تأمین‌کنندگان به ازاء هر واحد مواد خام، هزینه حمل از عرضه‌کننده، و سایر عوامل هزینه‌ای به صورت فازی لحاظ شده است.

از جمله تحقیقات جدید داخلی نیز می‌توان به مطالعه انجام شده توسط ربانی و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد. ایشان در تحقیق خود مساله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات (نت) را با در نظر گرفتن دوره‌های یکسان مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق ایشان حالات مختلف هر خط تولید به صورت مستقل در نظر گرفته شده و این مساله با لحاظ

زمان‌های کاری عادی و اضافه کاری و با در نظر گرفتن امکان برون سپاری برخی فعالیت‌ها، مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف تحقیق ایشان نیز حداقل کردن مجموع هزینه‌های تولید و نگهداری و تعمیرات بوده و ضمن ارائه مدل ریاضی این مساله، از الگوریتم‌های فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و جستجوی هارمونی برای حل آن بهره گرفته شده است.

از منظر تعداد تابع هدف بهینه‌سازی و تعداد معیارهای تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی تولید ادغامی نیز مانند هر مساله دیگری به دو دسته یک هدفه و چند هدفه تقسیم می‌شود. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته، کمینه‌سازی هزینه کل سیستم، به عنوان یک تابع هدف متداول در مدل‌های برنامه‌ریزی تولید ادغامی مورد بررسی قرار گرفته است (خیرخواه و همکاران، ۱۳۹۵). مازولا و همکاران (۱۹۹۸) دلیل توجه کمتر به برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند هدفه را سختی مواجهه با اهداف چندگانه و متضاد عنوان نموده‌اند.

در بین تحقیقات انجام شده در حوزه برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند هدفه می‌توان به تحقیق لیانگ و چان (۲۰۰۹) اشاره کرد که یک مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند هدفه را در حالتی مطالعه کردند که در آن چند نوع محصول و برای هر محصول چند نوع بازار وجود دارد و همچنین تولید محصولات در چند محل امکان‌پذیر می‌باشد. ایشان برای این مساله یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی جهت حداکثر کردن سود و کمینه نمودن هزینه خرابی ارائه نمودند. موضوع هزینه خرابی البته بدون لحاظ زمان تعمیرات برای اولین بار در تحقیق ایشان بررسی شده است. سپس بیکاسلاگو (۲۰۱۰) همین مساله را با ۴ هدف سود، تغییرات نیروی انسانی، موجودی، و کسری مورد مطالعه قرار داده و یک روش حل مبتنی بر تکنیک برنامه‌ریزی آرمانی برای آن ارائه داده است. در این تحقیق امکان استفاده از قرارداد جانبی به منظور کاهش هزینه‌های نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر، تحقیقات مختلفی در زمینه برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند هدفه انجام شده است که از آن جمله می‌توان به بیکاسلاگو (۲۰۰۱)، ونگ و لیانگ (۲۰۰۵)، چاکار بورتی و اختر (۲۰۱۳)، و صادقی و همکاران (۲۰۱۳) اشاره نمود. همچنین رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۷) یک مدل ریاضی چند هدفه برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی در زنجیره تأمین برگشت

G.P.	Cplex	MINLP					*	*	*	*	برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند هدفه و چند محصولی	لیانگ و چان (۲۰۰۹)
L.S.		MINLP				*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی تولید ادغامی در یک زنجیره تأمین سبز را با توجه به زمان تأخیر	میرزاپور و همکاران (۲۰۱۳)
Heuristic		MILP		*	*	*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند محصول در یک زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت	غلامیان و همکاران (۲۰۱۵)
I.C.A.	ϵ - Constraint	MINLP	*				*	*	*	*	بهینه‌سازی خیر خواه و مسئله‌ی همکاران، برنامه‌ریزی تولید ادغامی پایا	(۱۳۹۵)
	*	MINLP					*	*	*	*	برنامه‌ریزی یک‌چارچه تولید و تعمیرات پیشگیرانه در یک سیستم چندحالتی	سعیدی مهرآبادی و همکاران (۲۰۱۷)

											مساله برنامه ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات (نت) را با در نظر گرفتن دوره های یکسان	ربانی و همکاران (۱۳۹۶)
S.A, H.S.	MILP					*	*					
											مدل سازی و حل مساله یکپارچه برنامه - ریزی تولید ادغامی و تعمیرات و نگهداری در حالت دوهدفه و با رویکرد کاهش نارضایتی مشتریان	تحقیق حاضر
NSGA-II	MILP $\varepsilon - Constraint$			*		*	*		*			

نتایج بررسی تحقیقات گذشته که در جدول (۱) نیز منعکس شده است، نشان می دهد که مدل های سنتی برنامه ریزی تولید که اغلب بر پایه برنامه ریزی خطی بنا شده اند، طی سالان اخیر به خوبی بسط داده شده اند. اما یکپارچه سازی این مدل ها با فعالیت های پشتیبانی مانند برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات از مسائلی است که به تازگی مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به اینکه هماهنگی مناسب دو حوزه تولید و نگهداری و تعمیرات می تواند، عملکرد

خوب یک سیستم تولیدی را تضمین نماید لذا اهمیت تحقیق در حوزه برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات بیش از پیش نمایان می‌شود.

علاوه بر ضرورت یکپارچه بودن برنامه‌ریزی تولید با فرآیندهای پشتیبانی مانند نگهداری و تعمیرات، ادغامی بودن برنامه‌ریزی تولید نیز موضوع جدیدی هست که در آن، محصولاتی که از نظر ظاهر یا روند تولید مشابه یکدیگر هستند به عنوان یک خانواده محصول در نظر گرفته شده و مقدار/تعداد بهینه تولید و تامین تقاضای هر محصول در هر دوره به صورت ادغامی در یک برنامه تولید مشخص می‌شوند.

اما موضوع رضایت مشتریان که تابعی از تامین به موقع تقاضا می‌باشد به عنوان یک هدف مؤثر تاکنون کمتر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در همین راستا، در تحقیق حاضر سعی شده تا انحراف از موعد تامین تقاضاها به عنوان عاملی مؤثر در ایجاد نارضایتی مشتریان به عنوان هدفی جدید در مساله برنامه‌ریزی تولید ادغامی اضافه شود تا در کنار تلاش برای کاهش هزینه‌های کل سیستم، تابع رضایت مشتریان نیز افزایش یابد. در نتیجه، در این مقاله، مسأله برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند محصولی، و چند دوره‌ای به صورت یکپارچه با فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مورد مطالعه قرار گرفته و این مساله در حالت دوهدفه مدل‌سازی و حل می‌شود. براساس اهداف تعریف شده برای مساله مورد مطالعه، مدل توسعه داده شده از یک طرف به دنبال کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های کل سیستم تولید بوده و از طرف دیگر سعی دارد با تامین به موقع تقاضاها، نارضایتی مشتریان را به حداقل ممکن برساند. با توجه به پیچیدگی مسأله برنامه‌ریزی تولید ادغامی که از جمله مسائل NP-hard محسوب می‌شود، در نتیجه در تحقیقات بسیاری مانند فهیم نیا و همکاران (۲۰۰۸)، و ونگ و یه (۲۰۱۴) برای حل این مساله از الگوریتمهای فراابتکاری برای حل این مساله بهره برده‌اند.

در بین الگوریتم‌های چند هدفه، یک نسخه توسعه یافته از الگوریتم ژنتیک بنام الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب نسخه ۲ (NSGA-II) وجود دارد که یک الگوریتم برپایه پارتو بوده و جهت حل مسائل چند هدفه، بسیار مناسب است (چمبراری و همکاران، ۲۰۱۲). در این

مقاله نیز، الگوریتم NSGA-II به منظور حل مسأله مورد نظر استفاده شده و در این راستا، تنظیمات لازم بر روی پارامترهای آن انجام شده است.

