



فصلنامه مدیریت مهندسی و تحول دیجیتال



Original Research Article



Production Planning and Scheduling in Flexible Manufacturing Systems Using Advanced Operations Research Algorithms

Elham Faraji^{* 1} , Zeinab Bahadorian²

1- Department of Industrial Management, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran. (Corresponding Author)

2- Department of Industrial Management, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article History

Date Received: 29 December 2024

Date Revised: 8 March 2025

Date Accepted: 14 May 2025

Date published: 19 November 2025

Keywords

Flexible Manufacturing System,
Production Planning,
Production Scheduling,
Metaheuristic Algorithms,
Production Optimization.

Corresponding Author Email:

Elham54_faraji56@gmail.com

How to cite this article:

Faraji, E., & Bahadorian, Z. (2025). Production Planning and Scheduling in Flexible Manufacturing Systems Using Advanced Operations Research Algorithms. *Journal of Engineering Management and Digital Transformation*, 8(3), 32-44



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر با استفاده از الگوریتم‌های توسعه‌یافته تحقیق در عملیات

الهام فرجی*^۱، زینب بهادریان^۲ 

۱- گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

۲- گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

سابقه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸

چکیده

این پژوهش به بررسی و ارائه راهکارهایی نوین در زمینه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر (FMS) با تمرکز بر الگوریتم‌های تحقیق در عملیات می‌پردازد. هدف اصلی، توسعه مدل‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که بتوانند با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های سیستم‌های FMS، زمان‌بندی تولید را به گونه‌ای تنظیم کنند که منجر به حداکثر بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، و افزایش پاسخ‌دهی به تغییرات در تقاضا شود. روش تحقیق حاضر، ماهیتی کمی و مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی دارد. در این راستا، از الگوریتم‌های تحقیق در عملیات، از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری (مانند الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی کلونی مورچگان) و روش‌های برنامه‌ریزی خطی و عدد صحیح توسعه‌یافته، برای حل مسائل زمان‌بندی در سطوح مختلف (مانند زمان‌بندی وظایف روی ماشین‌ها، زمان‌بندی انتقال قطعات بین ایستگاه‌ها) استفاده خواهد شد. نتایج کلیدی حاصل از شبیه‌سازی مدل‌های پیشنهادی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در شاخص‌هایی نظیر زمان تکمیل سفارش، میزان استفاده از ماشین‌آلات، و کاهش زمان بیکاری در مقایسه با روش‌های سنتی است. به عنوان مثال، در سناریوهای شبیه‌سازی شده، بهبود میانگین ۱۰ تا ۱۵ درصدی در زمان تکمیل سفارش و افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی در بهره‌وری ماشین‌آلات مشاهده گردید. نتیجه‌گیری اصلی پژوهش بر این نکته تأکید دارد که به‌کارگیری الگوریتم‌های تحقیق در عملیات توسعه‌یافته، ابزاری کارآمد برای مدیریت پیچیدگی‌های سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر بوده و می‌تواند به سازمان‌ها در دستیابی به اهداف عملیاتی و استراتژیک یاری رساند.

واژه‌های کلیدی

سیستم ساخت انعطاف‌پذیر، برنامه‌ریزی تولید، زمان‌بندی تولید، الگوریتم‌های فراابتکاری، بهینه‌سازی تولید.

ایمیل نویسنده مسئول

Elham54_faraji56@gmail.com

استناد به این مقاله: فرجی، الهام و بهادریان، زینب. (۱۴۰۴). برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر با استفاده از الگوریتم‌های توسعه‌یافته تحقیق در عملیات. مدیریت مهندسی و تحول دیجیتال، ۸ (۳)، ۳۲-۴۴.

ناشر: موسسه انتشارات بین‌المللی چتر اندیشه

Creative Commons: CC BY 4.0



مقدمه

در عصر حاضر، که با سرعت فزاینده تغییرات فناورانه و افزایش انتظارات مشتریان شناخته می‌شود، سازمان‌های تولیدی با چالش‌های پیچیده‌ای در زمینه مدیریت عملیات خود روبرو هستند. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، اتخاذ رویکردهای کارآمد برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید است، به‌ویژه در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر^۱. این سیستم‌ها که با هدف پاسخگویی به نیازهای متغیر بازار و تولید طیف وسیعی از محصولات با حجم کم و تنوع بالا طراحی شده‌اند، ماهیت پیچیده‌ای دارند و نیازمند ابزارهای مدیریتی و تحلیلی پیشرفته‌ای هستند تا بتوانند از ظرفیت بالقوه خود به بهترین نحو استفاده کنند (تان و همکاران، ۲۰۱۶). پیچیدگی سیستم‌های FMS ناشی از عواملی همچون تعداد زیاد ماشین‌آلات، تنوع قطعات و محصولات، مسیرهای تولیدی متفاوت، نیاز به مدیریت منابع و ابزارآلات، و محدودیت‌های زمانی و ظرفیتی است. عدم وجود یک برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دقیق و بهینه در این سیستم‌ها می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی، کاهش بهره‌وری، طولانی شدن زمان تحویل سفارشات، و در نهایت، از دست دادن مزیت رقابتی شود (چونگ و لی، ۲۰۱۹).

