E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 6, Spec. Issue. (2022) 1–17.

Paper Type: Original Article

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

Mohamad Sharifzadegan[1] , Tahmourth Sohrabi [1,*], Ahmad Jafarnejad Chaghoshi[2]

[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 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).

Scanned with CamScanner

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۶، شماره ویژه، (۱۴۰۰)، ۱۷-۱

www.journal-dmor.ir

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 موازی کاری ها 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 ارائه‌شده 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 قبل 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 درصورتی‌که 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

[۱] Ertogral and Öztürk

* نویسنده مسئول

msh.mis416@gmail.com

http://dx.doi.org/10.22105/dmor.2021.278207.1343

Scanned with CamScanner

بهره گرفت. به دلیل اثر متقابل هرکدام 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 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 به‌صورت زنجیره به یکدیگر متصل است و تصمیم‌گیری در هر قسمت اثرات خود را بر روی بخش‌های دیگر نمایان می‌کند (لیو و همکاران[1]، ۲۰۱۹). پیشرفت‌های اخیر در یکپارچه‌سازی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موجب اتصال مباحث مقدار تولید اقتصادی[2] و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (سنا[3]، ۲۰۱۲)، کنترل هم‌زمان نرخ تولید، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه شده است (بریچی و همکاران[4]، 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[5]، ۲۰۱۶). درواقع تعداد معدودی از پژوهش‌ها منتشرشده 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. به‌طور 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، ازاین‌رو محصول تولیدشده به انبار محصول نهایی و ازآنجا به مرکز کنترل کیفیت ارسال می‌شود تا موردبررسی قرار گیرد. کالای ضایعاتی امحاء می‌گردد و کالای مورد تائید به دست مشتریان می‌رسد (هامرول[6]، 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 یك کالا در حین انجام عملیات را کاهش داد (دیلون[7]، 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 به‌واسطه انجام عملیات نگهداری و تعمیرات می‌گردید. در این دوران گروه نگهداری و تعمیرات ناوگان هوایی ایالات‌متحده با توجه به این مشاهدات موضوع نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را موردمطالعه 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[8]، ۲۰۰۴). با توجه به کاستی‌های موجود آن‌ها رویکردی منطقی برای تعیین اینکه آیا نوع مناسبی از نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای یك کالای موردنظر اثربخش است یا خیر ارائه کردند که عبارت از نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به آن اطلاق شد (موبری[9]، ۱۹۹۷).

ازاین‌رو با توجه به رقابت تنگاتنگ موجود بین سازمان‌های تولیدی، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های این سازمان‌ها چگونگی برنامه‌ریزی سازمان برای استفاده از منابع به‌منظور دستیابی به نحوه استفاده بهینه از منابع سیستم است. درواقع 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[10]، ۲۰۱۸)؛ بنابراین، چالش جدی شرکت‌های تولیدی درزمینهٔ 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

Scanned with CamScanner

است به‌گونه‌ای که عدم هم‌راستایی فعالیت‌های نگهداری سبب می‌شود تا به دلیل خرابی دستگاه‌های تولیدی، فرآیند تولید متوقف‌شده 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 به‌صورت کامل در دسترس فرض می‌شود و بحث در دسترس بودن، خرابی سیستم و نگهداری و تعمیرات آن‌ها نادیده گرفته می‌شود. از سوی دیگر در مدل‌های برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات نیز بحث میزان تولید و هزینه‌های آن نادیده گرفته می‌شود (گلی و همکاران[1]، 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 به‌منظور 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 گرفته‌شده 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 ارائه‌شده است. در بخش ۴ رویکرد عدم قطعیت فازی بکار گرفته‌شده در این تحقیق معرفی‌شده است. در بخش ۵ روش حل مدل ریاضی ارائه می‌شود؛ و سرانجام، در بخش ٦ نتایج عددی حاصل از بهینه‌سازی مدل ریاضی ارائه‌شده و درنهایت و در بخش ۷ یک نتیجه‌گیری از تحقیق و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