روش و مراحل تحقیق

از دیدگاه ماهیت تحقیق، این مطالعه را می‌توان در زمره پژوهش‌های کمی دانست. دلایل اصلی این مطلب را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

❖ مفاهیم اصلی تحقیق را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از متغیرها و پارامترهای مشخص نشان داد.

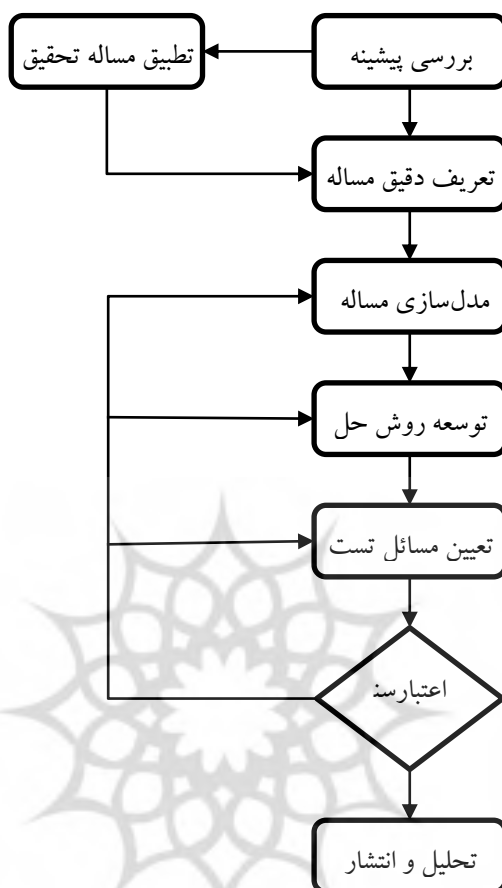
❖ داده‌های مورد نیاز برای محاسبه پارامترها به شکل عددی قابل جمع‌آوری هستند.

❖ فرآیندهای خروجی تحقیق به صورت استاندارد و تکرارپذیر قابل انجام هستند.

❖ تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌های تحقیق در قالب مفاهیم ریاضی قابل بیان هستند.

با توجه به کمی بودن ماهیت این تحقیق، استفاده از روش‌های تحقیق کمی برای انجام این مطالعه امری ضروری است. همچنین رویکرد اصلی این تحقیق، کاربردی است چرا که هدف اصلی تحقیق ایجاد ارتباط بین مفاهیم نظری تحقیق در عملیات با مسائل کاربردی در دنیای صنعت است. با توجه به مطالب طرح شده و ماهیت طرح تحقیق که نیازمند جداسازی مدل مورد مطالعه از دنیای واقعی است، فن تحقیق اصلی مدنظر برای این تحقیق فن تحقیق در عملیات (OR) است.

بنابراین در این تحقیق با توجه به تمرکز بر توسعه مدل‌های کمی در تحقیق در عملیات، تمرکز بر هدف تشریح تحقیق در عملیات خواهد بود. با توجه به مطالب مطرح شده فوق، فرآیند کلی پیشنهادی برای حل مساله مورد مطالعه در این تحقیق را می‌توان مطابق شکل (۲) در گام‌های زیر خلاصه نمود.



شکل ۲. فلوچارت مراحل تحقیق جهت مدل سازی و حل مساله

➤ شناخت دقیق مسئله تحقیق در دنیای واقعی. با توجه به اینکه تعریف مسئله تحقیق در این طرح بر اساس پیشینه تحقیق انجام شده است، لذا در گام اول تحقیق باید با مراجعه به دنیای صنعت، به بررسی مشابهت بین مفروضات تحقیق و خصیصه های دنیای واقعی اقدام نمود. این امر موجب می شود مسئله تحقیق تا حد ممکن واقعی تر و کاربردی تر شود.

- شناخت و تعریف مسئله. در این گام، بر اساس نتایج مرحله قبل و نیز نتایج بررسی پیشینه تحقیق، یک تعریف جامع و دقیق از محدوده سیستم مورد بررسی قرار گرفته و اجزای آن ارائه می‌شود. بر اساس این تعریف، می‌توان مفروضات مسئله تحقیق را مشخص نمود.
- مدل‌سازی مسئله. بر اساس مفروضات به‌دست آمده در گام قبلی، در این گام یک مدل ریاضی ارائه می‌گردد. با توجه به ماهیت مسئله تحقیق، در راستای مدل‌سازی باید از مفاهیم فن‌های مدل‌سازی مربوط به برنامه‌ریزی ریاضی و بهینه‌سازی استفاده نمود.
- انتخاب و طراحی روش حل. در این گام، بر اساس خصوصیات مدل ریاضی ارائه شده، یک یا چندین روش حل کارا و قدرتمند جهت حل مسئله در ابعاد واقعی ارائه می‌گردد. با توجه به اینکه، مدل ریاضی توسعه داده شده به صورت دو هدفه بنا نهاده شده است، در روش‌های مورد نیاز برای حل مسئله تحقیق نیز از روش‌های متناسب مانند محدودیت اپسیلون و الگوریتم‌های فرا ابتکاری (به دلیل پیچیدگی‌های زیاد حل مسئله) استفاده می‌شود.
- طراحی یا انتخاب مسائل نمونه و جمع‌آوری داده واقعی. در این گام، مسائل نمونه تصادفی (بر مبنای مسائل نمونه ارائه شده در ادبیات موضوع و طراحی تصادفی پارامترهای جدید مسئله تحقیق) و نیز در صورت امکان داده‌های واقعی برای اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی انتخاب و جمع‌آوری می‌شوند. برای این مرحله، از مسائل استاندارد تشریح شده در مقاله چاکرابوتی و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شده و پارامترهای خاص مطالعه حاضر نیز به آن اضافه می‌گردد.
- اعتبارسنجی. در این گام، با استفاده از داده‌های مرحله قبل، اعتبار عملکرد روش حل پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های تعریف شده در حوزه بهینه‌سازی چند هدفه سنجیده می‌شود. همچنین بر اساس نتایج حاصل از این مرحله، تغییرات لازم در روش حل داده می‌شود.

مدل‌سازی ریاضی مساله

در ادامه ابتدا اندیس‌ها و مجموعه‌ها، پارامترهای مساله، و متغیرهای تصمیم مساله تعریف و تشریح شده و سپس مدل ریاضی مساله در حالت دو هدفه همراه با محدودیت‌های موجود

توسعه داده می‌شود. این مدل برگرفته از منابع از جمله مدل ارائه شده توسط چراغعلی وهمکاران (۱۳۹۱) و چاکرابوتی و همکاران (۲۰۱۳) بوده که در راستای تامین به موقع تقاضاها، کاهش سطح کسری (سفارش عقب افتاده)، و همچنین امکان استفاده از قراردادهای جانبی، معادلات و محدودیت‌های (۲)، (۳)، (۴)، (۶)، و (۱۰) اضافه و یا تکمیل شده و پارامترها و متغیرهای تصمیم مربوطه نیز اضافه شده است.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

I : شماره (اندیس) محصول ($i=1, 2, \dots, I$)

T : شماره (اندیس) دوره زمانی ($t=1, 2, \dots, T$)

