



Paper Type: Original Article



Provide a Hybrid Model of Two Production Scheduling Objectives, with Limited Resource Approach Preventive Maintenance

Mohamad Sharifzadegan¹, Tahmourth Sohrabi^{1,*}, Ahmad Jafarnejad Chaghoshi²

¹ Department of Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; msh.mis416@gmail.com; dr.tsohrabi@gmail.com.

² Department of Industrial Management, University of Tehran, Tehran, Iran; jafarnejad@ut.ac.ir.

Citation:



Sharifzadegan, M., Sohrabi, T., & Jafarnejad Chaghoshi, A. (2022). Provide a hybrid model of two production scheduling objectives, with limited resource approach preventive maintenance. *Journal of decisions and operations research*, 6 (Spec. Issue), 1-17.

Received: 23/06/2021

Reviewed: 02/08/2021

Revised: 10/11/2021

Accepted: 25/11/2021

Abstract

Purpose: The complex conditions prevailing in the industries and the increasing costs of production equipment and machinery and competitiveness in gaining market share, show the role and importance of production planning and maintenance with other parts of the industry. Integrating such decisions can take fundamental steps to reduce costs and increase quality. Maintaining and creating the continuity of production activities depends on accurate and correct planning of production, maintenance activities and how to support these processes. The need for integration and coherence in the simultaneous planning of such activities causes a lack of rework and parallel work and obstacles and delays and inconsistencies at different levels of production.

Methodology: In this research, a two-objective mathematical model of production planning and repairs with limited resources is presented in conditions of uncertainty.

Findings: The results of comparing accurate and meta-innovative solutions show the improvement in the company's products and the optimal use of material and human resources. Sensitivity analysis also shows that the failure rate of the machine before and after preventive maintenance has a great impact on the value of the objective function of the mathematical model. The results show that the average error of the ant algorithm is only 3%. This is while the average solving time in GAMZ is 45,000 seconds, while the average solving time of the ant algorithm is about 354 seconds.

Originality/Value: This shows that the ant algorithm has a very small amount of error with much less time and therefore the efficiency of this solution method can be well explained.

Keywords: Production planning, Preventive maintenance, Mathematical model, Multipurpose ant system algorithm.

Corresponding Author: msh.mis416@gmail.com

[doi http://dx.doi.org/10.22105/dmor.2021.278207.1343](http://dx.doi.org/10.22105/dmor.2021.278207.1343)



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نوع مقاله: پژوهشی



ارائه مدل ترکیبی دو هدفه زمان‌بندی تولید، با محدودیت منابع ای با رویکرد نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

محمد شریف زادگان^۱، طهمورث سهرابی^{۱*}، احمد جعفرنژاد چقوشی^۲

^۱ گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۲ گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

هدف: شرایط پیچیده حاکم بر صنایع و افزایش روزافزون هزینه‌های تجهیزات و ماشین‌آلات تولیدی و رقابت‌پذیری در کسب سهم بازار، نقش و اهمیت برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات با دیگر بخش‌های صنعت را نشان می‌دهد. یکپارچه‌سازی این‌گونه تصمیمات در راستای کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت می‌تواند گام‌های اساسی را ایجاد نماید. حفظ و ایجاد در تداوم فعالیت‌های تولیدی درگرو برنامه‌ریزی دقیق و صحیح فعالیت‌های تولید و نگهداری و تعمیرات و چگونگی پشتیبانی از این فرآیندها می‌باشد. نیاز به یکپارچگی و پیوستگی در برنامه‌ریزی هم‌زمان این‌گونه از فعالیت‌ها باعث عدم دوباره‌کاری‌ها و موازی‌کاری‌ها و موانع و تاخیرات و ناهماهنگی‌ها در سطوح مختلف تولید می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش: در این تحقیق یک مدل ریاضی دو هدفه برنامه‌ریزی تولید و تعمیرات با محدودیت منابع، در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است.

یافته‌ها: نتایج حاصل از مقایسه حل دقیق و فرا ابتکاری نشان از بهبود در تولیدات شرکت و استفاده بهینه از منابع مادی و انسانی شده است. تحلیل حساسیت انجام‌شده نشان می‌دهد که نرخ خرابی ماشین قیل و پس از نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، تأثیر بسیار زیادی روی مقدار تابع هدف مدل ریاضی دارد. نتایج نشان می‌دهد که متوسط خطای الگوریتم مورچه تنها ۳ درصد می‌باشد. این در حالی است که متوسط زمان حل در گمز ۴۵ هزار ثانیه است در صورتی که متوسط زمان حل الگوریتم مورچه حدود ۳۵۴ ثانیه می‌باشد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم مورچه با صرف زمان بسیار کمتری، مقدار خطای بسیار اندکی دارد و لذا کارایی این روش حل به‌خوبی قابل تبیین است.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم مورچگان چند هدفه، برنامه‌ریزی تولید، مدل ریاضی، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه.

۱- مقدمه

در طی چند دهه گذشته همواره دغدغه‌های فراوانی در ارتباط با تلفیق حوزه‌های مختلف مرتبط با فعالیت‌های تولید وجود داشته است (ارتوگرال و اوزترک^۱، ۲۰۱۹). حوزه‌هایی که هرکدام به‌مثابه قلب تپنده واحدهای تولیدی هستند و باید در تصمیم‌گیری‌های مختلف از آن‌ها

* Ertogral and Öztürk





بهره گرفت. به دلیل اثر متقابل هرکدام از این حوزه‌ها نمی‌توان آن‌ها را به صورت جزیره‌ای بررسی کرد و بسیار مناسب و معقول است. تا سازوکاری را برنامه‌ریزی کرد که بتوان تمام عوامل مهم را تا جای امکان باهم 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 موردنظر به صورت زنجیره به یکدیگر متصل است و تصمیم‌گیری در هر قسمت اثرات خود را بر روی بخش‌های دیگر نمایان می‌کند (لیو و همکاران^۱، ۲۰۱۹). پیشرفت‌های اخیر در یکپارچه‌سازی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موجب اتصال مباحث مقدار تولید اقتصادی^۲ و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (سنا^۳، ۲۰۱۲)، کنترل هم‌زمان نرخ تولید، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه شده است (بریچی و همکاران^۴، ۲۰۰۹). از طرف دیگر تحقیقاتی که به یکپارچه‌سازی تولید و برنامه‌ریزی نت پرداخته‌اند، به بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ برمی‌گردد. تحقیقات در این دوره بیشتر بر روی چند اثر حیاتی متمرکز بوده است که عبارت‌اند از اثر پیچیدگی تولید و فناوری، سرعت عملیات، برنامه‌ریزی راه‌اندازی و طراحی تلورانس‌ها با در نظر گرفتن زوال کیفیت و یا تأثیر برنامه‌ریزی بازرسی کیفیت بر روی جریان تولید و همچنین برخی از پژوهش‌ها بر روی یکپارچه‌سازی تولید، کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن استهلاک سیستم تمرکز داشته‌اند (بوصلاح و همکاران^۵، ۲۰۱۶). در واقع تعداد معدودی از پژوهش‌ها منتشر شده سه جنبه تولید، کیفیت و نگهداری و تعمیرات را باهم در نظر گرفته‌اند. از طرفی دیگر، 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 دوره زمانی که بررسی می‌شود مقداری استهلاک پیدا کند، یکی از روش‌های مؤثر برخورد با چنین پدیده‌های 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 تولیدشده 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 (هامرول^۶، ۲۰۱۸).

