دسترسی در سایتِ http://jnrm.srbiau.ac.ir
سال هشتم، شماره سی و نهم، آذر و دی ۱۴۰۱
شماره شاپا: ۲۵۸۸X-۵۸۸

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

پژوهش‌های نوین در ریاضی

مدل سازی ریاضی و حل مساله برنامه ریزی تولید ادغامی، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با محدودیت منابع انسانی

محمد شریف‌زادگان[۱*]، عادل پورقادر چوبر[۲]

[۱] گروه مهندسی صنایع، واحد مسجدسلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی، مسجدسلیمان، ایران،
[۲] گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

چکیده

نیاز به یکپارچه‌سازی از مدت‌ها پیش مورد توجه پژوهشگران و مدیران صنایع بوده است. مباحث یکپارچه‌سازی برنامه-ریزی ادغامی تولید، نگهداری و تعمیرات و کنترل کیفیت با دیگر بخش‌های سیستم‌های تولیدی و صنعتی باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری سازمان‌های تولیدی می‌شود. یکی از چالش‌های برنامه‌ریزی تولید، عدم هماهنگی و ادغام مفاهیم نگهداری و تعمیرات با منابع انسانی در شرکت‌ها می‌باشد. براین اساس، در این پژوهش به ادغام‌سازی و پیوستگی در برنامه‌ریزی هم زمان حوزه‌های تولیدی و پشتیبانی در سازمان‌های تولیدی پرداخته شده است. این حوزه‌ها شامل برنامه زمان‌بندی تولید، نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه و منابع انسانی با تاثیرپذیری میزان نارضایتی‌های ایجاد شده از کمبود و تاخیرات نیروی انسانی می‌باشد. از این رو ارائه 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 و میزان نارضایتی پرسنل در حالت عدم قطعیت با روش فازی در پارامترهای مدل استفاده شده است. هدف مدل پیشنهادی حداقل سازی کسر نیروی کار برکارایی تولید و میزان نارضایتی سطح کسری نیروی کار است. نتایج کسب شده از پیاده‌سازی در یک سازمان تولیدی از مقایسه حل غیر قطعی و فرا ابتکاری نشان از بهبود در تولیدات شرکت با حداقل زمان معقول و منطقی، جواب‌هایی با حداقل خطای ممکن ارائه می‌دهد. با انجام تحلیل حساسیت مشاهده می‌شود که نرخ از کارافتادگی تجهیزات در بازه‌های قبل و بعد از فرایند نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، باعث تاثیر بسیار زیاد بر مقدار تابع هدف مدل ریاضی دارد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تولید ادغامی، تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه، برنامه‌ریزی منابع انسانی.

*. عهده‌دار مکاتبات: Email: Msh.mis416@gmail.com

۱- مقدمه

واحدهای تولیدی برای تحقق اهداف خود دیگر نمی‌توانند به روش‌های سنتی برنامه‌ریزی تولید بسنده کنند و می‌بایست پارامترها و اهداف جدید را در برنام هریزی‌های خود لحاظ نمایند. در این میان یکی از برنام هریزی‌های میان مدت زنجیرهٔ تأمین، برنامه‌ریزی تولید ادغامی است که در آن، محصولاتی که از نظر ظاهر یا روند تولید مشابه یکدیگر هستند به‌عنوان یک خانواده محصول در نظر گرفته می‌شوند. برنام هریزی تولید ادغامی به عنوان یک برنامه‌ریزی در سطح تاکتیکیِ مدیریت سعی می‌کند به منظور برآورده کردن تقاضای محصولات، مقدار بهینهٔ تولید، سطح موجودی، نیروی انسانی و غیره را در هر دورهٔ زمانی باتوجه به تعدادی محدودیت، تعیین نماید [۱]. 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 زنجیرهٔ تأمین می‌واند منجر به شکست سازمان در رقابت های داخلی و جهانی شود [۲]. نتایج برنامه ریزی 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 زنجیرهٔ تأمین را تسهیل کند [۳]. بنابراین مشاهده می‌شود یکپارچه‌سازی اطلاعات حیاتی بخش‌های مختلف تولیدی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است چراکه در طی چند دهه گذشته همواره دغدغه‌های فراوانی در ارتباط با تلفیق حوزه‌های مختلف مرتبط با فعالیت‌های تولید وجود داشته است. حوزه‌هایی که هریک به‌مثابه قلب تپنده واحدهای تولیدی هستند و باید در تصمیم گیری‌های مختلف از آن‌ها بهره گرفت. به دلیل اثر متقابل هر یک از این حوزه‌ها نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت جزیره‌ای بررسی کرد و بسیار مناسب و معقول است تا سازوکاری را برنامه‌ریزی کرد که بتوان تمام عوامل مهم را تا حد ممکن باهم در نظر گرفت. تلاش‌های زیادی برای یکپارچه‌سازی برنامه ریزی تولید، نگه‌داری و تعمیرات و تأمین مواد اولیه صورت گرفته است.

بر همین اساس، در این تحقیق ارائه یک مدل ریاضی جدید به‌منظور برنامه‌ریزی تولید و نگه‌داری تعمیرات و نیروی انسانی ارائه شده است. همچنین برای حل این مدل ریاضی یک الگوریتم فرا ابتکاری کارآمد مورد استفاده قرار گرفته‌است. در ادامه مقاله و در بخش ۲ به بررسی جدیدترین تحقیقات مربوطه پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مدل ریاضی تحقیق، در بخش ۴ نتایج عددی حاصل از بهینه سازی مدل ریاضی و درنهایت و در بخش ۵ نتیجه گیری جمع‌بندی تحقیق ارائه می‌شود.

۲- روش‌شناسی پژوهش

ژیانگ و همکاران [۴]، در پژوهش خود، به تولید و برنامه‌ریزی نگهداری وتعمیرات با در نظر گرفتن فضای بازبینی دوره‌ای که شامل تقاضای تصادفی و بازده تصادفی است پرداختند. هدف آن‌ها یکپارچه سازی سیاست تولید دسته‌ای و نگهداری و تعمیرات برای سامانه‌ای که هزینه‌های تولید، نگهداری، پس افت و نگهداری و تعمیرات ادغام گردیده و بر روی آن کمینه سازی صورت گرفته است می‌باشد

غلامیان و همکاران [۵] به مطالعه مساله برنامه ریزی 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 اضافه کاری، هزینه تأمین کنندگان به ازاء هر واحد مواد خام، هزینه حمل از عرضه کننده، و سایر عوامل هزینه‌ای به صورت فازی لحاظ شده است.

نورالفتح و همکاران [۶] به یکپارچه‌سازی تولید، نگه‌داری و تعمیرات و کیفیت یک فرایند ناکامل در سیستم چند تولیدی –چند دوره‌ای را بررسی کرد. هدف اصلی وی کمینه کردن تمام هزینه‌ها هم‌زمان با برآورده کردن تمام تقاضاها است. در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که هرچه سطح نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه بالاتر رود، هزینه‌های کیفیت کاهش می‌یابد. همچنین اگر هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه با کاهش هزینه‌های کیفیت جبران نشد، نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه انجام شده توجیه‌پذیر نمی‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده از حل مدل به وجود رابطه قوی بین تولید، نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه و کفیت صحه می‌گذارد.

اتای و همکاران [۷] مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه نگه‌داری و تعمیرات و تولید با سامانه جایگزینی پیش‌گیری دوره‌ای با تعمیرات حداقلی (نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه) در برابر خرابی‌های برنامه‌ریزی نشده را موردمطالعه قرار داده است.

به دلیل پیچیده بودن مسئله آن‌ها حل دقیق آن زمان بالایی نیاز دارد که ازاین‌رو به این نتیجه رسیدند که با روش‌های تقریبی در زمان حل منطقی به پاسخ‌های مناسب دست پیدا کرد.

اکین [۸] عملکرد عوامل نامشخص درون‌زا را در یکپارچه‌ی تولید و نگه‌داری تعمیرات مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور آن‌ها یک مدل تصمیم گیری توسعه داده و عدم قطعیت در دسترسی به ماشین‌ها را به‌عنوان نماینده عوامل نامشخص درون‌زا در نظر گرفتند. آن‌ها این مدل را به روش شبیه‌سازی احتمالی بهینه‌سازی کردند. این محققان نتیجه گرفتند که همواره یک توازنی بین به‌کارگیری ماشین‌ها و برنامه‌ریزی تعمیرات و نگه‌داری آن، باید برقرار باشد.