پارامترها

D_{it} : میزان تقاضای محصول i ام در دوره t ام

$C1_i$: هزینه یک واحد تولید محصول i ام در زمان عادی

$C2_i$: هزینه یک واحد تولید محصول i ام در زمان اضافه کاری

$C3_t$: هزینه یک نفر-ساعت کارگر در دوره t ام در زمان عادی

$C4_t$: هزینه یک نفر-ساعت کارگر در دوره t ام در زمان اضافه کاری

$C5_i$: هزینه یک واحد محصول i ام تهیه شده از طریق قرارداد جانبی

$C6_t$: مجموع هزینه خرابی سیستم در دوره t ام

$C7_t$: هزینه انجام نگهداری و تعمیرات در دوره t ام

$C8_i$: هزینه نگهداری یک واحد موجودی از محصول i ام در انبار

$C9_i$: هزینه یک واحد کسری (یا سفارش عقب افتاده) از محصول i ام

- $C10_t$: هزینه اخراج یک نفر گارگر در دوره t ام
- $C11_t$: هزینه استخدام یک نفر گارگر در دوره t ام
- $Imax_t$: ظرفیت انبار برای نگهداری محصولات در دوره t ام
- Cap_i : درصدی از ظرفیت انبار که توسط یک واحد از محصول i ام اشغال می‌شود
- Sl_i : درصدی از تقاضای محصول i ام که در هر دوره مجاز به کسری می‌باشد
- $Wmax_t$: حداکثر نیروی کار در دسترس در دوره t ام
- g : تعداد ساعات کاری هر کارگر در هر دوره زمانی
- a_t : درصدی از ظرفیت نیروی کار برای اضافه کاری در دسترس می‌باشد
- u_i : تعداد نفر ساعت مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول i ام در زمان عادی
- ul_i : تعداد نفر ساعت مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول i ام در زمان اضافه کاری
- e_i : زمان مورد نیاز ماشین برای تولید یک واحد از محصول i ام در زمان تولید عادی و اضافه کاری
- M_t : ظرفیت ماشین در دسترس برای زمان عادی در دوره t ام
- MT_t : زمان انجام نگهداری و تعمیرات
- K : درصدی از ظرفیت ماشین که در هر دوره به علت خرابی از دست می‌رود
- bl_t : درصدی از ظرفیت تولید ماشین که برای اضافه کاری در دسترس می‌باشد
- Inv_{i0} : سطح موجودی محصول خانواده i ام در ابتدای افق برنامه‌ریزی

۳-۳. متغیرهای تصمیم

- X_{it} : میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان تولید عادی در دوره t ام
- Y_{it} : میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان اضافه کاری در دوره t ام

W_t : تعداد نیروی کار مورد نیاز در دوره t ام

H_t : تعداد نیروی کار استخدام شده در دوره t ام

L_t : تعداد نیروی کار اخراج شده در دوره t ام

OT_t : ساعات اضافه کاری مورد نیاز در دوره t ام

Inv_{it} : سطح موجودی محصول خانواده i ام در انتهای دوره t ام

B_{it} : سطح کسری (سفارش عقب افتاده) محصول خانواده i ام در دوره t ام

SC_{it} : میزان محصول خانواده i ام که در دوره t ام توسط قرارداد جانبی تهیه شده است

PM_t : متغیر نگهداری و تعمیرات. در صورت انجام در دوره t ام مقدار یک و در غیر این صورت صفر

مدل ریاضی

$$Z_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (C1_j X_{jt} + C2_j Y_{jt}) + \sum_{t=1}^T (C3_t W_t + C4_t OT_t) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (C5_i SC_{it}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (C8_i Inv_{it} + C9_i B_{it}) + \sum_{t=1}^T (C10_t H_t + C11_t L_t) + \sum_{t=2}^T C6_t (1 - PM_{t-1}) + \sum_{t=1}^{T-1} C7_t PM_t \quad (1)$$

$$Z_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{B_{it}}{D_{it}} \quad (2)$$

S.t.

$$D_{it} = I_{it-1} - B_{it-1} + X_{it} + Y_{it} + SC_{it} - I_{it} + B_{it} \quad , \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, I \text{ and } t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^T D_{it} \leq I_{i0} + X_{it} + Y_{it} + SC_{it} \quad , \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, I \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I Inv_{it} \cdot Cap_i \leq I_{max_t} \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$$B_{it} \leq Sl_i \cdot D_{it} \quad , \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, I \text{ and } t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$$W_t \leq W_{max_t} \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

$$W_t \leq W_{t-1} + H_t - L_t \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

$$H_t L_t = 0 \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

$$Inv_{it} B_{it} = 0 \quad , \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, I \text{ and } t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

$$OT_t \leq ga_t W_t \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I u_i X_{it} \leq g W_t \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I ul_i Y_{it} \leq OT_t \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I e_i X_{it} + PM_t MT_t + (1 - PM_{t-1}) KM_t \leq M_t \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I e_i Y_{it} + (1 - PM_t) kbl_t M_t \leq bl_t M_t \quad , \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (15)$$

$$PM_t \in \{0, 1\} \quad , \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$X_{it}, Y_{it}, W_t, H_t, L_t, OT_t, Inv_{it}, B_{it}, SC_{it} \geq 0 \text{ and Integer} \quad , \quad \forall i \in I \text{ and } t \in T \quad (17)$$

در مدل ریاضی فوق، معادله‌های (۱) و (۲) نشان دهنده دو تابع هدف مساله بوده که به ترتیب نشان دهنده هزینه کل در افق برنامه ریزی و میزان نارضایتی ناشی از کسری و یا تاخیر در تحویل کالاها می باشد. معادله (۳)، تعادل تولید در هر دوره را نشان می دهد که در این تعادل تقاضای هر محصول از مجموع موجودی دوره قبل به علاوه تولید عادی و اضافه کاری آن

محصول به علاوه قرارداد جانبی منهای موجودی آخر در همان دوره به دست می آید. مطابق رابطه (۴) مجموع کل تولید هر کالا در زمان های کار عادی و اضافه کاری و میزان تامین آن کالا از قراردادهای جانبی در افق برنامه ریزی به علاوه موجودی ابتدائی نباید کمتر از کل تقاضای آن محصول باشد. رعایت ظرفیت موجودی انبار با اعمال محدودیت (۵) تضمین شده است. طبق محدودیت (۶) کسری هر محصول برای هر دوره نباید از مقدار معینی تجاوز کند. در محدودیت (۷) تعداد نیروی کار در هر دوره باید از حداکثر نیروی کار در دسترس آن دوره کمتر باشد. محدودیت (۸) تعادل نیروی کار را بیان می کند، که نیروی کار در هر دوره برابر نیروی کار دوره قبل به علاوه استخدام و اخراج طی دوره است. بر اساس محدودیت (۹) در هر دوره یا استخدام یا اخراج داریم و بر اساس محدودیت (۱۰) در هر دوره یا موجودی و یا کسری داریم. محدودیت (۱۱) سقف ظرفیت زمان اضافه کاری نیروی کار برای هر دوره را بیان می کند. در محدودیت (۱۲) زمان مورد نیاز برای تولید در زمان عادی باید از زمان در دسترس نیروی کار در زمان عادی کمتر باشد. بر اساس محدودیت (۱۳) زمان مورد نیاز برای تولید اضافه کاری باید از زمان در دسترس نیروی کار در زمان اضافه کاری کمتر باشد. مطابق محدودیت (۱۴) مجموع زمان مورد نیاز برای تولید عادی ماشین آلات به علاوه زمان نگهداری و تعمیرات به علاوه زمان کاهش یافته از ظرفیت به علت خرابی در سیستم باید کمتر از ظرفیت ماشین در دوره باشد. محدودیت (۱۵) مجموع زمان مورد نیاز جهت تولید اضافه کاری و زمان خرابی در اضافه کاری که در صورت انجام نشدن نگهداری و تعمیرات درصد معینی از زمان در دسترس ماشین صرف خرابی می گردد. رابطه (۱۶) متغیر تصمیم انجام یا عدم انجام نگهداری و تعمیرات در دوره t را نشان می دهد. رابطه (۱۷) دامنه تغییر متغیرهای تصمیم مدل را نشان می دهد.

