فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد سنندج – سال شانزدهم/ شماره ۵۵ / بهار ۱۴۰۰

ارائه مدل بهینه برنامه‌ریزی تولید، تعمیرات و نگه‌داری و زمان‌بندی نیروی کار در شرایط عدم قطعیت و حل آن با الگوریتم مورچگان

محمد شریف زادگان
دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
طهمورث سهرابی (نویسنده مسؤول)
استادیار، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
Email: dr.tsohrabi@gmail.com
احمد جعفرنژاد چقوشی
استاد تمام، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۲۸ * تاریخ پذیرش ۹۹/۱۱/۱۰

چکیده

در شرایط رقابتی امروز، بهره‌وری تولید یک موضوع بسیار مهم و کلیدی است. این در حالی است که تمامی بخش¬های واحدتولیدی به یکدیگر وابسته هستند. پاسخگویی سریع به نیاز مشتریان، تنوع پذیری، اطمینان و اعتماد پذیری و هزینه بر بودن تجهیزات و ماشین آلات با توجه به محدودیت‌های گسترده در منابع تولیدی به رقابت پذیری و کسب سهم بازار در شرایط عدم قطعیت، نیاز است برای اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی از قالبی یکپارچه که عوامل حیاتی را درخود جای داده‌است استفاده شود. بر همین اساس، در این تحقیق به یکپارچه‌سازی سه حوزه مهم در شرکت‌های تولیدی پرداخته شده‌است. این حوزه‌ها شامل برنامه‌ریزی تولید، نگه‌داری و تعمیرات و برنامه‌ریزی نیروی انسانی می‌باشد. در این خصوص یک مدل ریاضی با هدف استفاده بهینه از نیروی کار و افزایش حجم تولید ارائه شده‌است. در این مدل تجربه کارگران، نرخ به کارگیری ماشین و نرخ خرابی ماشین آلات به‌صورت غیرقطعی و با اعداد فازی بیان شده‌است. برای حل این مدل از الگوریتم فراابتکاری مورچگان استفاده شده‌است. نتایج عددی حاصل از پیاده‌سازی در یک شرکت صنعتی نشان می‌دهد که الگوریتم مورد استفاده، می‌تواند در یک زمان معقول و منطقی، جواب‌هایی با حداقل خطای ممکن ارائه کند. همچنین تحلیل حساسیت انجام‌شده نشان می‌دهد که نرخ خرابی ماشین قبل و پس از تعمیرات و نگه‌داری، تاثیر بسیار زیادی روی مقدار تابع هدف مدل ریاضی دارد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی تولید، تعمیرات و نگه‌داری، برنامه‌ریزی نیروی انسانی، مدل ریاضی، الگوریتم مورچگان.

۱-مقدمه

در اغلب واحدهای تولیدی اطلاعات تاثیرگذار در سطح نامطلوبی از هماهنگی و تبادل با دیگر فعالیتها هستند. نتیجه اینگونه فعالیت‌ها چیزی جز اتلاف در منابع (هزینه، زمان، مواد و ...) و پیدایش فرهنگ جزیره‌ای در سازمان نیست. پر واضح است که تمامی بخش‌های واحدتولیدی به یکدیگر وابسته هستند و نیاز است برای اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی از قالبی یکپارچه که عوامل حیاتی را درخود جای داده‌است استفاده شود. نیاز به یکپارچه‌سازی از مدت‌ها پیش مورد توجه پژوهشگران و مدیران صنایع بوده است. از این‌رو برخی از پژوهش‌گران مانند نورالفتح و همکاران به دنبال ایجاد هماهنگی و یکپارچه‌سازی تولید و نگه‌داری و تعمیرات بودند، ایشان به این نکته اشاره کردند که تولید، نگهدای و تعمیرات و کنترل کیفیت ارتباط قوی با یکدیگر دارند پس باید این مباحث را به خوبی با یکدیگر یکپارچه‌سازی نمود (Aghezzaf & Najid, 2008). پژوهشگران دیگر مانند هلوئی و همکاران به اهمیت یکپارچه‌سازی تامین مواد و نگه‌داری و تعمیرات پرداختند (Behnezhad & Khoshnevis, 1988) و همچنین گروه دیگری مانند بوصلاح و همکاران میل به یکپارچه‌سازی تولید، کنترل کیفیت و نگه‌داری و تعمیرات داشتند (Berrichi, Berrichi, Amodeo, Yalaoui, Châtelet, & Mezghiche, 2009). بنابراین مشاهده می‌شود یکپارچه‌سازی اطلاعات حیاتی بخش‌های مختلف تولیدی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است چرا که در طی چند دهه گذشته همواره دغدغه‌های فراوانی در ارتباط با تلفیق حوزه‌های مختلف مرتبط با فعالیت‌های تولید وجود داشته است. حوزه‌هایی که هریک به مثابه قلب تپنده واحدهای تولیدی هستند و باید در تصمیم‌گیری‌های مختلف از آنها بهره گرفت. به دلیل اثر متقابل هریک 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 برنامه‌ریزی تولید، نگه‌داری و تعمیرات و تامین مواد اولیه صورت گرفته‌است.

بر همین اساس، در این تحقیق ارائه یک مدل ریاضی جدید به منظور برنامه‌ریزی تولید و نگه‌داری تعمیرات و نیروی انسانی ارائه شده‌است.همچنین برای حل این مدل ریاضی یک الگوریتم فراابتکاری کارامد مورد استفاده قرار گرفته‌است. در ادامه مقاله و در بخش ۲ به بررسی جدید ترین تحقیقات مربوطه پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مدل ریاضی تحقیق و در بخش ۴ رویکرد عدم قطعیت فازی و در بخش ۵ روش حل مدل ریاضی ارائه می‌شود. در بخش ۶ نتایج عددی حاصل از بهینه‌سازی مدل ریاضی ارائه شده و در نهایت و در بخش ۷ جمع بندی تحقیق ارائه می‌شود.

الف) مرور پیشینه تحقیق

لیائو[1](۲۰۱۳) در مقاله‌ای به بررسی یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی تعمیر ناکامل برای سامانه تک ماشینه را بررسی کرد. در این مقاله تعمیرات پیش‌گیرانه دوره‌ای ناکامل و سامانه دوره‌ای کامل تعمیرات اساسی به‌صورت یکپارچه برای کمینه کردن هزینه مورد انتظار مربوط به تولید و تعمیر توسعه داده شده‌است. هدف از این پژوهش تعیین مدت زمان سیکل نگه‌داری و تعمیرات پیش‌گیرانه و همچنین سیکل تعمیرات اساسی سامانه مورد نظر با هدف کاهش هزینه‌های مورد انتظار نگه‌داری و تعمیرات پیش‌گیرانه است. نتایج نشان داد که تولید بهینه و نگه‌داری و تعمیرات پیش‌گیرانه بهینه با یکدیگر در ارتباط هستند.

