



Designing a Two-Stage D-optimal Approach for Selecting Components of Flexible Manufacturing Systems

Nima Pasha 

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Management, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran. E-mail: nima.pasha@ut.ac.ir

Fariborz Julai 

Prof., Department of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: fjolai@ut.ac.ir

Seyyed Hosein Razavi Haji Agha* 

*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Management, Faculty of Management and Financial Sciences, Khatam University, Tehran, Iran. E-mail: h.razavi@khatam.ac.ir

Abstract

Objective

Flexible Manufacturing Systems (FMS) are integrated workstations that utilize computer-controlled equipment components for production. These systems are managed by a central computer, which significantly enhances the efficiency and productivity of the production process. Accordingly, a case study is conducted on an FMS electrical manufacturing system with complex manufacturing processes, where automation on the production line is crucial. Selecting the optimal number of advanced equipment is a challenging and vital issue for managers aiming to boost productivity and efficiently fulfill customer orders. It is a hard-to-change model, and replacing equipment incurs substantial costs.

Methods

This study employs the two-stage D-Optimal method to optimize the combination of FMS elements and equipment. The D-Optimal response level input is derived from discrete-event simulation results. Depending on the conditions, various FMS equipment is allocated to each process. Each simulation result for element combinations serves as input for the experimental design. Additionally, the response level (y) of experiments from various FMS indexes is calculated using a weighting method. To reduce the number of experiments and increase data accuracy in a case study with hard-to-change parameters, all combinations are categorized based on the number of automated and manual equipment. The two stages of the D-Optimal design are defined as follows: In the first stage, all combinations within these categories are investigated. In the second stage, the optimized combination from the first

stage is analyzed to determine the best configuration. Experiments in the top category from the first stage are simulated and further evaluated in the second stage of the D-Optimal method.

Results

In the first phase, all advanced production equipment and FMS elements were considered. After selecting the best-calculated yy'' value, which was 44., 33.. 99 in this category, another D-Optimal design was optimized in the second phase to determine the best combination. This combination yielded a yy'' value of 55., 11.. 88, representing an improvement over the best category in the first phase of the D-Optimal design. Consequently, the optimized combination from the first phase was further refined. The results from the developed D-Optimal method and the second phase indicate that the optimal combination of equipment involves using automated and FMS equipment for approximately 92.8% of the total components. Finally, a list of recommended FMS equipment is provided, and its productivity is compared with the productivity at the current level and a higher degree of automation for this production line.

Conclusion

In summary, the results of the experimental design show that using advanced production systems does not necessarily improve system efficiency, and determining optimal combinations requires accurate calculations.

Keywords: Computer-aided design of experiments, Flexible manufacturing systems, Two-stage D-optimal design, Work-in-Process.

Citation: Pasha, Nima; Julai, Fariborz & Razavi Haji Agha, Seyyed Hosein (2024). Designing a Two-Stage D-Optimal Approach for Selecting Components of Flexible Manufacturing Systems. *Industrial Management Journal*, 16(4), 535-559. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2024, Vol. 16, No 4, pp. 535-559

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.349193.1007992>

Article Type: Research Paper

© Authors

Received: October 13, 2022

Received in revised form: July 06, 2023

Accepted: August 27, 2024

Published online: December 02, 2024





توسعه مدل D-optimal دومرحله‌ای به منظور انتخاب ترکیب اجزای سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر

نیما پاشا

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت صنعتی، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران. رایانامه: nima.pasha@ut.ac.ir

فریبرز جولای

استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: fjolai@ut.ac.ir

سید حسین رضوی حاجی آقا *

* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و علوم مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: h.razavi@khatam.ac.ir

چکیده

هدف: سیستم تولید انعطاف‌پذیر FMS، از ایستگاه‌های تولیدی‌ای شکل گرفته است که با سیستمی خودکار به یکدیگر متصل شده‌اند و توسط یک کامپیوتر مرکزی کنترل می‌شوند. هدف اصلی مقاله، بهینه‌سازی انتخاب اجزا و ترکیبات تجهیزات با حداقل آزمایش و بیشترین دقت نتایج در این سیستم است که می‌تواند در کاهش هزینه‌ها، بهبود فرایندها و افزایش بازده تولید تأثیر بسزایی داشته باشد. مطالعه موردی این پژوهش صنعت الکترونیک است. در این صنعت فرایندهای تولیدی بسیار پیچیده است و استفاده از اتوماسیون ضرورت دارد. در واقع انتخاب بهترین ترکیب از تجهیزات پیشرفته و اتوماتیک برای دستیابی به انعطاف‌پذیری سیستم تولیدی، مسئله بسیار مهمی برای مدیران خط است تا بتوانند پاسخ‌گویی به سفارش‌های مشتریان به‌موقع پاسخ دهند. این در حالی است که مسئله در دسته H2C قرار دارد و می‌بایست ترکیب بهینه‌ای از تجهیزات انتخاب شود.

روش: در این پژوهش برای دستیابی به بهترین ترکیب از تجهیزات، از روش D-Optimal دو مرحله‌ای استفاده شده است. برای محاسبه شاخص‌های تولید به‌ازای ترکیبات تجهیزات مورد استفاده در وضعیت فعلی خط تولید و سایر ترکیبات، شبیه‌سازی گسسته صورت می‌گیرد. طبق نتایج محاسبه شده برای شاخص‌ها و روش وزن‌دهی، سطح پاسخ «y» مربوط به آزمایش‌ها محاسبه می‌شود. هر یک از نتایج به‌دست‌آمده، ورودی یک آزمایش در طرح D-Optimal است. آزمایش‌ها بر اساس سطح اتوماسیون تجهیزات دسته‌بندی می‌شوند و به‌دلیل نزدیک‌بودن سطح پاسخ آن‌ها، فقط برای هر دسته از آن‌ها شبیه‌سازی صورت می‌گیرد تا با آزمایش‌ها نتایج دقیق‌تر و هزینه کمتر شود. در مرحله اول طرح، کلیه ترکیبات از تجهیزات بررسی می‌شود و در مرحله دوم طرح، برای کلیه حالات دسته‌بندی منتخب از مرحله اول، شبیه‌سازی صورت می‌گیرد و با توجه به سطح پاسخ به‌دست‌آمده از آن‌ها، طرح بررسی می‌شود.

یافته‌ها: در مرحله اول، کلیه حالات از سطح اتوماسیون تجهیزات دسته‌بندی و از هر دسته، یک نمونه انتخاب شد؛ سپس کلیه حالات ترکیبات از اجزای FMS و تجهیزات اتوماتیک بررسی شد. بر اساس محاسبات صورت گرفته، سطح پاسخ بهترین ترکیب در این مرحله ۱۴۷۳۳/۰۹ به‌دست آمد و با بررسی دقیق جزئیات، سطح پاسخ‌های این دسته و کلیه حالات آن در مرحله دوم، مقدار سطح

پاسخ برای بهترین حالت برابر با ۱۵۱۳۱۷/۸۸ به‌دست آمد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که میزان استفاده بهینه از تجهیزات اتوماتیک ۹۲/۸ درصد است. بر این اساس، فهرستی از بهترین ترکیب تجهیزات انتخاب شده پیشنهاد شده است؛ سپس بهره‌وری خط در بهترین حالت از ترکیبات تجهیزاتی که مشخص شد با حالت دوم محاسبه شده از ترکیبات بهینه و وضع موجود خط مقایسه شده است.

نتیجه‌گیری: طبق نتایج به‌دست‌آمده از طراحی آزمایش‌ها، استفاده صرف از تجهیزات کاملاً اتوماتیک، کارایی سیستم‌های تولیدی را افزایش نمی‌دهد؛ بلکه برآورد میزان اتوماسیون در خطوط مونتاژ نیز به محاسبات بسیار دقیق نیاز دارد.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر، طراحی آزمایش‌ها به‌کمک کامپیوتر، طرح D-Optimal دو مرحله‌ای، محصولات در حال تولید.

استناد: پاشا، نیما؛ جولای، فریبرز و رضوی حاجی آقا، سیدحسین (۱۴۰۳). توسعه مدل D-optimal دومرحله‌ای به‌منظور انتخاب ترکیب اجزای سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر. مدیریت صنعتی، ۱۶(۴)، ۵۳۵-۵۵۹.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

doi: <https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.349193.1007992>

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۳، دوره ۱۶، شماره ۴، صص. ۵۳۵-۵۵۹

ناشر: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان



مقدمه

انعطاف‌پذیری در خطوط تولید، از برنامه‌های درازمدت برخی سیستم‌های تولیدی است. سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر (FMS)^۱ یکی از مفاهیم انعطاف‌پذیری است که از ابتدای پیدایش بسیار مورد توجه قرار گرفته است (نیلانند، والجوس و تیووننا، لانز و نیمین^۲، ۲۰۱۹). در واقع سیستم تولید انعطاف‌پذیر، گروهی از تجهیزات و وسایل حمل‌ونقل را شامل می‌شود که از طریق یک کامپیوتر مرکزی کنترل می‌شوند (المراقی و کاگیانو^۳، ۲۰۱۹). همچنین تجهیزات و ماشین‌آلات پیشرفته تولید، بر اساس فناوری صنایع نسل چهارم و استفاده از فناوری اطلاعات (جاوید، هالیم، پراتاپ سینگ و سومان^۴، ۲۰۲۲)، استفاده از تجهیزات اتوماتیک در خط تولید، وسایل حمل‌ونقل هدایت شده^۵، وسایل حمل‌ونقل مواد، انبارش و بازیابی اتوماتیک^۶ و ماشین‌های CNC^۷ تأثیر زیادی در ارتقای عملکرد سیستم و افزایش انعطاف‌پذیری تولید دارد. در واقع انتخاب شاخص‌های ورودی مختلف، امری بسیار مهم برای پایش عملکرد این سیستم است (احمد، علی، خان و اسجد^۸، ۲۰۲۲).