روش های پیشنهادی حل مساله

در این بخش ابتدا به منظور اجرای مدل ریاضی و اطمینان از صحت و عملکرد آن، یک روش حل دقیق مبتنی بر روش محدودیت اپسیلون تعریف می گردد. سپس با توجه به NP-Hard

بودن مساله مورد نظر، الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-بازنگری ۲ (NSGA-II) نیز برای حل این مساله تنظیم و مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجائیکه مساله مورد بررسی خطی بوده، لذا در در ابعاد کوچک و با استفاده از نرم‌افزار گمز و با حل‌کننده CPLEX اجرا می‌شود. در این خصوص به منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل، ابتدا چند مساله در ابعاد کوچک به صورت شمارشی کامل و بررسی کل فضای جواب حل شد و سپس نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از مدل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. بعد از اطمینان از اعتبار مدل و صحت عملکرد آن در حل مسائل، این مدل بر روی مساله تست مورد مطالعه اجرا و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. درخصوص استفاده از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-بازنگری ۲ (NSGA-II) نیز مناسب بودن این رویکرد و اعتبار آن در منابع قبلی از جمله (حسینی، ۲۰۱۷ و حسینی ۲۰۱۹) تایید شده است.

حل مساله با استفاده از روش محدودیت اسیلون^۱

روش محدودیت اسیلون که امروزه یکی از رویکردهای پر کاربرد برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه محسوب می‌شود، اولین بار توسط هیمز و همکاران مطرح شد (رضایی ملک و همکاران، ۱۳۹۳). در این روش یکی از توابع هدف برای بهینه‌سازی انتخاب و توابع دیگر به محدودیت تبدیل می‌شوند. قالب کلی حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از روش محدودیت اسیلون مطابق زیر است:

$$\min f_j(x)$$

$$f_i(x) \leq \varepsilon_i \text{ for } i = 1, 2, \dots, n; \quad i \neq j; \quad \varepsilon_i = RL_k$$

$$x \in X$$

مراحل اجرای روش محدودیت اسیلون مطابق زیر می‌باشد:

- یک تابع هدف را به عنوان تابع اصلی مساله در نظر گرفته و سایر توابع هدف را در محدودیت‌ها قرار دهید.

- مساله را حل نموده و مقدار بهینه بدست آمده را برای تابع هدف مورد نظر ثبت نمائید.
 - مراحل فوق را برای هر یک از توابع هدف مساله انجام داده و مقدار بهینه هر تابع هدف را مشخص نمائید.
 - بدترین مقدار حاصل شده برای هر تابع هدف در تکرارهای فوق را به عنوان ندیر آن تابع هدف در نظر بگیرید.
 - برای هر تابع هدف، فاصله بین مقدار بهینه و مقدار ندیر را به تعداد از قبل مشخص تقسیم نموده و یک جدول برای مقادیر مختلف ϵ ها تعیین می کنیم.
 - مساله را با یکی از توابع هدف به عنوان تابع اصلی حل نموده و سایر توابع هدف را در محدودیتها قرار داده و در هر مرحله مقدار ϵ را برای یکی از توابع هدف که در محدودیتها قرار دارند تغییر دهید.
 - جوابهای بدست آمده را به عنوان جوابهای پاراتویی گزارش نمائید.
- در مساله مورد نظر در این تحقیق، دو تابع هدف وجود دارد (مجموع هزینهها، و مقدار نارضایتی). لذا به منظور حل این مساله با روش محدودیت اسپیلون، ابتدا مدل ریاضی این مساله دو بار حل می شود. در بار اول، مجموع هزینهها به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته و مقدار نارضایتی در محدودیتها لحاظ می شود. بدین ترتیب مقدار بهینه هزینهها و مقدار ندیر نارضایتی مشخص می گردد. سپس تابع هدف مرتبط با میزان نارضایتی به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و مجموع هزینهها در محدودیتها لحاظ می شود. این بار مقدار بهینه میزان نارضایتی و مقدار ندیر هزینهها مشخص می شود.

الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-بازنگری' (NSGA-II)

الگوریتم ژنتیک یک مدل از یادگیری ماشین است که رفتار آن از مکانیسم تکامل در طبیعت الهام گرفته شده است. این روش با ایجاد جمعیتی از افراد که هر یک در قالب کروموزم ارائه می‌شوند، به حل مساله می‌پردازد (رضایی ملک و همکاران، ۱۳۹۳).

اولین بار در سال ۱۹۹۴ سرینیواز و نب الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب را برای مسائل بهینه‌سازی چند هدفه ارائه کردند (سرینیواز و نب، ۱۹۹۵). با توجه به وجود معایبی همچون عدم نخبه‌گرایی، نیاز به تعیین پارامترهای اشتراک‌گذاری و پیچیدگی‌های محاسباتی برای مرتب‌سازی، این الگوریتم در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکاران توسعه داده و تحت عنوان NSGA-II معرفی شد. ایشان یک رویه براساس الگوریتم ژنتیک چند هدفه ارائه کردند که براساس آن جواب‌های والد و فرزند تجمیع و رتبه‌بندی می‌شوند (دب و همکاران، ۲۰۰۲). فلوچارت مراحل کلی الگوریتم NSGA-II مطابق شکل (۳) می‌باشد. براساس این الگوریتم، به منظور مرتب کردن جمعیت یک نسل در هر تکرار، از دو رویکرد زیر استفاده می‌شود.

▪ رتبه‌بندی نامغلوب

در حقیقت، در این مرحله می‌بایست ذرات (جواب‌ها) را بر مبنای مغلوب بودن، مرتب و آنها را در جبهه‌ها تقسیم‌بندی کرد. هر چه شماره جبهه‌ها کمتر باشد، به این معنی است که ذراتی که در آن هستند تعداد بیشتری از ذرات را مغلوب کرده‌اند. نمونه‌ای از رتبه‌بندی نامغلوب در شکل (۴) آمده است.

▪ استفاده از رویکرد گوناگونی

براساس این رویکرد، برای هر عضو یک فاصله ازدحامی محاسبه می‌شود و بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی نمونه مورد نظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته و گروه می‌باشد. مقدار بزرگ این پارامتر برای هر عضو بیانگر اهمیت آن عضو بوده چراکه حفظ آن می‌تواند منجر به واگرایی و

گستره بهتری در مجموعه اعضای جمعیت بشود. این پارامتر برای هر عضو مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می شود.

$$I(d_k)_m = \frac{I(K+1)_m - I(K-1)_m}{f_m^{max} - f_m^{min}} \quad (18)$$

$$(CD)_K = I(d_k)_1 + I(d_k)_2 + \dots + I(d_k)_m \quad (19)$$

در ادامه، ساختار مناسب کروموزوم جهت نمایش راه حل مساله در الگوریتم NSGA-II و تنظیمات اولیه پارامترهای این الگوریتم تشریح می شود.