یالایویی و همکاران (۲۰۱۴) مدل بسط داده شده‌ای از برنامه‌ریزی خطی را به عنوان رویکردی ترکیبی برای محاسبه مشخص کردن برنامه‌ریزی تولید بهینه با حداقل هزینه را بیان کردند. آن‌ها برای این منظور از مدلی با دو تابع هدف که برنامه‌ریزی تولید و نگه‌داری تعمیرات را مطرح می‌کرد استفاده کردند. مدلی که یالویی عنوان کرده است شامل چند خط تولید، چند محصول و دوره علاوه بر درنظرگرفتن استهلاک و زوال خطوط تولید است. همچنین فرض شده‌است که عملیات نگه‌داری و تعیمرات وضعیت عملیاتی دستگاه‌ها را به خوبی روز اول بر می‌گرداند(Yalaoui, Chaabi, & Yalaoui, 2014).

نورالفتح و همکاران (۲۰۱۶) به یکپارچه‌سازی تولید، نگه‌داری و تعیمرات 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

[1] Liao

پژوهش به این نتیجه رسیدند که هرچه سطح نگه‌داری و تعمیرات پیش‌گیرانه را بالاتر رود، هزینه‌های کیفیت کاهش می‌یابد. همچنین اگر هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات پیش‌گیرانه با کاهش هزینه‌های کیفیت جبران نشد، نگه‌داری و تعیمرات پیش‌گیرانه انجام شده توجیه‌پذیر نمی‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از حل مدل به وجود رابطه قوی بین تولید، نگه‌داری و تعمیرات پیش‌گیرانه و کفیت صحه می‌گذارد (Nourelfath, Nahas & Ben-Daya, 2016).

اتای و همکاران (۲۰۱۷) 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 داده‌است. 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(Ettaye, Barkany, & El Khalfi, 2017).

اکین(۲۰۱۸) عملکرد عوامل نامشخص درون‌زا را در یکپارچه‌ی تولید و نگه‌داری تعمیرات موردمطالعه قراردادند. برای این منظور آن‌ها یک مدل تصمیم‌گیری توسعه داده و عدم قطعیت در دسترسی به ماشین‌ها را به‌عنوان نماینده عوامل نامشخص درون‌زا درنظرگرفتند. 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(Ekin, 2018).

همرول (۲۰۱۸) 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 کارآمد تر 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(Hamrol, 2018).

گلاوار و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و کنترل نگه‌داری پیش‌گیرانه ارائه کردند. در این مدل انعطاف‌پذیری و کیفیت تولید در برنامه‌ریزی آن در نظر گرفته‌شده‌است. هدف این مدل کاهش کلیه هزینه‌های تولید و نگه‌داری می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داده‌است که ترکیب این دو حوزه تصمیم‌گیری می‌تواند نتایج مناسبی در کاهش و کنترل هزینه‌ها داشته باشد(Glawar, Karner, Nemeth, Matyas, & Sihn, 2018).

چریبر (۲۰۱۸) در پژوهش خود بیان داشت، سازمان‌های تولیدی که اغلب با افزایش هزینه‌های تولیدی و الزامات بازدهی به طور پیوسته مواجه است، اشاره کرد. یکی از راه‌های غلبه بر این چالش‌ها، ارتقاء بهبود کارایی و اثربخشی تعمیر و نگه‌داری با توسعه و یکپارچه‌سازی ابزارهای پیش‌بینی کننده‌ی نگه‌داری و استفاده از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی هدفمند با اقدامات تعمیر و نگه‌داری است. با این حال، ادغام سنسورها در منابع تولیدی که قبلاً نصب شده‌اند برای پیش‌بینی وظایف تعمیر و نگه‌داری مورد نیاز، یکی از چالش‌های مهم شرکت‌های تولیدی بود. بنابراین، در این مقاله، یک روش نوآورانه برای ابزارهای پیش‌بینی کننده نگه‌داری و تعمیرات به عنوان خدمات ابری هوشمند و کاربرد صنعتی این‌روش برای برنامه‌ریزی تولید و نگه‌داری یکپارچه ارائه شده‌است(Schreiber, 2018).

علیمیان و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی استوار برای نگه‌داری تعمیرات پیش‌گیرانه و تولید ارائه کردند. در این مدل عدم قطعیت در تقاضا در نظر گرفته‌شده و برای مواجهه با این عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده‌شده‌است. همچنین برای تعمیرات و نگه‌داری از رویکرد علل مشابه خرابی استفاده‌شده‌است. نتایج نشان داده‌است که استراتژی نگه‌داری و تعمیرات تأثیر به سزایی روی هزینه‌های تولید و نیز نرخ برگشت محصولات داشته باشد(Alimian, Saidi-Mehrabad & Jabbarzadeh, 2019).

بنسی من و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی تعمیرات پیش‌گیرانه با درنظرگرفتن نقش تجهیزات تعمیرات نگه‌داری و نیز عملکرد نامناسب تولید معرفی کردند. در این مدل، هزینه‌های عمر محصول به‌طور کامل به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته‌شده‌است. برای بهینه‌سازی این مدل ریاضی از یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته استفاده‌شده که نتایج آن حاکی از کارایی بالای این‌روش حل دارد(Bensmain, Dahane, Bennekrouf, & Sari , 2019).

گلی و همکاران (۲۰۱۹) به ادغام برنامه‌ریزی تولید یک‌ساله و برنامه‌ریزی نیروی انسانی پرداخته‌اند. این محققین یک مدل ریاضی دوهدفه با اهداف کاهش کل هزینه‌ها و حداکثرسازی رضایتمندی مشتری ارائه کردند. برای این مدل دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه و علف‌های هرز چندهدفه مورد استفاده قرارگرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های حل استفاده‌شده کارایی بالایی دارند.

در تحقیق دیگری از علیمیان و همکاران (۲۰۲۰)، تولید سلولی مورد مطالعه قرارگرفته و یک رویکرد جامعه برای برنامه‌ریزی تولید و نگه‌داری تعمیرات آن پیشنهاد شده‌است. در این‌رویکرد از زمان‌بندی گروهی و استفاده از سلول‌های پویا استفاده شده‌است. این محققان خرابی ماشین‌ها را به‌صورت یک نرخ در مدل ریاضی خود لحاظ کرده‌اند و پس از مدل‌سازی با نرم‌افزار گمز بهینه‌سازی کرده‌اند. نتایج نشان می‌هد که طراحی ساختار مناسب برای سلول‌های تولیدی می‌تواند تا حد زیادی روی خرابی ماشین‌ها و تعمیرات آنها تأثیرگذار باشد.

وانگ و همکاران (۲۰۲۰) از روش نگه‌داری تعمیرات پیش‌گیرانه مبتنی بر شرایط استفاده کرده و با برنامه‌ریزی تولید ترکیب کرده‌اند. در این تحقیق خرابی‌های ماشین و نیز تقاضای مشتریان به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده‌است. برای حل این مسئله از ترکیب بهینه‌سازی- شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده‌است. نتایج ارائه‌شده نشانگر برتری روش پیشنهادی تحقیق با سایر روش‌های مشابه می‌باشد. نمونه‌ی دیگری از این محققین (Wang, & Ren, 2020). نیز ارائه شده‌است که در آن از مدل‌سازی خطی عدد صحیح و از روش تحلیل سناریو برای بهینه‌سازی آن استفاده شده‌است.