دسترسی به بیشترین سطح تولید و استفاده بهینه از تجهیزات و منابع، همواره از مشکلات اصلی مدیران است؛ بنابراین نیاز به محاسبه و بهبود عملکرد سیستم‌های تولیدی ضروری است (محبوبی، کردرستمی، امیرتیموری و قانع کنفی، ۱۴۰۰)؛ زیرا سیستم‌های تولیدی باید انعطاف‌پذیر و در برابر نیاز بازار پاسخ‌گو باشند (فخرزاد، برخوردار و جعفری ندوشن، ۱۴۰۰). در واقع امروزه افزایش سلاقی مشتریان و تنوع بالای محصولات، هزینه‌های تولید و عملیاتی را افزایش داده است (عینی سرکله، حافظ الکتب، توکلی مقدم و نجفی، ۱۴۰۱). به همین دلیل استفاده از تجهیزات با تکنولوژی مناسب می‌تواند در افزایش کارایی بسیار مؤثر باشد؛ زیرا به‌طور مستمر تکنولوژی در جهت تسهیل و تسریع کارها گام برمی‌دارد (اسماعیل‌زاده، کاظمی و صفری، ۱۴۰۱).

همچنین با توجه به بازار رقابتی کنونی، زمان‌بندی، شبیه‌سازی گسسته و بهبود فرایندها در خطوط تولیدی پیچیده، می‌تواند کارایی تولید را بالا ببرد (گپی و چاندرا^۹، ۲۰۲۱). بنابراین استفاده از تجهیزات اتوماتیک، در افزایش بازدهی تأثیر زیادی خواهد داشت؛ اما هزینه راه‌اندازی این سیستم‌ها، باید متناسب با ظرفیت سیستم، سفارش‌ها و سایر عوامل مرتبط با سیستم تولیدی باشد. به عبارت دیگر، خرید تجهیزات با سطح بالای اتوماسیون، لزوماً نمی‌تواند کارایی را افزایش دهد و محاسبه بهترین ترکیب از تجهیزات در هر شرایط تولیدی، می‌تواند باعث صرفه‌جویی در هزینه شود و در عین حال انعطاف‌پذیری را بهبود دهد. این امر به نوع محصولات تولیدی، سیستم تولیدی، ماهیت صنعت و نوع تجهیزات اتوماتیک بستگی دارد. برای نمونه در یک خط تولید، استفاده از انواع ماشین‌های CNC یا ربات‌های صنعتی مشخص تا تعدادی

1. Flexible Manufacturing Systems
2. Nylund, Valjus, Toivonen, Lanz & Nieminen
3. ElMaraghy & Caggiano
4. Javaid, Haleem, Pratap Singh & Suman
5. Automated-Guided Vehicles
6. Automated Storage and Retrieval Systems
7. Computer Numerical Control
8. Ahmad, Ali, Khan, Asjad
9. Gopi & Chandra

مشخص، می‌تواند کارایی در ظرفیت تولید، نرخ خروجی خط^۱، زمان سیکل^۲ و محصولات در حال تولید^۳ را به همراه داشته باشند. طبقه‌بندی المان‌های سیستم FMS شامل وسیله نقلیه هدایت شونده یا سیستم هدایت هوشمند^۴، سیستم انبار و بازیابی تمام مکانیزه^۵، ماشین‌های CNC، ربات‌ها، تجهیزات تولید اتوماتیک، کنترل کننده منطقی قابل برنامه‌ریزی^۶ و... هستند که استفاده با تعداد مختلف از آن‌ها و با تنوع مختلف از انواع آن‌ها چالشی پیش روی مدیران در سیستم‌های FMS است (گروور^۷، ۲۰۲۰).

اصولاً بهینه‌سازی در سیستم‌های تولیدی، از مسائل ضروری است که باید همواره مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا سیستم‌های تولیدی باید در برابر تغییرات ناگهانی محیطی پاسخ‌گو باشند. بنابراین سوئیچ کردن از یک سیستم دستی به یک سیستم تولیدی پیشرفته با داشتن سرمایه مشخص و در نظر گرفتن شرایط مشخص و همچنین پارامترهای دخیل در آن می‌تواند بسیار ضروری باشد (ژانگ، مینگ و باو^۸، ۲۰۱۷). تحقیق در حوزه بررسی و تحلیل عملکرد سیستم‌های FMS با تمرکز بر سه عامل کیفیت، بهره‌وری و انعطاف‌پذیری و بر اساس ۱۵ متغیر توسط رویکردهای مدل‌سازی ساختاری تفسیری، معادلات ساختاری و نظریه گراف و رویکرد ماتریسی (GTMA) صورت گرفته است (جین و راج^۹، ۲۰۱۶). همچنین به منظور زمان‌بندی تولید در FMS بر اساس شبکه‌های پتری، مدل‌هایی توسعه یافته تا باعث بهبود در فرایندهای تولیدی شود (ونزبرگر^{۱۰}، ۲۰۱۹). همچنین در خصوص پیش‌بینی خرابی‌ها در خطوط مونتاژ FMS با استفاده از یادگیری عمیق تحقیقاتی صورت گرفته است (لی، پنگ، ژنگ، گوان و لی^{۱۱}، ۲۰۲۲). یکی از مزایای مدل ارائه شده در این تحقیق، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی آماری و طراحی آزمایش‌ها در جهت افزایش بهره‌وری تولید است. طرح توسعه‌ای پارامترهای ورودی زیادی دارد که برخی از آن‌ها را به‌سختی می‌توان تغییر داد. بنابراین از یک طرح D-Optimal در دو سطح استفاده شده که بهترین ترکیب استفاده از تجهیزات و ماشین‌آلات اتوماتیک انتخاب شود.

در این تحقیق ابتدا اطلاعات فرایندها شامل سیکل تولید، زمان‌های راه‌اندازی، تجهیزات و منابع مورد استفاده و توالی عملیات در سیستم تولیدی فعلی در نظر گرفته شده و فرایند آن مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌شود. سپس برای حالات مختلف ترکیبات تجهیزات، مدل شبیه‌سازی به‌دست‌آمده و هر کدام از مدل‌ها اجرا می‌شوند. در این خصوص میزان منابع تخصیص یافته به هر فرایند در مدل تغییر می‌کند. بر اساس شاخص‌های مختلف از قبیل میزان تولید، زمان کلی تولید، میزان ضایعات و... نتایج شبیه‌سازی برای هر ترکیب به‌دست‌آمده و با استفاده از روش وزن‌دهی مقدار سطح پاسخ هر آزمایش محاسبه می‌شود. در ضمن، ترکیبات مشابه در یک طبقه‌بندی قرار گرفته و برای هر طبقه شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. سپس در فاز اول طرح D-Optimal محدودیت‌های مدل اعمال شده و برای اجراهای اصلی، آزمایش

1. Production Rate
2. Cycle Time
3. Work-in-Process (WIP)
4. Automatic Guided Vehicles (AGVs)
5. Automated Storage and Retrieval System (AS/RS)
6. Programmable Logic Controllers (PLCs)
7. Groover
8. Zhang, Ming & Bao
9. Jain & Raj
10. Wenzelburger
11. Li, Pang, Zheng, Guan & Le

طراحی و معادله رگرسیون و همچنین حالت بهینه به دست می‌آید. در فاز دوم طراحی و بر اساس طبقه‌بندی انتخاب شده، تمامی اجراها بررسی شده و بهترین ترکیب انتخاب می‌شود.

در بخش دوم مقاله، مرور ادبیات تحقیق مرتبط با روش‌های سطح پاسخ و مدل‌های بهینه و همچنین تحقیقات مرتبط صورت گرفته در این خصوص، تشریح شده است. در بخش سوم، روش ارائه شده مشخص و نتایج شبیه‌سازی هر اجرا محاسبه شده است. همچنین نتایج طراحی آزمایش و معادلات رگرسیون در هر دو فاز نیز به دست آمده است. در بخش چهارم تحقیق، بهترین ترکیب از ماشین‌آلات و دستگاه‌های مورد استفاده در خط تولید FMS مشخص شده است و نتایج شاخص‌های آن، با وضعیت فعلی تولید و یک مدل با درجه اتوماسیون بالاتر مقایسه شده است. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری صورت گرفته است.

پیشینه نظری پژوهش

در بخش پیشینه پژوهش، ابتدا مفاهیم کلی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر و مفاهیم طراحی آزمایش‌ها در بخش نظری تشریح شده و در پیشینه تجربی نیز مطالعات قبلی صورت گرفته در این حوزه، به همراه مطالعات مرتبط صورت گرفته مرور شده است.

سیستم‌های تولید اتوماتیک پیشرفته و اتوماتیک

در واقع سیستم تولیدی FMS، تجهیزات مورد استفاده در خط تولید شامل ماشین‌های کنترلی توسط کامپیوتر، ربات‌ها، سیستم حمل‌ونقل و انبارش و بازیابی اتوماتیک، جیگ و فیکسچرها و ماشین‌های پیشرفته را یکپارچه می‌کند تا سطح اتوماسیون در تولید افزایش یابد و تولید کارا تر با انعطاف‌پذیری بیشتر شود (گروور، ۲۰۲۰)؛ زیرا خطوط تولید در شرایط فعلی رقابتی، باید چابک و انعطاف‌پذیر باشند (هراندز و همکاران^۱، ۲۰۲۰). این سیستم علاوه بر انعطاف‌پذیری، ارتباط هوشمند بین عملیات تولید، اجزای FMS و تجهیزات را با یک کامپیوتر مرکزی فراهم می‌کند و موجب افزایش کیفیت محصول و تسهیل در جابه‌جایی مواد می‌شود (دانیان و همکاران^۲، ۲۰۲۱). به دلیل انعطاف‌پذیر بودن سیستم‌های FMS، امکان پاسخ‌گویی به سفارش‌ها در صنایع مختلف و با تنوع بالای محصولات میسر است که با زمان‌بندی تولید مرتبط با برنامه‌های تجهیزات و ماشین‌آلات مورد استفاده در این نوع سیستم به صورت پویا این امر میسر می‌شود (گو، هو، رن و یانگ^۳، ۲۰۲۱). چیدمان در سیستم‌های FMS توسط سیستم حمل‌ونقل مشخص می‌شود. انواع چیدمان‌های متداول در FMS به پنج دسته خطی، چرخه‌ای، نردبانی، میدان باز، سلول ربات - مرکز تقسیم می‌شوند (گروور، ۲۰۲۰). به همین دلیل در سیستم برنامه‌ریزی در خصوص این نوع خطوط مونتاژ، برنامه کامپیوتر مرکزی و کنترل و پایش اجزا در نظر گرفته می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۲). در واقع عملکرد این نوع سیستم، به منظور کاهش زمان تولید، خرابی‌ها و افزایش کارایی مورد بررسی قرار می‌گیرد (محمودا، کارائولوا، اتو و شوچنکو^۴، ۲۰۱۷).