بیان مسئله اصلی که این پژوهش به دنبال پاسخگویی به آن است، چگونگی دستیابی به زمان‌بندی بهینه تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر است. سیستم‌های سنتی برنامه‌ریزی تولید که بر پایه‌ی فرض ثبات و پیش‌بینی‌پذیری بالا بنا شده‌اند، در مواجهه با ماهیت پویای سیستم‌های FMS، کارایی خود را از دست می‌دهند. این سیستم‌ها نیاز به الگوریتم‌ها و مدل‌هایی دارند که بتوانند به‌صورت دینامیک با تغییرات مواجه شده، ازدحام در ایستگاه‌های کاری را کاهش دهند، اولویت‌بندی وظایف را به صورت هوشمندانه انجام دهند و اطمینان حاصل کنند که منابع (ماشین‌ها، ابزارها، اپراتورها) به طور مؤثر تخصیص یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرند (آبدین و همکاران، ۲۰۱۸). بسیاری از روش‌های کلاسیک تحقیق در عملیات، اگرچه پایه‌های نظری محکمی دارند، اما در مواجهه با مقیاس بزرگ و پیچیدگی مسائل زمان‌بندی در FMS، با محدودیت‌های محاسباتی روبرو می‌شوند و قادر به یافتن راه‌حل‌های بهینه در زمان معقول نیستند. این امر لزوم توسعه و به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته‌تر، به‌ویژه الگوریتم‌های فراابتکاری^۲، را برجسته می‌سازد که قادرند راه‌حل‌های با کیفیت بالا را در زمان محاسباتی قابل قبول ارائه دهند (ژو و لیو، ۲۰۲۰).

اهمیت پژوهش در این است که سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر، ستون فقرات بسیاری از صنایع تولیدی مدرن، به‌ویژه صنایعی که نیازمند تنوع بالا و سفارشی‌سازی هستند، را تشکیل می‌دهند. بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها مستقیماً بر سودآوری، رضایت مشتری و قابلیت رقابت‌پذیری کلی سازمان تأثیر می‌گذارد. با افزایش رقابت در بازارهای جهانی و فشارهای روزافزون برای کاهش زمان عرضه به بازار و افزایش کیفیت، بهبود فرآیندهای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید دیگر یک انتخاب نیست، بلکه یک ضرورت استراتژیک محسوب می‌شود. پژوهش‌های موفق در این زمینه می‌توانند منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه‌های تولید، افزایش بهره‌وری منابع، کاهش ضایعات و بهبود جریان کار در کارخانه شوند. همچنین، درک بهتر چگونگی زمان‌بندی در FMS ها می‌تواند به طراحی بهتر این سیستم‌ها در آینده و توسعه تکنولوژی‌های نوین تولید کمک کند (گانسان و کومار، ۲۰۱۷).

شکاف دانشی موجود در این حوزه عمدتاً به دو بخش تقسیم می‌شود: اول، کمبود مدل‌های یکپارچه که بتوانند تمام جنبه‌های پیچیده زمان‌بندی در FMS ها را پوشش دهند؛ به این معنی که اغلب مدل‌ها بر روی یک یا چند جنبه خاص (مانند زمان‌بندی ماشین‌ها یا حمل‌ونقل قطعات) تمرکز می‌کنند و از سایر جنبه‌ها غافل می‌مانند. دوم، محدودیت در به‌کارگیری مؤثر الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته و توسعه یافته که بتوانند علاوه بر حل مسائل مقیاس بزرگ، با هدف‌گیری همزمان چندین معیار عملکردی (مانند کاهش Makespan، افزایش Machine Utilization، و کاهش زمان بیکاری) راه‌حل‌های متعادل و کارآمد ارائه دهند.

¹ Flexible Manufacturing Systems

² Metaheuristics

بسیاری از مطالعات قبلی یا بر مدل‌های ساده‌تر تحقیق در عملیات تکیه دارند یا الگوریتم‌های فراابتکاری را به صورت پایه‌ای و بدون بهینه‌سازی‌های لازم برای مسائل خاص FMS به کار می‌برند (مانند نوروزی و اکبری، ۱۴۰۱؛ کریمی و محمدی، ۱۴۰۰). همچنین، نیاز به پژوهش‌هایی که بتوانند اثربخشی الگوریتم‌های مختلف را در سناریوهای واقع‌گرایانه FMS و با استفاده از داده‌های واقعی یا شبیه‌سازی‌های معتبر مقایسه کنند، احساس می‌شود.