لیائو[2] (۲۰۱۳)، در پژوهشی مسئله ادغامی زمان‌بندی تولید و تعمیرات ناکامل برای سامانه تک ماشینه را بررسی نمود. در این مقاله تعمیرات پیشگیرانه دوره‌ای ناکامل و سامانه دوره‌ای کامل تعمیرات اساسی به‌صورت ادغامی برای حداقل کردن هزینه‌های تولید و تعمیرات توسعه داده‌شده است. هدف از این پژوهش تعیین مدت‌زمان دوره نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه و همچنین دوره تعمیرات اساسی سامانه موردنظر باهدف کاهش هزینه‌های 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[3] (۲۰۱٤)، مدل بسط داده‌شده‌ای از برنامه‌ریزی خطی را به‌عنوان 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 شده است که عملیات نگه‌داری و تعمیرات وضعیت عملیاتی دستگاه‌ها را به‌خوبی روز اول برمی‌گرداند. نورالفتح و همکاران[4] (۲۰۱٦)، به یکپارچه‌سازی تولید، نگهداری و تعمیرات و کیفیت یک فرآیند ناکامل در سیستم چندتولیدی - چند دوره‌ای را موردبررسی قراردادند. در مدل ارائه‌شده، سیستم تولیدی به‌عنوان یک دستگاه ناکامل که وضعیت آن‌ها را به‌عنوان حالت کنترلی و غیر کنترلی است، در نظر گرفته‌شده 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 موردتوجه قرار گرفته‌شده. مدل آن‌ها برهم‌کنش بین کیفیت، تولید و پارامترهای نگهداری را به‌خوبی 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.

Scanned with CamScanner

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[1] (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 موردمطالعه قراردادهاست. مدل توسعه داده‌شده توسط اتای و همکاران از هزینه‌ی کل، با درنظرگرفتن 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 چندمحصولی 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 ازاین‌رو 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 استفاده‌نشده بود ولی در این پژوهش رویکردی ابتکاری بازمان 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[2] (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. بااین‌حال، ادغام سنسورها به منابع تولیدی نصب‌شده قبلاً برای پیش‌بینی وظایف تعمیر و نگهداری موردنیاز، یکی از چالش‌های مهم شرکت‌های تولیدی بود. بنابراین، در این مقاله، یک روش نوآورانه برای ابزارهای پیش‌بینی‌کننده‌ی نگهداری به‌عنوان خدمات ابرهوشمند و کاربرد صنعتی این‌روش برای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری یکپارچه ارائه شده‌است. گلاوار و همکاران[3] (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. 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. بنسی من و همکاران[4] (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. 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 قرارگرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های حل استفاده‌شده کارایی بالایی دارند.

ژنگ و همکاران[5] (۲۰۲۰)، به یکپارچه‌سازی زمان‌بندی تولید و نگهداری تعمیرات با رویکرد کیفیت محصول پرداخته‌اند. در این خصوص زمان‌بندی تک ماشینه با در نظر گرفتن خرابی‌ها در حین تولید و تعمیرات آن بهینه‌سازی می‌شود. برای این موضوع، الگوریتم ژنتیک پیشنهادشده است. وانگ و همکاران[6] (۲۰۲۰)، از روش نگه‌داری تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر شرایط استفاده کرده و با برنامه‌ریزی تولید

[1] Entaye et al.
[2] Schreiber et al.
[3] Glawar et al.
[4] Bensmain et al.
[5] Zheng et al.
[6] Wang et al.

Scanned with CamScanner

ترکیب کرده‌اند. در این تحقیق خرابی‌های ماشین و نیز تقاضای مشتریان به‌صورت تصادفی در نظر گرفته‌شده است. برای حل این مسئله از ترکیب بهینه‌سازی- شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده است. نتایج ارائه‌شده نشانگر برتری روش پیشنهادی تحقیق با سایر روش‌های مشابه می‌باشد. نمونه‌ی دیگری از این محققین مانند وانگ و همکاران[1] (۲۰۲۱)، نیز ارائه‌شده است که در آن از مدل‌سازی خطی عدد صحیح و از روش تحلیل سناریو برای بهینه‌سازی آن استفاده‌شده است.

در ادامه به تأثیر فاکتور مدیریت نیروی انسانی و تعمیرات و نگهداری را در سازمان‌های پروژه محور موردمطالعه قرار داده‌اند. برای مثال، صمیمی و سیدو[2] (۲۰۲۰)، در مطالعه خود ضمن مرور تحقیقات مختلف درزمینهٔ مدیریت نیروی انسانی پرداخته‌شده است. سپس تأثیر آن بر تعمیرات و نگه‌داری در سازمان‌های پروژه محور مطالعه و ارزیابی‌شده است. نتایج گویای این مهم است که مشکلات نیروی انسانی می‌تواند به‌طور بالقوه عملکرد سازمان را در جنبه‌های مختلف دچار مشکل کند. درنهایت، میشرا و همکاران[3] (۲۰۲۱)، نت پیشگیرانه گروهی را بر روی چند سری از خط تولیدها بهینه‌سازی کرده‌اند. در این تحقیق تعداد بهینه قطعات در هر بار نت به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که کل هزینه‌های تولید و نگهداری حداقل شود. برای این منظور یک الگوریتم فرا ابتکاری بانام الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری *(TLBO)* استفاده‌شده است.