1. Hernandez

2. Daniyan

3. Qu, Hu, Ren & Yang

4. Mahmooda, Karaulova, Otto & Shevtshenko

مفاهیم طراحی آزمایش‌ها

تکنیک‌های طراحی آزمایش‌ها که شامل تحلیل واریانس، روش رگرسیون، طرح عاملی، طرح‌های 2^k کامل و کسری، روش‌های سطح پاسخ^۱ نظیر طرح مرکب مرکزی (CCD)^۲ و باکس - بنکن (BBK)^۳ هستند، امکان تحلیل بسیار دقیق را میسر می‌کنند تا با توجه به آزمایش‌ها، معادلات مربوطه را محاسبه کند. همچنین روش‌های دیگری از قبیل تحلیل Ridge، تندترین صعود با در نظر گرفتن محدودیت خطی و... هستند که امکان انتخاب بهترین گزینه را فراهم می‌کند (مونتگومری^۴، ۲۰۱۲). بهینه‌سازی در طراحی آزمایش‌ها، تکنیکی است تا بر اساس ورودی‌های صحیح و دقیق آزمایش، به بهترین نتایج دست یافت؛ به این معنا که با حداقل آزمایش، سیستم مورد مطالعه به بهترین کارایی برسد. از فواید طراحی آزمایش‌ها بهینه‌سازی سیستم، کاهش هزینه‌ها و بررسی جامع سیستم است. اجزای طراحی آزمایش عبارت‌اند از: فاکتورها، متغیرها، سطح و پاسخ. در خصوص روش‌های سطح پاسخ، سه مدل رگرسیون زیر فرموله می‌شود (میرز، داگلاس و اندرسون کوک^۵، ۲۰۱۶):

۱. مدل خطی:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \varepsilon \quad \text{رابطه ۱}$$

۲. تابع اثر متقابل^۶ یا 2FI:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1 \leq i \leq j}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad \text{رابطه ۲}$$

۳. تابع چند جمله‌ای با عبارت‌های چهارگانه^۷:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1 \leq i \leq j}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad \text{رابطه ۳}$$

که در روابط فوق y متغیر پاسخ، x_i متغیرهای ورودی، β_i ضرایب رگرسیون، β_0 عرض از مبدأ و ε خطای مدل است. علاوه بر طراحی آزمایش‌ها توسط روش‌های استاندارد، روش‌های متناوب جایگزین مانند D-Optimal هم هستند که در آن نواحی نامنظم بوده و تعداد آزمون‌ها کاهش می‌یابد، استفاده شوند. همچنین زمانی که بخواهیم مدل رگرسیون ویژه داشته و مدل سفارشی شود، این طرح کاربرد دارد. همچنین زمانی که بخواهیم مدل رگرسیون ویژه داشته باشیم و مدل سفارشی شود، این طرح کاربرد دارد. (مونتگومری، ۲۰۱۲).

1. Response Surface Methodology
2. Center Composite Design
3. Box Behnken Design
4. Montgomeri
5. Myers, Montgomery & Anderson-Cook
6. Function Interaction
7. Polynomial Function by Quadratic Terms

پیشینه تجربی پژوهش

تحقیقات بررسی شده در خصوص روش‌های سطح پاسخ و بهینه

جدول زیر برخی تحقیقات صورت گرفته در رابطه با روش‌های سطح پاسخ و طرح‌های بهینه را به همراه الگوریتم مورد استفاده در آن‌ها تشریح می‌کند.

جدول ۱. مقایسه تعداد آزمایش‌ها در روش‌های عاملی کامل، کسری و D-Optimal

تشریح الگوریتم در تحقیق	روش مورد استفاده		نویسنده (سال تحقیق)
	بهینه	طراحی آزمایش	
استفاده از روش‌های سطح پاسخ و طرح D-Optimal در مدل ذخیره و اقتصادی	D	RSM	نگوین، بائه، ریو، نام و تو ^۱ (۲۰۱۴)
استفاده از یک روش تحلیلی D-Optimal، توسعه D-Efficiencies روش‌های نمونه‌گیری Equidistant	D	-	لیو، یو و ونگ ^۲ (۲۰۱۸)
استفاده از روش‌های سطح پاسخ به منظور افزایش بهره‌وری در سیستم تولیدی	-	RSM	زهرایی، روحانی و ونگ ^۳ (۲۰۱۸)
استفاده از روش‌های سطح پاسخ و مدل برازش شده با سه فاکتور جهت بهینه‌سازی فرایندها	-	RSM	وانگوی، اوکانگو و رانیمبو ^۴ (۲۰۱۹)
استفاده از روش‌های سطح پاسخ و اندازه‌گیری ظرفیت به منظور بهینه‌سازی فرایندها	-	CCD	اتینو، لی، ریچارد و کانگ ^۵ (۲۰۲۰)
استفاده از روش‌های سطح پاسخ (روش CCD)، بهره‌وری D، A و G، واریانس پیش‌بینی متوسط مقیاس شده ^۷ بر اساس روش RSM و تحلیل ANOVA	-	RSM CCD ANOVA	کومار، کومار، کریشنا و کومار ^۶ (۲۰۲۰)
استفاده از طرح D-Optimal برای مدل رگرسیون ضرایب تصادفی و توسعه قضیه Elving در طرح D-Optimal	D	-	لیو، یو و چاترجی ^۸ (۲۰۲۰)
استفاده از طرح D-Optimal مخروطی یا میکس و trace counter plots	D	-	رادفر و همکاران ^۹ (۲۰۲۰)
استفاده از طرح D-Optimal مخروطی یا میکس	D	-	کارنیرو و همکاران ^{۱۰} (۲۰۲۰)

1. Nguyen, Bae, Ryoo, Nam & Tu
2. Liu, Yue & Wong
3. Zahraee, Rohani & Wong
4. Wangui, Okango & Ranyambo
5. Otieno, Lee, Lee, Richard & Kang
6. Kumar, Kumar, Krishna & Kumar
7. Scaled Average Prediction Variance
8. Liu, Yue & Chatterjee
9. Radfar
10. Carneiro et al.

تشریح الگوریتم در تحقیق	روش مورد استفاده		نویسنده (سال تحقیق)
	بهینه	طراحی آزمایش	
استفاده از روش سطح پاسخ برای طراحی محصولات و بررسی رفتار متغیرها که کاربرد این روش شامل توسعه، فرموله کردن، طراحی و بهینه سازی است.		RSM	اسفه، مطلبی و طغرای ^۱ (۲۰۲۰)
استفاده از روش‌های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی ANN		RSM	صالح و همکاران ^۲ (۲۰۲۳)
استفاده از روش دو مرحله‌ای D-Optimal با در نظر گرفتن نتایج شبیه‌سازی گسسته و وزن‌دهی شاخص‌ها در سیستم FMS	D		تحقیق جاری

