فصلنامهٔ مهندسی مدیریت نوین
دورهٔ نهم، شمارهٔ دوم، تابستان ۱۴۰۲

ارائهٔ یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی تولید و تعمیرات و نگهداری با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به منابع تولیدی در شرایط عدم قطعیت

محمد شریف زادگان[۱]، محمدرضا حیدری[۲]، کورش پوری[۳]، عادل پورقادر چوبر[۴]، میلاد ابوالقاسمیان[۵]

چکیده

در سیستم‌های تولیدی و صنعتی، برنامه‌ریزی ادغامی تولید و عملیات و تعمیرات از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از این رو در این پژوهش یک برنامه‌ریزی ادغامی چندهدفه با قابلیت بهینه‌سازی برای زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات با ملحوظ دانستن محدودیت دسترسی به منابع تولیدی در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. برای این منظور، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح در راستای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات در شرکت مارون مدل‌سازی گردید. بر طبق نتایج حاصل شده، ماکزیمم سود حاصل شده پس از کسر هزینه‌ها برابر با ۱۲۶۹۰ میلیون دلار، کمترین ریسک ناشی از تولید محصول برابر با ۳۴۶۲ و کمترین مدت زمان اجرای نگهداری و تعمیرات برابر با ۱۴۱۷۲ ساعت محاسبه شده است. سرانجام، نتایج ارزیابی مدل‌سازی انجام شده نشان داد که استقرار نتایج حاصل از حل دقیق و فراابتکاری ارائه شده در این مقاله بیش از ۷ درصد در تولیدات شرکت بهبود ایجاد می‌کند.

کلمات کلیدی: مدل ادغامی، زمان‌بندی تولید، نگهداری و تعمیرات، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II

---

[۱]- گروه مهندسی صنایع، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی، مسجد سلیمان، ایران (نویسندهٔ مسئول)
msh.mis416@gmail.com
[۲]- گروه مدیریت، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران mrheidari@tvu.ac.ir
[۳]- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Kooroshpouri@gmail.com
[۴]- گروه مهندسی صنایع، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
apourghader@gmail.com
[۵]- گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
m.abolghasemian.bt@gmail.com

تاریخ وصول: ۱۴۰۲/۳/۲۹ **تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۶/۹**

مقدمه

در طی چند دههٔ گذشته همواره دغدغه‌های فراوانی در ارتباط با تلفیق حوزه‌های مختلف مرتبط با فعالیت‌های تولید وجود داشته است (ارتوگرال[1]، ۲۰۱۹). حوزه‌هایی که هر کدام به‌مثابهٔ قلب تپندهٔ واحدهای تولیدی هستند و باید در تصمیم‌گیری‌های مختلف از آن‌ها بهره گرفت. به دلیل اثر متقابل هر کدام از این حوزه‌ها نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت جزیره‌ای بررسی کرد و بسیار مناسب و معقول است تا ساز و کاری را برنامه‌ریزی کرد که بتوان تمام عوامل مهم را تا جای امکان با هم در نظر گرفت. تلاش‌های زیادی برای یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات و تأمین مواد اولیه صورت گرفته است. همان‌طور که مشخص است سیستم مورد نظر به‌صورت زنجیره به یکدیگر متصل است و تصمیم‌گیری در هر قسمت اثرات خود را بر روی بخش‌های دیگر نمایان می‌کند (لئو، ۲۰۱۹). پیشرفت‌های اخیر در یکپارچه‌سازی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موجب اتصال مباحث مقدار تولید اقتصادی[2] و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (سنا[3]، ۲۰۱۲)، کنترل همزمان نرخ تولید، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه شده است[4] (برتوس[5]، ۲۰۱۱). از طرف دیگر تحقیقاتی که به یکپارچه‌سازی تولید و برنامه‌ریزی نت پرداخته‌اند به بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ برمی‌گردند. تحقیقات در این دوره بیشتر بر روی چند اثر حیاتی متمرکز بودند، مانند اثر پیچیدگی تولید و تکنولوژی، سرعت عملیات، برنامه‌ریزی راه‌اندازی و طراحی تلورانس‌ها با در نظر گرفتن زوال کیفیت (لئو[6]، ۲۰۰۹) و یا تأثیر برنامه‌ریزی بازرسی کیفیت بر روی جریان تولید (کیم[7]، ۲۰۰۸) و همچنین برخی از پژوهش‌ها بر روی یکپارچه‌سازی تولید، کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن استهلاک سیستم تمرکز

[1] Ertogral
[2] Economic Production Quantity (EPQ)
[3] Sana
[4] Preventive Maintenance (PM)
[5] Berthaut
[6] Liu
[7] Kim

کردند (بوسلاح[1]، ۲۰۱۶). در واقع تعداد معدودی از پژوهش‌های منتشر شده سه جنبهٔ تولید، کیفیت و نگهداری و تعمیرات را با هم در نظر گرفته‌اند.

همان‌طور که می‌دانیم اصالت در واحدهای تولید با ماشین‌آلات است، یعنی ماشین‌آلات نقش اساسی را به‌خصوص در تولید انبوه انجام می‌دهند. انجام کار توسط ماشین‌آلات با گذر زمان می‌تواند سبب مستهلک شدن آن‌ها و زوال روزافزون تجهیزات شود. پس فعالیتی همانند برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات باید برای حفظ کارایی و اثربخشی ماشین‌آلات صورت گیرد تا در تمام دوره‌ها ماشین‌آلات با کمترین خرابی و توقف به کار خود ادامه دهند. به طور طبیعی هر ماشین می‌تواند در طی دورهٔ زمانی که بررسی می‌شود مقداری استهلاک پیدا کند، یکی از روش‌های مؤثر برخورد با چنین پدیده‌هایی انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه یا تعمیرات حداقلی به میزانی در کُند شدن روند استهلاک مؤثر است. پس باید با توجه به ملاحظات هزینه و در نظر گرفتن زمان‌بندی‌های مناسب برای انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اقدام شود. هر محصول که تولید می‌گردد با توجه به داده‌های تاریخی تولید میزان ضایعات مشخصی دارد، از این رو محصول تولید شده به انبار محصول نهایی و از آنجا به مرکز کنترل کیفیت ارسال می‌شود تا مورد بررسی قرار گیرد. کالای ضایعاتی امحاء می‌گردد و کالای مورد تأیید به دست مشتریان می‌رسد.

از این رو با توجه به رقابت تنگاتنگ موجود بین سازمان‌های تولیدی، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های این سازمان‌ها چگونگی برنامه‌ریزی سازمان برای استفاده از منابع به‌منظور دستیابی به نحوهٔ استفادهٔ بهینه از منابع سیستم است (کوپانسون، ۲۰۱۹). در واقع سازمانی موفق است که بتواند به بهترین نحو از منابع خود استفاده کند. داشتن برنامه‌ریزی تولید مناسب در طول افق برنامه‌ریزی عاملی است که استفادهٔ بهینه از منابع سازمان اعم از منابع انسانی، تجهیزات، منابع مالی و ... را به دنبال خواهد داشت. از این رو محققان بسیاری در زمینه‌های مرتبط با مسائل برنامه‌ریزی تولید به پژوهش پرداخته‌اند. اغلب سازمان‌ها به‌صورت چندمحصولی هستند و این محصولات در اثر صرف منابعی همچون

[1] Bouslah

زمان استفاده از ماشین‌آلات، منابع مالی و ... حاصل می‌شوند. فرایند تولید محصولات در چنین سازمان‌هایی بر حسب نوع محصول به گروه‌های مشخصی تقسیم‌بندی می‌شود. مهم‌ترین محیط‌های تولیدی شامل جریان کارگاهی، کارکارگاهی و کارگاه باز هستند. از جمله مواردی که افزایش بهره‌وری یک سیستم یا سازمان را به دنبال دارد برخورداری سازمان از یک برنامه‌ریزی تولیدی مناسب است. از سوی دیگر برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات به تعیین زمان مناسب انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در طول افق برنامه-ریزی به‌منظور جلوگیری از بروز خرابی در سیستم با هدف حداقل نمودن هزینهٔ کل، کمک می‌نماید (صلاحی و همکاران، ۲۰۲۳; اچکار، ۲۰۱۹). چالش جدی شرکت‌های تولیدی در زمینهٔ برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، هم‌راستایی فعالیت‌های تولیدی و تعمیراتی است که زمان‌بندی و برنامه‌ریزی‌های مربوط به تولید را تحت شعاع اجرایی خود قرار داده است و هم‌راستایی اقدامات اجرایی را به چالش جدی سازمان‌های تولیدمحور کشانده است به‌گونه‌ای که عدم هم‌راستایی فعالیت‌های نگهداری سبب می‌شود تا به دلیل خرابی دستگاه‌های تولیدی، فرایند تولید متوقف شده و ضرر فراوانی به سازمان تحمیل کند.

توالی عملیات و زمان‌بندی نوعی فرایند تصمیم‌گیری است که نقش اساسی در ارتقاء بهره‌وری صنایع تولیدی و خدماتی دارد. با توجه به اینکه صنایع تولیدی به داشتن یک برنامه‌ریزی مناسب برای استفاده از منابع خود به‌منظور ارتقاء کارایی در دنیای رقابتی روزافزون بازارها و نیازهای متغیر مشتریان در شرکت‌های تولیدی نیاز دارند، داشتن یک برنامه‌ریزی مناسب که قادر است نیازهای مصرف‌کنندگان را پوشش دهد ضروری است. برای تحقق این هدف لازم است تا شرکت‌ها در ایده‌آل‌ترین وضعیت‌های ممکن خود از حیث عملکرد ماشین‌آلات قرار بگیرند. زیرا، عدم توجه به این مسئله و بروز خرابی‌های غیرمترقبه ممکن است هزینه‌های به‌مراتب سنگین‌تری برای نگهداری و تعمیرات اعمال نماید. اقدامات نگهداری و تعمیرات برای نگهداری از ماشین‌آلات در یک شرایط ایده‌آل و عملیاتی با هدف افزایش بهره‌وری سازمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، برای تولید با کیفیت محصولات که از اهداف عمده در هر سیستم تولیدی است؛ شرایط

ایده‌آل و آماده به کار صحیح ماشین‌آلات نقش اساسی بر روی کیفیت محصولات بازی می‌کند (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۲۱)؛ بنابراین، فعالیتی همانند برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات باید برای حفظ کارایی و اثربخشی ماشین‌آلات صورت گیرد تا در تمام دوره‌ها ماشین‌آلات با کمترین خرابی و توقف به کار خود ادامه دهند. به طور طبیعی هر ماشین می‌تواند در طی دورهٔ زمانی‌ای که بررسی می‌شود مقداری استهلاک پیدا کند، یکی از روش‌های مؤثر برخورد با چنین پدیده‌ای انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه یا تعمیرات حداقلی به میزانی در کُند شدن روند استهلاک مؤثر است. پس باید با توجه به ملاحظات هزینه و در نظر گرفتن زمان‌بندی‌های مناسب برای انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اقدام شود. هر محصول که تولید می‌گردد با توجه به داده‌های تاریخی تولید میزان ضایعات مشخصی دارد، از این رو محصول تولید شده به انبار محصول نهایی و از آنجا به مرکز کنترل کیفیت ارسال می‌شود تا مورد بررسی قرار گیرد. کالای ضایعاتی امحاء می‌گردد و کالای مورد تأیید به دست مشتریان می‌رسد (چوبر و همکاران، ۲۰۲۲).