تا دهه ۱۹۶۰ اغلب افراد بر این باور بودند که هر چیزی کالا یا سیستم زمان مناسبی برای انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه دارد که عموماً شامل جایگزینی قطعات یا تعمیرات اساسی است. عقیده بسیاری از افراد بر این باور بود که با انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌توان تناوب خرابی یک کالا در حین انجام عملیات را کاهش داد (دیلون^۷، ۱۹۹۹). در بیشتر موارد دیده می‌شود که نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اثرات مفیدی بر کارکرد سیستم ندارد و همچنین در بسیاری از موارد نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه باعث بدتر شدن وضعیت کارکردی اشیاء می‌شود چراکه باعث ایجاد فرصت بیشتری برای خرابی‌های تحمیلی به واسطه انجام عملیات نگهداری و تعمیرات می‌گردد. در این دوران گروه نگهداری و تعمیرات ناوگان هوایی ایالات متحده با توجه به این مشاهدات موضوع نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را مورد مطالعه قرارداد. نتایج مطالعه نشان می‌داد که نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه فقط برای اقلامی که الگوی معینی از خرابی‌ها را دارا هستند مفید است (اسمیت و هاوکینز^۸، ۲۰۰۴). با توجه به کاستی‌های موجود آن‌ها رویکردی منطقی برای تعیین اینکه آیا نوع مناسبی از نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای یک کالای موردنظر اثربخش است یا خیر ارائه کردند که عبارت از نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به آن اطلاق شد (موبری^۹، ۱۹۹۷).

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 به منظور دستیابی به نحوه استفاده بهینه از منابع سیستم است. 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 استفاده بهینه از منابع سازمان اعم از منابع انسانی، تجهیزات، منابع مالی و ... را به دنبال خواهد داشت (اکین^{۱۰}، ۲۰۱۸)؛ بنابراین، چالش جدی شرکت‌های تولیدی در زمینه برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، هم‌راستایی فعالیت‌های تولیدی و تعمیراتی می‌باشد که زمان‌بندی و برنامه‌ریزی‌های مربوط به تولید را تحت شعاع اجرایی خود قرار داده است و هم‌راستایی اقدامات اجرایی را به چالش جدی سازمان‌های تولید محور کشانده

¹ Liu et al.

² Economic Production Quantity (EPQ)

³ Sana

⁴ Berrichi et al.

⁵ Bouslah et al.

⁶ Hamrol

⁷ Dhillon

⁸ Smith and Hawkins

⁹ Moubray

¹⁰ Ekin



است به گونه‌ای که عدم هم‌راستایی فعالیت‌های نگهداری سبب می‌شود تا به دلیل خرابی دستگاه‌های تولیدی، فرآیند تولید متوقف شده و ضرر فراوانی به سازمان تحمیل کند. نکته دیگری که حائز اهمیت است آن است که در اکثر مسائل زمان‌بندی تولید و تعیین اندازه انباشته، سیستم تولیدی به صورت 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 (گلی و همکاران^۱، ۲۰۱۹).

با توجه به اهمیت در دسترس بودن سیستم تولیدی و تأثیری که برنامه نگهداری و تعمیرات بر عملکرد سیستم دارد، همچنین، با توجه به لزوم توسعه مدل ریاضی زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، مهم‌ترین سهم مشارکت این تحقیق عبارت است از:

- ارائه یک مدل ریاضی جدید به منظور برنامه‌ریزی تولید و نگهداری تعمیرات پیشگیرانه و نیروی کار و قابلیت کل سیستم.
- استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری کارآمد برای حل مسئله موجود در ابعاد بزرگ.

همچنین مهم‌ترین مفروضاتی که در این تحقیق به آن توجه شده است نیز عبارت‌اند از:

- حفظ کارایی کالا با استفاده از نگهداری و تعمیرات.
- رویکرد ارائه‌شده بر کارکرد یک سیستم متمرکز می‌شود نه اجزاء آن.
- نرخ خرابی ماشین بر طبق رویکرد نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته شده مبنای تصمیم‌ها است.
- رویکرد نگهداری و تعمیرات یک فرآیند پیوسته است.

در ادامه این مقاله به صورتی که مشخص می‌شود سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲ به بررسی جدیدترین تحقیقات مربوطه پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مدل ریاضی پیشنهادی تحقیق و جزئیات مربوط به آن ارائه شده است. در بخش ۴ رویکرد عدم قطعیت فازی بکار گرفته شده در این تحقیق معرفی شده است. در بخش ۵ روش حل مدل ریاضی ارائه می‌شود؛ و سرانجام، در بخش ۶ نتایج عددی حاصل از بهینه‌سازی مدل ریاضی ارائه شده و در نهایت و در بخش ۷ یک نتیجه‌گیری از تحقیق و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

لیائو^۲ (۲۰۱۳)، در پژوهشی مسئله ادغامی زمان‌بندی تولید و تعمیرات ناکامل برای سامانه تک ماشین را بررسی نمود. در این مقاله تعمیرات پیشگیرانه دوره‌ای ناکامل و سامانه دوره‌ای کامل تعمیرات اساسی به صورت ادغامی برای حداقل کردن هزینه‌های تولید و تعمیرات توسعه داده شده است. هدف از این پژوهش تعیین مدت زمان دوره نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و همچنین دوره تعمیرات اساسی سامانه موردنظر با هدف کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است. نتایج نشان داد که تولید بهینه و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بهینه با یکدیگر در ارتباط هستند. یالاوی^۳ (۲۰۱۴)، مدل بسط داده‌شده‌ای 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 در نظر گرفتن استهلاک و زوال خطوط تولید است. همچنین فرض شده است که عملیات نگهداری و تعمیرات وضعیت عملیاتی دستگاه‌ها را به خوبی روز اول برمی‌گرداند. نورالفتح و همکاران^۴ (۲۰۱۶)، به یکپارچه‌سازی تولید، نگهداری و تعمیرات و کیفیت یک فرآیند ناکامل در سیستم چندتولیدی - چند دوره‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در مدل ارائه شده، سیستم تولیدی به عنوان یک دستگاه ناکامل که وضعیت آن‌ها را به عنوان حالت کنترلی و غیر کنترلی است، در نظر گرفته شده است. هدف اصلی مدل کمینه کردن تمام هزینه‌ها، هم‌زمان با برآورده کردن تمام تقاضاها است. در این مدل‌سازی، کم کردن هزینه‌های جاری، هزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌های استرداد، هزینه‌های تولیدی و تنظیم و هزینه‌های نگهداری مورد توجه قرار گرفته شده. مدل آن‌ها برهم‌کنش بین کیفیت، تولید و پارامترهای نگهداری را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین، این مدل برای پیدا کردن بهترین حالت بین

¹ Goli et al.

² Liao

³ Yalaoui et al.

⁴ Nourelfath et al.