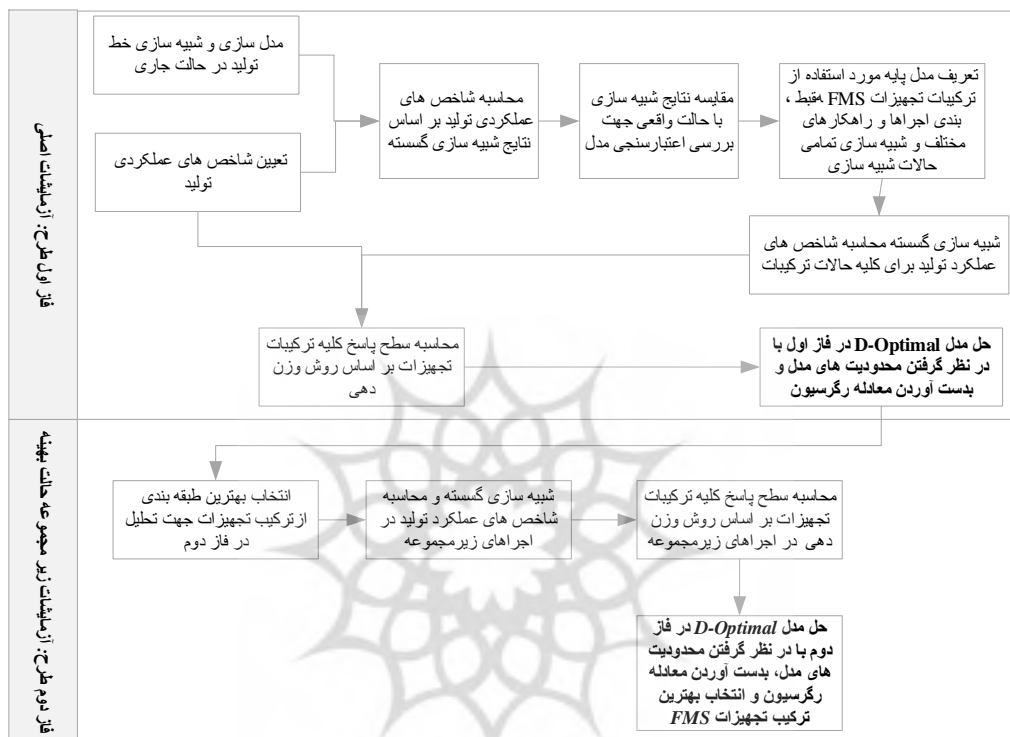
شکاف پژوهش

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی آماری و طراحی آزمایش‌ها، به‌منظور انتخاب بهترین ترکیب تجهیزات در خطوط موتناژ انعطاف‌پذیر، می‌تواند تأثیر زیادی در بهره‌وری و سود خط تولید مورد مطالعه داشته باشد. از ابعاد کمی بهبود می‌توان به کاهش محصولات در جریان ساخت، تولید به تعداد مورد نیاز، بهبود شاخص‌های خرابی دستگاه‌ها، کاهش زمان سیکل تولید و نرخ خروجی خط اشاره کرد. همچنین در خصوص ابعاد کیفی بهبود نیز می‌توان به افزایش کیفیت محصولات با تکنولوژی تولیدی پیشرفته، کاهش بی‌کاری نفرت و بهبود سیستم نت اشاره کرد. در این تحقیق، از طرح D-Optimal که بر اساس محدودیت‌های تعریف شده در خطوط تولید با تجهیزات متنوع از نوع دشوار در برابر تغییر و پیچیدگی زیاد، استفاده شده است. استفاده از این طرح در دو فاز باعث شده تا تعداد آزمایش‌ها و شبیه‌سازی گسسته کمتر شده اما دقت داده‌ها افزایش یابد. همچنین به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر از بین حالات مختلف ترکیبات تجهیزات باعث شده تا انتخاب بهترین ترکیب از المان‌های FMS میسر شود. روش پیشنهادی این تحقیق، در مورد تعیین درجه اتوماسیون در خطوط تولید پیشرفته و اتوماتیک است. ضمناً امکان استفاده از طراحی آزمایش‌ها به کمک کامپیوتر در دو فاز صورت گرفته که از نظر کیفی باعث افزایش دقت نتایج و از نظر کمی نیز کاهش تعداد اجراها جهت رسیدن به محاسبات شاخص‌ها شده است. همچنین امکان استفاده از روش توسعه یافته در تحقیقات آتی و در مورد سایر حوزه‌ها و صنایع متناسب با شاخص‌های کیفی و کمی مورد نیاز آن‌ها وجود دارد.

روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق طرح دو مرحله‌ای D-Optimal در سیستم FMS با شاخص‌های مختلف عملکردی ارائه و نتایج ورودی آزمایش‌ها یا سطح پاسخ توسط روش شبیه‌سازی گسسته و وزن‌دهی توسعه داده شده است. در فاز اول طرح، بهترین ترکیب از طبقه‌بندی ترکیب تجهیزات مورد استفاده انتخاب شده و بر اساس آن بخش، در فاز دوم جزئیات بیشتر در نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. مطالعه موردی در این تحقیق در شرکت شناپدر الکترونیک است.

افزایش بهره‌وری و سرعت تولید، کاهش موجودی محصولات در حال ساخت و تطابق بیشتر حجم تولید با سفارش‌ها با به‌کارگیری تجهیزات تولید اتوماتیک و پیشرفته متناسب با نیاز و شرایط سیستم مورد مطالعه از ضروریات انجام تحقیق است و در صورت عدم استفاده از مدل ارائه شده، عواقب مشهود و نامشهودی از قبیل افزایش سفارش‌های از دست رفته مشتری و هزینه‌های مربوطه با به‌کارگیری تجهیزات سنتی و نفرت تولید و همچنین کاهش کیفیت در پی خواهد داشت.



شکل ۱. مراحل اجرای پژوهش

کارخانه شیندر الکتریک دو خط تولید برای محصولات فشار ضعیف و فشار قوی دارد که فرایندهای تولید هر کدام متفاوت است. هر یک از این خطوط، از پنج ایستگاه کاری اصلی بازرسی ورودی و ذخیره سازی مواد، مونتاژ مکانیکی، نصب قطعات و سیم کشی، بررسی و تست کیفیت و بسته بندی و تحویل محصولات تشکیل شده است. بر اساس فرایندهای تولید مشخص شده توزیع‌های آماری ورودی‌ها و زمان فرایند تولید بر اساس منابع مختلف توسط بخش تحلیل ورودی نرم‌افزار ارنا مشخص شده است. جمع‌آوری داده‌ها و پارامترهای مسئله در قالب پرسش‌نامه تهیه شده است که کلیه اطلاعات مربوط به تولید، زمان فرایند، زمان بین ورود مواد، خرابی‌ها و... در آن دیده شده است.

به‌صورت کلی در هر مرحله بعد از شبیه‌سازی، باید چهار مرحله زیر صورت گیرد تا معادله رگرسیون و حالت بهینه

انتخاب شود:

الف. ابتدا شاخص‌های مدل باید مشخص شوند. شاخص‌های در نظر گرفته شده که از اجرای شبیه‌سازی به دست می‌آیند، به شرح جدول ۲ است (گروور، ۲۰۲۰):

جدول ۲. اندیس‌های جداول و توضیحات مربوط به آنها

اندیس	توضیحات
WIP1&WIP2	محصولات موجود در خط تولید با محصولات ولتاژ پایین و ولتاژ بالا (به ترتیب)
Products1&2	تعداد محصولات تولید شده در خط تولید با محصولات ولتاژ پایین و ولتاژ بالا (به ترتیب)
T	زمان کل شبیه‌سازی
Products	تعداد محصولات تولیدی در خط تولید با محصولات ولتاژ پایین + در خط با محصولات ولتاژ بالا
A: LVPRP	درصد استفاده از منابع اتوماتیک ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین
B: HVPRP	درصد استفاده از منابع اتوماتیک ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا
C: LVPRP2	درصد استفاده از منابع اتوماتیک ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین
D: HVPRP2	درصد استفاده از منابع اتوماتیک ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا
E: LVMRP	درصد استفاده از منابع دستی ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین
F: HVMRP	درصد استفاده از منابع دستی ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا
G: LVPMP2	درصد استفاده از منابع دستی ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین
H: HVPMP2	درصد استفاده از منابع دستی ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا
S1&S2	ضایعات در خط تولید محصولات با ولتاژ پایین و ولتاژ بالا (به ترتیب)

ب. سپس مقادیر x_1 و x_2 محاسبه می‌شود که به ترتیب میزان مجموع درصد استفاده از منابع اتوماتیک و دستی برای هر دو خط تولید محصولات است. در واقع تعداد اجراها برای هر حالت دستی و اتوماتیک بین ۴ تا ۸۰ است و بر اساس طبقه‌بندی صورت گرفته، تعداد اجراهای اصلی ۷۸ دفعه است که اجراهای زیرمجموعه هم دارد. در این مدل، تمامی فاکتورها به دو دسته دستی و اتوماتیک تقسیم می‌شود.

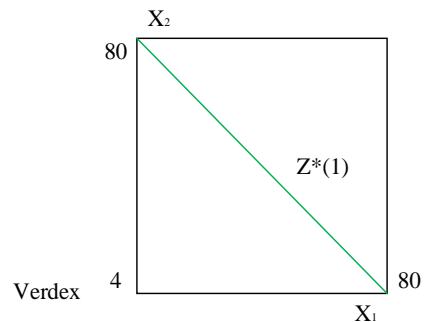
رابطه (۴) Automated Factors: $x_1 = A + B + C + D$

رابطه (۵) Manual Factors: $x_2 = E + F + G + H$

Automated
 $4 \leq x_1 \leq 80$

Manual
 $4 \leq x_2 \leq 80$

$$1 = \frac{x_1 - LL_{x_1}}{CP_{x_1} - LL_{x_1}} + \frac{x_2 - LL_{x_2}}{CP_{x_2} - LL_{x_2}} \rightarrow x_1 + x_2 = Z * 1$$



پ. نتایج بهینه در مرحله اول طرح به صورت زیر نشان داده می‌شوند:

$$x_1^* = A^* + B^* + C^* + D^*$$

$$x_2^* = E + F^* + G^* + H^*$$

$$Z_i = (A + B + C + D) + (E + F + G + H) = (A^* + B^* + C^* + D^*) + (E + F^* + G^* + H^*)$$

$$Z_i = x_1 + x_2 = x_1^* + x_2^* = 84$$

بر اساس نتایج بهینه به دست آمده در مرحله اول، مرحله دوم طرح آغاز می شود و نتایج بهینه یا بهترین ترکیب نیز به صورت x_1^* و x_2^* است. مقدار Z بهینه در هر دو مرحله طرح یکسان است:

Automated
 x_1^* is calculated

Manual
 x_2^* is calculated

ت. در نهایت، معادله رگرسیون برازش شده به صورت زیر به دست می آید:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot Z_j + \sum_{j=1}^m \beta_{jj} \cdot Z_j^2 + \sum_{j=1 \leq j < l \leq m} \beta_{jl} \cdot Z_j \cdot Z_l + \varepsilon \quad (\text{رابطه ۶})$$

تابع هدف و محدودیت های مدل برای محاسبه مقدار سطح پاسخ برای هر دو مرحله طرح از مدل زیر به دست می آید.

$$\text{Yield} = a \cdot \sum_{j=1}^m Z_j \cdot W_j \quad (\text{رابطه ۷})$$

st:

$$\sum_{j=1}^m W_j = 1$$

$$Z_1 = \sum_{k=1}^K \text{WIP}_k = (\text{WIP 1} + \text{WIP 2}) / 2$$

$$Z_2 = \sum_{k=1}^K \text{Production Number}_k$$

$$Z_3 = \left(\sum_{k=1}^K \text{Production Rate}_k \right)_K$$

$$Z_4 = \left(\sum_{i=1}^n \text{Average Resource Productivity} \right)_n = \frac{1}{8} (\sum_{i=1}^8 A + B + \dots + H)$$

$$Z_5 = \sum_{k=1}^K \text{Scrap}_k = (\text{Scrap 1} + \text{Scrap 2}) / 2$$

$$Z_6 = \sum_{k=1}^K \text{Scrap}_k, \quad Z_6 = \sum_{i=1}^n \text{Costs of Equipment}_n$$

$$Z_7 = \sum_{i=1}^n \text{Availability}_n$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

همچنین مدل بهره‌وری منابع دستی و اتوماتیک و محدودیت های آن به صورت زیر است:

$$\sum_{i=1}^n C_i Z_i \quad \text{(رابطه ۸)}$$

S.t:

$C_{A,B,C,D} Z_{A,B,C,D} \leq \alpha \rightarrow$ محدودیت استفاده از منابع و تجهیزات اتوماتیک

$C_{E,F,G,H} Z_{E,F,G,H} \leq \beta \rightarrow$ محدودیت استفاده از منابع و تجهیزات دستی