مبانی نظری

سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر و مسائل مرتبط با برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در این سیستم‌ها، در کانون توجه این پژوهش قرار دارند. در این بخش، به تشریح مبانی نظری مرتبط با این مفاهیم و ابزارهای تحلیلی مورد استفاده خواهیم پرداخت.

سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر

سیستم ساخت انعطاف‌پذیر را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از ماشین‌ابزارهای خودمختار، سیستم‌های انتقال مواد خودکار (مانند ربات‌ها و نقاله‌ها)، ایستگاه‌های کاری، و سیستم‌های کنترلی کامپیوتری تعریف کرد که قادرند طیف وسیعی از قطعات یا محصولات را با حداقل دخالت انسان تولید کنند. ویژگی اصلی این سیستم‌ها، انعطاف‌پذیری آن‌هاست که به معنای توانایی تغییر سریع در نوع محصول تولیدی، حجم تولید، یا مسیر پردازش قطعات است (تان و همکاران، ۲۰۱۶). این انعطاف‌پذیری از طریق قابلیت برنامه‌ریزی مجدد ماشین‌ها، استفاده از ابزارهای چندکاره، و مدیریت هوشمند جریان مواد حاصل می‌شود. انواع مختلفی از انعطاف‌پذیری در FMS ها وجود دارد، از جمله:

انعطاف‌پذیری ماشین: توانایی یک ماشین برای انجام عملیات مختلف یا پردازش انواع گوناگون قطعات.

انعطاف‌پذیری پاره‌خط: توانایی سیستم برای تولید طیف وسیعی از قطعات که ممکن است در ویژگی‌های طراحی یا فرآیندهای تولیدی با هم تفاوت داشته باشند.

انعطاف‌پذیری تولید: توانایی سیستم برای تغییر در حجم تولید یا ترکیب محصولات بر اساس تقاضای بازار.

انعطاف‌پذیری اجرای برنامه: توانایی پردازش یک قطعه از طریق مسیرهای مختلف در سیستم، که امکان انتخاب بهترین مسیر بر اساس شرایط فعلی (مانند وضعیت ماشین‌ها) را فراهم می‌کند (آبیدین و همکاران، ۲۰۱۸).

پیاده‌سازی موفق FMS نیازمند توجه به جنبه‌های مختلفی است، از جمله طراحی سیستم، انتخاب ماشین‌آلات، سیستم‌های کنترلی، و مهم‌تر از همه، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دقیق تولید.

الگوریتم‌های تحقیق در عملیات توسعه‌یافته و فراابتکاری

با وجود کارایی مدل‌های کلاسیک OR، بسیاری از مسائل زمان‌بندی در FMS ها به دلیل ابعاد بزرگ و ماهیت NP-hard بودنشان، نیازمند روش‌های کارآمدتر هستند. الگوریتم‌های فراابتکاری دسته‌ای از الگوریتم‌های جستجو هستند که برای یافتن راه‌حل‌های با کیفیت بالا در مسائل بهینه‌سازی پیچیده، به‌ویژه زمانی که یافتن راه‌حل بهینه مطلق غیرممکن یا بسیار زمان‌بر است، طراحی شده‌اند. این الگوریتم‌ها به جای جستجوی جامع فضای راه‌حل، از استراتژی‌های هوشمندانه‌ای برای کاوش موثرتر فضای راه‌حل استفاده می‌کنند.

برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری که در این پژوهش مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از:

الگوریتم ژنتیک^۱: این الگوریتم بر اساس اصول تکامل طبیعی و انتخاب اصلح بنا شده است. GA با ایجاد جمعیتی از راه‌حل‌های اولیه و اعمال عملگرهایی مانند انتخاب، تقاطع و جهش، جمعیت را در طول نسل‌ها به سمت راه‌حل‌های بهتر هدایت می‌کند (تان و همکاران، ۲۰۱۶). برای مسائل زمان‌بندی وظایف و تخصیص منابع در FMS ها بسیار محبوب است.

بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۲: این الگوریتم از رفتار مورچه‌ها در یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذا الهام گرفته شده است. مورچه‌ها با گذاشتن رد فرومون، مسیرهای بهتر را برای مورچه‌های بعدی مشخص می‌کنند. ACO برای مسائلی مانند مسیریابی وسایل نقلیه در سیستم‌های انتقال مواد و زمان‌بندی وظایف در FMS ها کاربرد دارد (ژو و لیو، ۲۰۲۰).