امروزه در اکثر مسائل زمان‌بندی تولید و تعیین اندازهٔ انباشته، سیستم تولیدی به‌صورت کامل در دسترس فرض می‌شود و بحث در دسترس بودن، خرابی سیستم و نگهداری و تعمیرات آن‌ها نادیده گرفته می‌شود. از سوی دیگر در مدل‌های برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات نیز بحث میزان تولید و هزینه‌های آن نادیده گرفته می‌شود. با توجه به اهمیت در دسترس بودن سیستم تولیدی و تأثیری که برنامهٔ نگهداری و تعمیرات بر عملکرد سیستم دارد، از این رو با توجه به لزوم توسعهٔ مدل ریاضی ادغامی زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات، یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینهٔ نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌های تولید، هزینه‌های کسری موجودی و توقف‌های حاصل از اجرای نت اصلاحی و کمینه‌سازی زمان‌بندی تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به ظرفیت تولید، تعداد نیروی انسانی برای اجرای نت پیشگیرانه و محدودیت بودجهٔ مربوط به تعمیرات ارائه خواهد شد. از طرفی دیگر با توجه به ماهیت وجود عدم قطعیت در تقاضای محصولات مورد نیاز و همچنین

زمان‌بندی اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیراتی، مدل ریاضی به‌صورت فازی ارائه شده است. از طرفی دیگر با توجه به چندهدفه بودن مدل ریاضی، با استفاده از روش حل دقیق ابتکاری LP-Metric پارتوی جواب‌های بهینه تعیین خواهد شد. سپس برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده شده است؛ لذا مهم‌ترین هدف اجرایی تحقیق، ارائهٔ یک مدل ادغامی با قابلیت بهینه‌سازی برای پیاده-سازی زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات با لحاظ کردن محدودیت دسترسی به منابع در شرکت پتروشیمی مارون است. برای تحقق این هدف، مهم‌ترین دستاورد مدل جدید معرفی شده و سهم مشارکت اصلی آن نسبت به تحقیقات مشابه دیگر عبارت است از:

- ارائهٔ یک مدل ریاضی ادغامی برای پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی تولید در یک سیستم تولیدی،
- در نظر گرفتن قابلیتی که در صورت اجرای نگهداری و تعمیرات در هر ماشینی منجر به عدم دسترسی همهٔ ماشین‌ها نشود،
- در نظر گرفتن یک سیاست نگهداری و تعمیرات به طور کامل که با حل این مسئله بتوان بیشترین سود، کمترین ریسک و کمترین زمان اجرای نگهداری و تعمیرات را در سیستم به‌دست آورد.

پیشینهٔ تحقیق

همرول[1](۲۰۱۸) در پژوهش خود بیان داشت که ارائهٔ روش‌های مختلف برای حفظ و بهبود فرایندهای تولید، هماهنگی اجرایی سیستم‌ها، درک و کاربرد عملی اصول آن‌ها است. نویسنده بر اساس مشاهدات خود بیان نموده استفادهٔ بیشتر و کارآمد از قدرت مدیریت کیفیت جامع، شش سیگما، تولید ناب و سایر استراتژی‌های تعمیر و نگهداری فرایندها و بهبود فعالیت‌های روزانه شرکت‌ها مفید باشد. چریبر[2](۲۰۱۸) در پژوهش خود بیان داشت که افزایش هزینه‌های تولید و الزامات بازدهی به طور مداوم برای

[1] Hamrol
[2] Schreiber

شرکت‌های تولیدی موجه است. یکی از راه‌های غلبه بر این چالش‌ها، ارتقاء بهره‌وری و اثربخشی تعمیر و نگهداری با توسعه و یکپارچه‌سازی ابزارهای پیش‌بینی‌کنندۀ نگهداری و استفاده از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی هدفمند که اقدامات تعمیر و نگهداری است. با این حال، ادغام سنسورها به منابع تولیدی نصب شده قبلاً برای پیش‌بینی وظایف تعمیر و نگهداری مورد نیاز یکی از چالش‌های اصلی شرکت‌های تولیدی است؛ بنابراین، در این مقاله، یک روش نوآورانه برای ابزارهای پیش‌بینی‌کنندۀ نگهداری به‌عنوان خدمات ابر هوشمند و کاربرد صنعتی این روش برای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری یکپارچه ارائه شده است. لئو (۲۰۱۸) در پژوهش خود بیان داشت که برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری و برنامه‌ریزی تولید دو فعالیت است که وابسته به یکدیگر هستند، اما اغلب به طور مستقل در تولید انجام می‌شود. برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بر هر زمان تولید در دسترس و احتمال شکست تأثیر می‌گذارد. با این حال، در تحقیقات قبلی، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری تنها مراقبت‌های پیشگیرانه را در نظر می‌گیرد و ممکن است کمبود تعمیر و یا بیش از حد را منجر شود و بدتر شدن وضعیت سلامت دستگاه‌ها از پیش آگهی‌ها اغلب نادیده گرفته می‌شود. این مقاله، یک مدل تصمیم‌گیری یکپارچه ارائه می‌دهد که تصمیمات پیش‌بینی‌کنندۀ مراقبت را بر اساس اطلاعات پیشگویی با تصمیم‌گیری‌های زمان‌بندی یک ماشین هماهنگ می‌کند تا کل هزینۀ مورد انتظار به حداقل برسد. در مدل یکپارچه، وضعیت سلامتی و زمان ساختگی در معرض تخریب دستگاه قرار دارند. در نهایت، یک نمونۀ موردی برای نشان دادن ارزش روش‌های پیشنهادی استفاده می‌شود و عملکرد راه‌حل یکپارچه با راه‌حل‌های به‌دست آمده از حل برنامه‌ریزی پیش‌بینی شده و برنامه‌ریزی تولید به طور مستقل مقایسه می‌شود. نتایج اثبات کارایی آن است. هوائیس[1] (۲۰۱۹) در پژوهش خود یک شبکۀ زنجیرۀ تأمین دو لایه متشکل از چند شرکت برون‌سپاری و پیمانکاران چندفرعی را مطالعه کرد. نویسندۀ مقاله در پژوهش خود بیان داشتند که بعضی اوقات سیستم‌های تولید قادر به برآورد تقاضای مشتریان نیستند. در این حالت، گزینۀ برون‌سپاری به‌منظور ارتقاء ظرفیت تولید محدود اتخاذ

[1] Haoues

می‌شود. تأمین مالی برون‌سازمانی با عدم تولید سیستم‌های تولیدی قابل توجیه نیست، بلکه برای ارزیابی مسائل به حداقل رساندن هزینه نیز در نظر گرفته می‌شود. در مسئلهٔ در نظر گرفته شده، فرض شده است که میزان خرابی به زمان و میزان تولید بستگی دارد. برای کاهش اثرات زوال می‌توان فعالیت‌های پیشگیرانه‌ای انجام داد و در صورت بروز خرابی‌های غیرمترقبه حداقل تعمیرات انجام می‌شود. از این رو هزینهٔ تولید بستگی به میزان استفاده از دستگاه در نظر گرفته شد. هدف از این تحقیق، ارائهٔ یک سیاست مشترک مبتنی بر یک فرمول برنامه‌نویسی مخلوط عدد صحیح برای تعادل بین مبادلات تجاری بین دو سطح زنجیرهٔ تأمین است. از این رو برنامه‌های یکپارچهٔ تولید و نگهداری تعیین شد تا سود یک زنجیرهٔ تأمین در یک افق برنامه‌ریزی محدود به حداکثر برسد. لذا یک روش بهینه‌سازی بهبودیافته، بر اساس الگوریتم‌های ژنتیکی توسعه داده شد و آزمایش‌های محاسباتی را برای مطالعهٔ بینش‌های مدیریتی برای چارچوب توسعه‌یافته مورد بحث و بررسی قرار دادند. ژیائو[1] (۲۰۱۹) در پژوهش خود بیان داشت که قابلیت اطمینان تجهیزات به طور قابل‌توجهی بر بهره‌وری تأثیر می‌گذارد، و برای به‌دست آوردن قابلیت اطمینان تجهیزات و بهره‌وری بالا، تصمیم‌گیری در مورد نگهداری و تولید باید به طور همزمان گرفته شود تا سیستم تولید سالم بماند. هدف از این مقاله، بررسی بهینه-سازی مشترک تجهیزات مربوط به تعمیر و نگهداری و تصمیم‌گیری در مورد تجهیزات سیستم k-out-of-n با تضمین کیفیت محصول و کشف تأثیر نگهداری بر روی تولید و کنترل هزینه برای تولیدکنندگان است. از این رو یک مدل زنجیره‌ای مارکوف چند دوره‌ای برای تجهیزات سیستم k-out-of-n بر اساس این فرض که خراب شدن تجهیزات یک فرایند تولید خالص، تنظیم شده است. سپس هزینهٔ نگهداری، هزینهٔ تنظیم، هزینهٔ نگهداری موجودی، هزینهٔ کمبود، هزینهٔ تولید و هزینهٔ کیفیت با تقاضای نامشخص و تضمین کیفیت محصول ناشی از خراب شدن تجهیزات تجزیه‌وتحلیل می‌شود. کل کمترین هزینه در هر واحد زمان و روش محاسبهٔ خاص آن ارائه شده است. سرانجام، استحکام و انعطاف‌پذیری روش با یک مثال عددی تأیید می‌شود و تأثیر شدت خرابی

[1] Xiao

تجهیزات و ضعیف شدن کیفیت محصول مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه نشان می‌دهد که مدل تصمیم‌گیری مشترک نه‌تنها می‌تواند تقاضای نامشخص را با هزینهٔ کم و استحکام بالا برآورده کند بلکه باعث می‌شود محصولات خروجی از کیفیت بالایی برخوردار باشند. علاوه بر این، تضمین کیفیت محصول می‌تواند بر تصمیم‌گیری در مورد نگهداری و تولید تجهیزات تأثیر بگذارد و منجر به ضایعات تولید و افزایش هزینهٔ بهره-برداری شود. گلوور[1](۲۰۱۸) در پژوهش خود بیان داشت که سیستم‌های تولید و برنامه-ریزی تولید فعلی شرکت‌های تولید شامل راهبردهای نگهداری آینده‌ای نیستند که امکان پیش‌بینی دقیق وظایف تعمیر و نگهداری را فراهم می‌کنند. این نتیجه در فرایند تولید ناکارآمد به علت پیش‌بینی‌های پیش‌بینی نشده دستگاه، زمان نوسان و تعداد زیادی از سفارشات عجله به دست آمده. یک رویکرد برای ادغام استراتژی‌های نگهداری پیشگویی در یک مدل برنامه‌ریزی تولید و کنترل برای توسعهٔ انعطاف‌پذیری و کیفیت برنامه‌ریزی تولید توسعه داده شده است. بر اساس یک استراتژی نگهداری پیشگویی، این مدل اقداماتی را برای به حداقل رساندن هزینه‌های تولید عمومی و همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری طی یک افق برنامه‌ریزی محدود می‌کند. فتا[2](۲۰۱۷) در پژوهش خود بیان داشت که عملکرد سیستم‌های تولید مدرن همچنان تحت تأثیر آسیب‌ها و خرابی‌های دستگاه قرار می‌گیرد. به‌عنوان یک نتیجه، برنامه‌های تعمیر و نگهداری کافی باید به‌منظور رفع نیازهای در طول توقف تولید به علت شکست‌های غیرمنتظره یا اقدامات پیشگیرانه (PM) انجام شود. به رغم تولید و تعمیر و نگهداری مسائل مربوط نزدیک است، فقط در طول دههٔ گذشته بهینه‌سازی مشترک آن‌ها تبدیل به یک موضوع مهم تحقیق شده است؛ بنابراین، در این مقاله، یک مدل برای بهینه‌سازی ترکیب کنترل تولید موجودی و سیاست‌های PM با هدف به حداقل رساندن کل هزینهٔ مورد انتظار در واحد زمان ارائه شد. این مدل با اشاره به یک سیستم تولید مداوم که مشخصهٔ رفتار ناخوشایند تصادفی است، به طوری که حضور یک بافر در نظر گرفته می‌شود تا عرضهٔ