در **جدول ۱** به‌مرور تحقیقات انجام‌شده پرداخته‌شده 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 فراابتکاری
لیائو	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 اشاره‌شده در بالا پس از بررسی و تحلیل تحقیقات مختلف که در **جدول ۱** نیز به‌خوبی قابل تبیین شده است، مشخص‌شده 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.
[2] Samimi and Sydow
[3] Mishra et al.

Scanned with CamScanner

را مشخص کنند. به همین مهم‌ترین سهم مشارکت این تحقیق، ارائه یک مدل ریاضی یکپارچه جدید که قادر است به‌طور 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 استفاده‌نشده است.

۳- مدل پیشنهادی

در این تحقیق باهدف برنامه‌ریزی نیروی انسانی، مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌گردد: کارخانه‌ای را در نظر بگیرید که دارای M ماشین یا دپارتمان مشخص است. قرار است در طی I روز برنامه زمان‌بندی کارکنان این ماشین‌آلات مشخص شود. هرروز از T شیفت کاری با تعداد ساعت مشخص تشکیل‌شده 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 به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

- *نوبت‌های کاری از قبل تعیین‌شده می‌باشد.*
- *اگر فردی در نوبت شب‌کار 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 بعدازظهر را کارکرد حتماً باید نوبت شب را در استراحت باشد.*
- *فرد با انجام کارهای متوالی یادگیری او افزایش‌یافته و نرخ انجام کارهای توسط او بیشتر می‌شود.*
- *باگذشت 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 تولیدشده 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 برآورده کردن شرایط فوق بیش‌ترین تولید را با به‌کارگیری حداقل پرسنل ایجاد شود. به‌منظور تشریح مدل ریاضی تحقیق ابتدا اندیس‌ها و مجموعه‌ها معرفی می‌شود، سپس پارامترها و متغیرها معرفی‌شده و در پایان روابط مدل ریاضی تشریح می‌گردد.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها.

I: مجموعه تمام‌روزهای افق برنامه‌ریزی.

i: اندیس روز $(i \in I)$.

T: مجموعه تمام شیفت‌های کاری.

t, T_t: اندیس شیفت کاری $(t \in T_t)$.

K: مجموعه تمام کارکنان.

k, k': اندیس کارکنان $(k, k' \in K)$.

شریف زادگان و همکاران/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۶، شماره ویژه، زمستان ۱۴۰۰، صفحه: ۱۷-۱

Scanned with CamScanner

M: مجموعه دپارتمان‌ها (ماشین‌آلات).

m: اندیس ماشین $(m \in M)$.

پارامترها.

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

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

LF_m: نرخ خرابی ماشین در دپارتمان m که به‌صورت 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_{tm} : نرخ خرابی قبل و بعد از انجام نت در شیفت Tبرای ماشین m.

λ_{tm} : نرخ خرابی بعد از انجام نت در شیفت Tبرای 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.

n': سقف تعداد شیفت‌های شب هر کارگرR 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.

Scanned with CamScanner

توابع هدف و محدودیت‌ها.

$$Min\ Z1 = \sum_{m\in M}\sum_{k\in K}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\frac{X_{itkm}}{FG_{tm}\,Q_{itkm}}, \quad (۱)$$

$$Z2 = \ Max\ R. \quad (۲)$$

$$FG_{tm} = 1 - e^{-\lambda\delta_t}, \qquad \forall t \in T, m \in M \quad (۳)$$

$$RG_{tm} = FG_t\, e^{-\mu\varepsilon_t}, \qquad \forall t \in T, m \in M \quad (۴)$$

$$FG_{t+1\,m} = RG_t + (1 - RG_t)(1 - e^{-\lambda\delta_{t+1}}), \qquad \forall t \in T, m \in M \quad (۵)$$

$$Q_{itkm} = LI_{km} + KI_{sm}\left[1 - exp\left(\frac{-1}{LE_m}X_{itkm}\right)\right] \times exp\left(\frac{1}{LF_m}X_{itkm}\right), \quad (۶)$$