صمیمی و همکاران (۲۰۲۰)، مدیریت نیروی انسانی و تعمیرات و نگه‌داری را در سازمان‌های پروژه محور مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق ابتدا به‌مرور تحقیقات مختلف در زمینه‌ی مدیریت نیروی انسانی پرداخته‌شده‌است. سپس تأثیر آن بر تعمیرات و نگه‌داری در سازمان‌های پروژه‌محور مطالعه و ارزیابی شده‌است. نتایج گویای این مهم است که مشکلات نیروی انسانی می‌تواند به‌طور بالقوه عملکرد سازمان را در جنبه‌های مختلف دچار مشکل کند.

موسوی و خلیلی (۲۰۲۱) به ترکیب تولید، موجودی و نگه‌داری تعمیرات پرداخته‌اند. در این مطالعه یک مدل ریاضی با هدف کاهش کل هزینه‌ها ارائه شده و از روش حل دقیق برای بهینه‌سازی آن استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های افزایش موجودی محصولات، نرخ خرابی ماشین‌آلات و هزینه‌های تعمیرات نگه‌داری را افزایش می‌دهد(Moosavi & Khalili, 2021).

در جدول شماره‌ی ۱ به مرور تحقیقات انجام‌شده پرداخته شده‌است.

جدول شماره (۱): مرور تحقیقات

محقق/ محققین	سال	برنامه‌ریزی تولید	تعمیرات و نگه‌داری	برنامه‌ریزی نیروی انسانی	قطعی	غیر قطعی	روش حل دقیق	روش حل فراابتکاری
لیائو	۲۰۱۳	√	√		√		√	
یالایویی و همکاران	۲۰۱۴	√	√		√		√	
نورالفتح و همکاران	۲۰۱۶	√	√			√	√	
اتای و همکاران	۲۰۱۷	β	√		√		√	√
اکین	۲۰۱۸		d			√		√
همرول	۲۰۱۸	√	√		√		√	
چریبر	۲۰۱۸	√	√		√		√	
گلاوار و همکاران	۲۰۱۸		√			√	√	
گلی و همکاران	۲۰۱۹	√		√	√			√
علیمیان و همکاران	۲۰۱۹	√	√		√		√	
بنسی من و همکاران	۲۰۱۹	√	√			√	√	

علیمیان و همکاران	۲۰۲۰		√		√		√
وانگ و همکاران	۲۰۲۰	√	√			√	√
صمیمی و همکاران	۲۰۲۰			√	√	√	
وانگ و همکاران	۲۰۲۱	√	√			√	
موسوی و خلیلی	۲۰۲۱	√	√		√	√	
پژوهش حاضر	۲۰۲۰	√	√	√		√	√

۲- روش‌شناسی پژوهش

پس از بررسی و تحلیل تحقیقات مختلف که در جدول شماره‌ی ۱ نیز به خوبی قابل تبیین است، مشخص شده‌است که مهمترین شکاف تحقیقاتی این حوزه در یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، نگه‌داری تعمیرات و نیز برنامه‌ریزی نیروی انسانی می‌باشد. این در حالی است که در شرایط واقعی، تمامی این سه حوزه به یکدیگر ارتباط داشته و می‌تواند عملکرد کلی شرکت تولیدی را مشخص کند. به همین دلیل نوآوری اصلی این تحقیق در ارائه یک مدل ریاضی جدید در خصوص یکارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، نگه‌داری و تعمیرات و برنامه‌ریزی نیروی انسانی می‌باشد. همچنین در هیچ یک از تحقیقات مربوطه از الگوریتم مورچگان استفاده نشده‌است بنابراین نوآوری دوم این تحقیق در به کارگیری این الگوریتم فراابتکاری در حوزه‌ی مورد مطالعه می‌باشد.

الف- مدل‌سازی ریاضی

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

هر یک از ماشین‌ها دارای یک نرخ خرابی مشخص است که لازم است برای هر شیفت عملیات تعمیرات و نگه‌داری روی آن انجام شود. بر اساس نرخ خرابی و نیز تعمیرات و نگه‌داری پیش گیرانه، نرخ 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 ماشین‌ها می‌شود.در خصوص تخصیص نیروها به ماشین‌ها، برای هر ماشین یک حداقل تجربه کاری باید وجود داشته باشد تا بتوان فرد را به ماشین مربوطه اختصاص داد. در هر شیفت حداقل تعداد کارکنان بایستی رعایت شود. همچنین چند شرط در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی کارکنان وجود دارد. این شروط شامل موارد زیر است:

≠ شیفت‌های کاری از پیش تعیین شده می‌باشد.

≠ اگر فردی در شیفت شب کار کند مجاز به کار کردن در شیفت صبح فردا نیست

≠ هر فرد حداکثر ۲ روز متوالی می‌تواند مرخصی باشد. (مرخصی‌های غیر متوالی از این شرط مستثنی است)

≠ اگر فردی شیفت صبح و بعد از ظهر را کار کرد حتما باید شیفت شب را در استراحت باشد.

≠ فرد با انجام کارهای متوالی یادگیری او افزایش یافته و نرخ انجام کارهای توسط او بیشتر می‌شود.

≠ با گذشت زمان خستگی بر عملکرد فرد تاثیر گذاشته و نرخ انجام کار توسط او را کاهش می‌دهد.

در این مدل ریاضی، مقدار تولید شده توسط هر ماشین به سه عامل، تجربه اپراتور، نرخ خرابی ماشین و نرخ بهره‌برداری از ماشین است. به دلیل این‌که این شاخص‌ها در شرایط مختلف تغییر می‌کند، هر سه این پارامترها یعنی نرخ خرابی، نرخ بهره‌برداری و تجربه به‌صورت فازی در نظر گرفته می‌شود. هدف ارائه‌ی برنامه‌ای جهت زمان‌بندی کارکنان است که ضمن برآورده‌کردن شرایط فوق بیش ترین تولید را با به کارگیری حداقل پرسنل ایجاد شود.

به منظور تشریح مدل ریاضی تحقیق ابتدا اندیس‌ها و مجموعه‌ها معرفی می‌شود، سپس پارامترها و متغیرها معرفی شده و در پایان روابط مدل ریاضی تشریح می‌گردد.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

I مجموعه تمام روزهای افق برنامه‌ریزی

i اندیس روز $(i \in I)$

J مجموعه تمام شیفتهای کاری

j, j اندیس شیفت کاری $(j, j' \in J)$

K مجموعه تمام کارکنان

k, k' اندیس کارکنان $(k, l \in K)$

S مجموعه دپارتمان‌ها (ماشین آلات)

s اندیس ماشین $(s \in S)$

پارامترها

M_{ijs} حداقل تعداد کارکنان مورد نیاز 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 ماشین در دپارتمان s در شرایط ایده آل (بر حسب میزان تولید)