➤ ساختار کروموزوم

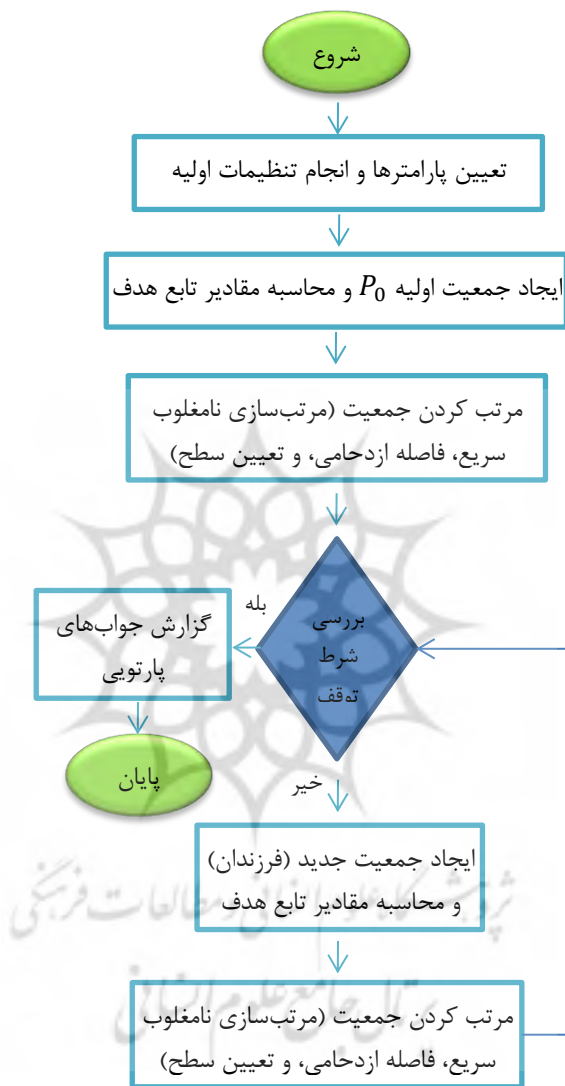
طراحی یک کروموزوم مناسب، مهمترین مرحله در اعمال کردن الگوریتم NSGA-II در فرآیند حل مساله می باشد. در مساله مورد نظر در این تحقیق، هر کروموزوم بدین صورت طراحی شده است که کلیه متغیرهای مساله را در افق برنامه ریزی در نظر بگیرد. هر چند تعداد زیادی متغیر در مساله مورد مطالعه وجود دارد اما سه متغیر اصلی این مساله که سایر متغیرهای تابعی از این سه متغیر هستند، مطابق زیر می باشد.

X_{it} میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان تولید عادی در دوره t ام

Y_{it} میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان اضافه کاری در دوره t ام

پروژه گاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

SC_{it} میزان محصول خانواده نام که در دوره t ام توسط قرارداد جانبی تهیه شده است



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم NSGA-II

t=T	...	t=3	t=2	t=1	
					} X_{1t} محصول اول
					} Y_{1t}
					} SC_{1t}
					} X_{2t} محصول دوم
					} Y_{2t}
					} SC_{2t}
.	} X_{It} محصول i ام
.	
.	
					} Y_{It}
					} SC_{It}
					} PM_t

شکل ۵. ساختار کروموزوم

➤ تنظیم اولیه پارامترهای الگوریتم

همانطور که می دانیم، کارایی الگوریتم های فراابتکاری به طور وسیعی به انتخاب پارامترهای مورد نیاز بستگی دارد. طراحی کامل فاکتورها که تمام ترکیبات ممکن فاکتورها را آزمایش می کند روشی است که در بیشتر تحقیقات به کار گرفته می شود. اما وقتی که تعداد فاکتورها به طور عمده افزایش می یابد تاثیر گذار نمی باشد. در میان چندین تکنیک طراحی آزمایش، روش تاگوچی به عنوان یک روش سیستماتیک برای بهینه سازی به کار گرفته شده است.

در الگوریتم NSGA-II، ۴ فاکتور اندازه جمعیت^۱، حداکثر تعداد تکرار^۲، احتمال رخداد تقاطع^۳ و احتمال رخداد جهش^۴ می‌بایست تنظیم شوند. در این تحقیق برای هر یک از فاکتورها سه سطح متفاوت در نظر گرفته شد و با توجه به روش تاگوچی با طرح L27، مقادیر بهینه هر پارامتر مشخص گردید. جدول (۲) سطح بهینه فاکتورهای فوق را برای الگوریتم NSGA-II استفاده شده در این تحقیق نشان می‌دهد.

جدول ۲. سطح بهینه فاکتورها برای الگوریتم NSGA-II

پارامترها	مقدار بهینه
Max It.	۲۰۰
Pop-size	۷۰
Pc	۰,۹
Pm	۰,۴

➤ جواب‌های اولیه

جواب‌های اولیه مورد نیاز به صورت تصادفی ایجاد می‌شوند. با توجه به شرایط مساله مورد مطالعه که براساس آن، کل تقاضای هر محصول می‌بایست در دوره‌های افق برنامه‌ریزی تامین شود لذا جواب‌های اولیه به گونه‌ای طراحی میشوند که مجموع تولید در زمان‌های عادی و اضافه کار بعلاوه میزان تامین طی قرارداد جانبی برای هر محصول با کل تقاضای آن محصول برابر شود.

➤ عملگرهای تقاطع و جهش

با توجه به نوع مساله و متغیرهای تصمیم، کدگذاری مساله از نوع ارزشی گسسته بوده و لذا با انجام بررسی‌های زیاد، عملگر تقاطع یکنواخت برای ایجاد فرزند انتخاب شد. براساس این

1. Pop-size
2. Max Iteration
3. Pc / P crossover
4. Pm / P mutation

نوع تقاطع، برای ایجاد هر فرزند، مقادیر ستون‌های مورد نیاز که بیانگر میزان تولید در هر دوره می‌باشند به صورت تصادفی از کروموزوم‌های والد برگزیده می‌شود. همچنین عملگر جهش بدین صورت انجام می‌شود که دو خانه از خانه‌های کروموزوم یک فرزند که بصورت یک ماتریس $n \times m$ درآمده و مربوط به یک خانواده محصول با احتمال مشخص P_m تعیین شده و مقداری از یک خانه کاهش داده و معادل آن به خانه دوم اضافه می‌گردد. این میزان با انجام تست‌های مختلف مقدار تصادفی بین ۲۰٪ تا ۴۵٪ تعیین شد. همچنین برای ردیف آخر کروموزوم که مربوط به متغیر دودویی تعمیرات و نگهداری است، از عملگر جهش معکوس استفاده می‌شود. به منظور رعایت قانونی بودن و امکان‌پذیر بودن جواب‌های جدید ایجاد شده از استراتژی تعمیر استفاده شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش، به منظور اجرای مدل ریاضی و اطمینان از صحت عملکرد آن و همچنین ارزیابی کارایی الگوریتم NSGA-II در حل مساله مورد مطالعه، از مسائل استاندارد تشریح شده در مقاله چاکرابوتی و اختر (۲۰۱۳) استفاده شده و پارامترهای خاص مطالعه حاضر نیز به آن اضافه می‌گردد. لذا داده‌های مسائل تست مطابق جداول (۳) تا (۶) می‌باشد. همچنین حد بالای مجاز برای قرارداد جانبی هر دو محصول در هر دوره ۲۰۰۰ واحد می‌باشد. در روش حل دقیق محدودیت اپسیلون، تعداد ۱۰ شکست برای هر تابع هدف در نظر گرفته شد و در مجموع حداکثر ۲۰ نقطه پاراتویی بدست آمده و مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در برخی نقاط شکست، فقط یکی از توابع هدف بدتر شده و تابع هدف دوم تغییری نکرد لذا این نقاط به عنوان نقاط مغلوب مشخص و از ادامه بررسی‌ها حذف گردید. در نهایت از تعداد ۲۰ جواب بدست آمده، ۱۲ نقطه پاراتویی مشخص گردید و تحلیل‌های بعدی براساس این ۱۲ جواب انجام شد. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب نشان دهنده ۲۰ جواب بدست آمده از ۱۰ شکست برای هر یک از دو تابع هدف و جبهه پاراتو بهینه نهایی می‌باشند. نقاط ابتدایی و انتهایی نمودار در این دو

شکل بیانگر حداقل مقدار ممکن برای دو تابع هدف بوده که برای هر تابع هدف با فرض آزاد بودن تابع هدف دوم حاصل شده است.