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

$$\sum_{k\in K} X_{itkm} \geq M_{itm}, \qquad \forall i \in I, t \in T, m \in M \quad (۷)$$

$$\sum_{t\in f}\sum_{m\in S} X_{itkm} + Y_{ik} = 1, \qquad \forall i \in I, k \in K \quad (۸)$$

$$L \leq \sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\sum_{m\in M} X_{itkm} \leq U, \qquad \forall k \in K \quad (۹)$$

$$\sum_{m\in M} X_{itkm} + X_{(i+1)t'km} \leq 1, \quad \forall i \in I: i < n, t = 3, t' = 1, k \in K \quad (۱۰)$$

$$Y_{ik} + \sum_{t\in T}\sum_{m\in M} X_{(i+1)tkm} + Y_{(i+2)k} \leq 2, \qquad \forall i \in I: i \leq n-2, k \in K \quad (۱۱)$$

$$\sum_{m\in M} X_{itkm} + \sum_{m\in M} X_{(i+1)tkm} + \sum_{m\in M} X_{(i+2)tkm} \leq Y_{(i+3)k} + 2 \quad \forall k \in K, t = 3, i \in I: i \leq n-3 \quad (۱۲)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{m\in M} X_{itkm} \leq n', \qquad t = 3, \forall k \in K \quad (۱۳)$$

$$R = 1 - e^{-\sum_{i\in T}\sum_{m\in M}\lambda\lambda'_{tm}\lambda^*_{tm}}, \qquad \forall\ m \in M, t \in T;\ \lambda^*_{tm} \leq \lambda'_{tm}. \quad (۱۴)$$

رابطه‌ی (۱) تابع هدف اول مدل ریاضی را مطرح می‌کند که کمینه‌سازی نیروی کار تقسیم‌بر 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)** 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[1]، ۲۰۱۷). **رابطه‌ی (۴)** میزان تولید بعد از تعمیرات و نگه‌داری را محاسبه می‌کند که این خرابی به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند و به مدت‌زمان تعمیرات و نگه‌داری وابسته است (جابر و همکاران[2]، ۲۰۱۳). **رابطه‌ی (۵)** میزان تولید برای شیفت بعدی را محاسبه می‌کند. در این رابطه میزان نرخ خرابی در دوره قبل مؤثر است و به‌صورت نمایی 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 شب‌کار کند. **رابطه‌ی (۱۴)** قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه می‌کند.

۱-۳- عدم قطعیت فازی

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

[1] Akbari

[2] Jaber et al.

Scanned with CamScanner

اطلاعات غیردقیق، ناواضح و مبهم هستند و با توجه به اینکه مقداردهی در این تحقیق بر اساس متغیرهای زبانی مبتنی بر جملات انسانی قابل‌قبول به‌جای اعداد استفاده‌شده است از نیروی انسانی برای عدد دهی مطابق با منطق فازی استفاده‌شده است. در چنین شرایطی، نظر افراد می‌توان متفاوت و متغیر باشد. بر همین اساس ضروری است تا عدم قطعیت در این پارامترها مدنظر قرار گیرد. در این پژوهش برای پارامترهای نرخ بهره‌برداری، نرخ خرابی و حداقل تجربه کارگران، عدم قطعیت فازی مثلثی در نظر گرفته‌شده است.

۴- روش‌های حل مدل ریاضی

به‌منظور بهینه‌سازی مدل ریاضی تحقیق، با توجه به دوهدفه بودن آن، از روش‌های معیار جامع (*LP metric*) و همچنین الگوریتم مورچگان چند هدفه استفاده می‌شود. در ادامه به تشریح مبانی نظری این روش‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۱- روش معیار جامع

برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه[1] و موازنه اهداف روش‌های متعددی در ادبیات ارائه‌شده است. روش *LP metric* بر اساس نرم‌های مختلف حالت کلی روش‌هایی همچون روش آرمانی وزنی، آرمانی فازی (*minimax*) و غیره است که با تغییر در مقدار نرم p حالت‌های مختلفی را بیان می‌کند.

۴-۱-۱- کلیات روش Lp متریک و توضیح نرم‌های p=1 و p=2 و p=inf

در حالت کلی، یک مسئله *MODM* به‌صورت زیر قابل‌بیان است (البته ممکن است برخی از اهداف بیشینه‌سازی نیز باشند ولی به‌سادگی قابل‌تبدیل به‌صورت زیر هستند):

$$\underset{x \in X.}{Min}\ (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \qquad (۱۵)$$

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[2] بین اهداف، معمولاً جواب $x^* \in X$ وجود ندارد که به ازای آن‌همه اهداف در حالت بهینه قرار گیرند ($\nexists\ x^* \in X : f_i^* = f_i(x^*)$). ازاین‌رو، اگر A یک روش حل باشد و جواب x^A به‌عنوان 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.