[1] Glawar
[2] Fata

محصولات مداوم را در حین وقفه سرویس بوجود آورد که ناشی از خرابی‌ها یا اقدامات تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی شده در سیستم تولید است. بر خلاف بخش اصلی ادبیات موجود، بدون محدودیت در وقوع شکست در اینجا اجباری است یعنی اینکه سیستم تولید ممکن است در هر سنی در طی چرخهٔ تولید شکست بخورد و همچنین بیش از یک شکست ممکن است در همان دوره رخ دهد. الگوریتم شبیه‌سازی شده بر روی آنلاینی همراه با یک ماژول شبیه‌سازی مونت کارلو به‌عنوان یک روش حل و فصل پیشنهاد شده است. استحکام الگوریتم توسعه‌یافته با استفاده از تکرارهای مختلف سناریوهای شبیه‌سازی شده مشخص شده توسط مجموعه‌های متنوع پارامترهای هزینه نشان داده شده است. نتایج همچنین اثربخشی مشخصات پیشنهاد شدهٔ سه گانهٔ تئوری موجود را تأیید می‌کند. کانگ[1](۲۰۱۸) در پژوهش خود به کنترل یکپارچهٔ تعمیر و نگهداری پویا و تولید در یک سیستم تولید ناخوشایند اشاره دارد. ادبیات قبلی در مورد کنترل یکپارچهٔ تولید و تعمیر و نگهداری، معمولاً نادیده گرفتن فرصت‌های تعمیر و نگهداری است که ممکن است در طول شکست ماشین‌ها رخ دهد؛ بنابراین، در این مقاله یک سیاست حفظ پویا ارائه می‌شود که شامل تعمیرات اصلاحی، پیشگیرانه و فرصت‌های بالقوه است. تعمیر و نگهداری فرصت‌های شغلی از خرابی ماشین‌ها به‌عنوان فرصت‌های بالقوه برای انجام تعمیر و نگهداری در سایر ماشین‌ها استفاده می‌کند. در این مقاله، کنترل نگهداری دینامیک با تولید به‌منظور دستیابی به حداقل تولید کل هزینه، شامل هزینه‌های موجودی، عقب‌ماندگی، تعمیرات، نگهداری پیشگیرانه و فرصت‌طلبانه، ادغام می‌شود. با استفاده از روش تقریبی و الگوریتم تکرار ارزش، نویسندگان خط‌مشی کنترل مطلوب را برای سیستم تولید بدتر به‌دست می‌آورند. علاوه بر این، نویسندگان عملکرد کنترل سیاست دست‌یافته را با سیاست کنترل قبلی که در ادبیات گزارش شده است مقایسه می‌کنند. تجزیه‌وتحلیل حساسیتی نیز برای بررسی تأثیر برخی از پارامترهای سیستم در پیکربندی سیاست کنترل انجام شده است. با سیاست کنترل پیشنهادی، تمرین-کنندگان صنعت قادر به اجتناب از نگهداری پیشگیرانهٔ غیر ضروری هستند و به طور

[1] Kang

کامل از پنجرهٔ زمان فرصت‌طلب برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم در حین دستیابی به حداقل هزینهٔ کل تولید استفاده می‌کنند. اگیر[1](۲۰۱۸) در پژوهش خود یک رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی متوسط‌مدت برای ادغام برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی و نگهداری پیشنهاد کرده است. مشکل مطرح شده در این مقاله یک کارخانهٔ تولید چندمرحله‌ای تک-مرحله‌ای با واحدهای موازی و منابع محدود است. یک فرمول مداوم در برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط بر اساس ایده‌های اصلی فروشندگان مسابقه و محدودیت‌های مبتنی بر پیش‌شرط برای مقابله با کاهش عملکرد واحد، وابسته به دنباله، عملیات بازیابی انعطاف‌پذیر، دسترسی به منابع و طول عمر محصول، طراحی شده است. نمونه‌هایی برنامه‌ریزی شده‌اند و با ترکیبات سازگار از ادبیات، بر اساس رویدادهای زمان گسسته و زمان جهانی، و اثربخشی روش پیشنهادی پیشنهاد شده مقایسه شده است. با توجه به چندین دورهٔ زمانی، مشکلات برنامه‌ریزی و برنامه‌ریزی اضافی پیشنهاد شده است. نمونه‌های چند مرحله‌ای به طور مؤثر با استفاده از مدل نشان داده شده است که کاربرد روش راه‌حل برای مشکلات متوسط را نشان می‌دهد. نورالفتح و همکاران (۲۰۱۶) یکپارچه‌سازی تولید، نگهداری و تعیمرات و کیفیت یک فرایند ناکامل در سیستم چندتولیدی – چنددوره‌ای را بررسی کردند. در مدل آن‌ها سیستم تولیدی به‌عنوان یک دستگاه ناکامل که وضعیت آن‌ها را به‌عنوان حالت کنترلی و غیرکنترلی است، در نظر گرفته شده است. هدف اصلی وی کمینه کردن تمام هزینه‌ها همزمان با برآورده کردن تمام تقاضاها است. در مدل‌سازی وی کم کردن هزینه‌های جاری، هزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌های استرداد، هزینه‌های تولیدی و تنظیم و هزینه‌های نگهداری مورد توجه قرار گرفته شده بود. مدل آن‌ها بر همکنش بین کیفیت، تولید و پارامترهای نگهداری را به‌خوبی نشان می‌دهد و همچنین این مدل برای پیدا کردن بهترین حالت بین هزینه‌ها کارایی بالایی دارد. در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که هر چه سطح نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بالاتر رود، هزینه‌های کیفیت کاهش می‌یابد؛ همچنین، اگر هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با کاهش هزینه‌های کیفیت جبران نشد،

[1] Aguirre

نگهداری و تعیمرات پیشگیرانهٔ انجام شده توجیه‌پذیر نمی‌باشد؛ همچنین، نتایج به‌دست آمده از حل مدل به وجود رابطهٔ قوی بین تولید، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و کیفیت صحه می‌گذارد. اتای و همکاران (۲۰۱۶) مسئلهٔ برنامه‌ریزی یکپارچهٔ نگهداری و تعمیرات و تولید با سامانهٔ جایگزینی پیشگیری دوره‌ای با تعمیرات حداقلی (نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه) در برابر خرابی‌های برنامه‌ریزی نشده را مورد مطالعه قرار داده‌اند. مدل توسعه داده شده توسط اتای و همکاران از هزینهٔ کلی با در نظر گرفتن وابستگی بین برنامهٔ نگهداری و زمان‌بندی تولید انجام شده است. در مدل آن‌ها هزینهٔ کلی شامل دو بخش هزینه‌های راه‌اندازی تولید محصول، تولیدات، انبار داری و هزینه‌های اختلال در برآورده‌سازی تقاضا، نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی برای سامانهٔ چند دوره‌ای و چندمحصولی است. هدف آتای و همکاران پیدا کردن بهترین سیکل در تعمیر پیشگیرانه و معین کردن اندازهٔ بهینهٔ دسته با افزودن محدودیت زمان راه‌اندازی به آن بوده است. به دلیل پیچیده بودن مسئلهٔ آن‌ها حل دقیق آن زمان زیادی نیاز دارد که از این رو به این نتیجه رسیدند که با روش‌های تقریبی می‌توان در زمان حل منطقی به پاسخ‌های مناسب دست پیدا کرد. از طرفی با توجه به اینکه در مطالعات پیشین (رجوع شود به پژوهش اتای و همکاران) برای حل چنین مسئله‌ای از رویکرد ابتکاری استفاده نشده بود ولی در این پژوهش رویکردی ابتکاری با زمان حل مناسب مطرح گردید. چنسومبات (۲۰۱۹) در پژوهش خود بیان کرد که تاریخچهٔ برنامه‌ریزی گسترده است، اما بیشتر این ارزیابی‌ها به‌صورت نظری است و پیچیدگی سیستم‌های دنیای واقعی را نشان نمی‌دهد. شرکت‌های تولیدی، کالاهای تولیدی را با ساختارهای جامد و پیچیده تولید می‌کنند که هر کدام از آن‌ها نیاز به هماهنگی در فرایندهای کاری، دسته‌ای، جریان و مونتاژ دارد. بسیاری از قطعات نیاز به عملیات متعدد در ماشین‌های چندگانه. یکپارچه‌سازی مشکلات زمان‌بندی دو یا چند تصمیم‌گیری همزمان را در نظر می‌گیرند. تحقیقات پیش‌بینی زمان‌بندی تولید در صنعت کالاهای سرمایه‌ای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری را نادیده گرفته و با استفاده از روش‌های فراابتکاری با جستجوی تصادفی که نمی‌تواند یک راه‌حل بهینه را تضمین کند، استفاده شود. این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی تلفیقی عددی مختلط برای حل

همزمان مسائل برنامه‌ریزی تولید و نگهداری پیشگیرانه در صنعت کالاهای سرمایه‌ای است که با استفاده از داده‌های یک شرکت مشارکتی مورد آزمایش قرار گرفت. هدف این پژوهش کاهش هزینه‌های کل از جمله: هزینه‌های جریمۀ تأخیر و هزینه‌های مجازات؛ هزینه‌های اجزاء و مونتاژ؛ هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه؛ و راه‌اندازی، تولید، انتقال و هزینۀ تولید زمان بیکاری است؛ بنابراین، تابع هدف و فرمول‌بندی مشکل از تحقیقات قبلی گسترده‌تر بود. ابزار با موفقیت با استفاده از داده‌های به دست آمده از یک شرکت همکاری مورد آزمایش قرار گرفت. مشخص شد که کل هزینۀ شرکت را می‌توان به ۶۳.۵٪ کاهش داد. بودجلیدا (۲۰۱۹) در پژوهش خود بیان داشت که تولید و نگهداری پیشگیرانه در صنایع بسیار مهم و استراتژیک عمل می‌کنند. با این حال، در بیشتر کارگاه تولیدی واقعی، برنامه‌ریزی فعالیت‌های مربوطه خود مستقل است و محدودیت تولید را نمی‌توان به‌خوبی برنامه‌ریزی کرد؛ بنابراین، با مشکل زمان‌بندی تولید و تعمیر و نگهداری و پیشگیری مواجه هستیم. علاوه بر این، برنامه‌ریزی ادغامی در هر لحظه ممکن است دچار خطا شود. از عملکرد نظری مورد نظر در هنگام مواجه شدن با اختلالات به دلایل مختلف ایجاد می‌شود؛ بنابراین، باید به دنبال برنامه‌ریزی دقیق‌تر، برای توسعۀ قابلیت اطمینان سیستم باشد. این مقاله یک رویکرد جدید برای بررسی قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی تولید ادغامی و تعمیر و نگهداری در کارگاه‌های جابجایی جایگزین را پیشنهاد می‌کند. شیخعلیشاهی (۲۰۱۹) در پژوهش خود مدل برنامه‌ریزی تولید را با در نظر گرفتن خطای انسانی و نگهداری پیشگیرانه ارائه کرد. مدل پیشنهادی ریاضی شامل تمرکز بر اهداف متضاد شامل خطای کاری، خطای انسانی و قابلیت اطمینان به ماشین است. به‌منظور دستیابی به برنامه‌ریزی مطلوب، خطاهای انسانی، تعمیر و نگهداری و عوامل تولید به طور همزمان مورد توجه قرار می‌گیرند. خطای انسانی با روش ارزیابی و کاهش خطاهای انسانی(HEART) سنجیده می‌شود. سه روش متاهیورستیکی شامل الگوریتم ژنتیک نا مغلوب و بهینه‌سازی ذرات چندهدفه (MOPSO) و الگوریتم پیشرفته (Pareto II) برای یافتن راه‌حل نزدیک به مطلوب توسعه داده شده است. روش Taguchi با تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراشناختی

اعمال می‌شود. چندین مثال نشانگر و یک مورد واقعی (سازندهٔ قطعات یدکی خودرو) برای نشان دادن کاربرد چندهدفهٔ برنامه‌ریزی غیر خطی اعداد صحیح مختلط اعمال می‌شود. رویکرد پیشنهادی این مطالعه ممکن است برای مشکلات مشابه فروشگاه باز با تغییرات جزئی مورد استفاده قرار گیرد. شریف‌زادگان و پورقادر چوبر (۲۰۲۲)، مدل-سازی ریاضی و حل مسئلهٔ برنامه‌ریزی تولید ادغامی، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با محدودیت منابع انسانی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش به ادغام‌سازی و پیوستگی در برنامه‌ریزی همزمان حوزه‌های تولیدی و پشتیبانی در سازمان‌های تولیدی پرداخته شده است. در این رو مدل بهینه‌سازی ریاضی با هدف برنامه‌ریزی نیروی انسانی و افزایش حجم تولیدات شرکت با در نظر گرفتن محدودیت منابع انسانی ارائه شده است. در این مدل مهارت پرسنل، نرخ استفاده از تجهیزات و نرخ از کارافتادگی تجهیزات در حالت عدم قطعیت با روش فازی در پارامترهای مدل استفاده شده است. هدف مدل پیشنهادی حداقل‌سازی کسر نیروی کار برکارایی تولید است. نتایج کسب شده از پیاده‌سازی در یک سازمان تولیدی از مقایسهٔ حل غیرقطعی و فراابتکاری نشان از بهبود در تولیدات شرکت با حداقل زمان معقول و منطقی، جواب‌هایی با حداقل خطای ممکن ارائه می‌دهد. رستگار و همکاران (۲۰۲۲)، برنامه‌ریزی تولید یکپارچه با محدودیت‌های نگهداری در محیط کارگاه هیبریدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله مدل ریاضی جدیدی برای تصمیم‌گیری همزمان برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌ها، زمان و دیرکرد در محیط جریان کارگاهی ترکیبی ارائه کرده‌اند. مفهوم نت ناکامل و در نظر گرفتن چند نوع منبع نگهداری تعمیرات در مدل پیشنهادی ارائه شده است. دو الگوریتم تکاملی فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر الگوریتم جستجوی هماهنگی و روش حل دقیق اپسیلون – محدودیت برای حل مدل پیشنهادی ارائه شده است که فضای حل تصمیم‌گیری را به روشی مستمر جستجو می‌کنند. نتایج نشان‌دهندهٔ مزایا و اثربخشی روش‌های استفاده شده در تعیین جواب بهینهٔ پارتو برای مسائل بهینه‌سازی بوده است. خلاصهٔ پژوهش‌های انجام شده در حوزهٔ برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات و تولید در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پیشینه تحقیق

ردیف	نویسنده/سال	تک‌هدفه	چندهدفه	ادغامی تولید و نت	قطعی	عدم قطعیت	حل دقیق	حل فراابتکاری
۱	همرول (۲۰۱۸)	*			*		*	
۲	چریبر (۲۰۱۸)	*		*	*		*	
۳	لئو (۲۰۱۸)	*		*	*		*	
۴	هوائیس (۲۰۱۹)		*	*	*		*	*
۵	ژیائو (۲۰۱۹)	*		*	*		*	*
۶	گلوور (۲۰۱۸)	*		*	*		*	
۷	فتا (۲۰۱۷)	*		*	*		*	
۸	کانگ (۲۰۱۸)	*		*		*	*	
۹	اگیر (۲۰۱۸)	*		*	*		*	
۱۰	لیاو (۲۰۱۲)	*		*		*	*	*
۱۱	وانگ (۲۰۱۳)	*		*	*		*	
۱۲	ژیانگ (۲۰۱۳)	*		*	*		*	
۱۳	یالایویی (۲۰۱۴)	*		*	*		*	
۱۴	نورالفتح (۲۰۱۶)		*	*	*		*	*
۱۵	اتای (۲۰۱۶)	*		*	*		*	*
۱۶	چنسومبات (۲۰۱۹)		*	*			*	
۱۷	بودجلیدا (۲۰۱۹)		*	*			*	
۱۸	شیخعلیشاهی (۲۰۱۹)		*	*			*	*
۱۹	یلاوی (۲۰۱۴)		*	*	*		*	
۲۰	احمدی (۲۰۱۸)	*		*		*	*	*
۲۱	اگوئری (۲۰۱۸)	*		*	*		*	*
۲۲	امیری (۲۰۱۸)	*		*		*	*	
۲۳	چانگ (۲۰۱۸)	*		*	*		*	*

ردیف	نویسنده/سال	تک‌هدفه	چندهدفه	ادغامی تولید و نت	قطعی	عدم قطعیت	حل دقیق	حل فراابتکاری
۲۴	گویراس (۲۰۱۸)	*		*		*		*
۲۵	مارتینو (۲۰۱۸)	*		*	*		*	*
۲۶	گومز (۲۰۱۸)		*	*	*		*	
۲۷	گیلابرت (۲۰۱۸)	*		*	*		*	
۲۸	شریف‌زادگان و پورقادر چوبر (۲۰۲۲)	*		*	*		*	
۲۹	رستگار و همکاران (۲۰۲۲)	*		*	*		*	*
۳۰	پژوهش حاضر		*	*		*	*	*

بر اساس موارد مشاهده شده در بالا، اکثر مطالعات صورت گرفته در مورد ترکیب مباحث زنجیرهٔ تأمین، کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی تولید مورد بررسی قرار گرفته است. همین‌طور برخی از پژوهش‌های مورد بررسی از واقعیت موجود در محیط‌های صنعتی فاصله گرفته است و از کارایی لازم برای استفاده در مسائل عملی برخوردار نیست. از این رو استفاده از این رویکردها به‌صورت عملی و تأثیرگذار بسیار سخت و مشکل می‌شود. در این پژوهش با آگاهی به ضعف‌ها و نقاط قوت پژوهش‌ها سعی داریم پژوهشی را بررسی کنیم که از لحاظ ساختاری هم تا حد زیادی روان و کاربردی باشد. چیزی که در میان مطالعات انجام شده مشهود است، فقدان یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی برای زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات می‌باشد. از این رو در این تحقیق، با ارائهٔ یک مدل‌سازی ریاضی و حل آن از طریق روش‌های قطعی و فراابتکاری به‌منظور ارتقاء کارایی فناوری تولید و نگهداری در مجموعه‌های تولیدی اقدام می‌شود. برای این منظور، اصلی‌ترین سهم مشارکت این تحقیق اتصال برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی تولید به یکدیگر از طریق ارائهٔ یک برنامه‌ریزی ادغامی با قابلیت بهینه‌سازی است. این برنامه‌ریزی که برای یک سیستم تولیدی اعمال

می‌شود، در آن نگهداری و تعمیرات در هر ماشینی منجر به در دسترس نبودن همهٔ ماشین‌ها نمی‌شود. یک سیاست نگهداری و تعمیرات به طور کامل فرض می‌شود که با حل این مسئله دو نتیجه به دست می‌آید تا هزینهٔ کل به حداقل برسد و قابلیت اطمینان را در سیستم افزایش نماید؛ بنابراین، با تمرکز بر روی کمینه‌سازی هزینه‌های مربوط به تولید محصول، نگهداری محصول تولیدی در کارخانه، نگهداری مواد اولیه در کارخانه، ارسال محصولات به مشتریان، خرید مواد اولیه، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی و با در نظر گرفتن ظرفیت محدود برای کارخانهٔ تولیدی و تأمین‌کننده است.

روش پژوهش

با توجه به اهمیت برنامه‌ریزی تولید ادغامی سیستم‌های تولیدی از یک سو و اهمیت نگهداری و تعمیرات از سوی دیگر برای سیستم‌های تولیدی، در سال‌های اخیر مدل‌های مختلفی به‌صورت مجزا برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی و برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات ارائه شده است. در این بخش به ارائهٔ مدل ریاضی ادغامی برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات در شرکت پتروشیمی مارون خواهیم پرداخت که در این مدل به کمینه‌سازی هزینه‌های تولید، هزینهٔ نگهداری می‌پردازیم. جهت مدل‌سازی فضای در نظر گرفته شده برای بررسی ابعاد موضوع نیاز است تا مفروضات مدل‌سازی معین و مطابق با آن فرایند توسعهٔ مدل انجام گردد. از این رو مفروضات تدوین مدل ریاضی به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

۱.مدل برنامه‌ریزی تولید چندمحصولی است.

۲. ظرفیت در دسترس هر ماشین محدود است.

۳. افق برنامه‌ریزی محدود است.

۴. زمان و هزینهٔ آماده‌سازی وابسته به توالی و حالت آماده‌سازی در ابتدای افق برنامه-ریزی برای تک‌تک
ماشین‌ها مشخص است.

۵. در هر دوره چند محصول می‌توان تولید نمود.

۶. امکان شکست زمان‌های آماده‌سازی بین دو دوره وجود ندارد.

۷. ساختار محصولات تک‌سطحی و ساختار تولید چندمرحله‌ای.

۸. کمبود مجاز نیست.

۹. تقاضای خارجی برای محصول تکمیل‌شده (نهایی) و قطعی است و در پایان هر دوره برآورده می‌شود.

۱۰. یک مرحله از تولید محصول، تا زمانی که کلیهٔ محصولات مورد نیاز آن مرحله آماده نباشد نمی‌تواند آغاز شود. به بیان دیگر، تولید در یک مرحلهٔ زمانی می‌تواند آغاز شود که تولید همان محصول در مرحلهٔ قبل پایان یافته باشد.

۱۱. بافرهای میان ماشین‌آلات دارای ظرفیت محدود هستند.

۱۳. اعمال نگهداری و تعمیرات باعث بر هم خوردن و یا تغییر حالت آماده‌سازی ماشین‌آلات نمی‌شود.

۱۴. برای تعیین فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات از تعریف سطح خدمت استفاده می‌کنیم، مدت زمان مفید کاری هر ماشین باید به‌گونه‌ای باشد که سطح خدمت مورد نظر سیستم از حد خاصی تجاوز نکند.

۱۵. کلیهٔ هزینه‌های مدل‌سازی فازی است.

۱۶. تقاضاها به‌صورت فازی است.

اندیس‌ها:

J, i: اندیس محصولات

m: اندیس مراحل

t: اندیس دورهٔ زمانی

پارامترها:

N: تعداد کل محصولات

T: تعداد کل دوره‌ها

M: تعداد کل مراحل

$\widetilde{A_{jmt}}$: هزینهٔ تولید یک واحد محصول j در دورهٔ t در مرحلهٔ m

$\widetilde{H_{jm}}$: هزینه نگهداری یک واحد محصول j در مرحلهٔ m

$\widetilde{P_m}$: هزینه هر بار نگهداری و تعمیرات در مرحلهٔ m

N_m: حداکثر ظرفیت ذخیرهٔ موجودی میانی در مرحلهٔ m

$RISK_{imt}$: ریسک تولید محصول i در مرحلهٔ m در دورهٔ t

PR_i: قیمت فروش محصول i

$\widetilde{S_{ijm}}$: زمان آماده‌سازی محصول j در مرحلهٔ m پس از محصول i

$\widetilde{CS_{ijm}}$: هزینهٔ آماده‌سازی محصول j پس از محصول i در مرحلهٔ m

C_{mt}: ظرفیت (زمان در دست) مرحلهٔ m در دورهٔ t

D_{jt}: تقاضا از محصول j در دورهٔ t

B_{jm}: زمان مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول j در مرحلهٔ m

T_{Mm}: مدت زمان انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات در مرحلهٔ m

U_m: حداکثر بازهٔ زمانی که فعالیت نگهداری و تعمیرات پس از پایان فعالیت تولیدی ماقبل بایستی آغاز گردد.