همرول [۹] در پژوهشی به ارائه‌ی راهکارهای مختلفی برای حفظ و ارتقاء فرایندهای تولید، هماهنگی اجرایی سیستم‌ها، درک و کاربردهای عملی آن‌ها پرداخته است. ایشان بر مبنای مشاهدات خود بیان نمود که استفاده بیشتر و کارآمدتر از روش‌های بهبود، مانند تولید ناب، مدیریت کیفیت جامع، شش سیگما و سایر استراتژی‌های اقدام کارآمد و روش‌های پشتیبانی در نگه‌داری و بهبود سیستم‌های تولیدی می‌تواند باعث بهبود فرایندها و فعالیت‌های روزانه‌ی سازمان‌ها شود؛ که این راهبرد باعث کاهش هزینه‌های سازمانی و افزایش میزان تولید و بهره‌وری می‌شود.

گلاوار و همکاران [۱۰]، یک مدل یکپارچه برنامه ریزی تولید و کنترل نگه‌داری پیشگیرانه ارائه کردند. در این مدل انعطاف پذیری و کیفیت تولید در برنامه‌ریزی آن در نظر گرفته شده است. هدف این مدل کاهش کلیه هزینه‌های تولید و نگه‌داری می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داده است که ترکیب این دو حوزه تصمیم‌گیری می‌تواند نتایج مناسبی در کاهش و کنترل هزینه‌ها داشته باشد.

چریبر [۱۱] در پژوهش خود به سازمان‌های تولیدی که اغلب با افزایش هزینه‌های تولیدی و الزامات بازدهی به‌طور پیوسته مواجه است، اشاره کرد. یکی از راه‌های غلبه بر این چالش‌ها، ارتقاء بهبود کارایی و اثربخشی تعمیر و نگه‌داری با توسعه و یکپارچه سازی ابزارهای پیش‌بینی کننده‌ی نگه‌داری و استفاده از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی هدفمند با اقدامات تعمیر و نگه‌داری است.

بااین‌حال، ادغام سنسورها در منابع تولیدی که قبلاً نصب شده‌اند برای پیش‌بینی وظایف تعمیر و نگه‌داری موردنیاز، یکی از چالش‌های مهم شرکت‌های تولیدی بود؛ بنابراین، در این مقاله، یک روش نوآورانه برای ابزارهای پیش‌بینی کننده نگه‌داری و تعمیرات به‌عنوان خدمات ابری هوشمند و کاربرد صنعتی این‌روش برای برنامه‌ریزی تولید و نگه‌داری یکپارچه ارائه شده است.

یانگ و همکاران [۱۲] یک برنامه‌ریزی نگهداری و

تولید چند حالته براساس یادگیری تقویتی ارائه کرد. در نظر گرفتن انواع شغل و وضعیت ماشین یکی از نوآوری‌های تحقیقاتی آنها بوده است. آنها مشکلی را به‌عنوان چارچوب فرآیند تصمیم مارکوف ارائه کردند. نتایج نشان دهنده اثربخشی رویکرد پیشنهادی است.

بن سمان و همکاران [۱۳]، یک برنامه‌ریزی تولید مجدد پیشگیرانه برای تجهیزات تولید تحت محدودیت‌های عملیاتی و نگهداری ناکامل مبتنی بر یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه دادند. این تحقیق با هدف بررسی فرصت‌های تولید مجدد تجهیزات تولید برای تولید یک محصول به منظور پاسخگویی به خواسته‌های قطعی و پویا در یک بازه زمانی محدود انجام شده است

لو و همکاران [۱۴] یک مدل ریاضی برای برنامه ریزی تولید تجهیزات پیشرفته ارائه کرد. توجه به خرابی ماشین آلات و نگهداری پیشگیرانه یکی از نوآوری‌های تحقیقاتی آنها بوده است. آنها یک الگوریتم ترکیبی گسسته سیاهچاله و جستجوی همسایگی متغیر را برای حل مدل ریاضی پیشنهادی ارائه کردند. نتایج نشان دهنده عملکرد بهینه مدل ترکیبی پیشنهادی است.

شریعت مداری و همکاران [۱۵] در مقاله خود یک تکنیک ترکیبی فرآیند شبکه تحلیل فازی شهودی و شبکه DEA را برای ارزیابی کارایی دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی پیشنهاد ارایه داده‌اند. از روش IFANP برای ارزیابی وزن‌های کلی در بین تمامی معیارها و زیرمعیارها استفاده کرده‌اند و از این وزن‌ها در مدل NDEA برای اندازه‌گیری کارایی نسبی یک سیستم استفاده شده است. مثال فرضی نشان داده که کارایی تمام DMUها با استفاده از DEA برابر با ۱ است و بین DMUها رتبه‌بندی وجود ندارد. همچنین، می‌تواند DMU های کارآمد را اولویت‌بندی کند، کارایی عملکردهای DMU را ارائه دهد که مدیران را قادر می‌سازد تا نقاط ضعف را شناسایی کنند.

بهریا و همکاران [۱۶]، در مطالعه خود یک استراتژی مشترک تولید، نگهداری و کنترل کیفیت که شامل یک سیاست نگهداری دوره‌ای پیشگیرانه است، را با استفاده از مدل‌سازی ریاضی توسعه داده‌اند. این مقاله بر یافتن مقادیر بهینه دوره نگهداری پیشگیرانه، مقدار سطح اطمینان، اندازه نمونه، فاصله نمونه‌گیری و محدودیت‌های نمودار کنترل متمرکز است، به‌طوری که هزینه کل انتظار برای واحد زمان به حداقل می‌رسد.

ساها و همکاران [۱۷]، یک مدل اقتصادی یکپارچه کنترل کیفیت و مدیریت نگهداری کیفیت را طراحی کردند و پیامدهای مدیریت فرآیند تولید را با استفاده از آن بررسی کردند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در میان تمام اجزای هزینه در نظر گرفته شده، خرابی فرآیند و خرابی تجهیزات دارای ویژگی قابل توجهی در کل هزینه‌های مدل بهینه شده است. در جدول (۱) به مرور تحقیقات انجام شده پرداخته شده است.

پس از بررسی و تحلیل تحقیقات مختلف که در جدول ۱ نیز به خوبی قابل مشاهده است، مشخص شده است که مهم‌ترین شکاف تحقیقاتی این حوزه در ادغام‌سازی برنامه‌ریزی دپارتمان‌های تولید، نگه‌داری تعمیرات و نیز برنامه‌ریزی منابع انسانی می‌باشد. این در حالی است که در شرایط واقعی، تمامی این حوزه‌ها به یکدیگر ارتباط داشته و می‌تواند عملکرد و بهره‌وری کلی شرکت در ارائه یک مدل ریاضی جدید در خصوص یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید ادغامی، نگه‌داری و تعمیرات و برنامه‌ریزی نیروی انسانی می‌باشد. همچنین در هیچ‌یک از تحقیقات مربوطه از الگوریتم مورچگان استفاده نشده است بنابراین نوآوری دوم این تحقیق در به گارگیری این الگوریتم فرا ابتکاری در حوزه‌ی مورد مطالعه می‌باشد.

جدول (۱): مرور تحقیقات

محقق/ محققین	سال	برنامه‌ریزی تولید	نگه‌داری و تعمیرات	برنامه‌ریزی نیروی انسانی	قطعی	غیرقطعی	روش حل دقیق	روش حل فرا- ابتکاری
ژیانگ و همکاران	۲۰۱۴	√	√		√		√	
یالایویی و همکاران	۲۰۱۴	√	√		√		√	
نورالفتح و همکاران	۲۰۱۶	√	√			√	√	
اتای و همکاران	۲۰۱۷	√	√		√		√	√
اکین	۲۰۱۸		√			√		√
همرول	۲۰۱۸	√	√		√		√	
چریبر	۲۰۱۸	√	√		√		√	
گلاوار و همکاران	۲۰۱۸		√			√	√	
لو و همکاران	۲۰۱۹	√		√	√			√
علیمیان و همکاران	۲۰۱۹	√	√		√		√	
بنسی من و همکاران	۲۰۱۹	√	√			√	√	
یانگ و همکاران	۲۰۲۰		√		√			√
شریعت مداری و همکاران	۲۰۲۰		√			√		
بهریا و همکاران	۲۰۲۰			√	√		√	
وانگ و همکاران	۲۰۲۱	√	√			√	√	
ساها و همکاران	۲۰۲۱	√	√		√		√	
پژوهش حاضر	۲۰۲۱	√	√	√		√		√

۳- مدل‌سازی ریاضی

در این تحقیق با هدف برنامه‌ریزی نیروی انسانی، مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌گردد: سازمان تولیدی را در نظر بگیرید که دارای S ماشین یا دپارتمان مشخص است. قرار است در طی I روز برنامه زمان‌بندی پرسنل این تجهیزات مشخص شود. هرروز از J شیفت کاری با تعداد ساعت معین تشکیل شده‌است. تعداد پرسنل نیز مقداری مشخص و برابر K می‌باشد.