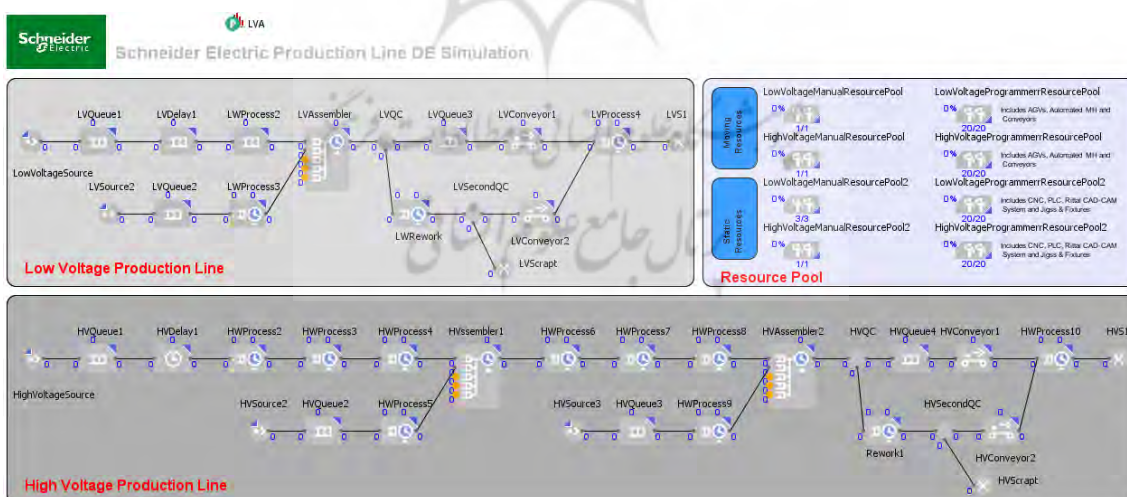
$C_i Z_i \leq \gamma \rightarrow$ محدودیت استفاده از هر دو نوع دستی و اتوماتیک از منابع و تجهیزات

بر اساس مدل D-Optimal محدودیت‌های تعریف شده مدل در روابط ۴ و ۵ مشخص شده است. همچنین رابطه ۶ بر اساس مدل اقتباس شده است؛ سپس بر اساس آن‌ها مدل‌سازی به منظور مطالعه موردی برای شاخص‌ها به صورت محدودیت تعیین شده است.

مرحله اول طرح D-Optimal

در این فاز، مراحل شبیه‌سازی گسسته حالات مختلف ترکیبات، محاسبه شاخص‌های عملکرد تولید و بررسی نتایج مدل انجام می‌شود:

۱. **شبیه‌سازی گسسته:** شبیه‌سازی حالت پایه یا تولید در شرایط فعلی و توسعه آن برای کلیه حالات ترکیبات استفاده از تجهیزات، بر اساس مدل زیر صورت گرفته است که با تغییر در مقدار اتوماسیون، استفاده از منابع و تجهیزات دستی و اتوماتیک تغییر کرده و نتایج شبیه‌سازی بر اساس آن برای تمام ۷۸ اجرا صورت می‌گیرد:



شکل ۲. مدل مربوط به شبیه‌سازی خط تولید

جدول ۳ نتایج برخی اجراهای مدل شبیه‌سازی را با در نظر گرفتن شاخص‌های فوق نشان می‌دهد که حالت بهینه و بهترین ترکیبات استفاده از تجهیزات در آن مشخص شده است:

جدول ۳. نتایج برخی از اجراهای مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شاخص‌های بررسی شده

E	F	G	H	A	B	C	C	S1	S2	Automation
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۹۷	۰	۱	۴ out of ۸۴
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۵۱	۰	۲	۵ out of ۸۴
...
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۲۶	۰/۰۴	۱	۰	۲۶ out of ۸۴
...
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰	۰	۶۱ out of ۸۴
...
۰/۶۸	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۱۶	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۰۴	۱	۱	۷۷ out of ۸۴
۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۰۴	۱	۱	۷۸ out of ۸۴
۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۶۸	۰/۹۸	۰/۱	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۴	۲	۰	۷۹ out of ۸۴
۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۳۴	۰/۹۸	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰	۰	۸۰ out of ۸۴

Run	WIP1	WIP2	P1	P2	T	Products	Automation
۱	۴۸	۵۳	۴۸	۵۰	۹۹۵۹/۶۷	۹۸	۴ out of ۸۴
۲	۵۵	۵۲	۵۵	۵۱	۹۹۸۴/۹۷	۱۰۶	۵ out of ۸۴
...
۲۶	۵۵	۵۰	۵۶	۴۹	۹۹۸۰/۱۹	۱۰۵	۲۶ out of ۸۴
...
۶۰	۷۰	۳۵	۷۲	۳۹	۹۹۶۲/۶۹	۱۱۱	۶۱ out of ۸۴
...
۷۵	۱۸۳	۳۸	۱۸۰	۳۶	۹۹۶۳/۳۳	۲۱۶	۷۷ out of ۸۴
۷۶	۱۸۳	۳۸	۱۸۰	۳۶	۹۹۶۳/۳۳	۲۱۶	۷۸ out of ۸۴
۷۷	۱۳۹	۵۱	۱۲۶	۵۲	۹۹۵۷/۲۵	۱۷۸	۷۹ out of ۸۴
۷۸	۷۳	۴۳	۷۳	۴۱	۹۹۲۲/۴	۱۱۴	۸۰ out of ۸۴

مجموع منابع دستی و اتوماتیک مورد استفاده به صورت زیر است:

منابع اتوماتیک ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین + منابع دستی ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین = ۲۱

منابع اتوماتیک ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا + منابع دستی ۱ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا = ۲۱

منابع اتوماتیک ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین + منابع دستی ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ پایین = ۲۱

منابع اتوماتیک ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا + منابع دستی ۲ در قسمت محصولات با ولتاژ بالا = ۲۱

مجموع کلیه منابع اتوماتیک در دو خط تولید محصولات با ولتاژهای پایین و بالا = α

مجموع کلیه منابع دستی در دو خط تولید محصولات با ولتاژهای پایین و بالا = β

$$\alpha + \beta = 84$$

یعنی به صورت کلی:

$$1 = \frac{x_1 - 4}{CP_{x_1} - 4} + \frac{x_2 - 4}{CP_{x_2} - 4} \rightarrow x_1 + x_2 = 84 \quad (\text{رابطه ۹})$$

۲. محاسبه شاخص‌های عملکردی تولید: تابع هدف و محدودیت‌های مدل برای محاسبه مقدار سطح پاسخ برای مرحله اول طرح از مدل زیر محاسبه می‌شود. همچنین با وزن فاکتورهای اصلی که در جدول ۴ مشخص شده (که مجموع آن‌ها ۱۰ است) و اعداد محاسبه شده برای هر شاخص، مقدار سطح پاسخ برای هر اجرا به دست می‌آید.

جدول ۴. وزن‌های شاخص‌های مورد استفاده در مدل

فاکتور	محصولات در جریان تولید	محصولات تولید شده	نرخ تولید	بهره‌وری منابع تولید	ضایعات	هزینه نگهداری تجهیزات	تسهیل‌سازی
وزن	۱/۸	۳/۲	۱/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۷	۲/۱

وزن‌های شاخص‌های مربوط به عملکرد تولید که بر اساس پرسش‌نامه تدوین و توسط روش مجموع سطری صورت گرفته، با تشکیل ماتریس مقایسه‌های زوجی و نسبت هر مقدار از جدول به مجموع سطرهای مربوط به شاخص محاسبه شده است. همچنین این وزن‌ها با در نظر گرفتن مثبت یا منفی بودن شاخص‌ها، برای محاسبه مقدار سطح به کار گرفته شده است. محاسبه عملکرد تولید با توجه به شاخص‌های در نظر گرفته شده به صورت زیر محاسبه شده است:

جدول ۵. محاسبه عملکرد تولید با توجه به شاخص‌های در نظر گرفته شده در فاز اول

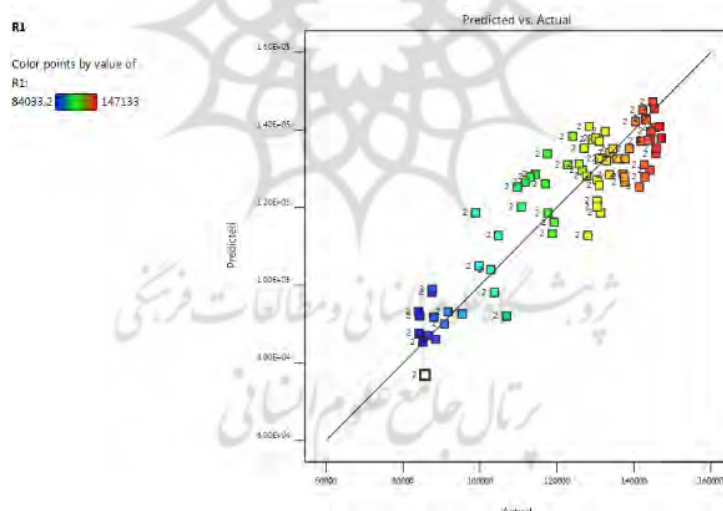
اجرا	اتوماسیون	WIP	تولید	نرخ تولید	بهره‌وری منابع تولید	ضایعات	هزینه نگهداری	تسهیل‌سازی
۱	۴ out of ۸۴	۱۰۱	۹۸	۰/۰۱	۰/۴۹۱۲۵	۱	۳۴/۲	۵۰
....
۲۶	۲۸ out of ۸۴	۱۰۵	۱۰۵	۰/۰۱	۰/۴۱	۱	۵۶/۷۸	۲۰۴/۲
....
۶۰	۶۲ out of ۸۴	۱۰۵	۱۱۱	۰/۰۱	۰/۴۹۵	۰	۹۲/۸۳	۵۴۸/۵
....
۷۶	۷۸ out of ۸۴	۲۲۱	۲۱۶	۰/۰۲	۰/۵۲	۲	۱۱۰/۳۴	۵۸۳/۸
۷۷	۷۹ out of ۸۴	۱۹۰	۱۷۸	۰/۰۲	۰/۴۷۳۷۵	۲	۱۱۱/۳۷	۵۹۰/۹
۷۸	۸۰ out of ۸۴	۱۱۶	۱۱۴	۰/۰۱	۰/۴۲۲۵	۰	۱۱۲/۴	۶۰۶