هزینه‌ها، کارایی بالایی دارد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از این پژوهش بیان می‌دارد 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 نشود، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه انجام‌شده توجیه‌پذیر نیست. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل به وجود رابطه‌ی قوی بین تولید، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و کیفیت صحه می‌گذارد. اتای و همکاران^۱ (۲۰۱۷)، مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه نگهداری و تعمیرات و تولید با سامانه‌ی جایگزینی پیش‌گیری دوره‌ای با تعمیرات حداقلی (نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه) در برابر خرابی‌های برنامه‌ریزی نشده را مورد مطالعه قرار داده‌است. مدل توسعه داده‌شده توسط اتای و همکاران از هزینه‌ی کل، با در نظر گرفتن وابستگی بین برنامه نگهداری و زمان‌بندی تولید انجام‌شده است. در مدل آن‌ها، هزینه‌ی کلی شامل دو بخش هزینه‌های راه‌اندازی تولید محصول، تولیدات، انبارداری و هزینه‌های اختلال در برآورده سازی تقاضا، نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی برای سامانه‌ی چند دوره‌ای و چند محصولی است. هدف اتای و همکاران پیدا کردن بهترین سیکل در تعمیر پیشگیرانه و معین کردن اندازه‌ی بهینه‌ی دسته با افزودن محدودیت زمان راه‌اندازی به آن بوده است. به دلیل پیچیده بودن مسئله، حل دقیق آن، زمان بالایی نیاز دارد که از این رو به این نتیجه رسیدند که با روش‌های تقریبی در زمان حل منطقی به پاسخ‌های مناسب دست پیدا کنند. 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. هامرول (۲۰۱۸)، در پژوهش خود به ارائه روش‌های مختلف برای حفظ و بهبود فرآیندهای تولید، هماهنگی اجرایی سیستم‌ها، درک و کاربرد عملی آن‌ها پرداخته است. او بر اساس مشاهدات خود بیان نمود که استفاده بیشتر و کارآمدتر از روش‌های بهبود، همچون مدیریت کیفیت جامع، شش سیگما، تولید ناب و سایر استراتژی‌های تعمیر و نگهداری فرآیندها و بهبود فعالیت‌های روزانه‌ی شرکت‌ها باعث افزایش میزان تولید و کاهش هزینه‌های سازمان می‌شود. چریبر و همکاران^۲ (۲۰۱۸)، در پژوهش خود به شرکت‌های تولیدی که همواره با افزایش هزینه‌های تولید و الزامات بازدهی به‌طور مداوم مواجه است، اشاره کرد. یکی از راه‌های غلبه بر این چالش‌ها، ارتقای بهره‌وری و اثربخشی تعمیر و نگهداری با توسعه و یکپارچه‌سازی ابزارهای پیش‌بینی‌کننده‌ی نگهداری و استفاده از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی هدفمند با اقدامات تعمیر و نگهداری است. با این حال، ادغام سنسورها به منابع تولیدی نصب‌شده قبلاً برای پیش‌بینی وظایف تعمیر و نگهداری مورد نیاز، یکی از چالش‌های مهم شرکت‌های تولیدی بود. بنابراین، در این مقاله، یک روش نوآورانه برای ابزارهای پیش‌بینی‌کننده‌ی نگهداری به‌عنوان خدمات ابرهوشمند و کاربرد صنعتی این روش برای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری یکپارچه ارائه شده است. گلاوار و همکاران^۳ (۲۰۱۸)، یک مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و کنترل نگهداری پیش‌گیرانه ارائه کردند. در این مدل انعطاف‌پذیری 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. اکین (۲۰۱۸)، عملکرد عوامل نامشخص درون‌زا را در یکپارچه‌ی تولید و نگهداری تعمیرات مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور آن‌ها یک مدل تصمیم‌گیری 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 توازن بین به‌کارگیری ماشین‌ها و برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری آن، باید برقرار باشد. بنسی من و همکاران^۴ (۲۰۱۹)، یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی تعمیرات پیش‌گیرانه با در نظر گرفتن نقش تجهیزات تعمیرات نگهداری و نیز عملکرد نامناسب تولید معرفی کردند. در این مدل، هزینه‌های عمر محصول به‌طور کامل به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. برای بهینه‌سازی این مدل ریاضی از یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته استفاده شده که نتایج آن حاکی از کارایی بالای این روش حل دارد. 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 علف‌های هرز چندهدفه مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های حل استفاده‌شده کارایی بالایی دارند.

ژنگ و همکاران^۵ (۲۰۲۰)، به یکپارچه‌سازی زمان‌بندی تولید و نگهداری تعمیرات با رویکرد کیفیت محصول پرداخته‌اند. در این خصوص زمان‌بندی تک ماشین به در نظر گرفتن خرابی‌ها در حین تولید و تعمیرات آن بهینه‌سازی می‌شود. برای این موضوع، الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. وانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۰)، از روش نگهداری تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر شرایط استفاده کرده و با برنامه‌ریزی تولید

¹ Ettaye et al.

² Schreiber et al.

³ Glawar et al.

⁴ Bensmain et al.

⁵ Zheng et al.

⁶ Wang et al.



ترکیب کرده‌اند. در این تحقیق خرابی‌های ماشین و نیز تقاضای مشتریان به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. برای حل این مسئله از ترکیب بهینه‌سازی- شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج ارائه شده نشانگر برتری روش پیشنهادی تحقیق با سایر روش‌های مشابه می‌باشد. نمونه‌ی دیگری از این محققین مانند وانگ و همکاران^۱ (۲۰۲۱)، نیز ارائه شده است که در آن از مدل‌سازی خطی عدد صحیح و از روش تحلیل سناریو برای بهینه‌سازی آن استفاده شده است.

در ادامه به تأثیر فاکتور مدیریت نیروی انسانی و تعمیرات و نگهداری را در سازمان‌های پروژه محور مورد مطالعه قرار داده‌اند. برای مثال، صمیمی و سیدو^۲ (۲۰۲۰)، در مطالعه خود ضمن مرور تحقیقات مختلف در زمینه مدیریت نیروی انسانی پرداخته شده است. سپس تأثیر آن بر تعمیرات و نگهداری در سازمان‌های پروژه محور مطالعه و ارزیابی شده است. نتایج گویای این مهم است که مشکلات نیروی انسانی می‌تواند به طور بالقوه عملکرد سازمان را در جنبه‌های مختلف دچار مشکل کند. در نهایت، میشرا و همکاران^۳ (۲۰۲۱)، نت پیشگیرانه گروهی را بر روی چند سری از خط تولیدها بهینه‌سازی کرده‌اند. در این تحقیق تعداد بهینه قطعات در هر بار نت به گونه‌ای تعیین می‌شود که کل هزینه‌های تولید و نگهداری حداقل شود. برای این منظور یک الگوریتم فرا ابتکاری بانام الگوریتم مبتنی بر آموزش یادگیری (TLBO) استفاده شده است.

در جدول ۱ به مرور تحقیقات انجام شده پرداخته شده است.

جدول ۱- مرور تحقیقات.
Table 1- Research review

محقق / محققین	سال	زمانبندی تولید	نگهداری تعمیرات	زمانبندی نیروی کار	قطعی	غیر قطعی	روش دقیق	روش فرا ابتکاری
لیانو	۲۰۱۳	✓	✓		✓		✓	
یالایویی و همکاران	۲۰۱۴	✓	✓		✓		✓	
نورالفتح و همکاران	۲۰۱۶	✓	✓			✓		
اتای و همکاران	۲۰۱۷	✓	✓		✓		✓	
اکین	۲۰۱۸		✓			✓		✓
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	✓	✓		✓		✓	
میشرا و گوپتا	۲۰۲۱	✓	✓		✓		✓	
پژوهش حاضر	۲۰۲۱	✓	✓	✓		✓	✓	✓

بر طبق مطالب اشاره شده در بالا پس از بررسی و تحلیل تحقیقات مختلف که در جدول ۱ نیز به خوبی قابل تبیین شده است، مشخص شده است که مهم‌ترین شکاف تحقیقاتی این حوزه در یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، نگهداری و تعمیرات و نیز برنامه‌ریزی نیروی انسانی می‌باشد. این در حالی است که در شرایط واقعی، تمامی این سه حوزه به یکدیگر ارتباط داشته و می‌توانند عملکرد کلی شرکت تولیدی

¹ Wang et al.

³ Mishra et al.

² Samimi and Sydow



را مشخص کنند. به همین مهم‌ترین سهم مشارکت این تحقیق، ارائه یک مدل ریاضی یکپارچه جدید که قادر است به طور هم‌زمان مسئله برنامه‌ریزی تولید، نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی نیروی انسانی را در نظر بگیرد. همچنین در هیچ‌یک از تحقیقات مربوطه از الگوریتم‌های فرا ابتکاری که قادر به حل مسائل چند هدفه باشند مانند الگوریتم مورچگان استفاده نشده است.

۳- مدل پیشنهادی

در این تحقیق باهدف برنامه‌ریزی نیروی انسانی، مسئله به صورت زیر تعریف می‌گردد: کارخانه‌ای را در نظر بگیرید که دارای M ماشین یا دیپارتمان مشخص است. قرار است در طی I روز برنامه زمان‌بندی کارکنان این ماشین‌آلات مشخص شود. هر روز از T شیفت کاری با تعداد ساعت مشخص تشکیل شده است. تعداد کارکنان نیز مقداری مشخص و برابر K می‌باشد.

هر یک از ماشین‌ها دارای یک نرخ خرابی مشخص است که لازم است برای هر نوبت عملیات نگهداری و تعمیرات روی آن انجام شود. بر اساس نرخ خرابی و نیز نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، نرخ تولید ماشین در قبل و بعد از انجام نگهداری و تعمیرات متفاوت خواهد بود. بدیهی است انجام این تعمیرات پیشگیرانه منجر به افزایش نرخ تولید ماشین‌ها می‌شود. در خصوص تخصیص نیروها به ماشین‌ها، در هر نوبت کمترین تعداد کارکنان بایستی در نظر گرفته شود.