هر یک از ماشین آلات دارای یک نرخ خرابی مشخص است که لازم است برای هر شیفت عملیاتی تعمیرات و نگه‌داری روی آن انجام شود. بر اساس میزان خرابی و نیز فرایند تعمیرات و نگه‌داری پیشگیرانه، میزان تولید ماشین در قبل و بعد از انجام تعمیرات و نگه‌داری متفاوت خواهد بود. بدیهی است انجام این تعمیرات پیشگیرانه منجر به افزایش نرخ تولید تجهیزات می‌شود. در خصوص تخصیص پرسنل به ماشین‌ها، برای هر ماشین یک حداقل مهارت کاری باید وجود داشته باشد تا بتوان فرد را به ماشین مربوطه اختصاص داد. در هر شیفت حداقل تعداد پرسنل می‌بایستی رعایت شود.

همچنین تعدادی شروط در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی

پرسنل وجود دارد. این شروط شامل موارد زیر است:

- شیفت‌های کاری از پیش مشخص شده می‌باشد.
- اگر فردی در شیفت شب‌کار کند دیگر مجاز به کار کردن در شیفت صبح فردا نیست
- هر فرد ۲ روز حداکثر به طور متوالی می‌تواند مرخصی باشد. (مرخصی‌های غیر متوالی از این شرط مستثنی است)
- اگر فردی در شیفت صبح و بعدازظهر کار کرد حتماً باید در شیفت شب استراحت باشد.
- فرد با انجام کارهای تکراری یادگیری او افزایش یافته و نرخ انجام کارها توسط او بیشتر می‌شود.
- با گذشت زمان خستگی بر عملکرد فرد تأثیر گذاشته و نرخ انجام کار توسط او کاهش می‌یابد.
- در اثر فشار و حجم کار زیاد و تاخیر درتشخیص به موقع تقاضاها میزان نارضایتی پرسنل افزایش می‌یابد.

در این مدل، مقدار تولید، توسط هر ماشین به چهار عامل، مهارت اپراتور، نرخ از کارافتادگی تجهیزات و نرخ بهره‌برداری از ماشین آلات و میزان نارضایتی پرسنل است. به دلیل این‌که این عوامل در شرایط مختلف تغییر می‌کنند، هر چهار این پارامترها یعنی نرخ خرابی، نرخ بهره‌برداری و مهارت و میزان نارضایتی پرسنل به‌صورت عدم قطعیت بیان می‌شود. هدف ارائه یک برنامه‌ی زمان‌بندی جهت کارکنان است که ضمن برآورد کردن شرایط بیان شده، بیش‌ترین میزان تولید را با به‌کارگیری کمترین نیروی کار و با بیشترین رضایتمندی ایجاد نماید.

به‌منظور تشریح مدل ریاضی، ابتدا اندیس‌ها و مجموعه‌ها معرفی می‌گردد، سپس پارامترها و متغیرهای مدل معرفی می‌شود و در آخر روابط مدل ریاضی بیان می‌گردد.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

I: مجموعه تمام روزهای افق برنامه ریزی

i: اندیس روز $(i \in I)$

J:مجوعه تمام شیفت‌های کاری

j, j': اندیس شیفت کاری $(j, j' \in J)$

K: مجموعه تمام کارکنان

k, k': اندیس کارکنان $(k, k' \in K)$

S : مجموعه دپارتمان‌ها (تجهیزات)

s: اندیس تجهیزات $(s \in S)$

پارامترها

M_{ijs}: حداقل تعداد کارکنان موردنیاز در شیفت j از روز i برای کار در دپارتمان s

LI_{ks}: حداقل تجربه کارگر k برای کار در دپارتمان s (بر حسب میزان تولید) که به‌صورت یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود.

KI_s: حداکثر کارایی تجهیز در دپارتمان s در شرایط ایده‌آل (برحسب میزان تولید)

LE_s: نرخ بهره‌برداری از تجهیز در دپارتمان s که به‌صورت یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود.

LF_s: نرخ خرابی تجهیز در دپارتمان s که به‌صورت یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود.

FG_{js}: نرخ تولید تجهیز در دپارتمان s در طی شیفت j قبل از زمان تعمیرات و نگه‌داری پیشگیرانه

RG_{js}: نرخ تولید تجهیز در دپارتمان s در طی شیفت j بعد از زمان تعمیرات و نگه‌داری پیشگیرانه

d_{ijs}: نرخ تقاضای نیروی انسانی در شیفت j از روز i برای کار در دپارتمان s که به‌صورت یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود.

λ: ضریب افزایش خرابی در دوره فعالیت‌وانجام کار

μ: ضریب کاهش خرابی در دوره استراحت

δ_j: طول مدت شیفت j

U: بیشترین روزهای کاری یک کارگر در افق برنامه‌ریزی

L: کمترین روزهای کاری یک کارگر در افق برنامه‌ریزی

n: تعداد روزهای افق برنامه‌ریزی

n': سقف تعداد شیفت‌های شب هر کارگر

t: بیشترین تعداد روزهای کاری متوالی هر کارگر

متغیرها

X_{ijks}: اگر در روز i و شیفت j کارگر k در بخش s مشغول به کار باشد یک و در غیر اینصورت صفر.

Q_{ijks}: میزان تولید انجام شده در روز i و شیفت j توسط کارگر k در بخش s انجام شود یک و در غیر انصورت صفر

b_{ijks}: سطح کسری نیروی کار در روز i و شیفت j کارگر k در بخش s ایجاد شود یک و در غیر اینصورت صفر

۳-۱- روابط مدل ریاضی

$$Min Z = \sum_{s\in S}\sum_{k\in K}\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\frac{X_{ijks}}{FG_{js}Q_{ijks}} + \sum_{j\in J}\frac{b_{ijks}}{d_{ijs}} \quad (۱)$$

$$FG_{j\,s} = 1 - e^{-\lambda\delta_j} \qquad \forall j \in J, s \in S \quad (۲)$$

$$RG_{j\,s} = FG_j e^{-\mu b_j} \qquad \forall j \in J, s \in S \quad (۳)$$

$$FG_{j+1s} = RG_j + \left(1 - RG_j\right)\left(1 - e^{-\lambda\delta_{j+1}}\right) \quad (۴)$$
$$\forall j \in J, s \in S$$

$$Q_{ijks} = LI_{ks} + KI_s\left[1 - \exp\left(\frac{-1}{LE_s}X_{ijks}\right)\right] \quad (۵)$$
$$\times \exp\left(\frac{1}{LF_s}X_{ijks}\right)$$
$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S$$

$$\sum_{k\in K} X_{ijks} \geq M_{ijs} \qquad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (۶)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{s\in S} X_{ijks} + Y_{ik} = 1 \quad (۷)$$
$$\forall i \in I, k \in K$$

$$L \leq \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{s\in S} X_{ijks} \leq U\,; \quad \forall k \in K \quad (۸)$$

$$\sum_{s\in S} X_{ijks} + X_{(i+1)j'ks} \leq 1\,; \quad (۹)$$
$$\forall i \in I : i < n, j = 3, j' = 1, k \in K$$

$$Y_{ik} + \sum_{j\in J}\sum_{s\in S} X_{(i+1)jks} + Y_{(i+2)k} \leq 2\,; \quad (۱۰)$$
$$\forall i \in I : i \leq n-2, k \in K$$

$$\sum_{s\in S} X_{ijks} + \sum_{s\in S} X_{(i+1)jks} + \sum_{s\in S} X_{(i+2)jks} \quad (۱۱)$$
$$\leq Y_{(i+3)k} + 2\,;$$
$$\forall k \in K, j = 3, i \in I : i \leq n-3$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{s\in S} X_{ijks} \leq n'; \qquad j = 3, \forall k \in K \quad (۱۲)$$

$$d_{ijs} \geq b_{ijks}$$
$$\forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (۱۳)$$

رابطه‌ی (۱) تابع هدف مدل ریاضی را مطرح می‌کند که کمینه‌سازی نیروی کار تقسیم بر کارایی تولید می‌باشد. این تابع هدف سعی دارد با در نظر گرفتن پارامترهای نرخ تولید، نرخ خرابی و تجربه کارگران و میزان نارضایتی‌های ایجاد شده از کمبود و تاخیرات نیروی انسانی بهترین خروجی لازم را در دپارتمان‌های مختلف داشته باشد.