M: عدد بزرگ

متغیر تصمیم:

Q_{jmt}: مقدار تولید محصول j در مرحلهٔ m در دورهٔ t

I_{jmt}: موجودی محصول j در مرحلهٔ m در دورهٔ t

X_{ijmt}: اگر آماده‌سازی محصول i بعد از محصول j در مرحلهٔ m در دورهٔ t انجام شود ۱ در غیر این صورت ۰

$Pjmt_{jmt}$: اگر فعالیت نگهداری و تعمیرات پس از محصول j در مرحلهٔ m در دورهٔ t انجام شود ۱ در غیر این صورت ۰

ST_{jmt}: زمان شروع فعالیت j بر روی مرحلهٔ m در دورهٔ t

AA_{jmt}: اگر ماشین m در دورهٔ t برای تولید محصول J آماده باشد ۱ در غیر این صورت ۰

Y_{jmt}: متغیری که نشان می‌دهد اولویت تولید محصول j در مرحلهٔ m در دورهٔ t

SS_{jmt}: زمان شروع نگهداری و تعمیرات پس از تولید محصول j بر روی مرحلهٔ m در دورهٔ t

توابع هدف:

با توجه به اینکه سؤال اصلی این تحقیق عبارت است از اینکه چگونه می‌توان با استفاده از یک مدل ریاضی ادغامی با قابلیت بهینه‌سازی برای پیاده‌سازی سیاست زمان‌بندی و نگهداری و تعمیرات را به اجرا در آورد؟ معادلات مربوط به توابع هدف و محدودیت‌ها مطابق مجموعه معادلات زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$MAX\ z = \sum_j \sum_m \sum_t PR_j * Q_{jmt} - (\sum_j \sum_m \sum_t A_{jmt} * Q_{jmt} + \sum_j \sum_m \sum_t H_{jm} * l_{jmt} + \sum_j \sum_m \sum_t P_m * P_{jmt} + \sum_i \sum_{j \neq i} \sum_m \sum_t CS_{ijm} * X_{ijmt}) \quad (1)$$

$$min\ z = \sum_j \sum_m \sum_t RISK_{jmt} * AA_{jmt} \quad (2)$$

$$min\ z = \sum_j \sum_m \sum_t (SS_{jmt} + ST_{jmt}) \quad (3)$$

$S.T.$

$$l_{jmt} = l_{jmt-1} + Q_{jmt} - D_{jt} \quad \forall j, m, t \quad (4)$$

$$l_{jmt-1} + Q_{jmt} = l_{jmt} + Q_{jm+1t} \quad \forall j, m, t \quad (5)$$

$$\sum_j l_{jmt} \leq N_m \quad \forall m, t \quad (6)$$

$$ST_{jmt} + B_{jm} * Q_{jmt} \leq C_{mt} \quad \forall j, m, t \tag{7}$$

$$ST_{jmt} \geq ST_{jmt-1} + B_{jm} * Q_{jmt-1} \quad \forall j, m = 2,3 \dots, t \tag{8}$$

$$ST_{jmt} \geq (ST_{imt} + B_{im} * Q_{imt}) + S_{ijm} - M * (1 - X_{ijmt}) \quad \forall i < j, m, t \tag{9}$$

$$Q_{jmt} \leq M * (\sum_{i \neq j} X_{ijmt} + AA_{jmt}) \quad \forall j, m, t \tag{10}$$

$$B_{jm} * Q_{jmt} + \sum_{i} ((1 - P_{imt}) * X_{ijmt}) + (1 - P_{jmt-1}) * AA_{jmt} \leq U_m \quad \forall j, m, t \tag{11}$$

$$\sum_{j} AA_{jmt} = 1 \quad \forall m, t \tag{12}$$

$$AA_{jmt} + \sum_{i} X_{ijmt} = AA_{jmt+1} + \sum_{i} X_{jimt} \; \forall j, m, t \tag{13}$$

$$Y_{imt} + B_{im} * X_{ijmt} - B_{jm} * AA_{jmt} \leq Y_{jmt} \; \forall i < j, m, t \tag{14}$$

$$ST_{jmt} \geq (ST_{imt} + TM_m) - B_{jm} * \left(\left(1 - X_{ijmt}\right) + (1 - P_{imt}) \right) \; \forall i < j, m, t \tag{15}$$

$$ST_{jmt} \geq \left(ST_{jmt} + B_{jm} * Q_{jmt}\right) - M * \left(1 - P_{jmt}\right) \forall j, m, t \tag{16}$$

$$ST_{jmt} \geq \left(ST_{jmt} + B_{jm} * Q_{jmt} + U_m\right) + M * \left(1 - P_{jmt}\right) \forall j, m, t \tag{17}$$

$$ST_{jmt} + TM_m \leq C_{mt} \quad \forall j, m, t \tag{18}$$

عبارت (۱،۲،۳) تابع هدف اول مدل. هدف از این مسئله بیشینه کردن سود حاصل کسر مجموع هزینه‌های تولید، هزینه‌های نگهداری موجودی، هزینه‌های آماده‌سازی وابسته به

توالی و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه از در آمد فروش محصول است. تابع هدف دوم کمینه‌سازی ریسک تولید و تابع هدف سوم کمینه‌سازی زمان اجرای تعمیرات و تولید است. عبارت (۴) محدودیت توازن تقاضا، موجودی و تولید محصولات بر روی ماشین مرحلهٔ آخر است. در مدل فرض کردیم که کمبود مجاز نمی‌باشد؛ بنابراین، مجموع میزان تولید و موجودی هر محصول در هر دوره و همچنین، میزان موجودی محصول از دورهٔ ماقبل باید برابر میزان تقاضای هر محصول در هر دوره بوده و از کمبود محصولات در کلیهٔ دوره‌ها جلوگیری شود. عبارت (۵) محدودیت توازن موجودی و تولید محصولات بر روی ماشین‌آلات به جز ماشین مرحلهٔ آخر است. به علت اینکه فرض کرده‌ایم که در ماشین‌آلات میانی نیز کمبود نداشته باشیم؛ بنابراین، مجموع میزان تولید و موجودی هر محصول در هر دوره و میزان موجودی آن محصول از دورهٔ ماقبل باید برابر با میزان تولید محصول در دورهٔ بعد باشد. عبارت (۶) محدودیت ذخیرهٔ موجودی میانی را نشان می‌دهد به این معنا که مجموع موجودی محصولات در هر دوره و بعد از هر ماشین نباید از حداکثر ظرفیت در دسترس تجاوز نماید. عبارت (۷) محدودیتی است که بیان می‌کند زمان پایان تولید تک‌تک محصولات نباید از مدت زمان در دسترس در هر دوره و هر ماشین تجاوز نماید. عبارت (۸) بیان می‌کند که زمان شروع تولید هر محصول روی هر ماشین باید از زمان پایان تولید آن محصول روی ماشین ماقبل بزرگ‌تر باشد. عبارت (۹) زمان شروع تولید هر محصول در هر دوره و روی هر ماشین باید از زمان پایان محصول ماقبل بزرگ‌تر باشد. عبارت (۱۰) بیان می‌کند که تولید تنها برای محصولاتی انجام می‌شود که برای آن محصول یا آماده‌سازی صورت گرفته و یا اینکه انتقال حالت آماده‌سازی از دورهٔ قبل داشته باشد. عبارت (۱۱) عبارتی است که مدت زمان تجمعی کار مفید پس از تولید هر محصول روی هر ماشین در هر دوره را محاسبه می‌نماید. مدت زمان کاری مفید مجموع مدت زمان تولید هر محصول، مدت زمان کاری مفید محصولات ماقبل و در صورتی که محصول اولین محصول هر دوره باشد، مقدار مدت زمان مفید کاری از دورهٔ ماقبل است. عبارت (۱۲) بیان می‌کند که در هر دوره و هر ماشین آماده‌سازی برای یک محصول صورت گرفته است. عبارت (۱۳)

تضمین‌کنندهٔ انتقال حالت آماده‌سازی در مدل است به این معنا که برای هر ماشین محصول ابتدایی هر دوره باید همان محصول آخر مرحلهٔ ماقبل باشد. عبارت (۱۴) محدودیت جلوگیری از تشکیل زیرتور در مدل است به این معنا که هر محصول در هر دوره و بر روی هر ماشین تنها یک‌بار تولید می‌گردد. عبارت (۱۵) بیانگر این موضوع است که اگر فعالیت نگهداری و تعمیرات پس از هر محصولی صورت گرفت زمان شروع فعالیت تولیدی بعدی باید از زمان پایان فعالیت نگهداری و تعمیرات بزرگ‌تر باشد به این معنا که فعالیت تولیدی بعدی باید پس از اتمام فعالیت نگهداری و تعمیرات صورت پذیرد. عبارت (۱۶) ارتباط زمان شروع فعالیت نگهداری و تعمیرات و زمان پایان فعالیت تولیدی را نشان می‌دهد. عبارت (۱۷) بیان می‌کند که فعالیت نگهداری و تعمیرات باید حداکثر به اندازهٔ یک فاصلهٔ زمانی مشخص (که به‌عنوان پارامتر مسئله است)، پس از فعالیت تولیدی بعدی آغاز گردد. عبارت (۱۸) تضمین می‌کند که زمان پایان فعالیت نگهداری و تعمیرات باید در مدت زمان مجاز در دسترس اتفاق بیفتد. به بیان دیگر فعالیت نگهداری و تعمیرات مورد نظر باید به‌صورت کامل در یک دوره اتفاق بیفتد.

روش دیفازی کردن

روش دیفازی‌سازی نقطهٔ وزن‌دار منظم اولین بار توسط اپریکویک (۲۰۰۳) معرفی شده است. اپریکویک و زنگ (۲۰۰۳) مقاله‌ای با عنوان «فازی‌زدایی در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره» ارائه کرده‌اند. در این مقاله به طور کلی روش‌های متعدد فازی‌زدایی بررسی شده است و در نهایت تکنیک CFCS به‌عنوان یک روش مناسب فازی‌دایی در تکنیک‌های MCDM پیشنهاد شده است. زمانیکه وو و لین (۲۰۰۷) نخستین بار از رویکرد فازی برای اجرای تکنیک MODM استفاده کردند، برای فازی‌زدایی از الگوی CFCS که توسط اپریکویک و زنگ مطرح شده بود، بهره گرفتند. نظر به پیچیدگی محاسباتی این روش، یک جابجایی در هدف اتفاق افتاد. بیشتر پژوهشگران بعدی محاسبات فازی مربوط به تکنیک MCDM را به الگوریتم

فازی‌زدایی CFCS منحصر کردند. به این معنا که نظرات خبرگان به‌صورت فازی وارد ماتریس ارتباط مستقیم می‌شود. سپس همین ماتریس با الگوی CFCS فازی‌زدایی می‌شود. ماتریس قطعی به‌دست آمده به‌عنوان ماتریس اولیه انتخاب می‌شود و سایر گام‌های به روش قطعی ادامه پیدا می‌کند. مراحل اجرای این روش به شرح زیر است.