به‌عبارت‌دیگر، بر اساس معیار انحراف از ایده آل (*MID*[3])، اگر جواب $F^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$به‌عنوان جواب ایده آل در نظر گرفته شود، آنگاه هرچه 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. درواقع، درروش *Lp* متریک، p به‌عنوان نُرم اندازه‌گیری فاصله در نظر گرفته می‌شود و فاصله با نرم p به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Norm_p(F^*, F^A) = \left|F^* - F^A\right|_p = \left(\sum_{i=1}^{n} \left(f_i^* - f_i(x^A)\right)^p\right)^{\frac{1}{p}}. \qquad (۱۶)$$

هر چه $\left|F^* - F^A\right|_p$ کمتر باشد، روش A باارزش‌تر است. لازم به توضیح است که اگر اهداف نسبت به یکدیگر از درجه اهمیت مختلفی برخوردار باشند، آنگاه **رابطه (۱۶)** به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$Norm_p(F^*, F^A) = \left|F^* - F^A\right|_p = \left(\sum_{i=1}^{n} w_i\left(f_i^* - f_i(x^A)\right)^p\right)^{\frac{1}{p}}. \qquad (۱۷)$$

[1] Multi Objective Decision Making (MODM)

[2] Conflict

[3] Mean of Ideal distance

Scanned with CamScanner

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

$$\left|F^* - F^A\right|_{p=1} = \sum_{i=1}^{n} w_i \left|f_i^* - f_i(x^A)\right|. \qquad (۱۸)$$

که با توجه به آنکه $f_i^* \le f_i(x^A)$ است، به‌صورت خطی زیر نیز قابل‌بیان است:

$$\left|F^* - F^A\right|_{p=1} = \sum_{i=1}^{n} w_i \left(f_i(x^A) - f_i^*\right). \qquad (۱۹)$$

و به آن روش مجموع وزنی (*WSM*[1]) می‌گویند.

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

$$\left|F^* - F^A\right|_{p=2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_i \left(f_i^* - f_i(x^A)\right)^2}. \qquad (۲۰)$$

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

$$\left|F^* - F^A\right|_{p=2}^2 = \sum_{i=1}^{n} w_i \left(f_i^* - f_i(x^A)\right)^2, \qquad (۲۱)$$

و یک مدل درجه دوم محدب[2] 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. به‌عبارت‌دیگر، گرچه ممکن است در حالت $p=2$ مجموع انحرافات بیشتر شود، اما انحراف از بهینگی هر هدف، نسبت به $p=1$ کمتر است.

در یک‌فاصله معروف دیگر، اگر درروش Lp متریک قرار دهیم $p \to \infty$ آنگاه مدل معروف زیر حاصل می‌شود:

$$\left|F^* - F^A\right|_{p=\infty} = max\{\, i \,|w_i(f_i(x^A) - f_i^*)|. \qquad (۲۲)$$

که بیشینه انحراف از بهینگی را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر در این حالت که به آن مدل *minimax* نیز گفته می‌شود، بیشترین انحراف از بهینگی کمینه می‌شود. لازم به توضیح است همان‌طور که از اسم این روش نیز مشخص است، در این روش کمترین انحراف از بهینگی اهداف را خواهیم داشت اما مجموع انحرافات معمولاً از دو 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 کاربست. الگوریتم موردنظر در حل مسئله فروشنده دوره‌گرد نه‌تنها قابل‌رقابت با سایر الگوریتم‌های زمان خود بود بلکه توانست در مدت‌زمان کوتاهی،از سایر روش‌ها پیشی بگیرد (دوریگو و استوتزل[3]، ۲۰۰٤).