رابطه‌ی (۲) نرخ تولید را برحسب تابع نمایی از مدت‌زمان شیفت کاری و ضریب خرابی محاسبه می‌کند.

رابطه‌ی (۳) نرخ تولید بعد از تعمیرات و نگه‌داری پیشگیرانه را محاسبه می‌کند که این خرابی به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند و به مدت‌زمان تعمیرات و نگه‌داری پیشگیرانه وابسته است.

رابطه‌ی (۴) نرخ تولید برای شیفت بعدی را محاسبه می‌کند. در این رابطه نرخ خرابی در دوره قبل مؤثر است و به‌صورت نمایی این خرابی افزایش پیدا می‌کند.

قید (۵) نرخ تولید توسط هر کارگر در هر دپارتمان را برحسب خرابی، میزان بهره‌برداری و نیز مهارت کارگران محاسبه می‌کند. در تعیین روابط ۲ تا ۵ از تحقیقات مربوط به زمان‌بندی نیروی کار با توجه به خستگی و یادگیری الهام گرفته شده‌است. برای نمونه می‌توان به تحقیق جابر و همکاران [۱۸] اشاره نمود.

قید (۶) تضمین می‌کند که حداقل کارگر موردنیاز در هر دپارتمان در هر شیفت فراهم شود.

قید (۷) بیان می‌کند که هر کارگر در هر شیفت یا مشغول به کار است و یا در مرخصی به سر می‌برد.

قید (۸) بیان می‌کند که هر کارگر باید بین حداقل و حداکثر تعداد روز مجاز، در مجموعه مشغول به کار باشد.

قید (۹) بیان می‌کند که پرسنلی که در شیفت شب (j=3) کار می‌کنند دیگر اجازه کار کردن در شیفت صبح (j=1) روز بعد را ندارند.

قید (۱۰) حداکثر یک کارگر ۲ روز متوالی می‌تواند در مرخصی باشد.

قید (۱۱) بیان می‌کند که اگر فردی در شیفت صبح و بعدازظهر کار کند حتماً می بایستی شیفت شب را در مرخصی باشد.

قید (۱۲) بیان می‌کند که هر کارگر حداکثر به تعداد n' می‌تواند در شیفت شب‌کار کند.

قید (۱۳) بیان می‌کند که میزان کسری هر شیفت نباید از میزان معینی تجاوز کند.

۳-۲- عدم قطعیت فازی

همان‌طور که در تشریح مدل مشخص شد، در این مدل چهار پارامتر مهم و اثرگذار وجود دارد. این پارامترها شامل نرخ بهره‌برداری، نرخ خرابی و حداقل مهارت کارگران و میزان نارضایتی نیروی انسانی می‌باشد. از طرف دیگر، مقداردهی به این پارامترها دارای قواعد مشخصی نمی‌باشد و این مقداردهی بر اساس نظر خبرگان نیروی انسانی خواهد بود. در چنین شرایطی، نظر افراد می‌توان متفاوت و متغیر باشد. براین اساس لازم است تا عدم قطعیت را در این پارامترها مدنظر قرار داد. در این پژوهش برای پارامترهای نرخ بهره‌برداری، نرخ خرابی تجهیزات و حداقل مهارت پرسنل و میزان نارضایتی‌ها، عدم قطعیت فازی مثلثی را در پارامترهای مدل در نظر گرفته شود.

۳-۳- الگوریتم مورچگان

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO) از پایان‌نامه دکتری Marco Dorigo در سال ۱۹۹۲ [۱۹] استخراج گردید و با عنوان سیستم مورچگان معرفی شد. Dorigo این الگوریتم را در ابتدا برای حل مسئله TSP به کار بست. الگوریتم موردنظر در حل مسئله فروشنده دوره‌گرد نه‌تنها قابل‌رقابت با سایر الگوریتم‌های زمان خود بود بلکه توانست در مدت‌زمان کوتاهی، از سایر روش‌ها پیشی بگیرد.

دلیل انتخاب الگوریتم مورچگان آن است که این الگوریتم به دلیل داشتن عملگرهایی مبتنی بر ساخت جواب به‌صورت مرحله‌به‌مرحله، می‌تواند به شکل مؤثری، راه‌حل‌هایی را برای زمان‌بندی نیروی انسانی ایجاد کند. به این صورت که هر مرحله در الگوریتم مورچگان، معادل یک روز در زمان‌بندی نیروی انسانی در نظر گرفته می‌شود. از طرفی دیگر، الگوریتم کلونی مورچگان به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد در حل مسائل زمان‌بندی شناخته شده است. بر همین اساس در این تحقیق به‌منظور بهینه سازی مدل ریاضی در ابعاد بزرگ، از الگوریتم مورچگان الهام گرفته شده‌است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبارسنجی مدل ریاضی

هدف از اعتبار سنجی درک درستی خروجی حاصل از مدل ریاضی است. در این راستا، یک مثال واقعی از یک سازمان تولیدی مورداستفاده قرار گرفته است. اطلاعات کسب شده به شرح زیر می‌باشد.

تعداد ده کارگر در یک سازمان تولیدی فعال مشغول به کار هستند. هدف برنامه زمان‌بندی آن‌ها در بازه ۷ روزه و برای هرروز ۳ شیفت کاری تعریف شده است. بیشترین تعداد شیفت هر کارگر برابر ۱۵ و کمترین آن ۳ تعریف شده‌است. در هر شیفت کاری و در هر دپارتمان حداقل ۲ نفر مشغول به کار باشند. مدت زمان هر شیفت برابر ۸ ساعت در نظر گرفته شده‌است. حداکثر کارایی تجهیزات در هر دپارتمان برابر ۸۰ درصد در نظر گرفته شده‌است. زمان تعمیرات و نگه‌داری پیشگیرانه هر شیفت کاری ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده‌است. ضرب افزایش خرابی برابر ۳۰ ٪ و ضریب کاهش خرابی برابر ۱۰٪ در نظر گرفته شده‌است. مقادیر مربوط به

مهارت، نرخ بهره‌برداری و نرخ خرابی تجهیزات و میزان نارضایتی‌ها، مختلف به‌صورت تصادفی در جدول ۲ طراحی شده‌است. برای تولید این اعداد تصادفی از توزیع یکنواخت پیوسته استفاده شده است. این توزیع دارای دو پارامتر حد پایین و حد بالا می‌باشد حد پایین L و حد بالای U به ازای هر پارامتر در جدول ۲ مشخص‌شده‌است. همچنین با توجه به فازی بودن پارامترهای تجربه، میزان نارضایتی‌ها و نرخ بهره‌برداری و نرخ خرابی تجهیزات، برای هر پارامتر ۳ مقدار تعیین شده‌است (عدد فازی مثلثی). این مقادیر به ترتیب حد پایین عدد فازی، حد وسط عدد فازی و حد بالای عدد فازی می‌باشد.

پس از وارد کردن اطلاعات در نرم‌افزار GAMS و بهینه‌سازی آن، خروجی مطابق شکل ۱ حاصل شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود پیغام proven optimal solution در نرم‌افزار GAMS ارائه‌شده که نشان‌دهنده حاصل شدن جواب بهینه کلی است؛ بنابراین این مدل ریاضی و محدودیت‌های آن یک فضای موجه منطقی ایجاد کرده است که نشان می‌دهد جواب بهینه مسئله قابل‌دستیابی می‌باشد.