مرحلهٔ اول: نرمال‌سازی مقادیر

بیشترین مقدار کران بالا از کمترین مقدار کران پایین تفریق شده تا بازهٔ کمترین تا بیشترین محاسبه گردد.

$$\Phi_{min}^{max} = u_{ij}^{t} - l_{ij}^{t} \qquad (20)$$

مرحلهٔ دوم: به‌دست آوردن حد بالا و پایین و وسط نرمال شده

هر کدام از کران‌ها به‌صورت جداگانه از بازه کم می‌شود.

$$l_{ij}^{n} = \frac{(l_{ij}^{t} - l_{ij}^{t})}{\Phi_{min}^{max}} \qquad (21)$$

$$m_{ij}^{n} = \frac{(m_{ij}^{t} - l_{ij}^{t})}{\Phi_{min}^{max}}$$

$$u_{ij}^{n} = \frac{(u_{ij}^{t} - l_{ij}^{t})}{\Phi_{min}^{max}}$$

مرحلهٔ سوم: محاسبهٔ کران بالا و پایین مقادیر نرمال

$$l_{ij}^{s} = \frac{m_{ij}^{n}}{(1 + m_{ij}^{n} - l_{ij}^{n})} \qquad (22)$$

$$u_{ij}^{s} = \frac{u_{ij}^{n}}{(1 + u_{ij}^{n} - m_{ij}^{n})}$$

مرحلهٔ چهارم: محاسبهٔ کل مقادیر قطعی نرمال شده

$$x_{ij} = \frac{\left[l_{ij}^{s} * \left(1 - l_{ij}^{s}\right) + u_{ij}^{s} * u_{ij}^{s}\right]}{\left[1 - l_{ij}^{s} + u_{ij}^{s}\right]} \qquad (23)$$

مرحلهٔ پنجم: محاسبهٔ مقادیر قطعی

$$Z_{ij} = l_{ij}^{n} + \left(x_{ij} * \Phi_{min}^{max}\right) \qquad (24)$$

یافته‌های پژوهش

در صحه‌گذاری مدل، تعداد پنج محصول و چهار مرحلهٔ کاری برای تولید محصول در طی سه دورهٔ زمانی (منظور از دورهٔ زمانی سیکل کاری سازمان است) ارزیابی و بررسی شده است. هزینهٔ هر بار تعمیر نگهداری مراحل تولید (هزینه‌ای که برای تعمیرات در ایستگاه‌های کاری تولید هزینه می‌شود) با توجه به فازی بودن آن به شرح زیر در نظر گرفته شد:

مرحلهٔ اول: نرمال‌سازی مقادیر:

بیشترین مقدار کران بالا از کمترین مقدار کران پایین تفریق شده تا بازهٔ کمترین تا بیشترین محاسبه گردد.

جدول ۲. نرمال‌سازی هزینهٔ هر بار تعمیر در مرحله

	l	m	U
m1	0.8	1.2	1.6
m2	0.65	1.6	2.1
m3	0.45	0.6	1.5
m4	1.4	1.7	3

مرحلهٔ دوم: هر کدام از کران‌ها به‌صورت جداگانه از بازه کم می‌شود.

جدول ۳. ارزیابی کران مقادیر هزینهٔ هر بار تعمیر در مرحله

	l	m	U

m1	0	0.5	1
m2	0	0.65517	1
m3	0	0.14286	1
m4	0	0.1875	1

مرحلهٔ سوم: محاسبهٔ کران بالا و پایین مقادیر نرمال

جدول ٤. محاسبهٔ کران بالا و پایین مقادیر نرمال

	l	U
m1	0.33333	0.66667
m2	0.39583	0.74359
m3	0.125	0.53846
m4	0.15789	0.55172

مرحلهٔ چهارم: محاسبهٔ کل مقادیر قطعی نرمال شده

جدول ۵. محاسبهٔ کل مقادیر قطعی نرمال شده

	مقدار قطعی
m1	0.5
m2	0.587698939
m3	0.282509158
m4	0.313785541

مرحلهٔ پنجم: محاسبهٔ مقادیر قطعی

جدول ٦. هزینهٔ هر بار تعمیر نگهداری

مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
۱.۲ میلیارد دلار	۱.۵ میلیارد دلار	۰.۷۵ میلیارد دلار	۱.۹ میلیارد دلار

در جدول ۶. هزینهٔ هر بار نگهداری و تعمیرات در کارخانه در این جدول نشان داده شده است که مرحلهٔ اول در صورت تعمیرات، ۱.۲ میلیارد دلار برای شرکت هزینه خواهد داشت. حداکثر ظرفیت ذخیرهٔ موجودی میانی در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷. حداکثر ظرفیت ذخیره موجودی میانی

مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
۵۰۰ تن	۸۰۰ تن	۳۰۰ تن	۵۰۰ تن

در جدول ۷. ظرفیت ذخیره‌سازی موجود محصولات نیم‌ساخته را مشخص می‌کند که در این جدول بر اساس مصاحبه با واحد انبار انجام گرفته است. مدت زمان انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات در هر مرحله در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸. مدت زمان انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات در هر مرحله تولید

مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
۲۵ ساعت	۸۰ ساعت	۴۵ ساعت	۱۲۰ ساعت

جدول ۸. از چک‌لیست نگهداری و تعمیرات موجود در واحد نگهداری و تعمیرات شرکت استخراج شده است که نشان می‌دهد در هر مرحله تعمیرات مدت زمان انجام چه میزان خواهد بود. حداکثر بازهٔ زمانی که فعالیت نگهداری و تعمیرات پس از پایان فعالیت تولیدی ماقبل بایستی آغاز گردد در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹. حداکثر بازهٔ زمانی که فعالیت نگهداری و تعمیرات

مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
۱۵ ساعت	۱۰ ساعت	۱۰ ساعت	۴۵ ساعت

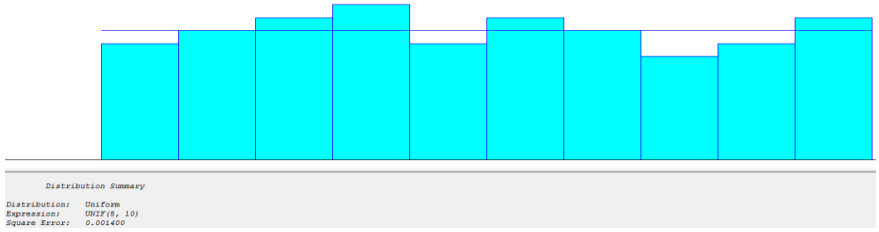
در جدول ۹. بازه‌های زمانی برای تعمیرات هر دستگاه مطابق با چک‌لیست‌های تعمیراتی دستگاه‌ها در هر ایستگاه مشخص شده و نتایج در جدول فوق اشاره شده است. هزینهٔ نگهداری یک واحد محصول در مرحله در جدول ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شرح مراحل فازی‌زدایی مدل ریاضی، نتیجهٔ دفازی‌سازی مقادیر به شرح جدول ۱۰ است.

جدول ۱۰. هزینهٔ نگهداری یک واحد محصول در مرحله

	مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
محصول ۱	۱ دلار	۱.۵ دلار	۱ دلار	۱ دلار

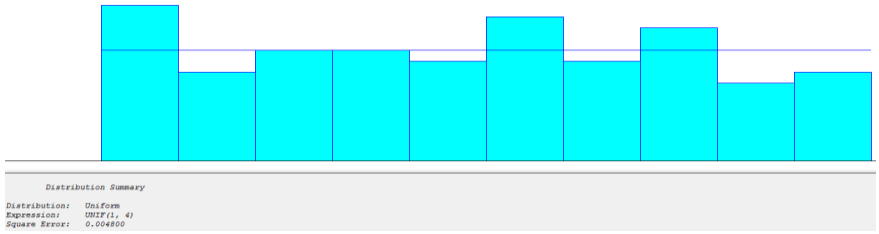
محصول ۲	۰.۵ دلار	۰.۵ دلار	۱ دلار	۱.۵ دلار
محصول ۳	۲ دلار	۲.۵ دلار	۲.۵ دلار	۱ دلار
محصول ۴	۱ دلار	۱ دلار	۱ دلار	۱ دلار
محصول ۵	۱ دلار	۱ دلار	۱ دلار	۱ دلار

در جدول ۱۰. هزینه‌های نگهداری محصول در انبار کارخانه ارائه شده است. در ادامه زمان آماده‌سازی محصول در هر مرحله محاسبه شده است. با توجه به بررسی انجام شده در زمان‌های آماده‌سازی، اطلاعات جمع‌آوری شده مورد تحلیل آماری قرار گرفته و زمان آماده‌سازی مطابق با بررسی انجام شده از تابع توزیع احتمال یکنواخت بین ۵ تا ۱۰ ساعت طول می‌کشد.



شکل ۱. تحلیل تابع زمان آماده‌سازی

با توجه به بررسی انجام شده در خصوص، هزینهٔ آماده‌سازی محصول پس از محصول در مرحله با توجه به مدت زمان آماده‌سازی از تابع توزیع یکنواخت بین ۱ الی ۴ هزار دلار هزینه داشته است.



شکل ۲. تحلیل تابع هزینهٔ آماده‌سازی

با توجه به ورود اطلاعات انجام شده در نرم‌افزار گمز لذا با استفاده از الگوریتم LP-Metric مدل ارائه شده ارزیابی و تحلیل می‌گردد که نتایج به شرح زیر است:

با توجه به حل مدل انجام شده در نرم‌افزار GAMS، مدل در مدت زمان ۱۲۵ ثانیه حل شده و مقدار تابع هدف اول ۱.۲۶۹۰.۰۰۰.۰۰۰ سود شرکت و مقدار تابع هدف دوم ۳.۴۶۲ ریسک تولید و تابع هدف سوم ۱۴۱۷۲ ساعت کمینه زمان اجرای نگهداری و تعمیرات واحد به‌صورت مستقل برآورد شده است؛ بنابراین، با توجه به مقادیر معیار جامع برای هر مقدار p جدول مطلوبیت جواب‌هایی کارا به شرح جدول ۱۱ است.

جدول ۱۱. مقادیر معیار جامع

ردیف	مقدار p	تابع هدف اول (میلیون دلار)	تابع هدف دوم	تابع هدف سوم	مدت زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف
1	1	8194.2	4.525	1000	125	0
2	2	11130	3.527	16908.847	109	0.230
3	3	11320	3.743	15463.9	234	0.15
4	4	11045	3.755	15421.32	558	0.13
5	5	10954	3.984	16892.097	1043	0.11

همچنین، مقدار تولید محصول در مرحله در هر دوره مطابق با جدول ۱۲ می‌باشد.