[1] Weighed sum method
[2] Convex quadratic
[3] Dorigo and Stützele

Scanned with CamScanner

دلیل انتخاب الگوریتم مورچگان آن است که این الگوریتم به دلیل داشتن عملگرهایی مبتنی برساخت جواب به‌صورت مرحله‌به‌مرحله، می‌تواند به شکل مؤثری، راه‌حل‌هایی را برای زمان‌بندی نیروی انسانی ایجاد کند. به این صورت که هر مرحله در الگوریتم مورچگان، معادل یک روز در زمان‌بندی نیروی انسانی در نظر گرفته می‌شود. از طرفی دیگر، الگوریتم کلونی مورچگان به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد در حل مسائل زمان‌بندی شناخته‌شده است. از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مورچگان برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه موردتوجه محققین مختلف قرارگرفته است؛ مانند (دوریگو و استوتزل، ۲۰۰٤؛ چیکا و همکاران[1]، ۲۰۱۱؛ مورا و همکاران[2]، ۲۰۰۹) که برای توسعه آن تلاش کرده‌اند. بر همین اساس در این تحقیق به‌منظور بهینه‌سازی مدل ریاضی در ابعاد بزرگ‌تر، از الگوریتم مورچگان چند هدفه بهره گرفته‌شده است.

۵- یافته‌های تحقیق

۵-۱- به‌کارگیری یک مثال کاربردی

ده کارگر در یک سیستم تولیدی فعال مشغول به کار هستند. هدف برنامه‌ریزی زمان‌بندی آن‌ها در طی ۷ روز و هرروز ۳ شیفت می‌باشد. دپارتمان تولیدی وجود دارد. حداکثر تعداد شیفت هر کارگر برابر ۱۵ و حداقل آن ۳ تعریف‌شده 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 گرفته‌شده است. حداکثر کارایی ماشین در هر دپارتمان برابر ٪۸۰ در نظر گرفته‌شده است. مدت تعمیرات و نگه‌داری هر شیفت ۳۰ دقیقه در نظر گرفته‌شده است. ضرب افزایش خرابی برابر ٪۲۰ و ضریب کاهش خرابی برابر ٪۱۰ در نظر گرفته‌شده است. مقادیر مربوط به تجربه، نرخ بهره‌برداری و نرخ خرابی ماشین‌آلات مختلف به‌صورت تصادفی و بر اساس جدول شماره‌ی ۲ طراحی‌شده است. برای تولید این اعداد تصادفی از توزیع یکنواخت پیوسته استفاده‌شده است. این توزیع دارای دو پارامتر حد پایین و حد بالا می‌باشد حد پایین L و حد بالای U به ازای هر پارامتر در **جدول ۲** مشخص‌شده است. در این جدول پارامترهای از پیش تعیین‌شده مدل ریاضی نشان داده شهد است. همچنین با توجه به فازی بودن سه پارامتر حداقل تجربه کارگران، نرخ خرابی و نرخ بهره‌برداری برای هر پارامتر ۳ مقدار مشخص‌شده است (عدد فازی مثلثی). این سه مقدار به ترتیب حد پایین عدد فازی، حد وسط عدد فازی و حد بالای عدد فازی می‌باشد. 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 گرفته‌شده بر اساس روش مینکوفسکی نشان داده‌شده است.

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

با اجرای مدل در نرم‌افزار *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 حل‌شده است. نتایج حل مدل جهت درک بهتر خروجی حاصل‌شده، در **جداول ۴** و **۵** و **۶** ارائه‌شده است. برای طراحی این جداول ابتدا کارگران با شماره‌های ۱ تا ۱۰ شماره‌گذاری شده‌اند. سپس در این جداول برای هرروز و هر شیفت شماره کارگرانی که باید در دپارتمان مربوطه مشغول به کار باشند مشخص‌شده است. به‌عنوان‌مثال در **جدول ۴** مشخص‌شده 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 ۱،۴،۹ و ۱۰ باید کار کنند. همچنین، در **جدول ۶**، در دپارتمان ۳، در شیف اول در روز اول کارگران ۲ و ۸ کار می‌کنند. به همین ترتیب، تخصیص کارگر به هرروز هفته در هر شیفت کاری در هر دپارتمان در **جداول ۴** و **۵** و **۶** تعیین‌شده است.

[1] Chica et al.

[2] Mora et al.

Scanned with CamScanner

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
	LE^1	30%	35%
نرخ بهره‌برداری	LE^2	35%	40%
	LE^3	40%	45%
	LF^1	20%	30%
نرخ خرابی	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 هرروز 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	۵5, 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 هرروز 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

Scanned with CamScanner

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 دادەشده 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) اجراشده و خروجی‌های آن در **جدول ۷** ارائه‌شده است. همچنین، در **جدول ۸**، مقدار پارامترهای از پیش تعیین‌شده برای الگوریتم مورچگان نشان دادەشده 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 تعیین‌شده مورچگان.
Table 8- Predetermined value of ant parameters.