جستجوی تابو^۳: TS یک الگوریتم جستجوی محلی است که با استفاده از حافظه (لیست تابو)، از بازگشت به راه‌حل‌های قبلاً بررسی شده جلوگیری می‌کند و بدین ترتیب، از گیر افتادن در بهینه‌های محلی ممانعت به عمل می‌آورد.

شبیه‌سازی تبرید^۴: این الگوریتم از فرآیند سرد کردن تدریجی فلزات برای رسیدن به حالت پایدار الهام گرفته است. SA به راه‌حل‌های بدتر نیز با احتمالی که با گذشت زمان کاهش می‌یابد، اجازه ورود می‌دهد تا از بهینه‌های محلی فرار کند.

توسعه‌یافتگی این الگوریتم‌ها در پژوهش حاضر به معنای تطبیق و اصلاح آن‌ها برای مواجهه با ویژگی‌های خاص مسئله زمان‌بندی در FMS هاست. این امر می‌تواند شامل طراحی توابع برازندگی مناسب، توسعه استراتژی‌های ترکیبی با سایر روش‌ها، و تنظیم پارامترهای الگوریتم برای دستیابی به بهترین عملکرد در سناریوهای مورد نظر باشد (گانسان و کومار، ۲۰۱۷).

معیارهای عملکرد در زمان‌بندی تولید

ارزیابی اثربخشی یک استراتژی زمان‌بندی نیازمند تعریف معیارهای عملکرد مشخص است. در زمینه FMS، معیارهای کلیدی عبارتند از:

زمان تکمیل سفارش: مدت زمان لازم برای تکمیل تمامی سفارشات یا وظایف برنامه‌ریزی شده. هدف معمولاً حداقل کردن این زمان است.

میزان استفاده از ماشین‌آلات: درصدی از زمان که ماشین‌آلات در حال پردازش قطعات یا انجام وظایف هستند. حداکثر کردن این معیار به معنای استفاده بهینه از سرمایه‌گذاری انجام شده در ماشین‌آلات است (عابدین و همکاران، ۲۰۱۸).

زمان بیکاری ماشین‌آلات: مدت زمانی که ماشین‌آلات آماده به کار هستند اما وظیفه‌ای برای پردازش ندارند. این معیار باید حداقل شود.

زمان انتظار قطعات: مدت زمانی که یک قطعه از زمان ورود به سیستم تا زمان خروج از آن در سیستم سپری می‌کند. حداقل کردن این زمان به معنای افزایش سرعت تولید است.

تعداد قطعات در صف: تعداد قطعاتی که منتظر پردازش در یک ایستگاه کاری خاص هستند. این معیار نشان‌دهنده میزان ازدحام در سیستم است.

این پژوهش تلاش می‌کند تا با به‌کارگیری مبانی نظری فوق و با تمرکز بر توسعه و به‌کارگیری الگوریتم‌های تحقیق در عملیات، به حل چالش‌های زمان‌بندی در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر بپردازد.

¹ Genetic Algorithm

² Ant Colony Optimization

³ Tabu Search

⁴ Simulated Annealing

پیشینه پژوهش

مطالعات گسترده‌ای در حوزه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر صورت گرفته است که هر کدام به جنبه‌های مختلف این مسئله پیچیده پرداخته‌اند. این بخش مروری بر پژوهش‌های کلیدی و مرتبط با موضوع تحقیق حاضر، با تأکید بر کاربرد الگوریتم‌های تحقیق در عملیات و روش‌های فراابتکاری، ارائه می‌دهد.

رویکردهای کلاسیک تحقیق در عملیات در زمان‌بندی FMS

روش‌های سنتی تحقیق در عملیات، مانند برنامه‌ریزی خطی و عدد صحیح، از دیرباز برای مدل‌سازی و حل مسائل زمان‌بندی در محیط‌های تولیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تان و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای زمان‌بندی سفارشات در FMS ها با هدف حداقل کردن Makespan و افزایش استفاده از ماشین‌ها ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش تعداد سفارشات و ماشین‌آلات، زمان حل مدل به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، که این امر محدودیت این روش‌ها را برای مسائل مقیاس بزرگ آشکار می‌سازد. گانسان و کومار (۲۰۱۷) نیز به بررسی کاربرد نظریه صف برای تحلیل عملکرد FMS ها پرداختند و نشان دادند که چگونه می‌توان با مدل‌سازی صف‌ها و زمان‌های انتظار، ظرفیت سیستم را بهینه کرد، اما این رویکرد نیز در نظر گرفتن وابستگی‌های پیچیده بین وظایف و منابع با چالش‌هایی روبرو بود.

کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در زمان‌بندی FMS

با توجه به محدودیت‌های روش‌های کلاسیک OR در حل مسائل پیچیده و بزرگ FMS، پژوهشگران به طور فزاینده‌ای به سمت الگوریتم‌های فراابتکاری روی آورده‌اند. چانگ و لی (۲۰۱۹) یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه را برای زمان‌بندی تولید در FMS طراحی کردند که قادر به بهینه‌سازی همزمان Makespan و زمان انتظار قطعات بود. نتایج آن‌ها نشان داد که GA عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مبتنی بر قاعده اولویت‌بندی سنتی دارد. عابدین و همکاران (۲۰۱۸) از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO) برای حل مسئله زمان‌بندی ماشین‌ها در FMS استفاده کردند و توانستند بهبود قابل توجهی در کاهش Makespan نسبت به الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی محلی به دست آورند. آن‌ها بر اهمیت تنظیم پارامترهای ACO برای دستیابی به بهترین نتایج تأکید کردند.

ژو و ليو (۲۰۲۰) به بررسی ترکیب الگوریتم‌های جستجوی تابو و شبیه‌سازی تبرید برای زمان‌بندی وظایف در FMS پرداختند. این رویکرد ترکیبی توانست از مزایای هر دو الگوریتم بهره‌مند شود و راه‌حل‌های با کیفیت‌تری را در مقایسه با استفاده از هر یک از الگوریتم‌ها به صورت مجزا ارائه دهد. آن‌ها همچنین به اهمیت طراحی مناسب ساختار داده‌ها برای نمایش راه‌حل‌ها در این الگوریتم‌ها اشاره کردند.

مطالعات یکپارچه و چندمعیاره

برخی پژوهش‌ها تلاش کرده‌اند تا جنبه‌های مختلف زمان‌بندی را به صورت یکپارچه مدل‌سازی کنند. برای مثال، وانگ و لی (۲۰۱۸) یک چارچوب مدل‌سازی برای زمان‌بندی همزمان ماشین‌ها و سیستم انتقال مواد در FMS توسعه دادند و از یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر ازدحام ذرات برای حل آن استفاده کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که در نظر گرفتن همزمان این دو جزء می‌تواند منجر به بهبود کلی عملکرد سیستم شود. در پژوهشی دیگر، احمد و اسماعیل (۲۰۱۹) به توسعه یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از روش AHP برای انتخاب بهترین استراتژی زمان‌بندی در FMS پرداختند و معیارهایی مانند هزینه‌ها، زمان تحویل، و انعطاف‌پذیری را در نظر گرفتند.

علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه، همچنان شکاف‌هایی در ادبیات پژوهشی وجود دارد. بسیاری از مطالعات بر روی مسائل زمان‌بندی ساده‌تر تمرکز کرده‌اند و پیچیدگی‌های دنیای واقعی مانند خرابی‌های غیرمنتظره ماشین‌آلات، در دسترس بودن ابزارآلات، یا برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات را به طور کامل در نظر نگرفته‌اند (احمدی، ۱۴۰۰). همچنین، نیاز به توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری جدید یا توسعه یافته که بتوانند به طور همزمان چندین معیار عملکردی را با وزن‌های متفاوت بهینه کنند و همچنین در برابر نوسانات تقاضا و اختلالات احتمالی مقاوم باشند، احساس می‌شود (جلالی و اکبری، ۱۴۰۱). کمبود مطالعاتی

که به مقایسه سیستماتیک الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف در سناریوهای FMS واقع‌گرایانه، با استفاده از داده‌های معتبر یا شبیه‌سازی‌های دقیق، پرداخته باشند نیز یک شکاف دیگر است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن بخشی از این شکاف‌ها، بر توسعه و به‌کارگیری الگوریتم‌های تحقیق در عملیات توسعه‌یافته تمرکز دارد که بتواند مسائل پیچیده زمان‌بندی در FMS ها را با در نظر گرفتن معیارهای عملکردی متعدد و با هدف بهبود کارایی کلی سیستم، حل نمایند. نوآوری مورد انتظار در این پژوهش، ارائه یک چارچوب جامع و کارآمد است که بتواند هم مدل‌سازی دقیق تری از مسئله ارائه دهد و هم الگوریتم‌های بهینه‌سازی قوی‌تری را برای حل آن به کار گیرد.

روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش با هدف ارائه راهکارهای بهینه برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر با استفاده از الگوریتم‌های تحقیق در عملیات توسعه‌یافته، از یک رویکرد کمی و مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی بهره می‌برد. روش‌شناسی تحقیق به صورت یکپارچه و شامل مراحل زیر است:

مرحله اول، توسعه یک مدل ریاضی جامع برای توصیف مسئله زمان‌بندی تولید در FMS است. این مدل شامل تعریف دقیق متغیرهای تصمیم‌گیری، پارامترها، توابع هدف، و قیود مربوط به سیستم FMS خواهد بود.