جدول (۲): حدود مقادیر مربوط به پارامترهای مختلف مدل ریاضی

پارامتر فازی	نماد	حد پایین (L)	حد بالا (U)
حداقل مهارت کارگران	LI1	۳	۴
	LI2	۴	۵
	LI3	۵	۶
نرخ بهره‌برداری	LE1	٪۴۰	٪۴۵
	LE2	٪۴۵	٪۵۰
	LE3	٪۵۰	٪۵۵
نرخ خرابی	LF1	٪۱۰	٪۲۰
	LF2	٪۲۰	٪۳۰
	LF3	٪۳۰	٪۴۰
نرخ نارضایتی پرسنل	LD1	٪۳۰	٪۴۰
	LD2	٪۴۰	٪۵۰
	LD3	٪۵۰	٪۶۰

```
Proven optimal solution.

MIP Solution:          97.431648    (23802 iterations, 804 nodes)
Final Solve:           97.431648    (0 iterations)

Best possible:         97.431648
Absolute gap:           0.000000
Relative gap:           0.000000

--- Restarting execution
--- Gams code.gms(76) 0 Mb
--- Reading solution for model sc
*** Status: Normal completion
--- Job Gams code.gms Stop 09/20/19 19:39:55 elapsed 0:00:07.713
```

شکل (۱): خروجی GAMS از مسئله اعتبار سنجی

جهت درک بهتر خروجی حاصل‌شده، نتیجه جواب بهینه در جدول ۳ و ۴ و ۵ ارائه شده است. برای طراحی این جداول ابتدا کارگران با شماره‌های ۱ تا ۱۰ شماره‌گذاری شده‌اند. سپس در این جداول برای هرروز و هر شیفت شماره کارگرانی که باید در دپارتمان مربوطه مشغول به کار باشند مشخص شده است. به‌عنوان مثال در جدول ۳ مشخص‌شده‌است که در دپارتمان ۱ و در شیفت اول روز ۱ کارگران شماره ۳ و ۷ و ۹ باید کار کنند.

جدول (۳): برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۱ در هرروز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	۳و۷و۹	۵و۶	۵و۸
روز ۲	۶و۷	۵و۶	۵و۷
روز ۳	۶و۹	۵و۶	۷و۱۰
روز ۴	۵و۶	۷و۱۰	۵و۶
روز ۵	۷و۸	۵و۶	۵و۷
روز ۶	۲و۶	۵و۶	۷و۱۰
روز ۷	۵و۶	۵و۶و۷	۳و۷

جدول (۴): برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۲ در هرروز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	۱و۴و۹و۱۰	۱و۴و۹و۱۰	۳و۹
روز ۲	۴و۱۰	۴و۵و۹و۱۰	۳و۹
روز ۳	۴و۵	۳و۹	۴و۱۰
روز ۴	۱و۳	۳و۴و۹و۱۰	۴و۹
روز ۵	۳و۱۰	۳و۴و۹و۱۰	۱و۱۰
روز ۶	۳و۴	۳و۹	۴و۱۰
روز ۷	۱و۹	۱و۴و۱۰	۴و۱۰

جدول (۵): برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۳ در هرروز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	۲ و ۸	۲ و ۸	۳و۹
روز ۲	۱و۸	۲و۸	۳و۹
روز ۳	۳و۷	۱و۲	۴و۱۰
روز ۴	۲و۷	۱و۸	۴و۹
روز ۵	۱و۴	۲و۸	۱و۱۰
روز ۶	۱و۸	۲و۷	۴و۱۰
روز ۷	۲و۷	۲و۸	۴و۱۰

در جداول ۳ تا ۵ اعداد واردشده در هر سلول نشان‌دهنده کارگران مشغول به کار در دپارتمان مربوطه و در روز و شیفت مشخص می‌باشد. نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که خروجی مدل ریاضی تمامی محدودیت‌های مدل را رعایت کرده و درنتیجه صحت اعتبار مدل ریاضی به تائید می‌رسد.

۴-۲- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

تاگوچی یک مهندس ژاپنی است که ایده‌ها و اقداماتی انقلابی را به حوزه کیفیت جامع وارد کرده است. کار او درزمینه طراحی آزمایش‌ها که ژاپن از اوایل دهه ۱۹۵۰ بدین سو به آن اقدام می‌کند، روش‌هایی قوی را در طراحی محصولات و فرایندهای جدید ارائه کرده است. در این روش‌ها، آزمایش‌هایی انجام می‌شود، برای تشخیص پارامترهای طراحی که اثر اغتشاش (عوامل چون دما، فشار یا خطای انسانی را که بر عملکرد مؤثرند) به حداقل می‌رسانند.

روش تاگوچی امکان آن را ایجاد کرده است که این اطلاعات حیاتی با تعداد آزمایش و تجربه بسیار کمتری فراهم شود. نتیجه آن است که محصولات و فرایندها به‌منظور مقاومت در برابر (اغتشاش) ایجاد می‌شوند. تابع زیان ایده مهم دیگری است که تاگوچی بیان کرده است و تأثیر بسیار در اندیشه و عمل کیفیت داشته است. این ایده جایگزین دیدگاه سنتی می‌شود که بر اساس آن محصولات در صورتی که حدهای مشخصات را محقق کنند قابل قبول‌اند. چنین دیدگاهی به معنی آن است که حدی وجود دارد که محصول به علت ناتوانی برای تحقق مشخصات در آن حد، غیرقابل قبول می‌شود. تاگوچی استدلال می‌کند که انحراف در محصول حتی در حیطه حدهای مشخص‌شده «زیانی برای اجتماع» در دوره عمر محصول ایجاد می‌کند و هرچه محصول از ارزش موردنظر خود دورتر می‌شود. انحطاط در عملکرد آن بیشتر خواهد بود، تاگوچی بر این باور است که زیان متناسب با مربع انحراف از ارزش مورد نظر است. محصولی که به مشتری می‌رسد، اگر نتواند کارکرد خود را داشته باشد، زیانی وارد می‌کند. این زیان از طرف مشتری در هزینه‌های تعمیر و جایگزینی و از طرف سازنده در هزینه‌های تضمین، افت اعتبار شرکت و از دست رفتن شغل و بازار جلوه می‌کند. برای به حداقل رساندن این زیان، بهبود کیفیت باید تا رسیدن به کمال هدف ادامه یابد، دیگر حدهای مشخصات فنی هدف نیستند. فعالیت بهبود، هرگز نباید متوقف شود.

۴-۳- طراحی آزمایشات برای پارامترهای الگوریتم مورچگان

بر اساس ساختار روش تاگوچی در ابتدا برای هر یک از پارامترهای الگوریتم مورچگان ۳ مقدار پیشنهاد می‌شود. مقادیر پیشنهادی به شرح جدول می‌باشد. در جدول ۶، پارامترهای الگوریتم مورچگان و سطوح مقادیر هر پارامتر آورده شده است. پارامتر Pc تعیین کننده درصد تغییر فرمون‌هاست. به عبارتی، برای هر یک از مورچگان، یک فرمون در نظر گرفته می‌شود. سپس در هر تکرار به اندازه Pc تغییر در فرمون حاصل می‌شود. پس از تغیین فرمون‌ها، حال باید موقعیت مورچگان را تغییر داد. درصد تغییر موقعیت مورچگان به اندازه پارامتر Pm خواهد بود.

جدول (۶): پارامترها و سطوح مقادیر آن‌ها برای الگوریتم مورچگان

الگوریتم مورد بررسی	پارامتر	مقادیر هر سطح		
		Level 1	Level 2	Level 3
مورچگان	نرخ تغییر فرمون‌ها (Pc)	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	درصد حرکت (Pm)	۰/۰۶	۰/۱	۰/۱۵
	تعداد جواب ها در هر مرحله (N-pop)	۵۰	۱۵۰	۲۵۰
	حداکثر تعداد تکرار	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰

در این الگوریتم، تعداد مورچگان یا همان تعداد جواب‌ها به اندازه N-pop است و معیار توقف الگوریتم رسیدن به تعداد Max-iteration تکرار می‌باشد.

آنگاه به ازای طرح L9 تاگوچی به ازای حالت‌های زیر الگوریتم مورچگان اجرا شده است. L9 یکی از طرح‌هایی است که تاگوچی آن را معرفی کرده است. در این طرح، باید ۹ بار آزمایش انجام شود و در هر باری، یکی از مقادیر پیشنهادی آن برای پارامتر ها استفاده می شود. خروجی پیاده سازی شده این طرح آزمایشی در جدول (۷) ارائه‌شده‌است.