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

۲-۵- 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 ارائه‌شده در *GAMS* با یکدیگر مقایسه می‌شود و در سرعت زمان حل این دو روش باهم مقایسه می‌شود. به‌منظور بررسی الگوریتم مورچگان استفاده‌شده برای این مسئله، این الگوریتم در محیط متلب کد نویسی شده است. پس‌ازآن ٦ مسئله در ابعاد مختلف تولیدشده است.

در **جدول ۹**، نتایج حاصل از حل دقیق مثال‌های تولیدشده با نرم‌افزار *GAMS* با نتایج حاصل از الگوریتم مورچگان بر اساس دو معیار زمان و مقدار تابع هدف با یکدیگر مقایسه شده است. ازآنجایی‌که زمان حل نرم‌افزار *GAMS* برای مسائل با ابعاد بالا بسیار زیاد است محدودیت زمانی ۳٦۰۰ ثانیه یا همان ۱ ساعت برای آن در نظر گرفته‌شده 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

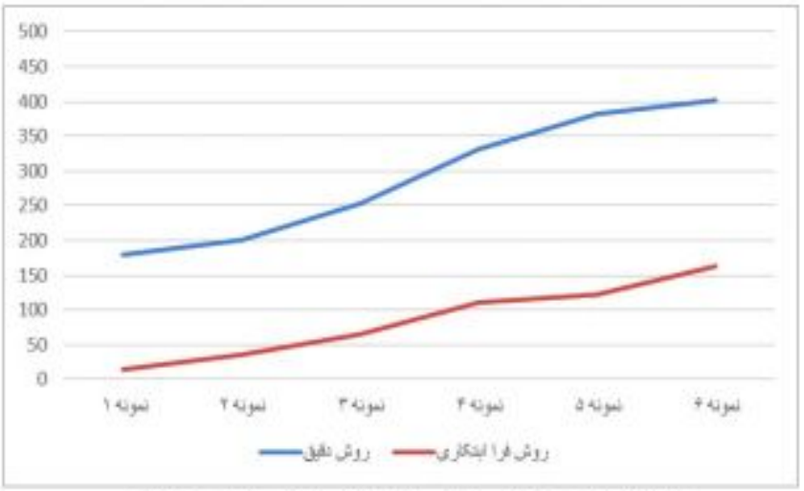
Scanned with CamScanner

اجرای برنامه اتمام می‌یابد. در **جدول ۹** خلاصه نتایج مقایسه نرم‌افزار *GAMS* با الگوریتم مورچگان چند هدفه ارائه‌شده است. همچنین با محاسبه میانگین گپ‌های محاسبه‌شده در هر مسئله در نظر گرفته‌شده، متوسط گپ ایجادشده بین معیارهای حل با استفاده ازنرم افزار *GAMS* و الگوریتم مورچگان، ۳٫۱% گزارش شده است. با توجه به اینکه مقدار گپ محاسبه‌شده در هر مسئله حداکثر ۵% گزارش‌شده لذا نتیجه می‌گیریم که مدل ارائه‌شده قابلیت خوبی در پاسخگویی به حل مسئله در نظر گرفته‌شده دارد. در **شکل ۱** زمان‌های حل مسئله را بر اساس روش دقیق و فرا ابتکاری نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده‌شده 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 اظهارنظر کرد که مسئله از درجه سختی *NP-HARD* برخوردار است؛ اما در همه حالات طبق روش الگوریتم مورچگان زمان محاسباتی نسبت به روش دقیق حل‌شده در نرم‌افزار *GAMS* کمتر است.

جدول شماره‌ی 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 داده‌شده و بر اساس آن مقدار تابع هدف گزارش‌شده 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 براین، در **جدول ۱۱**، در

Scanned with CamScanner

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.

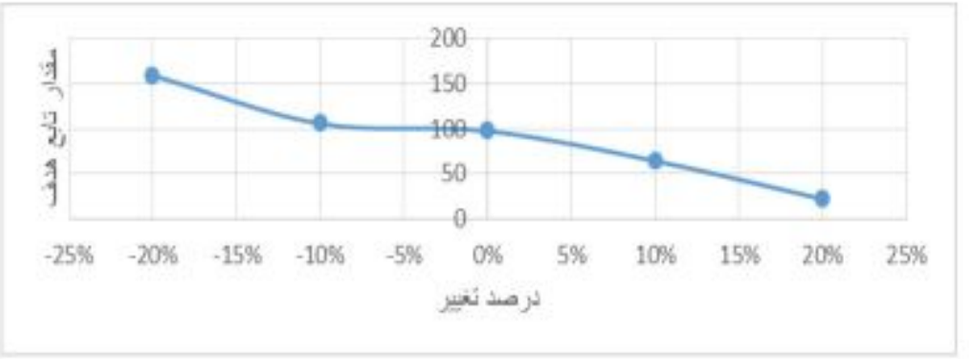
Table 10- Sensitivity analysis of the coefficient of increase of machine failure rate before repairs and maintenance.