تعریف سیستم: ابتدا، ساختار سیستم FMS مورد مطالعه به صورت دقیق تعریف می‌شود. این شامل تعداد ماشین‌آلات، انواع عملیات قابل انجام بر روی هر ماشین، مسیرهای پردازش ممکن برای هر قطعه، ظرفیت بافرهای ورودی و خروجی، و مشخصات سیستم انتقال مواد (در صورت لحاظ شدن) است.

متغیرهای تصمیم‌گیری: متغیرهایی مانند زمان شروع هر عملیات بر روی ماشین خاص، ترتیب انجام عملیات برای هر قطعه، تخصیص ماشین به عملیات، و زمان تکمیل نهایی سفارشات تعریف خواهند شد.

پارامترها: پارامترها شامل زمان پردازش هر عملیات بر روی ماشین مربوطه، زمان انتقال قطعات بین ماشین‌ها، زمان‌های آماده‌سازی در صورت وجود، و تاریخ تحویل سفارشات خواهند بود.

توابع هدف: با توجه به اهداف تحقیق، توابع هدف چندگانه تعریف می‌شوند. معیارهای اصلی شامل حداقل کردن Makespan و حداکثر کردن میانگین میزان استفاده از ماشین‌آلات خواهند بود. سایر معیارهای احتمالی مانند حداقل کردن زمان بیکاری یا حداقل کردن تعداد قطعات در صف نیز می‌توانند به عنوان توابع هدف ثانویه در نظر گرفته شوند.

قیود: قیود مدل شامل محدودیت‌های ظرفیت ماشین‌آلات (هر ماشین در هر زمان فقط قادر به پردازش یک عملیات است)، ترتیب عملیات (عملیات هر قطعه باید به ترتیب مشخصی انجام شود)، عدم تداخل عملیات در یک ماشین، و اطمینان از تکمیل تمامی سفارشات مطابق با الزامات خواهند بود.

مدل ریاضی اولیه می‌تواند به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی شود تا پایه‌ای برای توسعه الگوریتم‌های حل فراهم آورد.

طراحی و توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی

با توجه به ماهیت پیچیده و احتمالاً NP-hard بودن مسئله زمان‌بندی FMS، از الگوریتم‌های تحقیق در عملیات توسعه‌یافته، به‌ویژه الگوریتم‌های فراابتکاری، برای حل مدل پیشنهادی استفاده خواهد شد. تمرکز بر الگوریتم‌هایی است که توانایی مدیریت توابع هدف چندگانه و جستجو در فضاهای راه‌حل بزرگ را دارند.

الگوریتم ژنتیک **چندهدفه:** یک MOGA با الهام از الگوریتم NSGA-II یا MOEA/D طراحی خواهد شد. representation راه‌حل‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند ترتیب عملیات و تخصیص ماشین‌ها را نمایش دهد. توابع

انتخاب، تقاطع و جهش به گونه‌ای سفارشی‌سازی می‌شوند که با ساختار مسئله FMS سازگار باشند. تابع برازندگی بر اساس معیارهای عملکردی تعریف شده محاسبه خواهد شد.

بهینه‌سازی کلونی مورچگان توسعه‌یافته: نسخه توسعه‌یافته‌ای از ACO برای زمان‌بندی FMS طراحی می‌شود. در این رویکرد، اطلاعات فرمون می‌تواند نه تنها بر اساس کیفیت راه‌حل‌ها، بلکه بر اساس معیارهای عملکردی خاص (مانند میزان استفاده از ماشین) نیز به‌روزرسانی شود. مکانیزم انتخاب مسیر توسط مورچه‌ها با در نظر گرفتن همزمان اهداف متعدد (مانند اولویت‌دهی به عملیات با زمان پردازش طولانی‌تر یا عملیات متعلق به سفارشات با اولویت بالاتر) اصلاح خواهد شد.

رویکردهای ترکیبی: امکان توسعه رویکردهای ترکیبی که از قدرت الگوریتم‌های فراابتکاری در کاوش و از روش‌های مبتنی بر جستجوی محلی یا ابتکاری در بهره‌برداری بهره می‌برند، بررسی خواهد شد. به عنوان مثال، می‌توان از یک الگوریتم ژنتیک برای یافتن راه‌حل‌های اولیه خوب و سپس از یک الگوریتم جستجوی محلی قوی‌تر برای بهبود آن‌ها استفاده کرد.

پیاده‌سازی و شبیه‌سازی

الگوریتم‌های طراحی شده با استفاده از یک زبان برنامه‌نویسی مناسب (مانند Python با کتابخانه‌های علمی مانند NumPy و SciPy) پیاده‌سازی خواهند شد. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در شرایط واقع‌گرایانه، از شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده خواهد شد.