جدول ۱۲. مقدار تولید محصول در مرحله در هر دوره

	دوره	مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
محصول ۱	دورهٔ ۱	۹۰ تن	۹۰ تن	۹۰ تن	۶۰ تن
	دورهٔ ۲	۰	۰	۰	۰
	دورهٔ ۳	۰	۰	۰	۰
محصول ۲	دورهٔ ۱	۱۰ تن	۱۰ تن	۱۰ تن	۱۰ تن
	دورهٔ ۲	۳۵ تن	۳۵ تن	۱۵ تن	۱۵ تن
	دورهٔ ۳	۰	۰	۰	۰
محصول ۳	دورهٔ ۱	۶۸ تن	۶۸ تن	۶۸ تن	۶۸ تن
	دورهٔ ۲	۰	۰	۰	۰
	دورهٔ ۳	۰	۰	۰	۰
محصول ۴	دورهٔ ۱	۲۲ تن	۲۲ تن	۲۲ تن	۲۲ تن
	دورهٔ ۲	۱۷ تن	۱۷ تن	۱۷ تن	۱۷ تن

	دوره	مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
	دورهٔ ۳	۲۰ تن	۲۰ تن	۲۰ تن	۲۰ تن
محصول ۵	دورهٔ ۱	۳۹ تن	۳۹ تن	۳۹ تن	۳۹ تن
	دورهٔ ۲	۲۰ تن	۲۰ تن	۲۰ تن	۲۰ تن
	دورهٔ ۳	۳۰ تن	۳۰ تن	۳۰ تن	۳۰ تن

با توجه به متغیر تصمیم مشخص شده در مدل ریاضی، با توجه به حل مدل در نرم‌افزار گمز، مقدار تولید هر محصول در دوره‌های مختلف را نشان داده است. موجودی محصول در مرحله در هر دوره در جدول ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۱۳. موجودی محصول در مرحله در هر دوره

	دوره	مرحلهٔ اول	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ چهارم
محصول ۱	دورهٔ ۱	0	0	۳۰ تن	۴۰ تن
	دورهٔ ۲	0	0	۳۰ تن	0
	دورهٔ ۳	0	0	0	0
محصول ۲	دورهٔ ۱	0	0	0	0
	دورهٔ ۲	0	۲۰ تن	0	0
	دورهٔ ۳	0	0	0	0
محصول ۳	دورهٔ ۱	0	0	۳۸ تن	0
	دورهٔ ۲	0	0	0	۱۷ تن
	دورهٔ ۳	0	0	0	0
محصول ۴	دورهٔ ۱	0	0	۲ تن	0
	دورهٔ ۲	0	0	0	0
	دورهٔ ۳	0	0	0	0
محصول ۵	دورهٔ ۱	0	0	0	۹ تن
	دورهٔ ۲	0	0	0	0
	دورهٔ ۳	0	0	0	0

با توجه به متغیر تصمیم در نظر گرفته شده در خصوص موجودی محصول در هر دوره، مقادیر فوق حل مدل ریاضی به‌دست آمده است. توالی عملیات بین تولید محصولات شرکت در جدول ۱۴ نشان داده شده است.

جدول ١٤. توالی عملیات بین تولید محصولات شرکت دورهٔ اول

	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۳	محصول ۴	محصول ۵
محصول ۱	0	0	0	1	1
محصول ۲	0	0	1	1	5
محصول ۳	1	1	0	0	0
محصول ۴	1	1	0	0	0
محصول ۵		1	1*	0	0

با توجه به جدول ۱۴ نشان داده شده است که محصول ۵ زودتر از محصول ۳ در مراحل برنامه‌ریزی شده تولید خواهد شد.

٤.١ حل مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II

همچنین با توجه به حل مدل ریاضی در نرم‌افزار گمز و برنامه‌ریزی انجام شده در سه دوره برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات در دوره‌ها انجام نمی‌گردد و متغیر متناظر تعریف شده مقدار صفر در تابع هدف گرفته است. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشاهده گردید مدل در فضای ایجاد شده پاسخ درست و منطقی داشته و صحت عملکرد مدل مورد تأیید قرار گرفت؛ بنابراین، جهت بررسی وضعیت مدل در فضای بزرگ‌تر در محیط الگوریتم فراابتکاری بررسی شده است. پس از ارزیابی حل دقیق انجام شده، توسعهٔ مدل در الگوریتم فراابتکاری ژنتیک تولید جامعهٔ اولیه، نوبت به اجرای نسل‌های متوالی از جواب‌ها توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد. این فرایند در قالب شبه برنامه زیر ارائه می‌شود:

تعیین پارامترهای اولیه: تعداد نسل (itermax)، نرخ تقاطع (pc)، نرخ جهش (pm)، اندازهٔ جمعیت (ps).

ارزشیابی جامعهٔ اولیهٔ تصادفی ایجاد شده توسط تابع برازش.

به $t = 1$ می‌رویم.

تکرار مراحل زیر تا بر قراری شرط $(t > iter_max)$

عملیات تقاطع برای تولید $pc \times popsize$ فرزند.

عملیات انتخاب توسط روش انتخاب چرخهٔ رولت.

عملگر تقاطع برای تولید فرزند.

عملیات جهش برای تولید $\text{pm} \times \text{popsize}$ فرزند.

عملیات انتخاب، به روش انتخاب تصادفی.

عملیات جهش جابه‌جایی بر روی والد انتخاب شده و تولید فرزند.

رتبه‌بندی جمعیت و انتخاب $popsize \times (1 - pm - pc)$ کار اول به‌عنوان نخبه.

جایگزینی فرزندان تولید شده به‌عنوان جمعیت جدید.

ارزشیابی جامعهٔ جدید تولید شده.

به $t = t + 1$ می‌رویم.

در این شبه برنامه، پس از تولید پارامترهای کنترل‌کنندهٔ الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌های جامعهٔ تصادفی ایجاد شده توسط تابع برازش ارزشیابی می‌شود و در هر تکرار از الگوریتم با استفاده از عملیات انتخاب چرخهٔ رولت، والدین انتخاب شده و عملیات تقاطع انجام می‌شود و با استفاده از روش انتخاب تصادفی، یک کروموزوم انتخاب شده و عملیات جهش بر روی آن انجام می‌شود. علاوه بر دو مورد گفته شده تعدادی از کروموزوم‌ها که از نظر تابع هدف از کروموزوم‌های دیگر مناسب‌تر هستند به‌عنوان بخشی از جمعیت نسل جدید معرفی می‌شوند. سپس جامعهٔ جدید ارزشیابی می‌شوند. الگوریتم با تولید تعداد معینی از نسل‌ها خاتمه می‌یابد و آخرین جامعهٔ تولید شده به‌عنوان جامعهٔ نهایی الگوریتم معرفی می‌شود.

با توجه به تنظیم پارامتر الگوریتم تاگوچی انجام شده، پارامترهای مدل ژنتیک به شرح جدول ۱۵ اصلاح شده است.

جدول ۱۵. مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای الگوریتم GA برای مسائل با ابعاد مختلف.

Pm	Pc	Npop	MaxIt	اندازهٔ مسئله
3/0	7/0	70	900	کوچک
25/0	7/0	60	2300	متوسط
3/0	8/0	70	2700	بزرگ

در جدول زیر برای بررسی مدل ریاضی و توسعهٔ الگوریتم فراابتکاری ۶ مسئله ایجاد شده است که با پارامترهای معرفی شده در همین جدول، مشخص می‌کند در هر بعد چه

تعداد محصول، مرحلهٔ تولید و دوره تنظیم شده است و جواب‌های حل دقیق با زمان حل مدل چه میزان است و جواب‌های الگوریتم فراابتکاری با مدت زمان حل به چه شکل است و گپ بین حل دقیق و فراابتکاری چه میزان است که البته گپ جوابی کمتر از ۱۰ درصد نشان از کارایی الگوریتم فراابتکاری تنظیم شده بر روی مدل ریاضی دارد.

جدول ۱۶. مقایسهٔ دو الگوریتم توسعه‌یافته

مسائل	محصول	مرحله	دوره	تابع هدف GA	زمان حل GA(ثانیه)	تابع هدف GAMS	زمان حل GAMS(ثانیه)	Gap
1	3	2	2	66880	57.7	66880	125	0%
2	7	4	4	103520	179.827	103520	3720	0%
3	12	4	4	151700	1033.4	147540	46820	3%
4	20	4	4	201140	1036.1	195648	61240	3%
5	25	4	4	319950	3270.5	294958	266420	8%
6	30	4	4	236770	2186.0	224430	360000	5%

همان‌طور که بیان شده است با توجه به NP-HARD بودن مدل ریاضی، استفاده از حل دقیق برای ابعاد بزرگ در مدل ریاضی ناکارآمد است به‌گونه‌ای که در حل فوق زمان حل مدل با استفاده از CPLEX بسیار طولانی بوده و به اصطلاح حل مدل از طریق CPLEX مناسب نیست و از این رو بایستی مدل ریاضی ارائه شده در حل فراابتکاری بررسی و ارزیابی شود. همان‌طور که در جدول ۱۶ نشان داده شده است، با توجه به ابعاد طراحی شده در نرم‌افزار گمز و متلب برای حل مدل ریاضی، گپ جواب‌های حل دقیق و فراابتکاری در اندازهٔ استانداردی قرار دارد و حل فراابتکاری قابلیت استفاده از ابعاد بزرگ را برای تعریف مسئله دارد. با توجه به جواب‌های ارائه شده در حل دقیق و فراابتکاری، نشان داده شد تا فرآیند برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن محدودیت نگهداری و تعمیرات در حل دقیق به میزان ۱۴ درصد و در حل فراابتکاری به میزان ۹ درصد بهبود حاصل شده است. همچنین با توجه به جواب‌های به‌دست آمدهٔ حاصل از حل BARON و GA انحراف پاسخ‌های الگوریتم فراابتکاری در حد قابل‌قبولی بوده است و الگوریتم ژنتیک کارا ارزیابی شده است. با توجه به اینکه مقدار میانگین خطای

ناشی از حل مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری در این تحقیق به‌ازای مسائل گوناگون کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین، طبق توصیهٔ (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۲۲) و جهانگیری و همکاران (۲۰۲۳) مدل از اعتبار مطلوبی برخوردار است.

٤.۲ تحلیل حساسیت

در این بخش از نتایج عددی به بررسی میزان تأثیر دو پارامتر مهم یعنی ضریب افزایش خرابی ماشین‌آلات قبل از نگهداری و تعمیرات و ضریب کاهش خرابی پس از نگهداری و تعمیرات پرداخته می‌شود. برای این منظور مقادیر هریک از این پارامترها بین ٪۲۰- تا ٪۲۰+ تغییر داده شده و بر اساس آن مقدار تابع هدف گزارش شده است. جدول ۱۷ و ۱۸ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت این دو پارامتر را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱۷، در صورت کاهش ۲۰ درصدی در مقدار نرخ خرابی ماشین‌آلات قبل از نگهداری و تعمیرات، مقدار تابع هدف به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد، همچنین، در صورت افزایش ۲۰ درصدی مقدار آن، مقدار تابع هدف به کمترین مقدار ممکن می‌رسد. علاوه بر این، در جدول ۱۸، در صورت کاهش ۲۰ درصدی ضریب نرخ خرابی پس از نگهداری و تعمیرات مقدار تابع هدف به کمترین مقدار ممکن می‌رسد و در صورت افزایش ۲۰ درصدی مقدار تابع هدف به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد.