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

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

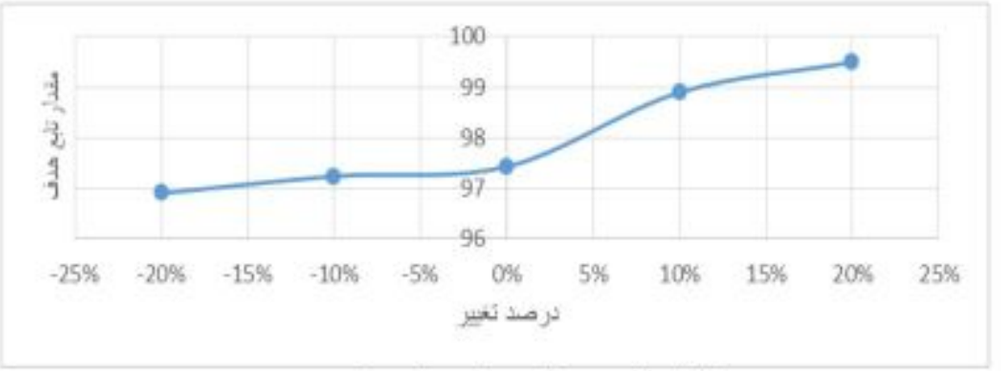
Table 11- Sensitivity analysis of failure rate reduction coefficient after repairs and maintenance.

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



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 موردتوجه 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 پیشنهادشده است. مهم‌ترین سهم مشارکت این تحقیق عبارت است از ارائه یک مدل ریاضی جدید به‌منظور برنامه‌ریزی تولید و نگهداری تعمیرات پیشگیرانه و نیروی کار و قابلیت کل

Scanned with CamScanner

سیستم و استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری کارآمد برای حل مسئله موجود در ابعاد بزرگ. درواقع این مدل ریاضی هم به دنبال کاهش نیروی انسانی از طریق تخصیص بهینه نفرات به هر دپارتمان در هرروز کاری و در هر شیف کاری و هم افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم می‌باشد. در این مدل پارامترهای مرتبط با نیروی کار و نگه‌داری و تعمیرات به‌صورت اعداد فازی بیان‌شده و از روش مینکوفسکی برای تبدیل مدل فازی به مدل غیر فازی استفاده‌شده است. برای حل این مدل ریاضی، الگوریتم مورچگان مورداستفاده قرار گرفت که نتایج عددی گویای کارایی این الگوریتم هم در کیفیت جواب‌ها و هم در سرعت عمل الگوریتم بوده است. نتایج حاصل‌شده هم در اعتبار سنجی مدل ریاضی و هم حل مسائل عددی مختلف نشان می‌دهد که رویکرد استفاده‌شده در این تحقیق که مبتنی بر ترکیب حوزه‌های مختلف تصمیم‌گیری در شرکت‌های تولیدی می‌باشد، می‌تواند منجر به ارائه راهکارهای مناسبی هم برای تولید و هم برای نگه‌داری و تعمیرات و هم برای زمان‌بندی نیروی کار باشد. همان‌طور که در **جدول ۹** نشان داده‌شده است، با توجه به ابعاد طراحی‌شده در نرم‌افزار گمز برای حل مدل ریاضی، متوسط گپ‌های حاصل‌شده از جواب‌های حل قطعی و فرا ابتکاری برابر ۳٫۱% به‌دست‌آمده است که در اندازه استانداردی قرار دارد همچنین، حل فرا ابتکاری قابلیت استفاده از ابعاد بزرگ برای تعریف مسئله را دارد. علاوه بر این، متوسط زمان حل در گمز ٤٥ هزار ثانیه است درصورتی‌که متوسط زمان حل الگوریتم مورچگان حدود ۳٥٤ ثانیه می‌باشد. 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. به‌منظور توسعه تحقیق پیشنهاد می‌شود که از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده شود و نیز از الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر مانند الگوریتم چندهدفه 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.ress.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. & Stützele, 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.ress.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

Ettaye, 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., & Sihn, 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., 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. 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

Scanned with CamScanner

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.ress.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.

Scanned with CamScanner