فرضیات مسئله به صورت زیر بیان می‌شوند:

- نوبت‌های کاری از قبل تعیین شده می‌باشد.
- اگر فردی در نوبت شب کار کند مجاز به کار کردن در نوبت صبح فردا نیست.
- هر فرد حداکثر ۲ روز متوالی می‌تواند مرخصی باشد (مرخصی‌های غیر متوالی از این شرط مستثنی است).
- اگر فردی نوبت صبح و بعد از ظهر را کارکرد حتماً باید نوبت 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 تأثیر گذاشته و نرخ انجام کار توسط او را کاهش می‌دهد.
- خرابی تمام قطعات از مابقی مستقل می‌باشد.
- سیستم قابلیت تعمیر پذیری دارد، عمر تجهیزات با استفاده زیاد از آن‌ها با کاهش قابلیت اطمینان مواجه می‌شود.

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 به صورت فازی در نظر گرفته می‌شود. هدف ارائه برنامه‌ای جهت زمان‌بندی کارکنان است که ضمن برآورده کردن شرایط فوق بیش‌ترین تولید را با به‌کارگیری 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 ($i \in I$).

T : مجموعه تمام شیفت‌های کاری.

t, T : اندیس شیفت کاری ($t \in T$).

K : مجموعه تمام کارکنان.

k, k' : اندیس کارکنان ($k, k' \in K$).

M : مجموعه دپارتمان‌ها (ماشین‌آلات).

m : اندیس ماشین ($m \in M$).

پارامترها.

M_{itm} : حداقل تعداد کارکنان موردنیاز در شیفت t از روز i برای کار در دپارتمان m .

LL_{km} : حداقل تجربه کارگر k برای کار در دپارتمان m (برحسب میزان تولید) که به صورت یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود.

KI_m : حداکثر کارایی ماشین در دپارتمان m در شرایط ایده آل (برحسب میزان تولید).

LE_m : نرخ بهره‌برداری از ماشین در دپارتمان m که به صورت یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود.

LF_m : نرخ خرابی ماشین در دپارتمان m که به صورت یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود.

FG_{tm} : نرخ تولید ماشین در دپارتمان m در طی شیفت t قبل از زمان نگهداری و تعمیرات.

RG_{tm} : نرخ تولید ماشین در دپارتمان s در طی شیفت t بعد از زمان نگهداری و تعمیرات.

λ : ضریب افزایش خرابی در دوره فعالیت و انجام کار.

λ_m : نرخ خرابی قبل و بعد از انجام نت در شیفت T برای ماشین m .

$\bar{\lambda}_m$: نرخ خرابی بعد از انجام نت در شیفت T برای ماشین m .

μ : ضریب کاهش خرابی در دوره استراحت، این خرابی مربوط به زمانی می‌شود که ماشین در حال استفاده نمی‌باشد اما آماده‌به‌کار است که ممکن است به دلیل نوسانات برقی یا غفلت و کم‌تجربگی کارگر دچار خرابی نامترقبه شود.

δ_t : طول مدت شیفت t .

U : حداکثر روزهای کاری یک کارگر در افق برنامه‌ریزی.

L : حداقل روزهای کاری یک کارگر در افق برنامه‌ریزی.

n : تعداد روزهای افق برنامه‌ریزی.

m : سقف تعداد شیفت‌های شب هر کارگر R قابلیت اطمینان کل سیستم.

متغیرهای تصمیم.

X_{itkm} : متغیر صفر و یک نشان‌دهنده این‌که آیا در روز i و شیفت t کارگر k در بخش m مشغول به کار است یا خیر.

Q_{itkm} : میزان تولید انجام‌شده در روز i و شیفت t کارگر k در بخش m .





$$\text{Min } Z1 = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \frac{X_{itkm}}{FG_{tm} Q_{itkm}}. \quad (1)$$

$$Z2 = \text{Max } R. \quad (2)$$

$$FG_{tm} = 1 - e^{-\lambda \delta_t}, \quad \forall t \in T, m \in M \quad (3)$$

$$RG_{tm} = FG_t e^{-\mu b_t}, \quad \forall t \in T, m \in M \quad (4)$$

$$FG_{t+1m} = RG_t + (1 - RG_t)(1 - e^{-\lambda \delta_{t+1}}), \quad \forall t \in T, m \in M \quad (5)$$

$$Q_{itkm} = LI_{km} + KI_{sm} \left[1 - \exp\left(\frac{-1}{LE_m} X_{itkm}\right) \right] \times \exp\left(\frac{1}{LF_m} X_{itkm}\right), \quad (6)$$

$$\forall i \in I, t \in T, k \in K, m \in M$$

$$\sum_{k \in K} X_{itkm} \geq M_{itm}, \quad \forall i \in I, t \in T, m \in M \quad (7)$$

$$\sum_{t \in J} \sum_{m \in S} X_{itkm} + Y_{ik} = 1, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (8)$$

$$L \leq \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} X_{itkm} \leq U, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M} X_{itkm} + X_{(i+1)t'km} \leq 1, \quad \forall i \in I: i < n, t = 3, t' = 1, k \in K \quad (10)$$

$$Y_{ik} + \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} X_{(i+1)tkm} + Y_{(i+2)k} \leq 2, \quad \forall i \in I: i \leq n-2, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} X_{itkm} + \sum_{m \in M} X_{(i+1)tkm} + \sum_{m \in M} X_{(i+2)tkm} \leq Y_{(i+3)k} + 2 \quad \forall k \in K, t = 3, i \in I: i \leq n-3 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} X_{itkm} \leq n', \quad t = 3, \forall k \in K \quad (13)$$

$$R = 1 - e^{-\sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \lambda'_{tm} \lambda''_{tm}}, \quad \forall m \in M, t \in T; \lambda''_{tm} \leq \lambda'_{tm}. \quad (14)$$

رابطه‌ی (۱) تابع هدف اول مدل ریاضی را مطرح می‌کند که کمینه‌سازی نیروی کار تقسیم‌بر کارایی تولید می‌باشد. این تابع هدف سعی دارد با در نظر گرفتن پارامترهای نرخ تولید، نرخ خرابی و تجربه کارگران بهترین خروجی لازم را در دپارتمان‌های مختلف داشته باشد. **رابطه‌ی (۲)** تابع هدف دوم مدل است که به دنبال افزایش قابلیت اطمینان هستیم **رابطه‌ی (۳)** میزان تولید را برحسب تابع‌نمایی از مدت‌زمان شیفت کاری و ضریب خرابی محاسبه می‌کند (اکبری^۱، ۲۰۱۷). **رابطه‌ی (۴)** میزان تولید بعد از تعمیرات و نگهداری را محاسبه می‌کند که این خرابی به‌صورت‌نمایی کاهش پیدا می‌کند و به مدت‌زمان تعمیرات و نگهداری وابسته است (جابر و همکاران^۲، ۲۰۱۳). **رابطه‌ی (۵)** میزان تولید برای شیفت بعدی را محاسبه می‌کند. در این رابطه میزان نرخ خرابی در دوره قبل مؤثر است و به‌صورت‌نمایی این خرابی افزایش پیدا می‌کند (صمیمی و سیدو، ۲۰۲۰). **رابطه‌ی (۶)** میزان تولید توسط هر کارگر در هر دپارتمان را برحسب خرابی، نرخ بهره‌برداری و نیز تجربه کارگران محاسبه می‌کند. **رابطه‌ی (۷)** تضمین می‌کند که حداقل کارگر موردنیاز در هر دپارتمان در هر شیفت فراهم شود. **رابطه‌ی (۸)** بیان می‌کند که هر کارگر در هر شیفت یا مشغول به کار است و یا در مرخصی به سر می‌برد. **رابطه‌ی (۹)** بیان می‌کند که هر کارگر باید بین حداقل و حداکثر تعداد روز مجاز، در مجموعه مشغول به کار باشد. **رابطه‌ی (۱۰)** بیان می‌کند که افرادی که در شیفت شب ($t=3$) کار می‌کنند اجازه کار کردن در شیفت صبح ($t=1$) روز بعد را ندارند. **رابطه‌ی (۱۱)** یک کارگر حداکثر ۲ روز متوالی می‌تواند در مرخصی باشد. **رابطه‌ی (۱۲)** بیان می‌کند که اگر فردی در شیفت صبح و بعدازظهر کارکرد حتماً باید شیفت شب را در مرخصی باشد. **رابطه‌ی (۱۳)** بیان می‌کند که هر کارگر حداکثر به تعداد n' می‌تواند در شیفت شب کار کند. **رابطه‌ی (۱۴)** قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه می‌کند.