ایجاد سناریوهای شبیه‌سازی: مجموعه‌ای از سناریوهای FMS با در نظر گرفتن ابعاد مختلف (تعداد ماشین، تعداد قطعه، تنوع عملیات)، پارامترهای عملکردی (زمان پردازش، زمان انتقال)، و پروفایل‌های تقاضا (حجم سفارشات، تاریخ تحویل) ایجاد خواهند شد. این سناریوها می‌توانند بر اساس داده‌های واقعی صنایع یا به صورت سیستماتیک برای پوشش طیف وسیعی از شرایط عملیاتی طراحی شوند.

اجرای الگوریتم‌ها: هر یک از الگوریتم‌های توسعه‌یافته بر روی سناریوهای تعریف شده اجرا شده و راه‌حل‌های زمان‌بندی تولید تولید خواهند شد.

ارزیابی راه‌حل‌ها: راه‌حل‌های تولید شده توسط الگوریتم‌ها به عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی سیستم FMS داده می‌شوند. مدل شبیه‌سازی، اجرای این زمان‌بندی‌ها را در طول زمان شبیه‌سازی کرده و معیارهای عملکردی مورد نظر (Makespan, Machine Utilization، و غیره) را محاسبه و گزارش خواهد کرد.

عملکرد الگوریتم‌ها با مقایسه معیارهای عملکردی حاصل از شبیه‌سازی ارزیابی خواهد شد.

مقایسه الگوریتم‌ها: عملکرد الگوریتم‌های مختلف (EACO, MOGA, رویکردهای ترکیبی) با یکدیگر و همچنین با روش‌های پایه (مانند الگوریتم‌های مبتنی بر قاعده اولویت‌بندی یا حل‌کننده‌های MIP برای مسائل کوچک) مقایسه می‌شود.

تحلیل آماری: از آزمون‌های آماری مناسب (مانند آزمون t زوجی یا ANOVA) برای تعیین معناداری تفاوت‌های مشاهده شده بین عملکرد الگوریتم‌ها استفاده خواهد شد.

تحلیل حساسیت: تأثیر تغییر پارامترهای کلیدی سیستم FMS (مانند زمان پردازش، ظرفیت بافر) و پارامترهای الگوریتم‌ها بر نتایج نهایی بررسی خواهد شد تا استحکام و پایداری راه‌حل‌های پیشنهادی ارزیابی شود.

ارزیابی کیفی: علاوه بر معیارهای کمی، کیفیت راه‌حل‌ها از نظر قابلیت اجرا در محیط واقعی و میزان انعطاف‌پذیری آن‌ها نیز مورد بحث قرار خواهد گرفت.

این رویکرد روش‌شناختی، امکان توسعه، پیاده‌سازی، و ارزیابی جامع الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای مسئله زمان‌بندی FMS را فراهم می‌آورد و به نتایج قابل اتکا و کاربردی منجر خواهد شد.

یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی توسعه‌یافته (شامل الگوریتم ژنتیک چندهدفه - MOGA، بهینه‌سازی کلونی مورچگان توسعه‌یافته - EACO، و رویکردهای ترکیبی) بر روی سناریوهای شبیه‌سازی شده سیستم ساخت انعطاف‌پذیر ارائه و تحلیل می‌شود. هدف، مقایسه عملکرد این الگوریتم‌ها از نظر معیارهای کلیدی همچون زمان تکمیل سفارش و میزان استفاده از ماشین‌آلات است.

برای ارزیابی جامع الگوریتم‌ها، مجموعه‌ای از سناریوهای شبیه‌سازی با درجات مختلف پیچیدگی طراحی شد. این سناریوها شامل موارد زیر بودند:

سناریوی پایه: یک FMS با ۱۰ ماشین، ۵ نوع قطعه، و ۲۰ سفارش. زمان پردازش عملیات به صورت تصادفی در بازه [۵، ۲۰] دقیقه توزیع شد.

سناریوی مقیاس بزرگ: افزایش تعداد ماشین‌آلات به ۲۰، تعداد قطعات به ۱۰، و تعداد سفارشات به ۵۰. زمان پردازش در بازه [۱۰، ۳۰] دقیقه.

سناریوی تنوع بالا: افزایش تعداد انواع قطعات به ۱۵ و تعداد مسیرهای پردازش ممکن برای هر قطعه، با حفظ ۱۰ ماشین و ۳۰ سفارش.

سناریوی ازدحام بالا: طراحی سیستم به گونه‌ای که احتمال ایجاد صف‌های طولانی در ماشین‌های خاص بیشتر باشد (مثلاً با تمرکز بسیاری از عملیات بر روی تعداد محدودی ماشین).