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

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

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

Bt_j مدت تعمیرات و نگه‌داری در شیفت کاری j

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

λ ضریب افزایش خرابی در دوره فعالیت و انجام کار

μ ضریب کاهش خرابی در دوره استراحت

δ_j طول مدت شیفت j

U حداکثر روزهای کاری یک کارگر در افق برنامه‌ریزی

L حداقل روزهای کاری یک کارگر در افق برنامه‌ریزی

n تعداد روزهای افق برنامه‌ریزی

n' سقف تعداد شیفتهای شب هر کارگر

t حداکثر تعداد روزهای کاری متوالی هر کارگر

متغیرها

X_{ijks} متغیر صفر و یک نشان دهنده این که آیا در روز i و شیفت j کارگر k در بخش s مشغول به کار است یا خیر

Q_{ijks} میزان تولید انجام شده در روز i و شیفت j کارگر k در بخش s مشغول به کار است یا خیر

ب- روابط مدل ریاضی

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

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

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

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

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

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

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

$$L \leq \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{s\in S} X_{ijks} \leq U \qquad \forall k \in K \tag{۸}$$

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

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

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

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

رابطه‌ی ۱ تابع هدف مدل ریاضی را مطرح می‌کند که کمینه‌سازی نیروی کار تقسیم بر کارایی تولید می‌باشد. این تابع هدف سعی دارد با درنظرگرفتن پارامترهای نرخ تولید، نرخ خرابی و تجربه کارگران بهترین خروجی لازم را در دپارتمان‌های مختلف داشته باشد.

رابطه‌ی ۲ میزان تولید را بر حسب تابع نمایی از مدت زمان شیفت کاری و ضریب خرابی محاسبه می‌کند.

رابطه‌ی ۳ میزان تولید بعد از تعمیرات و نگه‌داری را محاسبه می‌کند که این خرابی به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند و به مدت زمان تعمیرات و نگه‌داری وابسته است.

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

رابطه‌ی ۵ میزان تولید توسط هر کارگر در هر دپارتمان را بر حسب خرابی، نرخ بهره‌برداری و نیز تجربه کارگران محاسبه میکند. در تعیین روابط ۲ تا ۵ از تحقیقات مربوط به زمانبندی نیروی انسانی با توجه به خستگی و یادگیری الهام گرفته شده‌است. برای نمونه می‌توان به تحقیق (اکبری، ۱۳۹۶) اشاره نمود.

رابطه‌ی ۶ تضمین می‌کند که حداقل کارگر مورد نیاز در هر دپارتمان در هر شیفت فراهم شود.

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

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

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

رابطه‌ی ۱۰ یک کارگر حداکثر ۲ روز متوالی می‌تواند در مرخصی باشد.

رابطه‌ی ۱۱ بیان می‌کند که اگر فردی در شیفت صبح و بعد از ظهر کار کرد حتما باید شیفت شب را در مرخصی باشد.

رابطه‌ی ۱۲ بیان می‌کند که هر کارگر حداکثر به تعداد n' می‌تواند در شیفت شب کار کند.

ج- عدم قطعیت فازی

همان‌طور که در تشریح مدل مشخص شد، در این مدل سه پارامتر مهم و اثر گذار وجود دارد. این پارامترها شامل نرخ بهره‌برداری، نرخ خرابی و حداقل تجربه کارگران می‌باشد. از طرفی دیگر، مقدار دهی به این پارامترها دارای قواعد مشخصی نمی باشد و این مقدار دهی بر اساس نظر خبرگان نیروی انسانی خواهد بود. در چنین شرایطی، نظر افراد می‌توان متفاوت و متغیر

باشد. بر همین اساس ضروی است تا عدم قطعیت در این پارامترها مد نظر قرار گیرد. در این پژوهش برای پارامترهای نرخ بهره‌برداری، نرخ خرابی و حداقل تجربه کارگران، عدم قطعیت فازی مثلثی در نظر گرفته شده‌است.

د- الگوریتم مورچگان

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)از پایان نامه دکتری مارکو دوریگو[۲] در سال ۱۹۹۲ استخراج گردید و با عنوان سیستم مورچگان معرفی شد. دوریگو این الگوریتم را در ابتدا برای حل مساله TSP به کار بست. الگوریتم مورد نظر در حل مسئله فروشنده دوره گرد نه تنها قابل رقابت با سایر الگوریتم‌های زمان خود بود بلکه توانست در مدت زمان کوتاهی،از سایر روش‌ها پیشی بگیرد.

دلیل انتخاب الگوریتم مورچگان آن است که این الگوریتم به دلیل داشتن عملگرهایی مبتنی بر ساخت جواب به‌صورت مرحله به مرحله، می‌تواند به شکل موثری، 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 به عنوان یکی از روش‌های موثر و کارامد در حل مسائل زمان‌بندی شناخته شده‌است. بر همین اساس در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی مدل ریاضی در ابعاد بزرگ، از الگوریتم مورچگان الهام گرفته شده‌است.

۳- نتایج و بحث

الف- اعتبارسنجی مدل ریاضی

هدف از اعتبار سنجی درک درستی خروجی حاصل از مدل ریاضی است. در این خصوص، یک کیس واقعی از یک سازمان صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌است. اطلاعات این کیس به شرح زیر می‌باشد.

ده کارگر در یک سیستم تولیدی فعال مشغول به کار هستند. هدف برنامه‌ریزی زمان‌بندی آنها در طی ۷ روز و هر روز ۳ شیفت می‌باشد. دپارتمان تولیدی وجود دارد. حداکثر تعداد شیفت هر کارگر برابر ۱۵ و حداقل آن ۳ تعریف شده‌است. در هر شیفت و در هر دپارتمان حداقل ۲ نفر باید مشغول به کار باشند. طول مدت هر شیفت برابر ۸ ساعت در نظر گرفته شده‌است. حداکثر کارایی ماشین در هر دپارتمان برابر ۸۰٪ در نظر گرفته شده‌است. مدت تعمیرات و نگه‌داری هر شیفت ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده‌است. ضرب افزایش خرابی برابر ۲۰ درصد و ضریب کاهش خرابی برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده‌است. مقادیر مربوط به تجربه، نرخ بهره‌برداری و نرخ خرابی ماشین آلات مختلف به‌صورت تصادفی و بر اساس جدول شماره‌ی ۲ طراحی شده‌است. برای تولید این اعداد تصادفی از توزیع یکنواخت پیوسته استفاده شده‌است. این توزیع دارای دو پارامتر حد پایین و حد بالا می‌باشد حد پایین L و حد بالای U به ازای هر پارامتر در جدول شماره‌ی ۲ مشخص شده‌است. همچنین با توجه به فازی بودن سه پارامتر تجزبه، نرخ یادگیری و نرخ فراموشی، برای هر پارامتر ۳ مقدار مشخص شده‌است. این سه مقدار به ترتیب حد پایین عدد فازی، حد وسط عدد فازی و حد بالای عدد فازی می‌باشد.