جدول (۷): مقدار متغیر پاسخ در تکنیک تاگوچی برای مورچگان

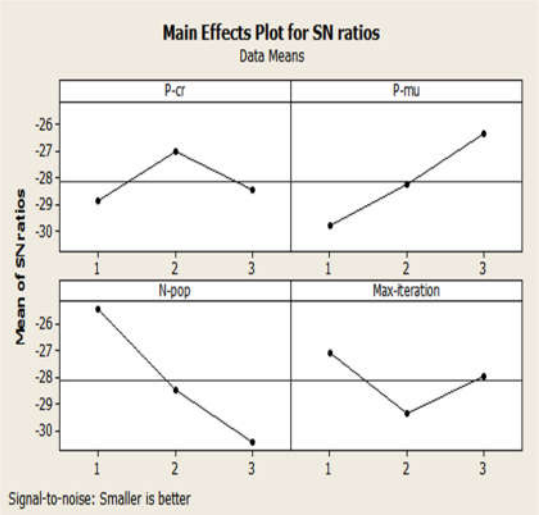
Run order	Algorithm parameters				Response
	P_{cr}	P_{mut}	N- Pop	Max-iteration	ACO
۱	۱	۱	۱	۱	۲۲/۹۸
۲	۱	۲	۲	۲	۳۵/۷۹
۳	۱	۳	۳	۳	۲۴/۹۱
۴	۲	۲	۲	۳	۲۹/۸۳
۵	۲	۲	۳	۱	۲۳/۴۷
۶	۲	۳	۱	۲	۱۹/۵۵
۷	۳	۱	۲	۲	۴۶/۰۵
۸	۳	۲	۱	۳	۱۸/۳۴
۹	۳	۳	۲	۱	۲۱/۰۲

بعد از واردکردن این اطلاعات در نرم افزار MINITAB و اجرای آن روش، نمودار S/N به صورت شکل ۲ بیان می‌شود. در این شکل محور افقی سطوح ۱ تا ۳ را نشان می‌دهد و محور عمودی شاخص S/N را نشان می‌دهد. شاخص S/N مطابق فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$S/N = -10\log\left(\frac{\sum_i Y^2}{n}\right) \qquad (۱۳)$$

در رابطه ۱۳، n تعداد آزمایش‌ها و Y مقدار متغیر پاسخ می‌باشد. رابطه S/N در اصل میزان نوسانات در روش تاگوچی را اندازه‌گیری می‌کند و لذا هر چقدر مقدار کمتری داشته باشد، به معنای نوسان اندک و در نتیجه بهتر بودن مقدار پیشنهادی می‌باشد.

این شاخص توسط تاگوچی ابداع شده است و میزان پراکندگی خروجی الگوریتم مورچگان به ازای تغییرات پارامتر موردنظر را نشان می‌دهد. محاسبه این شاخص توسط نرم‌افزار مینی تب انجام می‌شود. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد، به این معنی است که پارامتر در سطح موردنظر کم‌ترین نوسانات را از خود نشان می‌دهد.



شکل (۲): خروجی روش تاگوچی در الگوریتم مورچگان

بر اساس نمودار فوق، برای هر پارامتر مقداری مناسب است که کمترین مقدار S/N را داشته باشد؛ بنابراین در خصوص الگوریتم مورچگان مقادیر جدول ۸ مقادیر بهینه می‌باشند و سایر مثال‌ها با این مقادیر اجرا خواهند شد.

۴-۴- بررسی کارایی الگوریتم مورچگان

در این بخش با توجه به نتایج عددی حاصل شده به بررسی کارایی الگوریتم مورچگان پرداخته می‌شود. کارایی الگوریتم بر مبنای ۲ مفهوم تعریف می‌شود اول کیفیت و دوم سرعت در کیفیت آن، آنگاه اختلاف ایجاد شده در مقدار تابع هدف الگوریتم مورچگان با نرم افزار GAMS مقایسه می‌شود. سرعت زمان حل این دو روش نیز باهم مقایسه می‌شود. الگوریتم مورچگان استفاده شده برای این مسئله، جهت بررسی در محیط متلب کدنویسی شده‌است. در ابعاد مختلف ۱۰ مسئله تولید شده که در جدول ۹ آورده شده‌است. سایر پارامترها بر اساس اطلاعات وارد شده در بخش ۶-۱ تولید شده است. دیگر اطلاعات مورد نیاز مسئله در جدول ۸ نشان داده شده‌است.

جدول (۸): مقدار بهینه پارامترهای مورچگان

مقدار بهینه	پارامتر	الگوریتم موردبررسی
۰/۹	نرخ تغییر فرمون‌ها (Pc)	مورچگان
۰/۰۶	درصد حرکت (Pm)	
۲۵۰	تعداد جواب‌ها در هر مرحله (N-pop)	
۳۰۰	حداکثر تعداد تکرار (Max-iteration)	

جدول (۹): اطلاعات مسئله‌های تولیدشده

شماره مسئله	I	J	K	S
PR1	۱۰	۲	۱۰	۵
PR2	۱۵	۲	۱۰	۱۰
PR3	۳۰	۲	۱۰	۱۵

PR4	۵۰	۲	۲۰	۲۰
PR5	۶۰	۲	۳۰	۳۰
PR6	۸۰	۳	۳۰	۴۰
PR7	۱۱۰	۳	۴۰	۵۰
PR8	۱۵۰	۳	۵۰	۶۰
PR9	۲۰۰	۳	۵۰	۷۰
PR10	۳۰۰	۳	۵۰	۸۰

نتایج بدست آمده از حل دقیق مثال‌های تولیدشده در نرم‌افزار GAMS با نتایج بدست آمده از الگوریتم مورچه مقایسه شده‌است. زمان حل از نرم‌افزار GAMS برای مسائل با ابعاد بالا بسیار زیاد است و محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه یا همان ۶۰ دقیقه برای آن در نظر گرفته شده‌است. چنانچه حل مسئله در نرم‌افزار GAMS زمانی بیشتر از ۶۰ دقیقه لازم داشته باشد نرم‌افزار GAMS با رسیدن به زمان ۶۰ دقیقه یک جواب موجه (نه الزاماً بهینه) را ارائه کرده و اجرای برنامه اتمام می‌یابد. در جدول ۱۰ خلاصه نتایج مقایسه نرم‌افزار GAMS با الگوریتم مورچگان ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود نرم‌افزار GAMS نتوانسته در سه مسئله آخر در کمتر از ۶۰ دقیقه جواب بهینه را پیدا کند اما برای همین مثال‌ها الگوریتم مورچگان با صرف زمان به نسبت کمتر توانسته جواب‌های بهتری نسبت به GAMS پیدا کند.

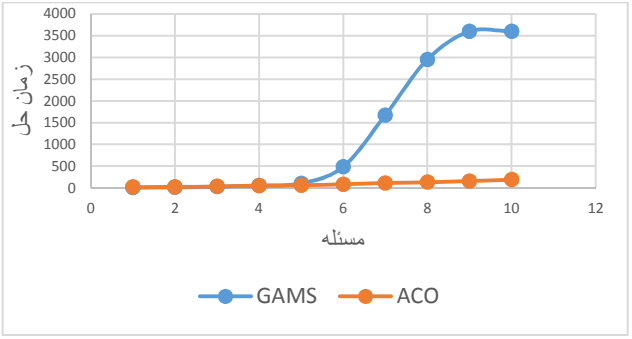
در شکل (۳) نمودار سرعت حل هر دو روش نشان داده شده‌است.

همان‌طور که مشخص است، زمان حل دقیق این مسئله با نرم‌افزار GAMS دارای افزایشی نمایی است که با افزایش ابعاد مسئله زمان حل به‌طور قابل مشخصی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در الگوریتم مورچه نرخ افزایش زمان حل بسیار کمتر می‌باشد.

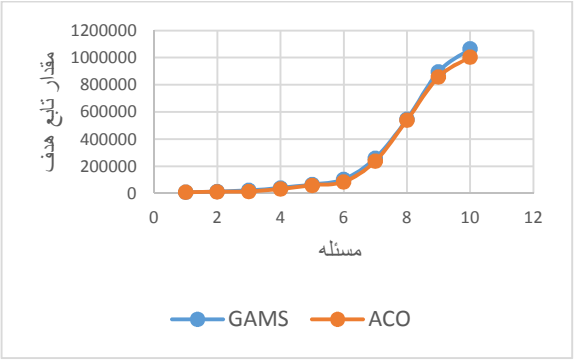
در شکل (۴) نمودار تابع هدف به‌دست‌آمده از حل دقیق و حل فرا ابتکاری مدل نشان داده شده‌است.