جدول ٤-۲۷ تحلیل حساسیت ضریب افزایش نرخ خرابی ماشین‌آلات قبل از نگهداری و تعمیرات

درصد تغییر	-20%	-10%	0%	10%	20%
مقدار تابع هدف تجمیعی	۱۵۹/۲۶	۱۰۵/۶	۹۷/۴۳	۶۴/۲	۲۱/۷۳

جدول ٤-۲۸ تحلیل حساسیت ضریب کاهش نرخ خرابی پس از نگهداری و تعمیرات

درصد تغییر	-20%	-10%	0%	10%	20%
مقدار تابع هدف تجمیعی	۶۹/۹	۹۷/۲۴	۹۷/۴۳	۹۸/۹	۹۹/۵

۵. بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در ادبیات پژوهشی بیان گردید، یکی از چالش‌های برنامه‌ریزی تولید، هماهنگی و ادغام مفاهیم نگهداری و تعمیرات در شرکت‌ها است. از این رو برای برطرف‌سازی چالش‌های تولیدی و زمان‌بندی اجرای امور مربوط به نگهداری و تعمیرات، رویکرد مدل‌سازی فضای موجود در شرکت ارائه شده است. از این رو در این پژوهش یک مدل ریاضی MIP در راستای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات در شرکت مارون مدل‌سازی گردید. از طرفی با توجه به NP-HARD بودن این دسته از مسائل ادغامی تولید (مسئلهٔ ادغامی در تولید به‌منظور ترکیب تولید و یکی از رویکردهای وابسته مانند نگهداری و تعمیرات است) از روش فراابتکاری ژنتیک بهره گرفته شد. نتایج ارزیابی مدل‌سازی انجام شده نشان داد تا حل دقیق و فراابتکاری ارائه شده بیش از ۷ درصد در تولیدات شرکت بهبود حاصل شده است. بر طبق نتایج به‌دست آمده مهم‌ترین پیشنهادهای مدیریتی عبارت‌اند از اینکه هزینهٔ نگهداری و تعمیرات در دورهٔ سوم کمتر از سایر مراحل است؛ بنابراین، توصیه می‌شود انجام عملیات مربوط به این دوره به دورهٔ چهارم موکول نگردد؛ زیرا اجرای عملیات در این دوره باعث افزایش هزینه‌های مربوطه می‌گردد. علاوه بر این، با توجه به اینکه مدت زمان انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در مرحلهٔ سوم و همچنین محصولات نیمه‌ساخته در دورهٔ سوم کمتر است، اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در این مرحله به صلاح مجموعه است. با توجه به محدودیت دسترسی به منابع، توصیهٔ سیاستی برای ارائهٔ یک مدل ادغامی با قابلیت بهینه‌سازی برای پیاده‌سازی زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات عبارت است از: با استفاده از چارچوب پیشنهادی ابتدا می‌توان به‌دقت وضعیت فعلی تولید، نگهداری و تعمیرات را تحلیل کرد. این تجزیه‌وتحلیل باید شامل بررسی منابع موجود، زمان‌بندی فعلی، هزینه‌ها و موانع مورد نیاز باشد. این تحلیل کمک می‌کند تا نقاط ضعف و قوت را شناسایی کرد تا بتوان بر روی آن‌ها تمرکز نمود. بعد از تحلیل وضعیت فعلی، می‌توان بررسی کرد که آیا امکان بهینه‌سازی این فرآیندها با توجه به محدودیت دسترسی به منابع وجود دارد یا خیر. برای این منظور، باید به مقدار منابع موجود نسبت به نیازهای کنونی و آیندگان دقت کرد. همچنین، لازم است اثرات

بهینه‌سازی بر بهره‌وری و عملکرد عمومی سیستم را به‌دقت بررسی کرد. با توجه به تحلیل وضعیت و امکان بهینه‌سازی، مدل ادغامی برای زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات، طراحی می‌شود. در این مدل باید محدودیت‌ها و اهداف خاصی را در نظر گرفت، مانند نیازمندی‌های منابع، زمان‌بندی تولید و نیازهای نگهداری و تعمیرات. همچنین، بهینه‌سازی می‌تواند شامل بهبود بهره‌وری منابع، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد مجموعه باشد. پس از پیاده‌سازی مدل ادغامی، باید به‌دقت اثرات آن را نظارت و ارزیابی کرد. برای این منظور، لازم است بررسی کنیم که آیا مدل بهینه‌سازی دسترسی به منابع و هماهنگی بین تولید و نگهداری و تعمیرات را بهبود داده است یا خیر. در صورت نیاز، تغییرات لازم را به مدل اعمال کنید تا همواره بهینه باشد. برای تحقق اهداف، تیم‌ها و کارکنان مرتبط با استفاده از مدل ادغامی و زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات تعیین شوند. برنامه‌ریزی آموزش و آگاهی‌دهنده برای اطلاع‌رسانی و آموزش افراد دربارهٔ استفادهٔ صحیح از مدل و انجام فرآیندهای بهینه، لازم است. سرانجام، تغییر در روش‌ها و فرآیندهای سازمانی همواره چالشی است؛ بنابراین، برای موفقیت پیاده‌سازی مدل ارائه شده باید برنامه‌ریزی مدیریت تغییر مناسب انجام شود. این برنامه باید شامل امکانات ارتباطی، اعلام تغییرات، آموزش کارکنان و ایجاد روحیهٔ مثبت دربارهٔ تغییر باشد. با اجرای این توصیه‌ها، مدل ادغامی با قابلیت بهینه‌سازی برای پیاده‌سازی زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به منابع برای سازمان شما مواجه خواهد شد. سرانجام، برای اجرای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود برای توجیه عدم قطعیت از برنامه‌ریزی استوار استفاده شود.

منابع

- Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., & Daneshmand-Mehr, M. (2022). Simulation-based multiobjective optimization of open-pit mine haulage system: a modified-NBI method and meta modeling approach. *Complexity*, *2022*.
- Abolghasemian, M., Pourghader Chobar, A., AliBakhshi, M., Fakhr, A., & Moradi Pirbalouti, S. (2021). Delay scheduling based on discrete-

event simulation for construction projects. *Iranian Journal of Operations Research*, *12*(1), 49-63.

- Achkar, V. G., Cafaro, V. G., Mendez, C. A., & Cafaro, D. C. (2019). Discrete-time MILP formulation for the optimal scheduling of maintenance tasks on oil and gas production assets. Industrial & Engineering Chemistry Research.

- Aguirre, A. M., & Papageorgiou, L. G. (2018). Medium-term optimization-based approach for the integration of production planning, scheduling and maintenance. Computers & Chemical Engineering, 116, 191-211.

- Ahmadi, R. (2018). An integrated approach to maintenance scheduling of multi-state production systems subject to deterioration. IMA Journal of Management Mathematics, 30(2), 235-264.

- Amiri, S., & Honarvar, M. (2018). Providing an integrated Model for Planning and Scheduling Energy Hubs and preventive maintenance. Energy, 163, 1093-1114.

- B. Bouslah, A. Gharbi, and R. Pellerin, "Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint," Omega, vol. 61, pp. 110-126, 2016.

- Boudjelida, A. (2019). On the robustness of joint production and maintenance scheduling in presence of uncertainties. Journal of Intelligent Manufacturing, 30(4), 1515-1530.

- 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.

- Cheng, G. Q., Zhou, B. H., & Li, L. (2018). Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems. Reliability Engineering & System Safety, 175, 251-264.

- Chobar, A. P., Adibi, M. A., & Kazemi, A. (2022). Multi-objective hub-spoke network design of perishable tourism products using combination machine learning and meta-heuristic algorithms. *Environment, Development and Sustainability*, 1-28.

- Ertogral, K., & Öztürk, F. S. (2019). An integrated production scheduling and workforce capacity planning model for the maintenance and repair operations in airline industry. Computers & Industrial Engineering, 127, 832-840.
- F. Berthaut, A. Gharbi, and K. Dhouib, "Joint modified block replacement and production/inventory control policy for a failure-prone manufacturing cell," Omega, vol. 39, no. 6, pp. 642-654, 2011.
- Gilabert, E., Konde, E., Sierra, B., & Arnaiz, A. (2018). A multi-stage optimization algorithm for standardization of maintenance plans. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 520-524.
- Glawar, R., Karner, M., Nemeth, T., Matyas, K., & Sihn, W. (2018). An approach for the integration of anticipative maintenance strategies within a production planning and control model. Procedia CIRP, 67, 46-51.
- Guiras, Z., Hajej, Z., Rezg, N., & Dolgui, A. (2018). Comparative Analysis of Heuristic Algorithms Used for Solving a Production and Maintenance Planning Problem (PMPP). Applied Sciences, 8(7), 1088.
- Hamrol, A. (2018). A new look at some aspects of maintenance and improvement of production processes. Management and Production Engineering Review, 9.
- Hamrol, A. (2018). A new look at some aspects of maintenance and improvement of production processes. Management and Production Engineering Review, 9.
- Haoues, M., Dahane, M., & Mouss, N. K. (2019). Outsourcing optimization in two-echelon supply chain network under integrated production-maintenance constraints. Journal of Intelligent Manufacturing, 30(2), 701-725.
- J. Kim and S. B. Gershwin, "Analysis of long flow lines with quality and operational failures," IIE transactions, vol. 40, no. 3, pp. 284-296, 2008.
- J. Liu, J. Shi, and S. J. Hu, "Quality-assured setup planning based on the stream-of-variation model for multi-stage machining processes," IIE transactions, vol. 41, no. 4, pp. 323-334, 2009.

- Jafari, L., & Makis, V. (2016). Optimal lot-sizing and maintenance policy for a partially observable production system. Computers & Industrial Engineering, 93, 88-98.

- Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., & Chobar, A. P. (2023). Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International journal of industrial and systems engineering*, *43*(1), 1-19.

- Kang, K., & Subramaniam, V. (2018). Joint control of dynamic maintenance and production in a failure-prone manufacturing system subjected to deterioration. Computers & Industrial Engineering, 119, 309-320.

- Kopanos, G. M., & Puigjaner, L. (2019). Integrated Operational and Maintenance Planning of Production and Utility Systems. In Solving Large-Scale Production Scheduling and Planning in the Process Industries (pp. 191-244). Springer, Cham.

- La Fata, C. M., & Passannanti, G. (2017). A simulated annealing-based approach for the joint optimization of production/inventory and preventive maintenance policies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91(9-12), 3899-3909.

- Liu, Q., Dong, M., & Chen, F. F. (2018). Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 51, 238-247.

- Liu, Q., Dong, M., Chen, F. F., Lv, W., & Ye, C. (2019). Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 173-182.

- Martinod, R. M., Bistorin, O., Castañeda, L. F., & Rezg, N. (2018). Maintenance policy optimisation for multi-component systems considering degradation of components and imperfect maintenance actions. Computers & Industrial Engineering, 124, 100-112.

- Matyas, K., Nemeth, T., Kovacs, K., & Glawar, R. (2017). A procedural approach for realizing prescriptive maintenance planning in manufacturing industries. CIRP Annals, 66(1), 461-464.

- Rastgar, I., Rezaeian, J., Mahdavi, I., & Fattahi, P. (2022). Integrated production planning and scheduling with maintenance constraints in hybrid flow shop environment. Modern Research in Decision Making, 7(2), 1-27.

- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., Kenné, J. P., Montaño-Arango, O., & Hernández-Gress, E. S. (2018). Subcontracting strategies with production and maintenance policies for a manufacturing system subject to progressive deterioration. International Journal of Production Economics, 200, 103-118.

- S. S. Sana, "Preventive maintenance and optimal buffer inventory for products sold with warranty in an imperfect production system," International Journal of Production Research, vol. 50, no. 23, pp. 6763-6774, 2012.

- Schreiber, M., Klöber-Koch, J., Richter, C., & Reinhart, G. (2018). Integrated Production and Maintenance Planning for Cyber-physical Production Systems. Procedia CIRP, 72, 934-939.

- Sharifzadegan, M., & Pourghader Chobar, A. (2022). Mathematical modeling and problem solving Integrated production planning and preventive maintenance with limited human resources. Journal of New Researches in Mathematics, 8(39), 5-24.

- Sheikhalishahi, M., Eskandari, N., Mashayekhi, A., & Azadeh, A. (2019). Multi-objective open shop scheduling by considering human error and preventive maintenance. Applied Mathematical Modelling, 67, 573-587.

- Xiao, S., Chen, Z., & Sarker, B. R. (2019). Integrated maintenance and production decision for k-out-of-n system equipment with attenuation of product quality. International Journal of Quality & Reliability Management, 36(5), 735-751.

- Salahi, F., Daneshvar, A., Homayounfar, M., & Pourghader Chobar, A. (2023). Presenting an integrated model for production planning and preventive maintenance scheduling considering uncertainty of parameters and disruption of facilities. Journal of Industrial Management Perspective, 13(1, Spring 2023), 105-139.