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

پارامتر فازی	نماد	حد پایین (L)	حد بالا (U)
حداقل تجربه کارگران	LI^1	۲	۳
	LI^2	۳	۴
	LI^3	۴	۵
نرخ بهره‌برداری	LE^1	٪۳۰	٪۳۵
	LE^2	٪۳۵	٪۴۰
	LE^3	٪۴۰	٪۴۵
نرخ خرابی	LF^1	٪۲۰	٪۳۰
	LF^2	٪۳۰	٪۴۰

[2] Marco Dorigo

٪۵۰	٪۴۰	LF^3

پس از وارد کردن اطلاعات در نرم‌افزار GAMS و بهینه‌سازی آن، خروجی مطابق تصویر شماره‌ی ۱ حاصل شده‌است.

```
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
```

تصویر شماره (۱): خروجی GAMS از مسئله اعتبار سنجی

همان‌طور که مشاهده می‌شود پیغام proven optimal solution در نرم‌افزار GAMS ارائه شده که نشان دهنده 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 قابل دست یابی می‌باشد.

جهت درک بهتر خروجی حاصل شده، نتیجه جواب بهینه در جدول شماره‌ی ۳ و ۴ و ۵ ارائه شده‌است. برای طراحی این جداول ابتدا کارگران با شماره‌های ۱ تا ۱۰ شماره گذاری شده اند، سپس در این جداول برای هر روز و هر شیفت شماره کارگرانی که باید در دپارتمان مربوطه مشغول به کار باشند مشخص شده‌است. به عنوان مثال در جدول شماره‌ی ۳ مشخص شده‌است که در دپارتمان ۱ و در شیفت اول روز ۱ کارگران شماره ۳ و ۷ و ۱۰ باید کار کنند.

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

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	۳و۷و۱۰	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 شماره(۴): برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۲ در هر روز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	۱و۴و۹و۱۰	۱و۴و۹و۱۰	۳و۹
روز ۲	۴و۱۰	۳و۴و۹و۱۰	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 شماره(۵): برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۳ در هر روز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	۲ و ۸	۲ و ۸	۴ و ۳
روز ۲	۸و۱	۸و۲	۱و۲
روز ۳	۸و۷	۲و۱	۸و۱
روز ۴	۷و۲	۸و۱	۸و۲
روز ۵	۴و۱	۸و۲	۶و۲
روز ۶	۸و۱	۷و۲	۸و۱
روز ۷	۷و۲	۸و۲	۸و۲

در جداول ۳ تا ۵ اعداد وارد شده در هر سلول نشان دهنده گارگران مشغول به کار در دپارتمان مربوطه و در روز و شیفت مشخص می‌باشد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که خروجی مدل ریاضی تمامی محدودیت‌های مدل را رعایت کرده و در نتیجه صحت اعتبار مدل ریاضی به تایید می‌رسد.

ب – 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 در زمینه 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 این‌روشها، آزمایش‌هایی انجام می‌شود، برای تشخیص پارامترهای طراحی که اثر اغتشاش (عوامل چون دما، فشار یا خطای انسانی را که بر عملکرد موثرند) 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 به منظور مقاومت در برابر (اغتشاش) ایجاد می‌شوند. تابع زیان ایده مهم دیگری است که تاگوچی بیان کرده است و تاثیر بسیار در اندیشه و عمل کیفیت داشته است. این ایده جایگزین دیدگاه سنتی می‌شود که براساس آن محصولات درصورتی که حدهای مشخصات را محقق کنند قابل قبولند. 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 خواهدبود، تاگوچی بر این باور است که زیان متناسب با مربع انحراف از ارزش موردنظر است. محصولی که به مشتری می‌رسد، اگر نتواند کارکرد خود را داشته باشد، زیانی وارد می‌کند. این زیان ازطرف مشتری در هزینه‌های تعمیر و جایگزینی وازطرف 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.

ج– طراحی آزمایشات برای پارامترهای الگوریتم مورچگان

بر اساس ساختار روش تاگوچی ابتدا برای هر یک از پارامترهای الگوریتم مورچگان ۳ مقدار پیشنهاد می‌شود. مقادیر پیشنهادی به شرح جدول شماره‌ی ۶ می‌باشد.

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

الگوریتم مورد بررسی	پارامتر	مقادیر هر سطح		
		Level 1	Level 2	Level 3
مورچگان	Percentage of change pheromone (Pc)	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	Percentage of Movement (Pm)	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵
	Number of Solutions in the Population (N-pop)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰

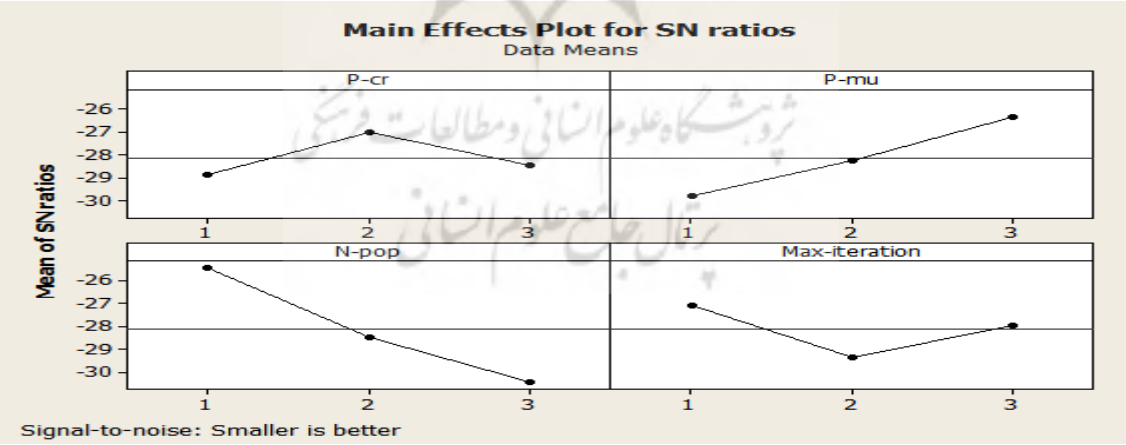
Maximum iteration(Max-iteration)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰

سپس به ازای طرح L9 تاگوچی به ازای حالات زیر الگوریتم مورچگان اجرا شده و خروجی‌های آن در جدول شماره‌ی ۷ ارائه شده‌است.

جدول شماره(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	۲۱/۹۸
۲		۲	۲	۲	۳۳/۷۹
۳		۳	۳	۳	۲۸/۹۱
۴	'	۱	۲	۳	۲۷/۸۳
۵	'	۲	۳	۱	۲۶/۴۷
۶	'	۳	۱	۲	۱۵/۵۵
۷	'	۱	۳	۲	۴۸/۰۵
۸	'	۲	۱	۳	۱۹/۳۴
۹	'	۳	۲	۱	۲۰/۰۲

پس از واردکردن این اطلاعات در نرم‌افزار MINITAB و اجرای روش تاگوچی، نمودار S/N به‌صورت تصویر شماره‌ی ۲ ارائه شده‌است. در این شکل محور افقی سطوح ۱ تا ۳ را نشان می‌دهد و محور عمودی شاخص S/N را نشان می‌دهد. این شاخص توسط تاگوچی ابداع شده‌است و میزان پراکندگی خروجی الگوریتم مورچگان به ازای تغییرات پارامتر مورد نظر 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 مورد نظر کمترین نوسانات را از خود نشان می‌دهد.