جدول (۱۰): نتایج حل مسائل نمونه با GAMS و الگوریتم مورچگان

شماره مسئله	حل دقیق با نرم‌افزار GAMS		الگوریتم مورچگان		GAP(%)
	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل	
PR1	۸۴۹۳/۰۰	۲/۷	۸۳۶۱/۱۹	۱۸/۱۹	۰/۰۰۳۷۱۰
PR2	۱۲۶۷۸/۰۰	۱۰/۶	۱۱۹۵۹/۹۰	۲۱/۶۰	۰/۰۸۰۳۰
PR3	۲۲۵۴۰/۰۰	۲۷/۳	۱۳۳۸۴/۵۷	۳۴/۹۰	۰/۰۴۰۶۱۹
PR4	۳۹۷۶۵/۰۰	۴۹/۳	۳۲۵۱۷/۳۸	۴۹/۷۰	۰/۰۱۸۲۲۶
PR5	۶۶۰۳۸/۰۰	۱۰۳/۵	۵۹۶۷۴/۵۷	۵۸/۹۰	۰/۰۹۶۳۶
PR6	۱۰۳۹۵۷/۰۰	۴۸۵/۱	۸۵۶۳۴/۳۷	۷۹/۶۰	۰/۰۱۷۶۲۵
PR7	۲۴۸۷۶۰/۰۰	۱۶۷۲/۲	۲۳۷۹۱۳/۰۴	۱۱۰/۹۰	۰/۰۸۷۱۸
PR8	۵۴۶۳۷۵/۰۰	۲۹۵۳/۹	۵۴۸۰۶/۹۲	۱۲۹/۷۰	۰/۰۱۰۱۵
PR9	۸۹۶۴۸۵/۰۰	۳۶۰۰/۰۰	۸۵۸۸۵۷/۵۰	۱۵۴/۶۰	۰/۰۴۱۹۷
PR10	۱۰۶۵۷۲۰/۰۰	۳۶۰۰/۰۰	۱۰۰۵۲۳۸/۰۱	۱۸۸/۱۰	۰/۰۵۶۷۵
متوسط	۳۰۲۱۹۱/۱۰	۱۲۵۰/۴۶	۲۸۵۹۴۶/۷۴	۸۳/۸۲	۰/۰۴۵۳



شکل (۳): مقایسه سرعت عملکرد الگوریتم مورچگان و نرم‌افزار GAMS



شکل (۴): مقایسه مقدار تابع هدف GAMS و الگوریتم مورچگان

در تصویر ۴ نشان داده می‌شود که در مسائل مختلف الگوریتم مورچگان اختلاف چندانی با حل دقیق آن نداشته است؛ و در کل مسائل حل‌شده ۰/۰۵ درصد خطا با نرم‌افزار GAMS داشته است که این نشان دهنده عملکرد خوب الگوریتم مورچگان در یافتن جواب بهینه مسئله می‌باشد. به‌طورکلی الگوریتم مورچگان هم در سرعت و هم در صحت عملکرد مناسبی را از خود ارائه کرده است و بنابراین به‌عنوان یک روش حل مناسب در بهینه سازی این مسئله مطرح می‌باشد.

تحلیل مقادیر GAP در ستون آخر جدول ۱۰ نشان می‌دهد که به طور متوسط الگوریتم مورچگان حدود ۴ درصد است. بیشترین خطای این الگوریتم برابر ۸ درصد بوده است. لذا نتیجه می‌شود که این الگوریتم با خطای بسیار اندکی که در بهینه‌سازی خود داشته است، کارایی کافی برای بهینه‌سازی مسئله مورد نظر را داشته است.

۴-۵- تحلیل حساسیت تعمیرات و نگه‌داری و بررسی سناریوهای شیفت کاری

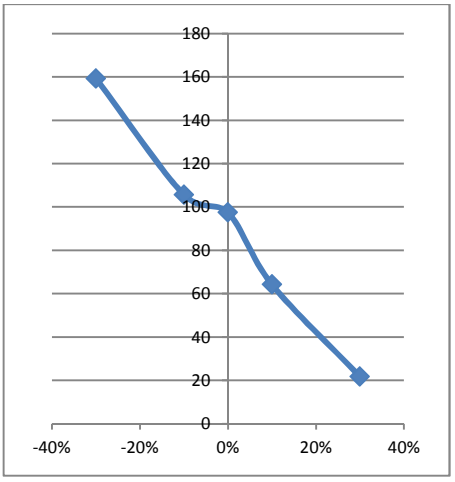
در این بخش از نتایج عددی به بررسی تأثیر دو پارامتر مهم یعنی ضریب افزایش خرابی ماشین‌آلات قبل از تعمیرات و نگه‌داری و ضریب کاهش خرابی پس از تعمیرات و نگه‌داری پرداخته می‌شود. برای این منظور مقادیر هریک از این پارامترها بین ٪۱۰- تا ٪۳۰+ تغییر داده شده و بر اساس آن مقدار تابع هدف گزارش شده‌است. جدول ۱۱ و ۱۲ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت این دو پارامتر را نشان می‌دهد. تصاویر ۵ و ۶ نیز به‌صورت گرافیکی به نمایش تأثیر این دو پارامتر در مدل ریاضی می‌پردازد.

جدول (۱۱): تحلیل حساسیت ضریب افزایش نرخ خرابی ماشین‌آلات قبل از تعمیرات و نگه‌داری

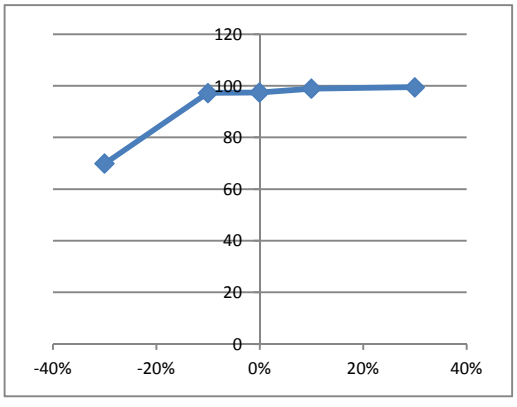
درصد تغییر	-٪۳۰	-٪۱۰	٪۰	٪۱۰	٪۳۰
مقدار تابع هدف	۱۵۹/۲۶	۱۰۵/۶	۹۷/۴۳	۶۴/۲	۲۱/۷۳

جدول (۱۲): تحلیل حساسیت ضریب کاهش نرخ خرابی پس از تعمیرات و نگه‌داری

درصد تغییر	-٪۳۰	-٪۱۰	٪۰	٪۱۰	٪۳۰
مقدار تابع هدف	۶۹/۹	۹۷/۲۴	۹۷/۴۳	۹۸/۹	۹۹/۵



شکل (۵): تأثیر ضریب افزایش نرخ خرابی بر تابع هدف



شکل (۶): تأثیر ضریب کاهش خرابی بر تابع هدف

همان‌طور که در جدول ۱۱ و شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش نرخ خرابی، مقدار تابع هدف به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. طبق روابط مدل با افزایش نرخ نارضایتی پرسنل FG افزایش نمایی پیدا کرده و درنتیجه مقدار تابع هدف به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. از طرفی دیگر مطابق جدول ۱۲ و شکل (۶) با بیشتر شدن ضریب کاهش خرابی با نگه‌داری و تعمیرات که مقدار تابع هدف آن روند افزایشی پیدا می‌کند.

با افزایش نرخ نارضایتی پرسنل مقدار RG کاهش یافته و درنهایت مقدار FG نیز کاهش اندکی خواهد داشت. نتیجه آن افزایش مقدار تابع هدف خواهد بود. این افزایش به نسبت تغییراتی که در ضریب افزایش خرابی مشاهده می‌شود به‌مراتب کمتر است؛ پس نتیجه می‌شود که ضریب افزایش خرابی می‌تواند تأثیر بیشتری را نسبت به ضریب کاهش خرابی در مدل داشته باشد. در مرحله بعد جهت بررسی حالت‌های مختلف مدل، کوشش شده‌است تا سناریوهای مختلف برای آن طراحی و بهترین انتخاب شود. در همین راستا ۶ سناریو مورد بررسی قرار گرفته‌است. این سناریوها در جدول ۱۳ نشان داده شده است.

پس از بهینه‌سازی سناریوهای مختلف، مقدار تابع هدف هر سناریو مشخص‌شده و در جدول ۱۴ گزارش شده‌است. همچنین نمودار تابع هدف هر سناریو در شکل (۷) ارائه شده است.