۳. نتایج مرحله اول طرح: با حل مدل D-Optimal در نرم‌افزار Expert Choice و در نظر گرفتن محدودیت‌های اعمالی، معادله رگرسیون به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 R1 = & 3.51E + 05 - 7593.41 * A - 337.44 * B + 2872.14 * C \\
 & - 1813.55 * D - 14819.97 * E + 1251.76 * F + 318.91 \\
 & * G - 3200.72 * H + 2597.23 * AB + 6426.69 * AC \\
 & - 8471.94 * AD - 2088.73 * AE + 4535.14 * AF \\
 & + 5515.35 * AG + 4294.85 * AH + 4568.74 * BC \\
 & - 45.99 * BD - 11038.39 * BE + 1531.15 * BF \\
 & + 7237.57 * BG - 13502.05 * BH - 6974.97 * CD \\
 & - 894.2 * CE + 6034.21 * CF - 12161.12 * CG \\
 & - 1443.04 * CH - 975.9 * DE + 9780.88 * DF + 2460.82 \\
 & * DG - 690.03 * DH - 8342.95 * EF + 373.87 * EG \\
 & + 930.59 * EH + 4149.16 * FG + 3153.03 * FH \\
 & - 257.99 * GH - 28772.38 * A^2 - 10957.99 * B^2 \\
 & - 30701.04 * C^2 - 31035.94 * D^2 - 18015.31 * E^2 \\
 & - 25505.39 * F^2 - 51105.74 * G^2 - 50859.34 * H^2
 \end{aligned}$$

رابطه ۱۰)

بر اساس نتایج بررسی شده، اطمینان استفاده از مدل بسیار خوب است. همچنین نمودار پیش‌بینی و مقدار واقعی در فاز نشان می‌دهد که انحراف ۷۸ اجرا از خط مورب کم است.



شکل ۳. نمودار پیش‌بینی و اجرا در فاز اول

مرحله دوم طرح D-Optimal

در مرحله دوم ابتدا بر اساس کلیه اجراهای زیرمجموعه در ترکیب بهینه انتخاب شده، نسبت به شبیه‌سازی اقدام و بر اساس شاخص‌های تعریف شده و وزن‌دهی آن‌ها، مقادیر سطح پاسخ به دست می‌آید. جدول ۶ نتایج عملکرد شاخص‌ها با توجه به استفاده از هر نوع ترکیب تجهیزات را نشان می‌دهد که حالت بهینه در آن مشخص شده است:

جدول ۶. محاسبه عملکرد تولید با توجه به شاخص‌های در نظر گرفته شده در فاز دوم

E	F	G	H	A	B	C	D	WIP	تولید	نرخ تولید	منابع تولید	ضایعات	نگهداری	تسهیل‌سازی	Y
۱۸	۲۰	۲۰	۲۰	۳	۱	۱	۱	۲۲۱	۲۱۶	۰/۰۲۱۶۷۹	۰/۵۲	۲	۱۱۰/۳۴	۵۸۳/۸	۱۴۷۱۳۳/۱
۲۰	۲۰	۱۸	۲۰	۱	۱	۳	۱	۱۹۱	۱۹۴	۰/۰۱۹۶۱۶	۰/۴۷۷۵	۲	۱۱۰/۳۴	۵۸۳/۸	۱۴۵۴۱۷
۲۰	۱۸	۲۰	۲۰	۱	۳	۱	۱	۱۰۷	۱۰۶	۰/۰۱۰۷۴۴	۰/۳۴۶۲۵	۲	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۳۸۸۱۱
۲۰	۲۰	۲۰	۱۸	۱	۱	۱	۳	۱۳۱	۱۳۳	۰/۰۱۳۳۹۶	۰/۳۵۲۵	۱	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۴۳۲۴۰/۲
۲۰	۲۰	۱۹	۱۹	۱	۱	۲	۲	۱۰۳	۱۰۹	۰/۰۱۰۹۷۶	۰/۳۹۲۵	۱	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۴۰۵۲۷
۲۰	۱۹	۲۰	۱۹	۱	۲	۱	۲	۱۴۴	۱۴۲	۰/۰۱۴۳۵۳	۰/۵۰۵	۳	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۴۳۷۴۵/۸
۲۰	۱۹	۱۹	۲۰	۱	۲	۲	۱	۱۱۰	۱۰۹	۰/۰۱۱۰۴	۰/۳۸۵	۰	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۳۹۳۱۲/۵
۱۹	۲۰	۲۰	۱۹	۲	۱	۱	۲	۱۰۵	۱۰۴	۰/۰۱۰۴۴۹	۰/۳۸۳۷۵	۱	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۳۸۵۶۲/۳
۱۹	۲۰	۱۹	۲۰	۲	۱	۲	۱	۱۹۰	۱۹۱	۰/۰۱۹۲۴۶	۰/۵۰۳۷۵	۲	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۵۱۳۱۷/۹
۱۹	۱۹	۲۰	۲۰	۲	۲	۱	۱	۱۲۳	۱۱۹	۰/۰۱۱۹۸۲	۰/۳۷۵	۳	۱۱۰/۳۴	۶۱۵	۱۴۰۰۹۸

همچنین معادله رگرسیون به دست آمده به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 R1 = & 1.380E + 05 - 1374.55 * A + 149.96 * B - 233.91 * C \\
 & - 73.62 * D - 1446.17 * E - 55.98 * F + 586.03 * G \\
 & - 213.40 * H - 288.28 * AB - 1139.96 * AC - 856.55 \\
 & * AD - 224.35 * AE - 1142.99 * AF - 2044.86 * AG \\
 & + 1560.92 * AH - 730.17 * BC - 138.38 * BD - 69.28 \\
 & * BE - 333.97 * BF + 110.03 * BG + 13.51 * BH \\
 & + 957.87 * CD + 559.23 * CE + 324.64 * CF + 555.47 \\
 & * CG + 403.28 * CH - 1198.43 * DE + 17.72 * DF \\
 & + 2853.01 * DG - 825.31 * DH + 411.84 * EF - 680.47 \\
 & * EG + 703.13 * EH + 408.26 * FG + 575.01 * FH \\
 & + 431.89 * GH - 2534.40 * A^2 + 3988.79 * B^2 - 8069.73 \\
 & * C^2 + 1454.25 * D^2 + 3600.79 * E^2 + 618.26 * F^2 \\
 & + 1672.01 * G^2 + 4135.36 * H^2
 \end{aligned}
 \tag{۱۱}$$

ضریب تعیین مرحله دوم ۹۲/۳ درصد است که اطمینان بالای مدل را نشان می‌دهد.

یافته‌های پژوهش

بر اساس مدل طراحی D-Optimal ارائه شده و محاسبات نرم‌افزار در مطالعه موردی، ترکیب بهینه استفاده از تجهیزات

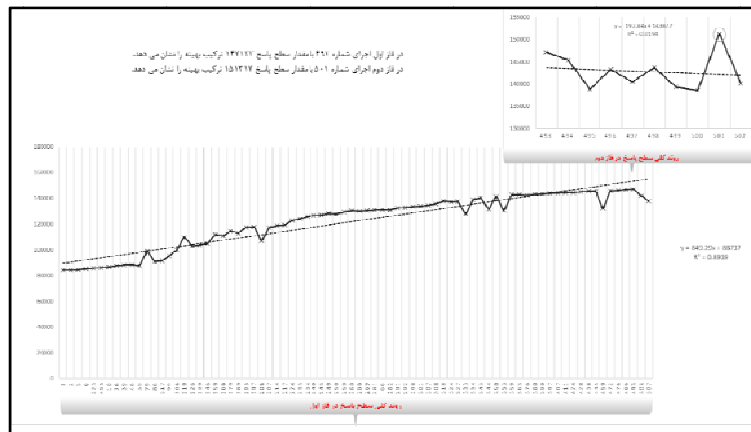
اتوماتیک که مربوط به اجرای شماره ۵۰۱ و به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 A = 19 & & C = 19 & & E = 2 & & G = 2 \\
 B = 20 & & D = 20 & & F = 1 & & H = 1
 \end{aligned}$$



شکل ۴. مقایسه شاخص‌های تولید در حالت بهینه و سیستم فعلی

نمودار فوق نیز شاخص‌های مختلف سیستم FMS را در حالت کنونی و حالت بهینه انتخاب شده نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، کلیه معیارهای اصلی بهبود چشمگیری دارد و تنها شاخص WIP از ۵۱٪ به ۵۳٪ تغییر یافته که با توجه به افزایش چشمگیر میزان تولید، طبیعی است. با توجه به اینکه در مدل، سطوح مختلف اتوماسیون مورد بررسی قرار گرفته، مقدار سطح پاسخ نیز تقریباً حالت افزایشی داشته است. شکل ۵ روند افزایش بهره‌وری تولید در هر دو مرحله را نشان می‌دهد.



شکل ۵. روند میزان سطح پاسخ برای دو فاز طرح D-Optimal

شکل ۶ میزان استفاده از تجهیزات مختلف اتوماتیک در اجراهای شماره ۲ (وضعیت فعلی سیستم)، شماره ۵۰۱ (حالت بهینه) و شماره ۵۰۲ (حالت با اتوماسیون بیشتر از حالت بهینه) را مقایسه می‌کند. در واقع در حالت فعلی، از تجهیزات اتوماتیک AS/RS، AGV، جیگ و فیکسچر و دستگاه‌های طراحی و تولید به کمک کامپیوتر Rittal استفاده نشده و در سطح بسیار پایینی از تجهیزات اتوماتیک و PLC استفاده شده است؛ اما در اجراهای ۵۰۱ و ۵۰۲، از تمامی این تجهیزات در سطح بسیار زیادی استفاده شده و در مقایسه با هم، در حالت بهینه که از میزان اتوماسیون کمتری برخوردار است، از تجهیزات شرکت Rittal و دستگاه‌های اتوماتیک تولید شرکت کمتر استفاده شده؛ اما از سایر موارد کمی بیشتر استفاده شده است.