جدول ۳. داده‌های مربوط به ۸ دوره برنامه‌ریزی

پارامتر	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴	دوره ۶	دوره ۷	دوره ۷	دوره ۸
$C3_t$	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴
$C4_t$	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
$C6_t$	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰
$C7_t$	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰
$C10_t$	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
$C11_t$	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
a_t	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳
bl_t	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۶
MT_t	۱۵۰۰	۶۰۰۰	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۴۷۰۰	۲۴۰۰	۲۲۵۰	۱۶۰۰
M_t	۳۲۰۰۰	۲۸۴۰۰	۲۹۶۰۰	۲۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۳۳۶۰۰	۲۹۶۰۰	۲۶۴۰۰
I_{max_t}	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
W_{max_t}	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۴۵۰۰	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۵۵۰۰	۴۵۰۰	۴۰۰۰

جدول ۴. داده‌های مربوط به محصولات تولیدی

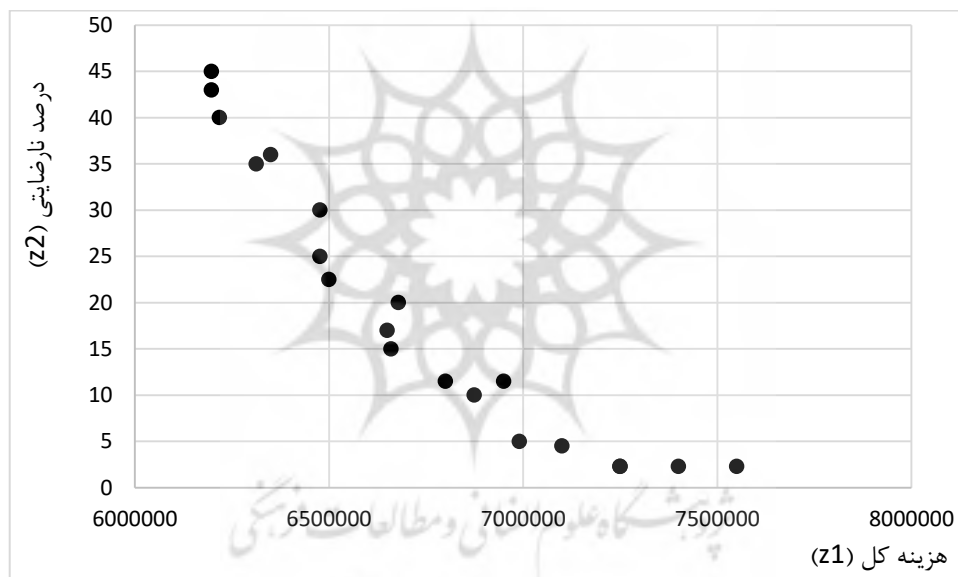
	$C1_i$	$C2_i$	$C5_i$	$C8_i$	$C9_i$	U_i	$U1_i$	$w1_i$	e_i
محصول ۱	۱۵	۱۵	۷۴	۴۰	۷۰	۲	۲	۰٫۵	۱٫۵
محصول ۲	۲۰	۲۰	۱۰۰	۶۰	۱۰۰	۳	۳	۰٫۵	۲

جدول ۵. میزان تقاضای محصولات

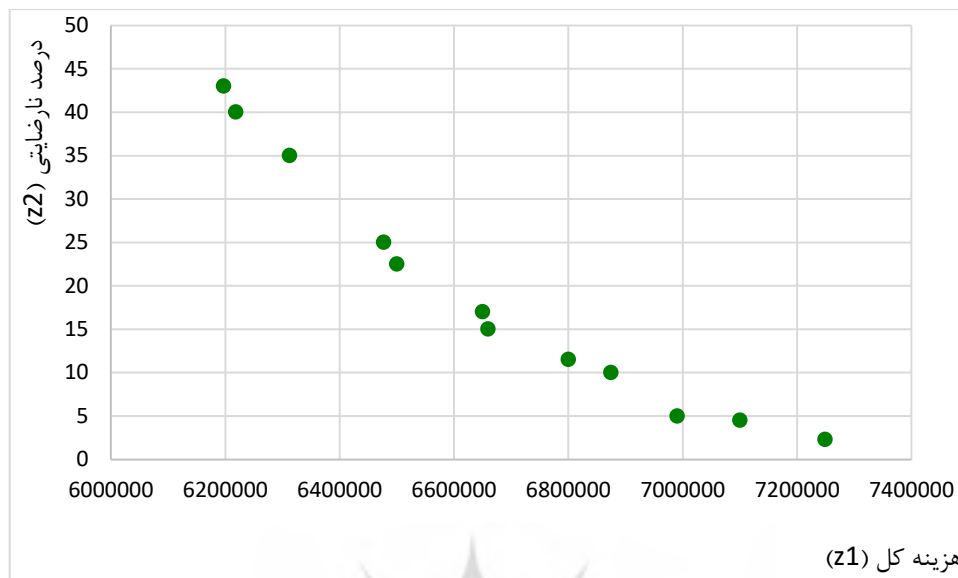
دوره ۸	دوره ۷	دوره ۶	دوره ۵	دوره ۴	دوره ۳	دوره ۲	دوره ۱	
۸۰۰۰	۶۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۴۰۰۰	۹۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۳۰۰۰	۸۰۰۰	محصول ۱
۱۱۰۰۰	۸۰۰۰	۳۵۰۰	۹۰۰۰	۴۰۰۰	۱۱۰۰۰	۱۵۰۰۰	۴۵۰۰	محصول ۲

جدول ۶. مقادیر پارامترها در شرایط اولیه مساله

پارامتر	k	W_0	B_{20}	Inv_{20}	B_{10}	Inv_{10}	g
مقدار	۰٫۱	۳۵۰۰	۰	۵۰۰	۰	۵۰۰	۱۶۰



شکل ۶. مقدار توابع هدف در نقاط شکست در روش محدودیت اسپیلون



شکل ۷. جبهه پاراتو بهینه با روش محدودیت اِپسیلون

جدول (۷) برخی از مقایسات اولیه بین جواب‌های حاصل از روش حل دقیق محدودیت اِپسیلون و الگوریتم NSGA-II را نشان می‌دهد. براساس این نتایج، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II توانسته است جواب‌های مربوط به هر دو مقدار بهینه ممکن برای توابع هدف بطور جداگانه را تعیین نماید. این الگوریتم همچنین از مجموع کل ۱۲ نقطه پاراتو بهینه، تعداد ۱۱ نقطه را مشخص کرده است. در نهایت این جدول نشان می‌دهد که زمان حل الگوریتم NSGA-II تقریباً یک سوم زمان اجرای روش محدودیت اِپسیلون بوده است. با توجه به اینکه این مساله از نوع NP-Hard می‌باشد لذا می‌توان اعلام کرد که الگوریتم NSGA-II این مساله با ابعاد بزرگ را در زمانی بسیار کمتر از روش محدودیت اِپسیلون حل می‌کند و با توجه به نزدیکی کیفیت جواب آن به نتایج حاصل از روش حل دقیق، کارایی این الگوریتم مورد تایید می‌باشد.

همچنین نتیجه حل مساله و تعیین مقدار متغیر دودویی تعمیرات و نگهداری در دو روش مطابق جدول (۸) می‌باشد.