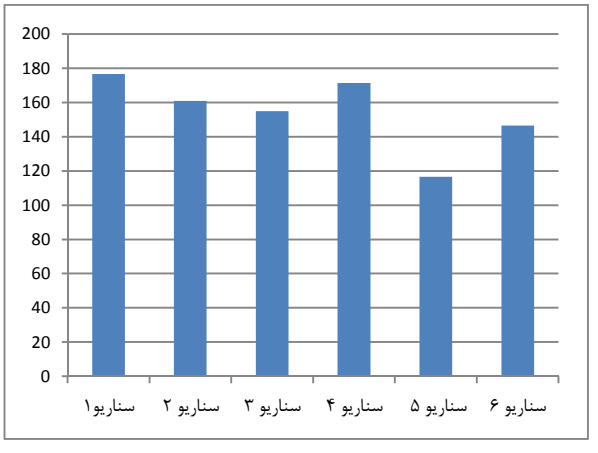
همان‌طور که در شکل (۷) و جدول ۱۴ مشاهده می‌شود، سناریو ۱ دارای بیشترین مقدار در تابع هدف است. همچنین سناریوی ۵ دارای کمترین مقدار در تابع هدف می باشد؛ از این رو می‌توان سناریوی ۵ را به‌عنوان سناریو برتر و سناریو ۱ را به‌عنوان بدترین سناریو به تصمیم گیران معرفی نمود. در سناریو ۱ دو شیفت کاری ۶ ساعته در یک افق برنامه‌ریزی ۲۰ روزه مدنظر می‌باشد.

جدول (۱۳): سناریوهای کاری

سناریو	تعداد شیفت	طول مدت هر شیفت	مدت استراحت	افق برنامه‌ریزی
سناریو ۱	۲	۶	۲	۲۰
سناریو ۲	۲	۷ و ۶	۳	۱۲
سناریو ۳	۱	۱۲	۳	۲۵
سناریو ۴	۳	۶	۶	۱۵
سناریو ۵	۳	۸ و ۷ و ۶	۳	۱۰
سناریو ۶	۳	۸	۲	۳۰

جدول (۱۴): مقدار تابع هدف هر سناریو

سناریو	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶
مقدار تابع هدف	۱۷۶/۲۵	۱۶۰/۸۳	۱۵۴/۷۹	۱۷۱/۳۳	۱۱۶/۵۳	۱۴۶/۵۰



شکل (۷): نمودار تابع هدف هر سناریو

این در حالی است که با افزایش زمان شیفت‌ها و نیز کاهش افق برنامه‌ریزی به ۱۲ روز، مقدار تابع هدف از حدود ۱۸۰ به حدود۱۶۰ تغییر یافته است. نتایج نشان می‌دهد که ثبات در برنامه ریزی ساعات کاری و نیز داشتن افق زمانی معقول، می تواند منجر به رسیدن به بهترین عملکرد و بهره وری در سیستم برنامه‌ریزی نیروی انسانی شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی ادغامی جدید در خصوص برنامه‌ریزی تولید، تعمیرات و نگه‌داری پیشگیرانه و زمان‌بندی نیروی کار ارائه شد. در این مدل ریاضی یک تابع هدف جدید به‌صورت حاصل کسر نیروی کار به حجم تولید و با تاثیرپذیری میزان نارضایتی‌های ایجاد شده از کمبود و تاخیرات نیروی انسانی معرفی شد. درواقع این مدل ریاضی هم به دنبال کاهش نیروی انسانی با در نظر گرفتن سطح کسری نیروی کار و هم افزایش حجم تولید می‌باشد.

در این مدل ریاضی پارامترهای مرتبط با نیروی کار و تعمیرات نگه‌داری پیشگیرانه به‌صورت عدم قطعیت بیان شده و از روش برش فازی برای تبدیل مدل فازی به مدل غیر فازی استفاده شد. و برای حل مدل، الگوریتم مورچگان مورد استفاده قرار گرفت که نتایج عددی بدست آمده نشان دهنده میزان کارایی الگوریتم هم در کیفیت جواب و هم در سرعت عمل الگوریتم بوده است. نتایج بدست آمده هم در اعتبار سنجی مدل ریاضی و هم حل مسائل عددی مختلف نشان می‌دهد که رویکرد ایجاد شده در این تحقیق که مبتنی بر یکپارچه سازی دپارتمان‌های مختلف تصمیم‌گیری در سازمان‌های تولیدی می‌باشد، می‌تواند به ارائه راهکارهای مناسب هم برای بخش تولید و هم برای بخش تعمیرات و نگه‌داری و همچنین برای زمان‌بندی نیروی انسانی باشد. جهت توسعه این پژوهش پیشنهاد می‌گردد، که از رویکردهای دیگر مانند بهینه‌سازی استوار در مواجهه با عدم قطعیت در دیگر پارامترها استفاده‌شده و نیز از الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر مانند کرم شب‌تاب و گرگ خاکستری استفاده شود.

فهرست منابع

[1]. S.M.J. Mirzapour Al-e-Hashem, M.B. Aryanezhad, S.J. Sadjadi. An efficient algorithm to solve a multi-objective robust aggregate production planning in an uncertain environment, International Journal of Advance Manufacturing Technology, 58. 765–782 (2012)

[2]. S.R. Moghadam, O. Yousefi, M. Karbasian, B. Khayambashi. 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, 9(2), 1-22 (2019)

[3]. A. Berrichi, L. Amodeo, F. Yalaoui, E. Châtelet, M. Mezghiche. Bi-objective optimization algorithms for joint production and maintenance scheduling: application to the parallel machine problem. Journal of Intelligent Manufacturing, 20(4), 389 (2009)

[4]. Y. Xiang, C.R. Cassady, T. Jin, C.W. Zhang. Joint production and maintenance planning with machine deterioration and random yield, International Journal of Production Research, 52 (6), pp. 1644–1657 (2014)

[5]. N. Gholamian, I. Mahdavi, R. Tavakkoli-Moghaddam, N. Mahdavi-Amiri. A comprehensive fuzzy multi-objective multi-product multi-site aggregate production planning decisions in a supply chain under uncertainty, Applied Soft Computing, 37. 585-607 (2015)

[6]. M. Nourelfath, N. Nahas, M. Ben-Daya. Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. Reliability engineering & system safety, 148, 21-31 (2016)

[7]. G. Ettaye, A. El Barkany, A. El Khalfi. Modeling and optimization a production/maintenance integrated planning. In International Journal of Engineering Research in Africa (Vol. 28, pp. 169-181) (2017)

[8]. T. Ekin, Integrated maintenance and production planning with endogenous uncertain yield. Reliability Engineering & System Safety, 179, 52-61 (2018)

[9]. A. Hamrol. A new look at some aspects of maintenance and improvement of production processes. Management and Production Engineering Review, 9 (2018)

[10]. R. Glawar, M. Karner, T. Nemeth, K. Matyas, W. Sihn. An approach for the integration of anticipative maintenance strategies within a production planning and control model. Procedia CIRP, 67, 46-51 (2018)

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

[12]. H. Yang, W. Li, B. Wang. Joint optimization of preventive maintenance and production scheduling for multi-state production systems based on reinforcement learning. Reliability Engineering & System Safety, 214, 107713. (2021)

[13]. Y. Bensmain, M. Dahane, M. Bennekrouf, Z. Sari. Preventive remanufacturing planning of production equipment under operational and imperfect maintenance constraints: A hybrid genetic algorithm based approach. Reliability Engineering & System Safety, 185, 546-566 (2019)

[14]. S. Lu, J. Pei, X. Liu, P. M. Pardalos. A hybrid DBH-VNS for high-end

equipment production scheduling with machine failures and preventive maintenance activities. Journal of Computational and Applied Mathematics, 384, 113195. (2021)

[15]. E. Shariatmadari Serkani, F. Hosseinzadeh Lotfi, E. Najafi, M. Ahadzadeh Namin. Efficiency Measurement for Hierarchical Network Systems Using Network DEA and Intuitionistic Fuzzy ANP. *Scientia Iranica*, -. doi: 10.24200/ 54619.3836 (2020)

[16]. N. Bahria, I. Harbaoui Dridi, A. Chelbi, H, Bouchriha. "Joint design of control chart, production and maintenance policy for unreliable manufacturing systems", Journal of Quality in Maintenance Engineering, 27 (4), 586-610 (2021)

[17]. R. Saha, A. Azeem, K. W. Hasan, S. M. Ali, S. K. Paul. Integrated economic design of quality control and maintenance management: Implications for managing manufacturing process. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 12(2), 263-280 (2021)

[18]. M. Y. Jaber, Z. S. Givi, W. P. Neumann. Incorporating human fatigue and recovery into the learning–forgetting process. Applied Mathematical Modelling, 37(12-13), 7287-7299 (2013)

[19]. A. Goli, E. B. Tirkolaee, N. S. Aydin. Fuzzy integrated cell formation and production scheduling considering automated guided vehicles and human factors. IEEE Transactions on Fuzzy Systems (2021)