۳-۱- عدم قطعیت فازی

همان‌طور که در تشریح مدل مشخص شده است، در این مدل سه پارامتر مهم و اثرگذار وجود دارد. این پارامترها شامل حداقل تجربه کارگران، نرخ خرابی و نرخ بهره‌برداری می‌باشد. چون مقدردهی به این پارامترها دارای قواعد مشخصی نمی‌باشد و همچنین، دارای



اطلاعات غیردقیق، ناواضح و مبهم هستند و با توجه به اینکه مقادری در این تحقیق بر اساس متغیرهای زبانی مبتنی بر جملات انسانی قابل قبول به جای اعداد استفاده شده است از نیروی انسانی برای عدد دهی مطابق با منطق فازی استفاده شده است. در چنین شرایطی، نظر افراد می توان متفاوت و متغیر باشد. بر همین اساس ضروری است تا عدم قطعیت در این پارامترها مدنظر قرار گیرد. در این پژوهش برای پارامترهای نرخ بهره برداری، نرخ خرابی و حداقل تجربه کارگران، عدم قطعیت فازی مثلثی در نظر گرفته شده است.

۴- روش های حل مدل ریاضی

به منظور بهینه سازی مدل ریاضی تحقیق، با توجه به دوهدفه بودن آن، از روش های معیار جامع (*LP metric*) و همچنین الگوریتم مورچگان چند هدفه استفاده می شود. در ادامه به تشریح مبانی نظری این روش ها پرداخته می شود.

۴-۱- روش معیار جامع

برای حل مسائل تصمیم گیری چندهدفه^۱ و موازنه اهداف روش های متعددی در ادبیات ارائه شده است. روش *LP metric* بر اساس نرم های مختلف حالت کلی روش هایی همچون روش آرمانی وزنی، آرمانی فازی (*minimax*) و غیره است که با تغییر در مقدار نرم p حالت های مختلفی را بیان می کند.

$$p=1 \text{ و } p=2 \text{ و } p=\text{inf}$$

در حالت کلی، یک مسئله *MODM* به صورت زیر قابل بیان است (البته ممکن است برخی از اهداف بهینه سازی نیز باشند ولی به سادگی قابل تبدیل به صورت زیر هستند):

$$\text{Min} (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad x \in X. \quad (15)$$

فرض کنید مقدار بهینه هر یک از اهداف $i = 1, 2, \dots, n$ برابر با f_i^* باشد. در مسائل واقعی *MODM*، با توجه به تناقض^۲ بین اهداف، معمولاً جواب $x^* \in X$ وجود ندارد که به ازای آن همه اهداف در حالت بهینه قرار گیرند ($f_i^* = f_i(x^*)$). از این رو، اگر A یک روش حل باشد و جواب x^A به عنوان خروجی آن حاصل شود، آنگاه این روش A زمانی کارایی بیشتری داشته است که $f_i(x^A)$ فاصله کمتری نسبت به f_i^* داشته باشد.

به عبارت دیگر، بر اساس معیار انحراف از ایده آل (*MID*^۳)، اگر جواب $F^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ به عنوان جواب ایده آل در نظر گرفته شود، آنگاه هر چه جواب $F^A = (f_1(x^A), f_2(x^A), \dots, f_n(x^A))$ از جواب F^* فاصله کمتری داشته باشد، عملکرد روش A و پاسخ آن بهتر است.

اما اینکه فاصله F^A از F^* به چه صورت تعریف شود، اساس تعریف روش *LP* متریک است. در واقع، در روش *LP* متریک، p به عنوان نرم اندازه گیری فاصله در نظر گرفته می شود و فاصله با نرم p به صورت زیر تعریف می شود:

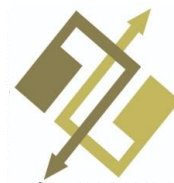
$$\text{Norm}_p(F^*, F^A) = |F^* - F^A|_p = \left(\sum_{i=1}^n (f_i^* - f_i(x^A))^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (16)$$

هر چه $|F^* - F^A|_p$ کمتر باشد، روش A با ارزش تر است. لازم به توضیح است که اگر اهداف نسبت به یکدیگر از درجه اهمیت مختلفی برخوردار باشند، آنگاه رابطه (۱۶) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\text{Norm}_p(F^*, F^A) = |F^* - F^A|_p = \left(\sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_i(x^A))^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (17)$$

² Conflict

³ Mean of Ideal distance



که در آن w_i وزن یا اهمیت نسبی هر هدف را نشان می‌دهد (که معمولاً توسط تصمیم‌گیرنده از پیش مشخص می‌شود). در روش Lp متریک، به ازای برخی از p ها، مدل‌های شناخته‌شده‌ای حاصل می‌شود که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. اگر در روش Lp متریک $p=1$ قرار دهیم، آنگاه مدل قدر مطلق زیر حاصل می‌شود:

$$|F^* - F^A|_{p=1} = \sum_{i=1}^n w_i |f_i^* - f_i(x^A)|. \quad (18)$$

که با توجه به آنکه $f_i^* \leq f_i(x^A)$ است، به صورت خطی زیر نیز قابل بیان است:

$$|F^* - F^A|_{p=1} = \sum_{i=1}^n w_i (f_i(x^A) - f_i^*). \quad (19)$$

و به آن روش مجموع وزنی (WSM^1) می‌گویند.

اگر در روش Lp متریک $p=2$ قرار دهیم که به نرم/فاصله اقلیدسی نیز معروف است، آنگاه مدل زیر حاصل می‌شود:

$$|F^* - F^A|_{p=2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_i(x^A))^2}. \quad (20)$$

که برای سادگی می‌توان مجذور فاصله را در نظر گرفت که به صورت زیر بوده

$$|F^* - F^A|_{p=2}^2 = \sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_i(x^A))^2, \quad (21)$$

و یک مدل درجه دوم محدب^۲ حاصل می‌شود که می‌توان پاسخ بهینه سرا سری آن را به دست آورد. لازم به توضیح است که در فاصله با $p=2$ نسبت به $p=1$ به انحراف از بهینگی هر هدف توجه بیشتری دارد. به عبارت دیگر، گرچه ممکن است در حالت $p=2$ مجموع انحرافات بیشتر شود، اما انحراف از بهینگی هر هدف، نسبت به $p=1$ کمتر است.

در یک فاصله معروف دیگر، اگر در روش Lp متریک قرار دهیم $p \rightarrow \infty$ آنگاه مدل معروف زیر حاصل می‌شود:

$$|F^* - F^A|_{p=\infty} = \max\{i | w_i (f_i(x^A) - f_i^*)\}. \quad (22)$$

که بیشینه انحراف از بهینگی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در این حالت که به آن مدل $minimax$ نیز گفته می‌شود، بیشترین انحراف از بهینگی کمینه می‌شود. لازم به توضیح است همان طور که از اسم این روش نیز مشخص است، در این روش کمترین انحراف از بهینگی اهداف را خواهیم داشت اما مجموع انحرافات معمولاً از دور روش قبل بیشتر است.

در این تحقیق، روش LP metric با مقادیر P مختلف در مدل $MODM$ مسئله نگهداری تعمیرات و برنامه‌ریزی تولید و قابلیت اطمینان کل سیستم بکار گرفته می‌شود.

۲-۴- الگوریتم مورچگان چند هدفه

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO) از پایان‌نامه دکتری مارکو دوریگو استخراج گردید و با عنوان سیستم مورچگان معرفی شد. دوریگو این الگوریتم را در ابتدا برای حل مسئله فروشنده دوره‌گرد به کار بست. الگوریتم موردنظر در حل مسئله فروشنده دوره‌گرد نه تنها قابل رقابت با سایر الگوریتم‌های زمان خود بود بلکه توانست در مدت‌زمان کوتاهی، از سایر روش‌ها پیشی بگیرد (دوریگو و استوتزل^۳، ۲۰۰۴).