شکل ۶. مقایسه میزان استفاده از المان‌های سیستم FMS در حالت کنونی، حالت بهینه و حالت با اتوماسیون بیشتر از حالت بهینه

شکل ۷ جزئیات بیشتری را در خصوص تجهیزات دستی و اتوماتیک برای سه اجرای فوق نشان می‌دهد.

انواع	حالت فعلی				انواع	حالت بهینه				انواع	حالت با درجه بیشتر اتوماسیون									
	مجموع دو خط تولید	مجموع وولتاژ بالا	مجموع وولتاژ بالا	مجموع وولتاژ پایین		مجموع دو خط تولید	مجموع وولتاژ بالا	مجموع وولتاژ بالا	مجموع وولتاژ پایین		مجموع دو خط تولید	مجموع وولتاژ بالا	مجموع وولتاژ بالا	مجموع وولتاژ پایین						
A,B	AS/RS	انبار اتوماتیک	A	0	B	0	0	0	A	1	B	2	3	A	1	B	1	2	A = 19	B = 19
A,B	AGVs	اتوماتیک	A	0	B	0	0	0	A	5	B	10	15	A	5	B	8	13	A = 19	B = 19
A,B	PLC	اتوماتیک	A	1	B	1	2	2	A	4	B	9	13	A	4	B	7	11	A = 19	B = 19
A,B	جیگ و فیکسچر	اتوماتیک	A	0	B	0	0	0	A	2	B	4	6	A	2	B	3	5	A = 19	B = 19
B,D	Rittal	سیستم اتوماتیک	C	0	D	0	0	0	C	0	D	4	4	C	2	D	4	6	C = 20	D = 20
B,D	تجهیزات اتوماتیک	اتوماتیک	C	1	D	3	4	4	C	8	D	18	26	C	9	D	18	27	C = 20	D = 20
E,F	Staging Trolley	دستی	E	5	F	15	20	20	E	2	F	4	6	E	2	F	4	6	E = 2	F = 2
E,F	رک انبار	دستی	E	2	F	4	6	6	E	0.5	F	1.5	2	E	0.5	F	1.5	2	E = 2	F = 2
E,F	Air Handle Unit	دستی	E	2	F	4	6	6	E	0.5	F	1.5	2	E	0.5	F	1.5	2	E = 2	F = 2
E,F	SM6 (SW and CB)	دستی	E	2	F	8	10	10	E	1	F	2	3	E	1	F	2	3	E = 2	F = 2
E,F	Cluster A-E	دستی	E	5	F	11	16	16	E	3	F	6	9	E	3	F	7	10	E = 2	F = 2
E,F	Recloser and LBS and RM6 Tester	دستی	E	7	F	18	25	25	E	3	F	11	14	E	3	F	12	15	E = 2	F = 2
E,F	Busbar	دستی	E	3	F	5	8	8	E	1	F	5	6	E	1	F	5	6	E = 2	F = 2
E,F	تراور	دستی	E	3	F	7	10	10	E	1	F	4	5	E	1	F	7	8	E = 2	F = 2
G,H	تجهیزات Competency	دستی	G	2	H	4	6	6	G	2	H	4	6	G	1	H	4	5	G = 1	H = 1
G,H	تجهیزات Fishish Area	دستی	G	1	H	5	6	6	G	2	H	3	5	G	1	H	3	4	G = 1	H = 1
G,H	تجهیزات Training Center	دستی	G	3	H	10	13	13	G	3	H	1	4	G	2	H	1	3	G = 1	H = 1
G,H	تجهیزات تعمیرات	دستی	G	4	H	8	12	12	G	1	H	1	2	G	1	H	1	2	G = 1	H = 1
G,H	PIX Adaption Equipment	دستی	G	3	H	6	9	9	G	2	H	2	4	G	1	H	2	3	G = 1	H = 1
G,H	MC Set , McCb. Acb , Motorpack , RM6 , Premset	دستی	G	2	H	2	4	4	G	2	H	2	4	G	2	H	2	4	G = 1	H = 1
G,H	تکسین	دستی	G	80	H	140	220	220	G	45	H	100	145	G	45	H	100	145	G = 1	H = 1
G,H	ایر فیلتر	دستی	G	140	H	410	550	550	G	95	H	310	405	G	95	H	310	405	G = 1	H = 1

شکل ۷. المان‌های سیستم FMS در حالت کنونی، حالت بهینه و حالت با اتوماسیون بیشتر از حالت بهینه با جزئیات کلیه تجهیزات

بر اساس نتایج به دست آمده در حالت بهینه ۹۲/۸ درصد از تجهیزات مورد استفاده اتوماتیک هستند. در این حالت با توجه به شاخص‌های تولید و کاهش محصولات که بر اساس اهداف پژوهش است، بیشترین سطح پاسخ مشاهده شده است. در این حالت، میزان استفاده از منابع دستی، سطح اتوماسیون در انبار و PLC، سطح استفاده از جیگ و فیکسچرها و استفاده از تجهیزات تولید اتوماتیک مشخص شده است.

در خصوص مقایسه حالت بهینه با سیستم فعلی، میزان استفاده از منابع دستی از ۷۷۰ به ۵۵۰ کاسته شده است. همچنین در سیستم فعلی سطح استفاده از PLC و ماشین‌های اتوماتیک به ترتیب ۲ و ۴ است؛ اما در حالت بهینه، میزان استفاده از تجهیزات اتوماتیک به مقدار ۵۵۰ یعنی ۵۵ درصد افزایش داشته و سطح PLC نیز به مقدار ۱۳ افزایش یافته است. همچنین سطح استفاده از تجهیزات انبارش AS/RS از سطح ۳ به ۱۵ افزایش یافته که مقدار ۶۶/۶۶ درصد از آن‌ها برای خط تولید با ولتاژ بالا است. میزان سطح استفاده از جیگ و فیکسچر در حالت بهینه مقدار ۶ است که ۴ عدد از آن در خط با ولتاژ بالاست. سیستم شرکت Rittal هم که در کارایی تأثیر زیادی دارد، در حالت بهینه در سطح ۴ استفاده شده است.

در مقایسه حالت کنونی با حالت با بیشترین درجه اتوماسیون، سطح استفاده از ماشین‌آلات اتوماتیک تولید در مقایسه با حالت فعلی به مقدار ۵۷۵ درصد افزایش یافته و به ۵۷۵ رسیده است. سطح استفاده از PLC هم به سطح ۱۱ یعنی ۴۵۰ برابر افزایش یافته که ۷ عدد از آن مربوط به خط با ولتاژ بالاست. همچنین سطح استفاده از انبارهای اتوماتیک به مقدار ۲ رسیده که سهم هر خط تولید مقدار یک عدد است. همچنین در حالت با بیشترین مقدار اتوماسیون مقدار ۱۳ سطح از AGV ها استفاده شده که سهم خط تولید محصولات با ولتاژ بالا ۸ عدد است. مقدار استفاده از جیگ و فیکسچرها در حالت با بیشترین درجه اتوماسیون ۵ است که سه عدد از آن‌ها برای خط با محصولات ولتاژ بالا است. سیستم CAD/CAM شرکت Rittal در حالت بیشترین سطح اتوماسیون به مقدار ۶ سطح رسیده است.

در مقایسه حالت بهینه با حالت با درجه اتوماسیون بیشتر، در سیستم بهینه میزان استفاده از ماشین‌های اتوماتیک در حالت بهینه سطح ۴ و در حالت با اتوماسیون بیشتر سطح ۶ است. میزان سطح استفاده از جیگ و فیکسچر در حالت بهینه مقدار ۶ است. سیستم شرکت Rittal در حالت بهینه در مقایسه با حالت بیشترین اتوماسیون، به میزان ۵۰ درصد بیشتر استفاده شده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، بر اساس شاخص‌های متناسب در یک سیستم FMS مدل طراحی آزمایش با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی بسیار بالا طراحی شده است که بر اساس ترکیبات مختلف استفاده از تجهیزات مورد نیاز خط، بهترین حالت به منظور افزایش راندمان و پاسخ‌گویی به سفارش‌ها و کاهش هزینه‌های تولید، انتخاب شده است. با توجه به پیچیدگی خط تولید در مطالعه موردی و دشوار بودن تغییر سطح متغیرها در واقعیت، با دسته‌بندی حالات ترکیبات مورد بررسی در خصوص المان‌های خط تولید، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته است؛ اما دقت نتایج ورودی آن‌ها افزایش یافته و حالات آزمایش در حالت بهینه، با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف تجهیزات اتوماتیک، مدل دو مرحله‌ای D-Optimal طراحی شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده در حالت بهینه ۹۲/۸ درصد از تجهیزات مورد استفاده اتوماتیک هستند. اعتبارسنجی مدل نشان می‌دهد که شاخص‌های بهره‌وری در حالت بهینه با سایر حالات حتی با درجه اتوماسیون بالاتر بهبود یافتند. مدل ارائه شده در این تحقیق، قابلیت توسعه و در نظر گرفتن محدودیت‌های بیشتر با توجه به نیاز سیستم را دارد. همچنین امکان استفاده از مدل‌های دو مرحله‌ای، بر اساس ساختار ارائه شده جهت بررسی جزئیات بیشتر اما با سایر روش‌های Optimal، طراحی آزمایش‌ها به کمک کامپیوتر و سطح پاسخ متناسب با هر نوع سیستم میسر است. محدودیت‌های تحقیق مربوط به کسب دقیق اطلاعات فنی و آماری که به صورت مقطعی و در قالب پرسش‌نامه بوده و تدارک تجهیزات پیشرفته تولید است. البته اطلاعات از مدیران و خبرگان در حوزه خاص گرفته شده و برای تعمیم آن باید احتیاط کامل صورت پذیرد. همچنین پیش‌بینی لازم برای رسیدن به اطلاعات دقیق و شناسایی متغیرهای ناخواسته صورت گرفته است.