تصویر شماره(۲): خروجی روش تاگوچی در الگوریتم مورچگان

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

جدول شماره(۸): مقدار بهینه پارامترهای مورچگان

مقدار بهینه	پارامتر	الگوریتم مورد بررسی
۰/۷	Percentage of change pheromone (Pc)	مورچگان
۰/۰۵	Percentage of Movement (Pm)	
۱۵۰	Number of Solutions in the Population (N-pop)	

Maximum iteration(Max-iteration)	۲۰۰

د- بررسی کارایی الگوریتم مورچگان

در این بخش از نتایج عددی به بررسی کارایی الگوریتم مورچگان پرداخته می‌شود. کارایی الگوریتم بر اساس ۲ مفهوم تعیین می‌شود اولی کیفیت و دومی سرعت در کیفیت، اختلاف مقدار تابع هدف الگوریتم مورچگان با GAMS مقایسه می‌شود و در سرعت زمان حل این دو روش با هم مقایسه می‌شود. به منظور بررسی الگوریتم مورچگان استفاده شده برای این مسئله، این الگوریتم در محیط متلب کدنویسی شده‌است. پس از آن ۱۰ مسئله در ابعاد مختلف تولید شده‌است در تولید این مسائل نمونه ابعاد هر یک از مسائل در جدول شماره‌ی ۹ آورده شده‌است. همچنین سایر پارامتر بر اساس اطلاعات وارد شده در بخش ۶-۱ تولید شده‌است. سایر اطلاعات مسئله در جدول شماره‌ی ۸ نشان داده شده‌است.

جدول شماره (۹): اطلاعات مسئله‌های تولید شده

شماره مسئله	I	J	K	S
PR1	۱۰	۲	۱۰	۵
PR2	۱۵	۲	۱۰	۱۰
PR3	۲۰	۲	۲۰	۱۵
PR4	۴۰	۲	۲۰	۲۰
PR5	۶۰	۲	۳۰	۳۰
PR6	۸۰	۳	۳۰	۴۰
PR7	۱۰۰	۳	۴۰	۵۰
PR8	۱۵۰	۳	۴۰	۶۰
PR9	۲۰۰	۳	۵۰	۷۰
PR10	۳۰۰	۳	۵۰	۸۰

نتایج حاصل از حل دقیق مثال‌های تولید شده با نرم‌افزار GAMS با نتایج حاصل از الگوریتم مورچگان مقایسه شده‌است. از آنجایی که زمان حل نرم‌افزار GAMS برای مسائل با ابعاد بالا بسیار زیاد است محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه یا همان ۱ ساعت برای آن در نظر گرفته شده‌است. لازم به ذکر است چنانچه حل مسئله در نرم‌افزار GAMS زمانی بیش از ۱ ساعت لازم داشته باشد نرم‌افزار GAMS با رسیدن به زمان ۱ ساعت یک جواب موجه(نه الزاما بهینه) را ارائه کرده و اجرای برنامه اتمام می‌یابد. در جدول شماره‌ی ۱۰ خلاصه نتایج مقایسه نرم‌افزار GAMS با الگوریتم مورچگان ارائه شده‌است.

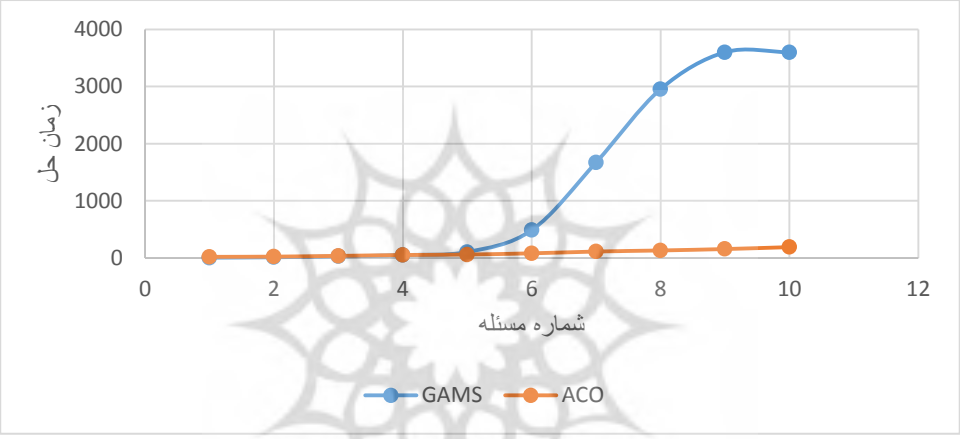
جدول شماره(۱۰): نتایج حل مسائل نمونه با GAMS و الگوریتم مورچگان

شماره مسئله	حل دقیق با نرم‌افزار GAMS		الگوریتم مورچگان		GAP(%)
	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل	
PR1	۸۵۹۳/۰۰	۲/۷	۸۵۶۱/۱۲	۱۸/۱۹	۰/۰۰۳۷۱۰
PR2	۱۲۶۷۸/۰۰	۱۰/۶	۱۱۶۵۹/۹۰	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	۲۵۹۷۶۰/۰۰	۱۶۷۲/۲	۲۳۷۱۱۳/۰۴	۱۱۰/۹۰	۰/۰۸۷۱۸

PR8	۵۴۶۳۷۵/۰۰	۲۹۵۳/۹	۵۴۰۷۲۶/۹۲	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	۲۸۵۳۴۶/۷۴	۸۳/۸۲	۰/۱۱۴۱۱

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود نرم‌افزار GAMS نتوانسته در سه مسئله آخر در کمتر از ۱ ساعت 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.

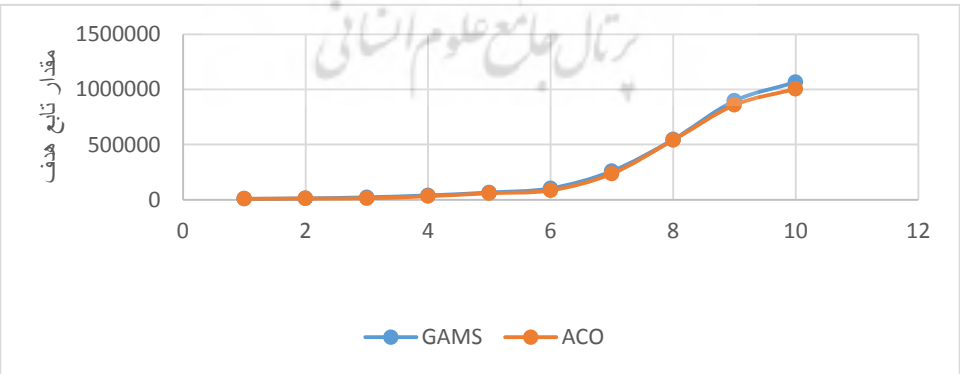
در تصویر شماره‌ی ۳ نمودار سرعت حل هر دو روش نشان داده شده‌است.



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

همان‌طور که مشاهده می‌کنید زمان حل دقیق این مسئله با نرم‌افزار GAMS دارای افزایشی نمایی است که با افزایش ابعاد مسئله زمان حل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این در حالی است که در الگوریتم مورچگان نرخ افزایش زمان حل بسیار کوچک است.