¹ Weighed sum method

² Convex quadratic

³ Dorigo and Stützle



دلیل انتخاب الگوریتم مورچگان آن است که این الگوریتم به دلیل داشتن عملگرهایی مبتنی بر ساخت جواب به صورت مرحله به مرحله، می تواند به شکل مؤثری، راه حل هایی را برای زمان بندی نیروی انسانی ایجاد کند. به این صورت که هر مرحله در الگوریتم مورچگان، معادل یک روز در زمان بندی نیروی انسانی در نظر گرفته می شود. از طرفی دیگر، الگوریتم کلونی مورچگان به عنوان یکی از روش های مؤثر و کارآمد در حل مسائل زمان بندی شناخته شده است. از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه مورچگان برای حل مسائل بهینه سازی ترکیبی چندهدفه مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است؛ مانند (دوریگو و استوتزل، ۲۰۰۴؛ چیکا و همکاران^۱، ۲۰۱۱؛ مورا و همکاران^۲، ۲۰۰۹) که برای توسعه آن تلاش کرده اند. بر همین اساس در این تحقیق به منظور بهینه سازی مدل ریاضی در ابعاد بزرگ تر، از الگوریتم مورچگان چند هدفه بهره گرفته شده است.

۵- یافته های تحقیق

۵-۱- به کارگیری یک مثال کاربردی

ده کارگر در یک سیستم تولیدی فعال مشغول به کار هستند. هدف برنامه ریزی زمان بندی آن ها در طی ۷ روز و هر روز ۳ شیفت می باشد. دپارتمان تولیدی وجود دارد. حداکثر تعداد شیفت هر کارگر برابر ۱۵ و حداقل آن ۳ تعریف شده است. 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 شده است. حداکثر کارایی ماشین در هر دپارتمان برابر ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. مدت تعمیرات و نگهداری هر شیفت ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. ضرب افزایش خرابی برابر ۲۰٪ و ضریب کاهش خرابی برابر ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. مقادیر مربوط به تجربه، نرخ بهره برداری و نرخ خرابی ماشین آلات مختلف به صورت تصادفی و بر اساس جدول شماره ۲ طراحی شده است. برای تولید این اعداد تصادفی از توزیع یکنواخت پیوسته استفاده شده است. این توزیع دارای دو پارامتر حد پایین و حد بالا می باشد حد پایین L و حد بالای U به ازای هر پارامتر در جدول ۲ مشخص شده است. در این جدول پارامترهای از پیش تعیین شده مدل ریاضی نشان داده شده است. همچنین با توجه به فازی بودن سه پارامتر حداقل تجربه کارگران، نرخ خرابی و نرخ بهره برداری برای هر پارامتر ۳ مقدار مشخص شده است (عدد فازی مثلثی). این سه مقدار به ترتیب حد پایین عدد فازی، حد وسط عدد فازی و حد بالای عدد فازی می باشد. در مطالعات فازی، در ابتدا لازم است که مقادیر فازی از طریق فازی زدایی به مقادیر قطعی تبدیل شوند؛ بنابراین، در جدول ۳، فازی زدایی کران بالا و کران پایین هر یک از پارامترهای فازی در نظر گرفته شده بر اساس روش مینکوفسکی نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۳، برای تولید عدد تصادفی مورد نظر برای هر پارامتر با استفاده از حدود بالا و پایین قطعی به دست آمده، بر اساس توزیع آماری یکنواخت طبق رابطه $R(U-L)$ اقدام می شود. که R یک عدد تصادفی بین صفر و یک است.

با اجرای مدل در نرم افزار GAMS و بررسی شدنی بودن مسئله، جواب بهینه مسئله قابل حصول است. این مدل برای هفت روز در یک هفته و بر اساس سه شیفت کاری با در نظر گرفتن ۱۰ کارگر حل شده است. نتایج حل مدل جهت درک بهتر خروجی حاصل شده، در جداول ۴ و ۵ و ۶ ارائه شده است. برای طراحی این جداول ابتدا کارگران با شماره های 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 شده است. به عنوان مثال در جدول ۴ مشخص شده است که در دپارتمان ۱ و در شیفت اول در روز ۱ کارگران شماره ۳، ۷ و ۱۰ باید کار کنند. یا در جدول ۵، در دپارتمان ۲، در شیفت اول در روز اول کارگران ۹، ۴، ۱ و ۱۰ باید کار کنند. همچنین، در جدول ۶، در دپارتمان ۳، در شیفت اول در روز اول کارگران ۲ و ۸ کار می کنند. به همین ترتیب، تخصیص کارگر به هر روز هفته در هر شیفت کاری در هر دپارتمان در جداول ۴ و ۵ و ۶ تعیین شده است.

¹ Chica et al.

² Mora et al.



جدول ۲- حدود مقادیر مربوط به پارامترهای مختلف مدل ریاضی.

Table 2- Limits of values related to various parameters of the mathematical model.

پارامتر فازی	نماد	حد پایین (L)	حد بالا (U)
	LI	2	3
حداقل تجربه کارگران	LI ²	3	4
	LI ³	4	5
نرخ بهره‌برداری	LE ¹	30%	35%
	LE ²	35%	40%
	LE ³	40%	45%
نرخ خرابی	LF ¹	20%	30%
	LF ²	30%	40%
	LF ³	40%	50%

جدول ۳- فازی زدایی مقادیر مربوط به پارامترهای مختلف مدل ریاضی.

Table 3- DE fuzzy of values related to various parameters of the mathematical model.

پارامتر فازی	حد پایین (L)	حد بالا (U)
حداقل تجربه کارگران	3.5	4.5
نرخ بهره‌برداری	37.5	42.5
نرخ خرابی	35	45

جدول ۴- برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۱ در هر روز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی.

Table 4- Department 1 schedule per day and each shift from the planning horizon.

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	3, 7, 10	5, 6	5, 8
روز ۲	6, 7	۵, 6	5, 7
روز ۳	6, 9	5, 6	7, 10
روز ۴	5, 6	7, 10	5, 6
روز ۵	7, 8	5, 6	5, 7
روز ۶	2, 6	5, 6	7, 10
روز ۷	5, 6	5, 6, 7	3, 7

جدول ۵- برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۲ در هر روز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی.

Table 5- Department schedule 2 for each day and each shift from the planning horizon.

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	1, 4, 9, 10	1, 4, 9, 10	3, 9
روز ۲	4, 10	3, 4, 9, 10	3, 9
روز ۳	4, 5	3, 9	4, 10
روز ۴	1, 3	3, 4, 9, 10	4, 9
روز ۵	3, 10	3, 4, 9, 10	1, 10
روز ۶	3, 4	3, 9	4, 10
روز ۷	1, 9	1, 4, 10	4, 10

جدول ۶- برنامه‌ی زمان‌بندی دپارتمان ۳ در هرروز و هر شیفت از افق برنامه‌ریزی.

Table 6- Department 3 schedule per day and each shift from the planning horizon.

روزها/شیفت‌ها	شیفت ۱	شیفت ۲	شیفت ۳
روز ۱	2, 8	2, 8	4, 3
روز ۲	1, 8	2, 8	1, 2
روز ۳	7, 8	1, 2	1, 8
روز ۴	2, 7	1, 8	2, 8
روز ۵	1, 4	2, 8	2, 6
روز ۶	1, 8	2, 7	1, 8
روز ۷	2, 7	2, 8	2, 8

در ادامه، برای تعمیم مدل پیشنهادی برای پاسخگویی به مسئله در ابعاد بزرگ‌تر الگوریتم مورچگان توسعه داده شده است. برای این منظور از طرح $L9$ تاگوچی به ازای حالات مختلف برای پارامترهای اصلی الگوریتم مورچگان (نرخ تغییر فرمون ها، درصد حرکت، تعداد جواب‌ها در هر مرحله، حداکثر تعداد تکرار) اجرا شده و خروجی‌های آن در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین، در جدول ۸، مقدار پارامترهای از پیش تعیین شده برای الگوریتم مورچگان نشان داده شده است.

جدول ۷- مقدار متغیر پاسخ در تکنیک تاگوچی برای مورچگان.

Table 7- The value of the response variable in the Taguchi technique for ants.