نتایج کاربردی حاصل از پژوهش شامل انتخاب بهترین ترکیب از تجهیزات و دستگاه‌ها در خط تولید پیشرفته و انعطاف‌پذیر جهت افزایش کارایی و بهره‌وری تولید و متناسب با نیاز، بر اساس شاخص‌های تعریف شده است. نتایج حاصله این امکان را میسر می‌کند که در شرایط مختلف، میزان سطح اتوماسیون تغییر یافته و جهت پاسخ‌گویی سیستم، انعطاف‌پذیری در تولید فراهم شود. همچنین این یافته‌ها می‌تواند در آینده برای توسعه در صنایع نسل ۴.۰ نیز استفاده شود. پیشنهادها پژوهشی مبتنی بر محدودیت‌های پژوهش شامل به‌کارگیری مدل در سایر صنایع تولیدی از قبیل خودروسازی، فولاد، آلومینیوم و... است که با تغییر در پارامترها، شاخص‌های ترکیب تجهیزات و محدودیت‌های سیستم، مدل‌های آن خطوط طراحی می‌شود. همچنین نیاز به شناسایی و تعریف برنامه‌های اجرایی در سیستم مورد مطالعه، برای رسیدن به نتایج حاصله است. در ضمن با توجه به اینکه این تحقیق در خصوص ترکیبات تجهیزات تولید انجام شده

است، پیشنهاد می‌شود در آینده به تعمیم آن در سایر حوزه‌های بهبود از قبیل فرایند تولید، چیدمان و بالانس خطوط تولیدی توسط رویکردهای طراحی آزمایش‌ها به کمک کامپیوتر پرداخته شود.

منابع

- اسماعیل‌زاده، مریم؛ کاظمی، عالیه و صفری، حسین (۱۴۰۱). شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های پیاده‌سازی سیستم‌های خدمات محصول هوشمند به‌روش بهترین بدترین راف - فازی. *مدیریت صنعتی*، ۱۴(۴)، ۵۳۹-۵۶۴.
- عینی سرکله، غلامرضا؛ حافظ الکتب، اشکان؛ توکلی مقدم، رضا و نجفی، اسماعیل (۱۴۰۱). شناسایی موانع اصلی پیاده‌سازی قراردادهای دوطرفه در زنجیره تأمین با استفاده از روش ترکیبی بهترین - بدترین و واسپاس با رویکرد فازی (مطالعه موردی: صنعت خودروسازی کشور). *مدیریت صنعتی*، ۱۴(۲)، ۳۱۰-۳۳۶.
- فخرزاد، محمدباقر، برخوردار، فرزاد و جعفری ندوشن، عباسعلی (۱۴۰۰). ارائه مدل ریاضی برای مسئله چیدمان سلولی پویا بر اساس زمان‌بندی، تخصیص کارگر و محدودیت منابع مالی. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۳)، ۴۳۵-۴۶۳.
- محبوبی، مرصع، کردرستمی، سهراب، امیرتیموری، علیرضا و قانع کنفی، آرمن (۱۴۰۰). تحلیل عملکرد و محاسبه نرخ‌های حاشیه‌ای با حضور عوامل ورودی - خروجی نامطلوب و شاخص‌های کنترل‌ناپذیر. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۳)، ۴۹۲-۵۱۳.

References

- Ahmad, Sh., Ali, M., Khan, Z., Asjad., M. (2022). Investigating the effect of input variables on the performance of FMS followed by multi-response optimization: A simulation study. *Materials Today*, 64, 1500-1503.
- Carneiro, A.F., Carneiro, C.N., de N Pires, L., Teixeira, L.S.G., Azcarate, S.M., de S Dias, F. (2020). D-optimal mixture design for the optimization of extraction induced by emulsion breaking for multielemental determination in edible vegetable oils by microwave-induced plasma optical emission spectrometry. *Talanta*, 219, 121218.
- ElMaraghy, H. & Caggiano, A. (2014). Flexible manufacturing system. *CIRP encyclopedia of production engineering*, 524-530.
- Daniyan, I., Mpfu, K., Ramatsetse, B., Zeferino, E., Monzambe, G., Sekano, E. (2021). Design and simulation of a flexible manufacturing system fo manufacturing operations of railcar subassemblies. *Procedia Manufacturing*, 54, 112-117.
- Esmeilzadeh, M., Kazemi, A., & Safari, H. (2022). Identifying and Prioritizing Challenges of Implementing Smart Product-service Systems Using the Best-worst Rough-fuzzy Method. *Industrial Management Journal*, 14(4), 539-564. (in Persian)
- Fakhrzad, M.B., Barkhordary, F., Jafari Nodoushan, A. (2021). A Mathematical Model for Dynamic Cell Formation Problem Based on Scheduling, Worker Allocation, and Financial Resources Constraint. *Industrial Management Journal*, 13(3), 435-463. (in Persian)
- Einy - Sarkalleh, Gh., Hafezalkotob, A., Tavakkoli - Moghaddam, R., Najafi, E. (2022). Identifying the Main Obstacles to Carrying Out Bi-directional Contracts in Supply Chains

- by Adopting the Best-worst Method and Undertaking Weighted Aggregates Sum Product Assessment: A Fuzzy Approach. *Industrial Management Journal*, 14(2), 310-336. (in Persian)
- Esfe, M., Motallebi, S., Toghraei, D. (2022). Optimal viscosity modelling of 10W40 oil-based MWCNT (40%)-TiO₂ (60%) nanofluid using Response Surface Methodology (RSM). *Heliyon*, 8(12).
- Gopi, S., Chandra, A. (2021). Solving distributed FMS scheduling problems with/ without breakdowns: Simulation optimization approach. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4879-4884.
- Groover, M.P. (2020). *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*. Prentice Hall.
- Hernandez, J., Cespedes, E., Gutierrez, D., Sanchez-Londoño, D., Barbieri, G., Abolghasem, S., Romero, D. & Fumagalli, L. (2020). Human-Computer-Machine Interaction for the Supervision of Flexible Manufacturing Systems: A Case Study. *IFAC-Papers OnLine*, 53(2), 10550-10555.
- Jain, V., & Raj, T. (2016). Modeling and analysis of FMS performance variables by ISM, SEM and GTMA approach. *International journal of production economics*, 171, 84-96.
- Javaid, M., Haleem, A., Pratap Singh, R., Suman, R. (2022). Enabling flexible manufacturing system (FMS) through the applications of industry 4.0 technologies. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 2, 49-62.
- Kumar, M.V., Kumar, M., Krishna, S., Kumar, K. (2020). Optimization of CNC Turning Parameters in Machining EN19 using Face Centered Central Composite Design Based RSM. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2277-3878.
- Li, J., Pang, D., Zheng, Y., Guan, X., Le, X. (2022). A flexible manufacturing assembly system with deep reinforcement learning. *Control Engineering Practice*, 118, 104957.
- Liu, X., Yue, R., Chatterjee, K. (2020). Geometric characterization of D-optimal designs for random coefficient regression models. *Statistics & Probability Letters*, 159, 108696.
- Liu, X., Yue, R., Wong, W. (2018). D-optimal design for the heteroscedastic Berman model on an arc. *Journal of Multivariate Analysis*, 168, 131-141.
- Mahmooda, K., Karaulova, T., Otto, T., Shevtshenko, E. (2017). Performance Analysis of a Flexible Manufacturing System (FMS). *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*.
- Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons Inc.
- Mahboubi, M., Kordrostami, S., Amirteimoori, A., Ghane-Kanafi, A. (2021). Performance Analysis and Calculation of Marginal Rates in the Presence of Undesirable Input-output Factors and Non-Discretionary Indexes. *Industrial Management Journal*, 13(3), 492-513. (in Persian)
- Mahmooda, K., Karaulova, T., Otto, T., Shevtshenko, E. (2017). Performance Analysis of a Flexible Manufacturing System (FMS). *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*.

- Myers, R., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, Ch. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments*. Wiley Series in Probability and Statistics.
- Nguyen, H. X., Bae, W., Ryoo, W.S., Nam, M.J., & Tu, T. N. (2014). Application of D-optimal Design for Modeling and Optimization of Operation Conditions in SAGD Process. *Utilization, and Environmental Effects*, 36(19), 2142-2153.
- Nylund, H., Valjus, V., Toivonen, V., Lanz, M. & Nieminen, H. (2019). The virtual FMS—an engineering education environment. *Procedia manufacturing*, 31, 251-257.
- Otieno, D., Lee, E.J., Lee, S.G., Richard, C., & Kang, H.W. (2020). Optimizing process of brewing onion peel tea using a response surface methodology. *NFS Journal*, 20, 22-27.
- Qu, Sh., Hu, Y., Ren, W., Yang, X. (2021). Coordinative scheduling of the mobile robots and machines based on hybrid GA in flexible manufacturing systems. *Procedia CIRP*, (pp. Pages 1005-1010).
- Radfar, R., Hoseini, H., Farhoodi, M., Ghasemi, I., Średnicka-Tober, D., Shamloo, E., Khaneghah, A. (2020). Optimization of antibacterial and mechanical properties of an active LDPE/starch/nanoclay nanocomposite film incorporated with date palm seed extract using D-optimal mixture design approach. *International Journal of Biological Macromolecules*, 158, 790-799.
- Saleh, B., Ma, A., Fathi, R., Radrika, N., Yang, G., Jiang, J. (2023). Optimized mechanical properties of magnesium matrix composites using RSM and ANN. *Materials Science and Engineering: B*, 290, 116303.
- Wangui, P., Okango, A., Ranyombo, A. (2019). Selection of Second Order Models' Design Using D-, A-, E-, T Optimality Criteria. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 5(2), 1-15.
- Wenzelburger, P. (2019). A Petri Net Modeling Framework for the Control of Flexible Manufacturing Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 492-498.
- Zhang, X., Ming, X., Bao, Y. (2022). A flexible smart manufacturing system in mass personalization manufacturing model based on multi-module-platform, multi-virtual-unit, and multi-production-line. *Computers & Industrial Engineering*, 171, 108379.
- Zahraee, S. M., Rohani, J., Wong, K.. (2018). Application of computer simulation experiment and response surface methodology for productivity improvement in a continuous production line: Case study. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 30(3), 207-217.