در تصویر شماره‌ی ۴ نمودار تابع هدف به‌دست‌آمده از حل دقیق و حل فراابتکاری مدل نشان داده شده‌است.



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

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

هـ- تحلیل حساسیت تعمیرات و نگه‌داری و بررسی سناریوهای شیفت کاری

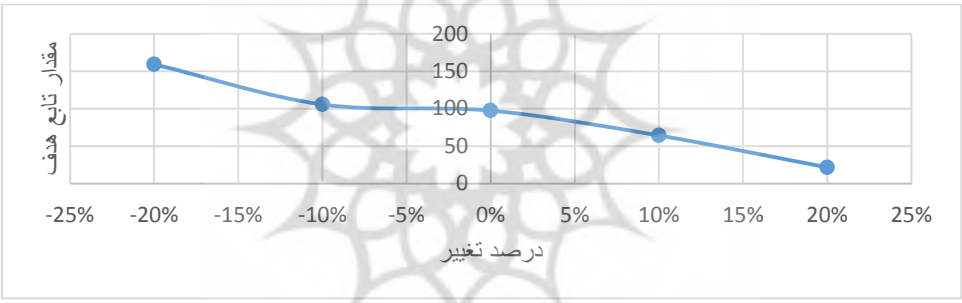
در این بخش از نتایج عددی به بررسی تاثیر دو پارامتر مهم یعنی ضریب افزایش خرابی ماشین آلات قبل از تعمیرات و نگه‌داری و ضریب کاهش خرابی پس از تعمیرات و نگه‌داری پرداخته می‌شود. برای این منظور مقادیر هریک از این پارامترها بین ٪۲۰- تا ٪۲۰+ تغییر داده شده و بر اساس آن مقدار تابع هدف گزارش شده‌است. جدول شماره‌ی ۱۱ و ۱۲ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت این دو پارامتر را نشان می‌دهد. تصاویر شماره‌ی ۵ و ۶ نیز به‌صورت گرافیکی به نمایش تاثیر این دو پارامتر در مدل ریاضی می‌پردازد.

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

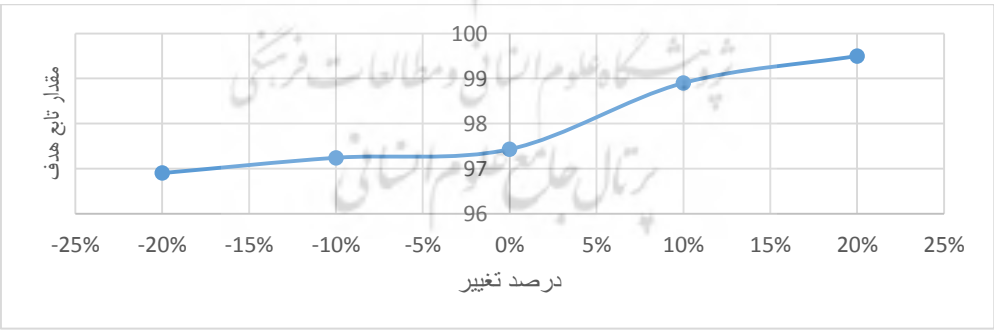
درصد تغییر	-20%	-10%	0%	10%	20%
مقدار تابع هدف	۱۵۹/۲۶	۱۰۵/۶	۹۷/۴۳	۶۴/۲	۲۱/۷۳

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

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



تصویر شماره(۵): تاثیر ضریب افزایش نرخ خرابی بر تابع هدف



تصویر شماره(۶): تاثیر ضریب کاهش خرابی بر تابع هدف

همان‌طور که در جدول شماره‌ی ۱۱ و تصویر شماره‌ی ۵ مشاهده می‌شود با افزایش ضریب خرابی، مقدار تابع هدف به شدت کاهش پیدا می‌کند. طبق روابط مدل با افزایش ضریب خستگی مقدار FG افزایش نمایی پیدا کرده و در نتیجه مقدار تابع هدف به شدت کاهش پیدا می‌کند.از طرفی دیگر مطابق جدول شماره‌ی ۱۲ و تصویر شماره‌ی ۶ با بیشتر شدن ضریب کاهش خرابی با تعمیرات و نگه‌داری مقدار تابع هدف روند افزایشی پیدا می‌کند. با افزایش ضریب کاهش خستگی مقدار RG کاهش یافته و در نتیجه مقدار FG نیز کاهش اندکی خواهد داشت و در نتیجه مقدار تابع هدف افزایش پیدا خواهد کرد. این افزایش نسبت به تغییراتی که در ضریب افزایش خرابی دیده می‌شود به مراتب کمتر است. بنابراین نتیجه می‌شود که ضریب افزایش خرابی تاثیر بیشتری نسبت به ضریب کاهش خرابی در مدل دارد.در گام بعد به منظور بررسی حالات مختلف مدل ریاضی، تلاش شده‌است تا

سناریوهای مختلف طراحی و بهترین آنها انتخاب شود. در همین راستا ۵ سناریو مختلف بررسی شده‌است. این سناریوها مطابق جدول شماره‌ی ۱۳ می‌باشد.

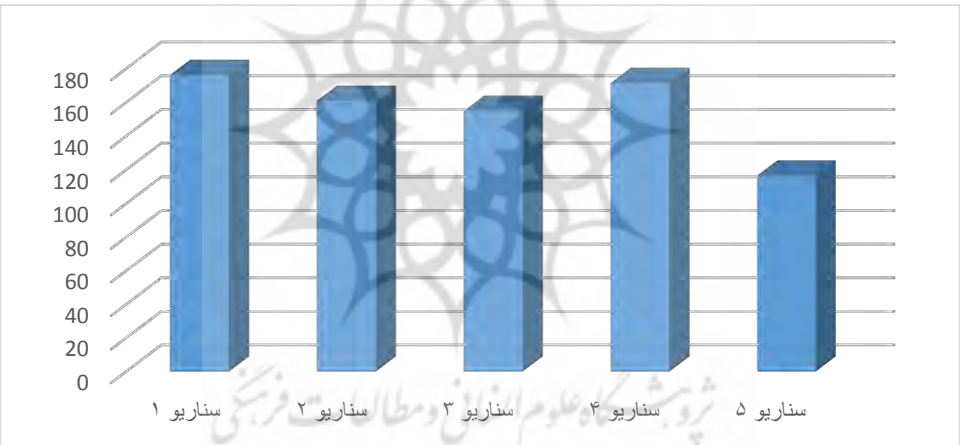
جدول شماره(۱۳): سناریوهای کاری

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

پس از بهینه‌سازی سناریوهای مختلف، مقدار تابع هدف هر سناریو مشخص شده و در جدول شماره‌ی ۱۴ گزارش شده‌است. همچنین نمودار تابع هدف هر سناریو در تصویر شماره‌ی ۷ ارائه شده‌است.