Run order	Algorithm parameters				Response	
	P_{cr}	P_{mut}	N- Pop	Max-iteration	ACO	
1	1	1	1	1	21.98	
2	1	2	2	2	33.79	
3	1	3	3	3	28.91	
4	2	1	2	3	27.83	
5	2	2	3	1	26.47	
6	2	3	1	2	15.55	
7	3	1	3	2	48.05	
8	3	2	1	3	19.34	
9	3	3	2	1	20.02	

جدول ۸- مقدار پارامترهای از پیش تعیین شده مورچگان.

Table 8- Predetermined value of ant parameters.

الگوریتم مورد بررسی	پارامتر	مقدار پارامتر
	(Pc) نرخ تغییر فرمون ها	0.7
	(Pm) درصد حرکت	0.05
مورچگان	(N-pop) تعداد جواب‌ها در هر مرحله	150
	(Max-iteration) حداکثر تعداد تکرار	200

۵-۲- بررسی کارایی الگوریتم مورچگان

در این بخش از مقاله، به بررسی کارایی الگوریتم مورچگان پرداخته می‌شود. کارایی الگوریتم بر اساس ۲ مفهوم تعیین می‌شود اولی کیفیت و دومی سرعت. همچنین، اختلاف مقدار تابع هدف الگوریتم مورچگان با مقدار تابع هدف ارائه شده در $GAMS$ با یکدیگر مقایسه می‌شود و در سرعت زمان حل این دو روش باهم مقایسه می‌شود. به منظور بررسی الگوریتم مورچگان استفاده شده برای این مسئله، این الگوریتم در محیط متلب کد نویسی شده است. پس از آن ۶ مسئله در ابعاد مختلف تولید شده است.

در جدول ۹، نتایج حاصل از حل دقیق مثال‌های تولید شده با نرم‌افزار $GAMS$ با نتایج حاصل از الگوریتم مورچگان بر اساس دو معیار زمان و مقدار تابع هدف با یکدیگر مقایسه شده است. 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 شده است. 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 الزاماً بهینه) را ارائه کرده و

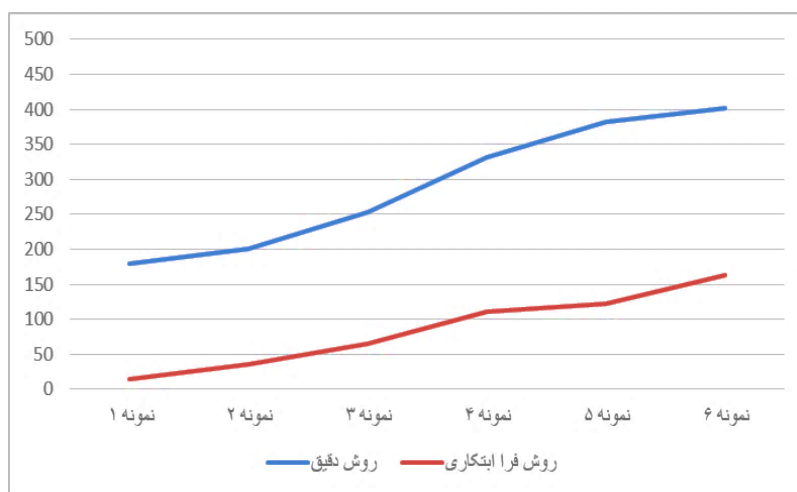




اجرای برنامه اتمام می‌یابد. در جدول ۹ خلاصه نتایج مقایسه نرم‌افزار GAMS با الگوریتم مورچگان چند هدفه ارائه شده است. همچنین با محاسبه میانگین گپ‌های محاسبه شده در هر مسئله در نظر گرفته شده، متوسط گپ ایجاد شده بین معیارهای حل با استفاده از نرم افزار GAMS و الگوریتم مورچگان، ۳/۱٪ گزارش شده است. با توجه به اینکه مقدار گپ محاسبه شده در هر مسئله حداکثر ۵٪ گزارش شده لذا نتیجه می‌گیریم که مدل ارائه شده قابلیت خوبی در پاسخگویی به حل مسئله در نظر گرفته شده دارد. در شکل ۱ زمان‌های حل مسئله را بر اساس روش دقیق و فرا ابتکاری نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با زیادتر شدن ابعاد مسئله از نمونه دوم به بعد با پیچیده‌تر شدن مسئله زمان حل مسئله بر اساس روش قطعی به‌طور ناگهانی زیاد می‌شود. لذا می‌توان بیان کرد که با توجه به صعودی بودن زمان حل مسئله اظهار نظر کرد که مسئله از درجه سختی NP-HARD برخوردار است؛ اما در همه حالات طبق روش الگوریتم مورچگان زمان محاسباتی نسبت به روش دقیق حل شده در نرم‌افزار GAMS کمتر است.

جدول شماره ۹- نتایج حل مسائل نمونه با GAMS و الگوریتم مورچگان.
Table 9- Results of solving sample problems with GAMS and Ant algorithm.

شماره مسئله	GAMS حل دقیق با نرم‌افزار		الگوریتم مورچگان چند هدفه		GAP (%)
	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل	
PR1	6880	125	66880	57.7	0%
PR2	3520	3720	103520	179.827	0%
PR3	47540	46820	151710	263.8	3%
PR4	95648	61240	201140	394.9	3%
PR5	94958	266420	319950	567.4	5%
PR6	24430	266420	236770	664.7	5%



شکل ۱- زمان محاسباتی اجرای مدل ریاضی با روش دقیق و فرا ابتکاری.

Figure 1- Computational time of performing mathematical model with accurate and meta-heuristic method.

۳-۵- تحلیل حساسیت نگهداری و تعمیرات و بررسی سناریوهای نوبت‌کاری

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. جداول ۱۰ و ۱۱ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت این دو پارامتر را نشان می‌دهد. شکل‌های ۲ و ۳ نیز به‌صورت گرافیکی به نمایش تأثیر این دو پارامتر در مدل ریاضی می‌پردازد. با توجه به جدول ۱۰، 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 ۱۱، 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 ۱۰- تحلیل حساسیت ضریب افزایش نرخ خرابی ماشین‌آلات قبل از نگهداری و تعمیرات.

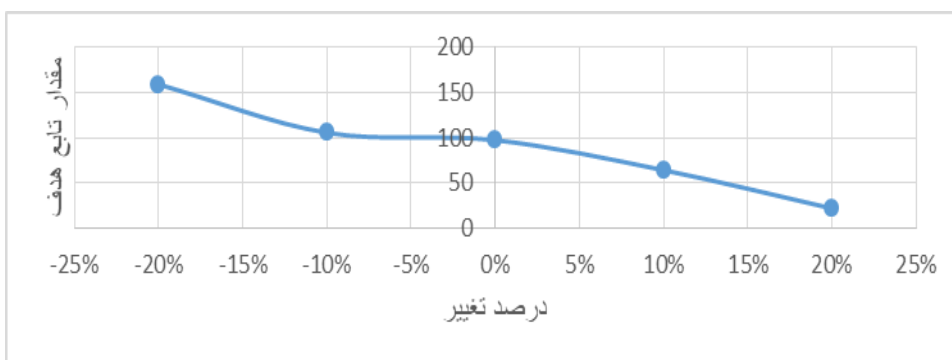
Table 10- Sensitivity analysis of the coefficient of increase of machine failure rate before repairs and maintenance.

درصد تغییر	20%	10%	0%	-10%	-20%
مقدار تابع هدف	21.73	64.2	97.43	105.6	159.26

جدول ۱۱- تحلیل حساسیت ضریب کاهش نرخ خرابی پس از نگهداری و تعمیرات.