جدول ۷. مقایسه نتایج الگوریتم NSGA-II با روش محدودیت اپسیلون

الگوریتم	بهترین مقدار تابع هدف اول	بهترین مقدار تابع هدف دوم	تعداد نقاط پاراتویی	زمان حل (ثانیه)
ϵ _Constraint	۶۱۹۷۴۱۲	۰,۰۲۳	۱۲	۲۱۷۸
NSGA-II	۶۱۹۷۴۱۲	۰,۰۲۳	۱۱	۷۲۲

جدول ۸. تعیین زمان انجام تعمیرات و نگهداری در دو روش

شماره جواب	الگوریتم	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴	دوره ۵	دوره ۶	دوره ۷	دوره ۸	مجموع
۱	ϵ _Constraint	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۵
	NSGA-II	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۵
۲	ϵ _Constraint	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۵
	NSGA-II	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۵
۳	ϵ _Constraint	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۵
	NSGA-II	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۵
۴	ϵ _Constraint	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۵
	NSGA-II	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۵
۵	ϵ _Constraint	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۴
	NSGA-II	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۴
۶	ϵ _Constraint	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۴
	NSGA-II	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۴
۷	ϵ _Constraint	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۴
	NSGA-II	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۴
۸	ϵ _Constraint	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۴
	NSGA-II	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۴
۹	ϵ _Constraint	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۴
	NSGA-II	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۴
	NSGA-II	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۳
۱۰	ϵ _Constraint	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۳
	NSGA-II	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۳
۱۱	ϵ _Constraint	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۳
	NSGA-II	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۳

علاوه بر مقایسه جدول (۷)، با توجه به مشخص بودن جواب‌های پاراتو بهینه $(|PF_{true}|)$ ۱ دو شاخص مهم نرخ خطا (ER) ۲ و فاصله عمومی (GD) ۳ نیز به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم NSGA-II قابل محاسبه می‌باشد.

نرخ خطا بیانگر نسبت نقاط پاراتو نهایی مشخص شده توسط الگوریتم می‌باشد که بر روی جبهه پاراتو بهینه حاصل از حل دقیق قرار ندارند. این شاخص مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^{|PF_{known}|} e_i}{|PF_{known}|} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، متغیر e_i یک متغیر دودویی می‌باشد بطوری که اگر جواب پاراتو مربوطه (جواب پاراتو i ام) یکی از جواب‌های واقع بر جبهه پاراتو بهینه باشد مقدار ۰ و در غیر اینصورت مقدار ۱ را به خود می‌گیرد. همچنین عبارت $|PF_{known}|$ بیانگر تعداد جواب‌های پاراتو ارائه شده توسط الگوریتم می‌باشد. بنابراین اگر مقدار نرخ خطا برابر با صفر باشد بدین معناست که تمام جواب‌های پاراتو حاصل از الگوریتم بر روی جبهه پاراتو بهینه قرار دارد. شاخص فاصله عمومی نیز بیانگر میانگین فاصله جواب‌های پاراتو ارائه شده توسط الگوریتم از جبهه پاراتو بهینه می‌باشد و مطابق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{|PF_{known}|} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، پارامتر d_i^2 بیانگر فاصله اقلیدسی i امین جواب پاراتو الگوریتم تا نزدیکترین جواب واقع بر روی جبهه پاراتو بهینه می‌باشد.

مقدار دو شاخص نرخ خطا (ER) و فاصله عمومی (GD) برای جواب‌های حاصل از الگوریتم NSGA-II به ترتیب برابر با ۷,۱٪ و ۲,۶٪ بدست آمده که حاکی از عملکرد خوب این الگوریتم در حل این مساله نمونه می‌باشد.

-
1. optimum Pareto-front (PF_{true})
 2. Error Ratio (ER)
 3. Generational Distance (GD)

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با رقابتی شدن بازارهای تولیدی، اهمیت تولید محصولات با لحاظ سه فاکتور مهم کیفیت بالاتر، هزینه کمتر، و تحویل به موقع به بازار و مشتری از اهمیت دوچندانی برخوردار گشته است. لذا امروزه در فرآیند برنامه‌ریزی تولید و زیرمجموعه‌های آن از جمله تعمیرات و نگهداری به گونه‌ای عمل می‌شود که این سه هدف ممکن به بهترین حالت ممکن برآورده شود. در این مقاله مساله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید ادغامی با هزینه تعمیرات و نگهداری با دو هدف از سه هدف فوق بررسی و ضمن تعریف پارامترها و متغیرهای مساله، مدل ریاضی آن در حالت دوهدفه ارائه گردید. این مدل با استفاده از روش محدودیت افسیلون و به کمک برنامه گمز به تعداد ۱۰ شکست برای هر تابع هدف حل شد. همچنین به دلیل پیچیدگی مساله ذکر شده، برای حل آن در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II توسعه داده شد و مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه مساله دارای دو هدف می‌باشد، برای مقایسه و ارزیابی نتایج بدست آمده از الگوریتم‌ها از معیارهای ارزیابی چندهدفه مختلفی استفاده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از حل ۳۰ مسئله با اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی چندهدفه NSGA-II دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. براساس مقایسه این نتایج، الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی NSGA-II موفق شد حدود ۹۲٪ از نقاط واقع بر روی جبهه پاراتو بهینه را شناسایی نماید. همچنین زمان حل مساله توسط این الگوریتم حدود ۳۳٪ زمان حل با روش دقیق بوده است. شاخص‌های نرخ خطا (ER) و فاصله عمومی (GD) که دو شاخص ارزیابی مهم در حل مساله چند هدفه محسوب می‌شوند به ترتیب با مقادیر ۷۱٪ و ۲۶٪ نیز بیانگر موفقیت این الگوریتم می‌باشند. بررسی کل مساله حل شده با دو روش درخصوص تعیین زمان‌های نگهداری و تعمیرات بیانگر این است که در ۱۱ جواب ارائه شده تعداد مجموع کل دفعات نیاز به تعمیرات و نگهداری در دو روش حل دقیق و الگوریتم فراابتکاری یکسان بوده و همچنین در ۵ مساله از ۱۱ مساله، زمان‌های مورد نیاز به تفکیک هر دوره نیز دو روش انطباق کامل دارند. مقایسه خلاصه این نتایج حاکی از موفقیت الگوریتم پیشنهادی فراابتکاری در حل این مساله می‌باشد.

از جمله نتایج مدیریتی مهم این تحقیق می‌توان به تضاد اهداف مختلف در یک سیستم برنامه‌ریزی تولید اشاره کرد. به ویژه وقتی اهداف داخلی سازمان مانند کاهش هزینه، افزایش میزان تولید و فروش، و افزایش بهره‌وری منابع با اهداف بیرون سازمان از قبیل رضایت مشتریان به صورت همزمان لحاظ می‌شود تضاد بین اهداف بیشتر نمایان می‌شود. با توجه به جایگاه ویژه مشتریان در بازار رقابتی امروزی، مدیران سازمان‌ها دیگر نمی‌توانند صرفاً با لحاظ اهداف مورد نظر خود برنامه تولید را تعیین نمایند چرا که نادیده گرفتن یک یا چند هدف مهم دیگر موجب می‌شود سازمان در کسب نتایج ایده‌آل خود در بازار موفق نباشد. برای این اساس، بکارگیری روش‌های برنامه‌ریزی چند هدفه با لحاظ اهداف مهم همه ذینفعان موجب می‌شود مدیران و تصمیم‌گیرندگان سیستم‌های تولیدی با ارزیابی و مقایسه جواب‌های مختلف بدست آمده نسبت به انتخاب مناسب‌ترین جواب اقدام نمایند.

همچنین برای کارهای آتی می‌توان همین مساله را در شرایط عدم قطعیت (احتمالی) و فازی در نظر گرفت. علاوه بر این در نظر گرفتن اهداف متناقض دیگر از جمله کاهش سطح کسری، کاهش ساعات اضافه‌کاری و غیره می‌تواند در توسعه مدل کمک کننده باشد. موضوع جدید دیگری که می‌تواند برای محققین بعدی جذاب باشد در نظر گرفتن کیفیت محصولات بوده و می‌توان تولید محصولات را در شرایط متفاوت و با درجه‌بندی کیفیت‌های مختلف مطرح و بررسی نمود.