جدول شماره(۱۴): مقدار تابع هدف هر سناریو

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



تصویر شماره(۷): نمودار تابع هدف هر سناریو

همان‌طور که در تصویر شماره‌ی ۷ و جدول شماره‌ی ۱۴ مشاهده می‌شود، سناریو ۱ بیشترین مقدار تابع هدف را دارد. همچنین سناریو ۵ کمترین مقدار تابع هدف را دارد. بنابراین می‌توان سناریو ۱ را به عنوان سناریو برتر و سناریو ۵ را به عنوان بدترین سناریو به مدیران معرفی نمود. در سناریو ۱ دو شیفت کاری ۶ ساعته در یک افق برنامه‌ریزی ۲۰ روزه مد نظر می‌باشد. این در حالی است که با افزایش مدت شیفت‌های کاری 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 ساعت‌های کاری و نیز داشتن افق زمانی معقول، منجر به رسیدن به بهترین عملکرد از سیستم برنامه‌ریزی نیروی انسانی می‌شود.

و– جمع بندی

در این تحقیق ارائه یک مدل ریاضی جدید در خصوص تولید، نگه‌داری و تعمرات و زمان‌بندی نیروی انسانی ارائه شد. در این مدل یک تابع هدف جدید به‌صورت حاصل تقسیم نیروی کار به حجم تولید معرفی شد. در واقع مدل ریاضی هم به دنبال کاهش نیروی انسانی و هم افزایش حجم تولید می‌باشد. در این مدل ریاضی پارامترهای مرتبط با نیروی کار و تعمیرات نگه‌داری به‌صورت اعداد فازی بیان شده و از روش برش فازی برای تبدیل مدل فازی به مدل غیر فازی استفاده شد. برای حل این مدل ریاضی، الگوریتم مورچگان مورد استفاده قرار گرفت که نتایج عددی گویای کارایی این الگوریتم هم در کیفیت جواب‌ها و هم در

سرعت عمل الگوریتم بوده است. نتایج حاصل شده هم در اعتبار سنجی مدل ریاضی و هم حل مسائل عددی مختلف نشان می‌دهد که رویکرد استفاده شده در این تحقیق که مبتنی بر ترکیب حوزه‌های مختلف تصمیم گیری در شرکت‌های تولیدی می‌باشد، می‌تواند منجر به ارائه راهکارهای مناسبی هم برای تولید و هم برای تعمیرات و نگه‌داری و هم برای زمان‌بندی نیروی کار باشد. به منظور توسعه این تحقیق پیشنهاد می‌شود که از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده شده و نیز از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر مانند کرم شب تاب و گرگ خاکستری استفاده شود.

٤-منابع

1. Aghezzaf, E. H., & Najid, N. M. (2008). Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information Sciences*, *178*(17), 3382-3392.
2. Akbari Mohammad, (2017), Scheduling of Temporary Employees with Variable Productivity. *Management Research in Iran*, 21(3), 47-25.
3. Alimian, M., Ghezavati, V., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). New integration of preventive maintenance and production planning with cell formation and group scheduling for dynamic cellular manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, *56*, 341-358.
4. Alimian, M., Saidi-Mehrabad, M., & Jabbarzadeh, A. (2019). A robust integrated production and preventive maintenance planning model for multi-state systems with uncertain demand and common cause failures. *Journal of Manufacturing Systems*, *50*, 263-277.
5. Behnezhad, A. R., & Khoshnevis, B. (1988). The effects of manufacturing progress function on machine requirements and aggregate planning problems. *International journal of production research*, *26*(2), 309-326.
6. Bensmain, Y., Dahane, M., Bennekrouf, M., & Sari, Z. (2019). 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.
7. Berrichi, A., Amodeo, L., Yalaoui, F., Châtelet, E., & Mezghiche, M. (2009). Bi-objective optimization algorithms for joint production and maintenance scheduling: application to the parallel machine problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *20*(4), 389.
8. Ekin, T. (2018). Integrated maintenance and production planning with endogenous uncertain yield. *Reliability Engineering & System Safety*, *179*, 52-61.
9. Ettaye, G., El Barkany, A., & El Khalfi, A. (2017). Modeling and optimization a production/maintenance integrated planning. In *International Journal of Engineering Research in Africa* (Vol. 28, pp. 169-181). Trans Tech Publications Ltd.
10. 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.
11. Goli, A., Tirkolaee, E. B., Malmir, B., Bian, G. B., & Sangaiah, A. K. (2019). A multi-objective invasive weed optimization algorithm for robust aggregate production planning under uncertain seasonal demand. *Computing*, *101*(6), 499-529.
12. Hamrol, A. (2018). A new look at some aspects of maintenance and improvement of production processes. Management and Production Engineering Review, 9.
13. Liao, G. L. (2013). Joint production and maintenance strategy for economic production quantity model with imperfect production processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *24*(6), 1229-1240.

14. Moussawi-Haidar, L., Daou, H., & Khalil, K. (2021). Joint reserve stock and just-in-time inventory under regular preventive maintenance and random disruptions. *International Journal of Production Research*, 1-22.
15. Nourelfath, M., Nahas, N., & Ben-Daya, M. (2016). Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. *Reliability engineering & system safety*, *148*, 21-31.
16. Samimi, E., & Sydow, J. (2020). Human resource management in project-based organizations: revisiting the permanency assumption. *The International Journal of Human Resource Management*, 1-35.
17. 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.
18. Wang, L., Lu, Z., & Ren, Y. (2020). Integrated production planning and condition-based maintenance considering uncertain demand and random failures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *234*(1-2), 310-323.
19. Wang, T., Zhao, Y., & Zhu, X. (2021, January). Advanced Production Plan System of Military Manufacturing Enterprises Based on Linear Programming Model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1732, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
20. Yalaoui, A., Chaabi, K., & Yalaoui, F. (2014). Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information Sciences*, *278*, 841-861.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Providing an Optimal Model of Production Planning, Repairs and Maintenance and Scheduling of Labor in Conditions of Uncertainty and Solving Using the Ant Algorithm

Mohamad Sharifzadegan
PhD Candidate, Industrial Management, Faculty of Management, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran
Tahmourth Sohrabi (Corresponding Author)
Assistant Professor, Faculty of Management, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran
Email: dr.tsohrabi@gmail.com
Ahmad Jafarnejad Chaghoshi
Full Professor, Faculty of Management, University of Tehran, Iran

Abstract
In today's competitive environment, production productivity is a very important and key issue. However, all department of the production unit are interdependent. Rapid response to customer needs, diversity, reliability and cost of equipment and machinery due to the widespread limitations in production resources to be competitive and gain market share in conditions of uncertainty, is needed to make management decisions from Use an integrated format that incorporates important elements. Accordingly, in this study, the integration of three important areas in manufacturing companies has been addressed. These areas include production planning, maintenance, and manpower planning. In this way, a mathematical model with the aim of optimal use of labor and increasing production volume is presented. In this model of workers' experience, machine utilization rate and machine failure rate are expressed uncertainly and with fuzzy numbers. To solveing this model, the ant's meta-innovation algorithm has been used. Numerical results obtained from the implementation in an industrial company show that the algorithm used can provide answers with the least possible error in a reasonable time. Sensitivity analysis also shows that the failure rate of the machine before and after repairs and maintenance has a great impact on the value of the objective function of the mathematical model.

Keywords: Production Planning, Maintenance, Manpower Planning, Mathematical Model, Ant Algorithm.