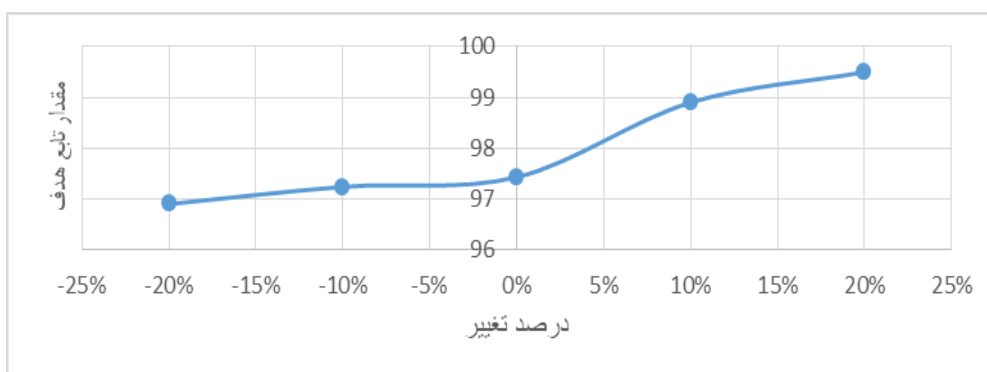
Table 11- Sensitivity analysis of failure rate reduction coefficient after repairs and maintenance.

درصد تغییر	20%	10%	0%	-10%	-20%
مقدار تابع هدف	99.5	98.9	97.43	97.24	69.9



شکل ۲- تأثیر ضریب افزایش نرخ خرابی بر تابع هدف.

Figure 2- The effect of failure rate increase coefficient on the objective function.



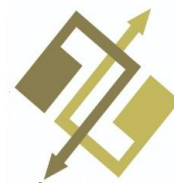
شکل ۳- تأثیر ضریب کاهش خرابی بر تابع هدف.

Figure 3- The effect of failure reduction coefficient on the objective function.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مسائل بهینه‌سازی ترکیبی یکپارچه همواره مورد توجه صنایع تولیدی بوده است. برنامه‌ریزی تولید با رویکرد و توجه به عوامل پشتیبانی مانند کیفیت و نگهداری و تعمیرات در چارچوب یک سیستم ادغامی هم‌زمان با در نظر گرفتن هزینه‌های کلی و قابلیت اطمینان باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری واحدهای تولیدی و خدماتی می‌شود. در این تحقیق یک مدل ریاضی جدید دو هدفه در خصوص تولید، نگهداری و تعمیرات و زمان‌بندی نیروی انسانی و قابلیت اطمینان کل سیستم پیشنهاد شده است. مهم‌ترین سهم مشارکت این تحقیق عبارت است از ارائه یک مدل ریاضی جدید به منظور برنامه‌ریزی تولید و نگهداری تعمیرات پیشگیرانه و نیروی کار و قابلیت کل





سیستم و استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری کارآمد برای حل مسئله موجود در ابعاد بزرگ. در واقع این مدل ریاضی هم به دنبال کاهش نیروی انسانی از طریق تخصیص بهینه نفرات به هر دپارتمان در هر روز کاری و در هر شیفت کاری و هم افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم می باشد. در این مدل پارامترهای مرتبط با نیروی کار و نگهداری و تعمیرات به صورت اعداد فازی بیان شده و از روش مینکوفسکی برای تبدیل مدل فازی به مدل غیر فازی استفاده شده است. 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 می دهد که رویکرد استفاده شده در این تحقیق که مبتنی بر ترکیب حوزه های مختلف تصمیم گیری در شرکت های تولیدی می باشد، می تواند منجر به ارائه راهکارهای مناسبی هم برای تولید و هم برای نگهداری و تعمیرات و هم برای زمان بندی نیروی کار باشد. همان طور که در جدول ۹ نشان داده شده است، با توجه به ابعاد طراحی شده در نرم افزار گمز برای حل مدل ریاضی، متوسط گپ های حاصل شده از جواب های حل قطعی و فرا ابتکاری برابر 3.1% به دست آمده است که در اندازه استاندارد قرار دارد همچنین، حل فرا ابتکاری قابلیت استفاده از ابعاد بزرگ برای تعریف مسئله را دارد. علاوه بر این، متوسط زمان حل در گمز ۴۵ هزار ثانیه است در صورتی که متوسط زمان حل الگوریتم مورچگان حدود ۳۵۴ ثانیه می باشد. این موضوع نشان می دهد که الگوریتم مورچه با صرف زمان بسیار کمتری، مقدار خطای بسیار اندکی دارد و لذا کارایی این روش حل به خوبی قابل تبیین است. به منظور توسعه تحقیق پیشنهاد می شود که از رویکرد بهینه سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده شود و نیز از الگوریتم های فرا ابتکاری دیگر مانند الگوریتم چند هدفه ژنتیک استفاده شود.

منابع

- Akbari, M. (2017). Scheduling of temporary employees with variable productivity. *Management research in Iran*, 21(3), 25-37. (In Persian). <https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=318611>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.09.001>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0113-5>
- Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2016). Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint. *Omega*, 61, 110-126. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.07.012>
- Chica, M., Cordón, O., Damas, S., & Bautista, J. (2011). A new diversity induction mechanism for a multi-objective ant colony algorithm to solve a real-world time and space assembly line balancing problem. *Memetic computing*, 3(1), 15-24. <https://doi.org/10.1007/s12293-010-0035-6>
- Dorigo, M. & Stützle, T. (2004). *Ant colony optimization*. MIT Press. <https://mitpress.mit.edu/books/ant-colony-optimization>
- Ekin, T. (2018). Integrated maintenance and production planning with endogenous uncertain yield. *Reliability engineering & system safety*, 179, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.07.011>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.022>
- Ettay, G., El Barkany, A., & El Khalfi, A. (2017). Modeling and optimization a production/maintenance integrated planning. *International journal of engineering research in Africa*, 28, 169-181. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.28.169>
- Glawar, R., Karner, M., Nemeth, T., Matyas, K., & Sih, W. (2018). An approach for the integration of anticipative maintenance strategies within a production planning and control model. *Procedia CIRP*, 67, 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.174>
- Goli, A., Tirkolae, 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. <https://doi.org/10.1007/s00607-018-00692-2>
- Hamrol, A. (2018). A new look at some aspects of maintenance and improvement of production processes. *Management and production engineering review*, 9(1), 34-43. <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/119398/edition/103877/content>
- Jaber, M. Y., Givi, Z. S., & Neumann, W. P. (2013). Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process. *Applied mathematical modelling*, 37(12-13), 7287-7299. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.028>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0658-1>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.09.007>
- Mishra, A. K., Shrivastava, D., & Gupta, H. (2021). Group preventive maintenance model for multi-unit series system: a tlbo algorithm-based approach. *Recent advances in mechanical engineering* (pp. 61-69). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8704-7_7



- Mora, A. M., Merelo, J. J., Laredo, J. L. J., Millán, C., & Torrecillas, J. (2009). CHAC, A MOACO algorithm for computation of bi-criteria military unit path in the battlefield: presentation and first results. *International journal of intelligent systems*, 24(7), 818-843. <https://doi.org/10.1002/int.20362>
- Nourelfath, M., Nahas, N., & Ben-Daya, M. (2016). Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. *Reliability engineering & system safety*, 148, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.11.015>
- Samimi, E., & Sydow, J. (2021). Human resource management in project-based organizations: revisiting the permanency assumption. *The international journal of human resource management*, 32(1), 49-83. <https://doi.org/10.1080/09585192.2020.1783346>
- Samimi, E., & Sydow, J. (2020). Human resource management in project-based organizations: revisiting the permanency assumption. *The international journal of human resource management*, 32(18), 49-83. DOI:10.1080/09585192.2020.1783346
- Sana, S. S. (2012). Preventive maintenance and optimal buffer inventory for products sold with warranty in an imperfect production system. *International journal of production research*, 50(23), 6763-6774. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.623838>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.144>
- 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.
- Wang, T., Zhao, Y., & Zhu, X. (2021). Advanced production plan system of military manufacturing enterprises based on linear programming model. *Journal of physics: conference series*, 1732(1), p. 012017. IOP Publishing.
- Yalaoui, A., Chaabi, K., & Yalaoui, F. (2014). Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information sciences*, 278, 841-861. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.03.097>
- Zheng, J., Yang, H., Wu, Q., & Wang, Z. (2020). A two-stage integrating optimization of production scheduling, maintenance and quality. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part b: journal of engineering manufacture*, 234(11), 1448-1459.
- Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean maintenance: reduce costs, improve quality, and increase market share*. Elsevier.
- Moubray, J. (1997). *Reliability centered maintenance*. Elsevier.