منابع

- جبارزاده - آرمین، زارعیان - رحمان، قوسی، روزبه (۱۳۹۲)، ارائه یک رویکرد برنامه‌ریزی تولید ادغامی با اهداف بیشینه کردن سود و بیشینه کردن ثبات تولید: مدل‌سازی و کاربرد واقعی، دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۷ بهمن تا ۸ بهمن ۱۳۹۲.
- چراغلی‌خانی - علی، خوش‌الحان، فرید (۱۳۹۱)، ارائه مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید ادغامی با هزینه نگهداری و تعمیرات، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، دوره ۲۳، شماره ۱، ص ۶۸ تا ۷۷.
- حجی - علی‌رضا، محمد رحیمی، علی‌رضا (۱۳۸۷)، بکارگیری برنامه‌ریزی خطی چند هدفه فازی در برنامه‌ریزی تولید ادغامی، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۳۰ بهمن تا ۱ اسفند ۱۳۸۷.
- خیرخواه - امیرسامان، نوبی - آرش، حاجی‌پور، وحید (۱۳۹۵)، ارائه الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه جهت بهینه‌سازی مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید ادغامی پایا، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، جلد ۴، شماره ۷، ص ۱ تا ۱۵.
- ربانی - مسعود، افزاره - محمد حسین، امینی - ساسان، فرخیاصل، حامد (۱۳۹۶)، برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری تعمیرات با در نظر گرفتن دوره‌های یکسان‌ت، نشریه روش‌های عددی در مهندسی، دوره ۳۶، شماره ۲، ص ۶۳ تا ۷۸.
- رضایی‌ملک - محمد، توکلی‌مقدم - رضا، عوض‌آبادیان، فرشید (۱۳۹۳)، ارائه مدل دو هدفه برای مساله زمانبندی جریان کارگاهی با محدودیت دسترسی به ماشین‌ها، نشریه مهندسی صنایع، دوره ۴۸، شماره ۲، ص ۱۸۹ تا ۲۰۰.
- رضایی‌مقدم - سعید، یوسفی - ام‌البنین، کرباسیان - مهدی، خیام‌باشی، بیژن (۱۳۹۷)، برنامه‌ریزی تولید یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین برگشت پذیر به کمک مدل‌سازی ریاضی چند هدفه: مطالعه موردی در یک صنعت High-Tech، مدیریت تولید و عملیات، دوره ۹، شماره ۲، ص ۵۷ تا ۷۶.

Abrego, L. and Osterholm, P (2008), "External Linkages and Economic Growth in Colombia: Insights from A Bayesian VAR Model", IMF Working Paper WP/08/46.

Baykasoglu, A. (2010), "Aggregate Production Planning using the Multiple Objective Tabu Search", *International Journal of Production Research*, No. 39. PP: 3685-3702.

Cassady C.R. and Kutanoglu, E. (2003), "Minimizing Job Tardiness Using Integrated Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling", *IIE Transactions*, No. 35. PP: 503-513.

Chakraborty, R.K. and Akhtar Hasin, A. (2013), "Solving an aggregate production planning problem by using multi-objective genetic algorithm (MOGA) approach", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, No. 4. PP: 1-12.

Chambari, A. Rahmati, S.H.R. Najafi, A.A. and Karimi, A. (2012), "A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies", *Computers & Industrial Engineering*, No. 63. PP: 109-119.

Deb, K. Pratap, A. Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002), "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, No. 6. PP: 182-197.

Dekker, R. (1996), "Application of maintenance optimization models: a review and analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, No. 51. PP: 229-240.

Doan, T. Litterman, R and Sims, C (1984), "Forecasting and Conditional Projection Using Realistic Prior Distributions", *Econometric Reviews*, No. 3. PP: 1-100.

Fahimnia, B. Luong, L.H.S. and Marian, R.M. (2008), "Modeling and optimization of aggregate production planning-A genetic algorithm approach", *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*, No. 28. PP: 1007-1012.

Gholamian N. Mahdavi I. Tavakkoli-Moghaddam R. and Mahdavi-Amiri N. (2015), "A comprehensive fuzzy multi-objective multi-product multi-site aggregate production planning decisions in a supply chain under uncertainty", *Applied Soft Computing*, No. 37. PP: 585-607.

Hanssman, F. and Hess, S. (1960), "A linear programming approach to production and employment scheduling", *Management Technology*, No. 1. PP: 46-51.

Holt, C.C. Modigliani, F. and Muth, J.F. (1956), "Derivation of a Linear Decision Rule for Production and Employment", *Management Science*, No. 2. PP: 159-177.

Holt, C.C. Modigliani, F. and Simon, H.A. (1955), "A Linear Decision Rule for Production and Employment Scheduling", *Management Science*, No. 2. PP: 1-30.

Hosseini, S. M. H. (2017). "A multi-objective genetic algorithm (MOGA) for hybrid flow shop scheduling problem with assembly operation", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10 (special issue on production and inventory), 132-154.

Hosseini, S. M. H. (2019). "Modelling and solving the job shop scheduling Problem followed by an assembly stage considering maintenance operations and access restrictions to machines", *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 12(1), 63-78.

Leung, S.C.H. and Chan, S.S.W. (2009), "A Goal Programming Model for Aggregate Production Planning with Resource Utilization Constraint", *Computers & Industrial Engineering*, No. 56. PP: 1053-1064.

Masud, A.S.M. and Hwang, C.L. (1980), "An aggregate production planning model and application of three multiple objective decision methods", *International Journal of Production Research*, No. 18. PP: 741-752.

Mazzola, J.B. Neebe, A.W. and Rump, C.M. (1998), "Multiproduct production planning in the presence of work-force Learning", *European Journal of Operational Research*, No. 106. PP: 336-356.

McCall, J.J. (1965), "Maintenance Policies for Stochastically Failing Equipment: A Survey", *Management Science*, No. 11. PP: 493-524.

Mirzapour Al-e-Hashem, S.M.J. Aryanezhad, M.B., and Sadjadi, S.J. (2012), "An efficient algorithm to solve a multi-objective robust aggregate production planning in an uncertain environment", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, No. 58. PP: 765-782.

Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Babolib, A., and Sazvarb, C. (2013). "A stochastic aggregate production planning model in a green supply chain: Considering flexible lead times, nonlinear purchase and shortage cost functions", *European Journal of Operational Research*, 230(1), 26-41.

Moghadam, S.R, Yousefi, O., Karbasian, M., and Khayambashi, B. (2019), "Integrated production-distribution planning in a reverse supply chain via multi-objective mathematical modeling; case study in a high-tech industry", *Journal of Production and Operations Management*, Vol. 9, Issue 2, No. 17, PP:1-22.

Nam, S.J. and Logendran, R. (1992), "Aggregate production planning-a survey of models and methodologies", *European Journal of Operational Research*, No. 61. PP: 255-272.

Ozdamar, L. Bozyel, M.A. and, Birbil, S. (1998), "A hierarchical decision support system for production planning (with case study)", *European Journal of Operational Research*, No. 104 PP: 403-422.

Sadeghi, M. Hajiagha, S.H.R. and Hashemi, S.S. (2013), "A fuzzy grey goal programming approach for aggregate production planning", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, No. 64. PP: 1715-1727.

Srinivas, N. and Deb, K. (1995), "Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms", *Evolutionary Computation*, No. 2 (3). PP: 221–248.

Wang S.C. and Yeh M.F. (2014), "A modified particle swarm optimization for aggregate production planning", *Expert Systems with Applications*, No. 6. PP: 3069-3077.

Wang, R.C. and Liang, T.F. (2005), "Aggregate production planning with multiple fuzzy goals", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 25. PP: 589–597.