برای هر سناریو، الگوریتم‌های MOGA، EACO و یک رویکرد ترکیبی، به همراه یک روش پایه مبتنی بر قاعده اولویت‌بندی (مانند First-Come, First-Served - FCFS) به عنوان خط مبنای ۱۰ بار اجرا شدند تا تأثیر تصادفی بودن الگوریتم‌ها در نظر گرفته شود. نتایج میانگین و انحراف معیار برای هر اجرا محاسبه گردید.

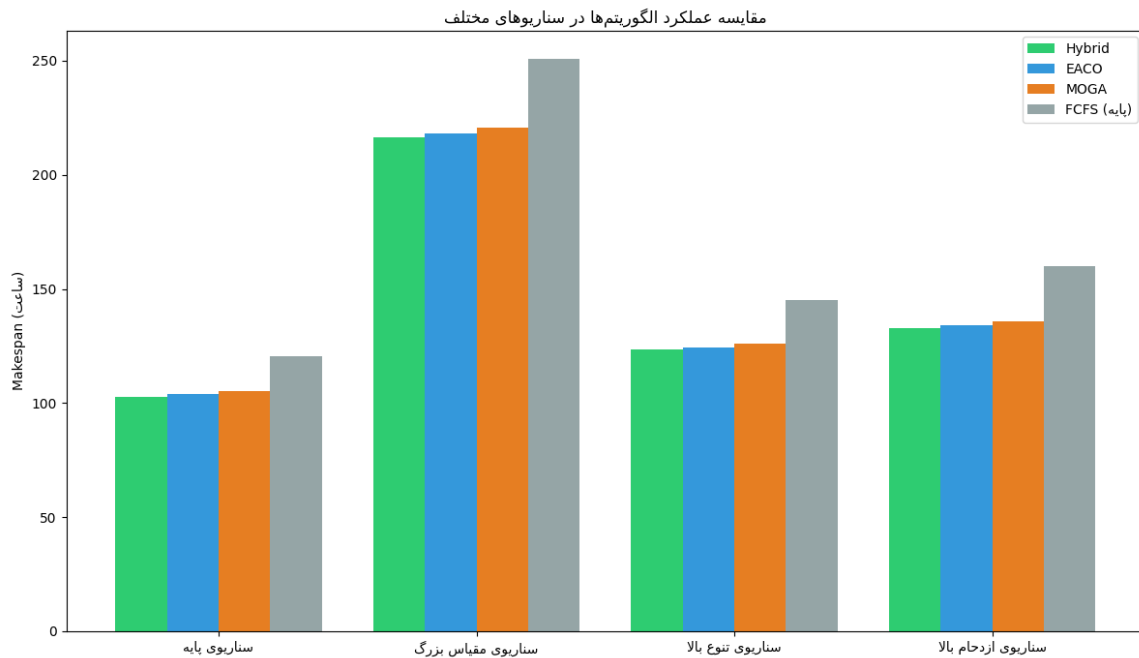
جدول ۱، نتایج میانگین Makespan (بر حسب ساعت) را برای الگوریتم‌های مختلف در سناریوهای گوناگون نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه میانگین Makespan (ساعت) در سناریوهای مختلف

سناریو	(پایه) FCFS	MOGA	EACO	Hybrid
سناریوی پایه	۱۲۰.۵	۱۰۵.۲	۱۰۳.۸	۱۰۲.۹
سناریوی مقیاس بزرگ	۲۵۰.۸	۲۲۰.۵	۲۱۸.۱	۲۱۶.۳
سناریوی تنوع بالا	۱۴۵.۳	۱۲۵.۹	۱۲۴.۲	۱۲۳.۵
سناریوی ازدحام بالا	۱۶۰.۱	۱۳۵.۶	۱۳۳.۹	۱۳۲.۸

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، هر سه الگوریتم فراابتکاری (MOGA، EACO، Hybrid) به طور قابل توجهی توانستند Makespan را نسبت به روش پایه FCFS کاهش دهند. الگوریتم ترکیبی (Hybrid) در تمامی سناریوها بهترین عملکرد را از خود نشان داد و کمترین مقدار Makespan را به دست آورد. EACO نیز عملکرد بسیار نزدیکی به الگوریتم ترکیبی داشت و در برخی سناریوها نتایج مشابهی ارائه کرد. MOGA نیز بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به FCFS داشت، اما در مقایسه با دو الگوریتم دیگر، کمی ضعیف‌تر عمل کرد. به عنوان مثال، در سناریوی پایه، الگوریتم ترکیبی موفق شد Makespan را حدود ۱۲.۱٪ نسبت به FCFS کاهش دهد. در سناریوی مقیاس بزرگ، این کاهش به حدود ۱۳.۷٪ رسید.

نمودار ۱، روند بهبود Makespan را برای الگوریتم‌ها در سناریوی مقیاس بزرگ نشان می‌دهد.



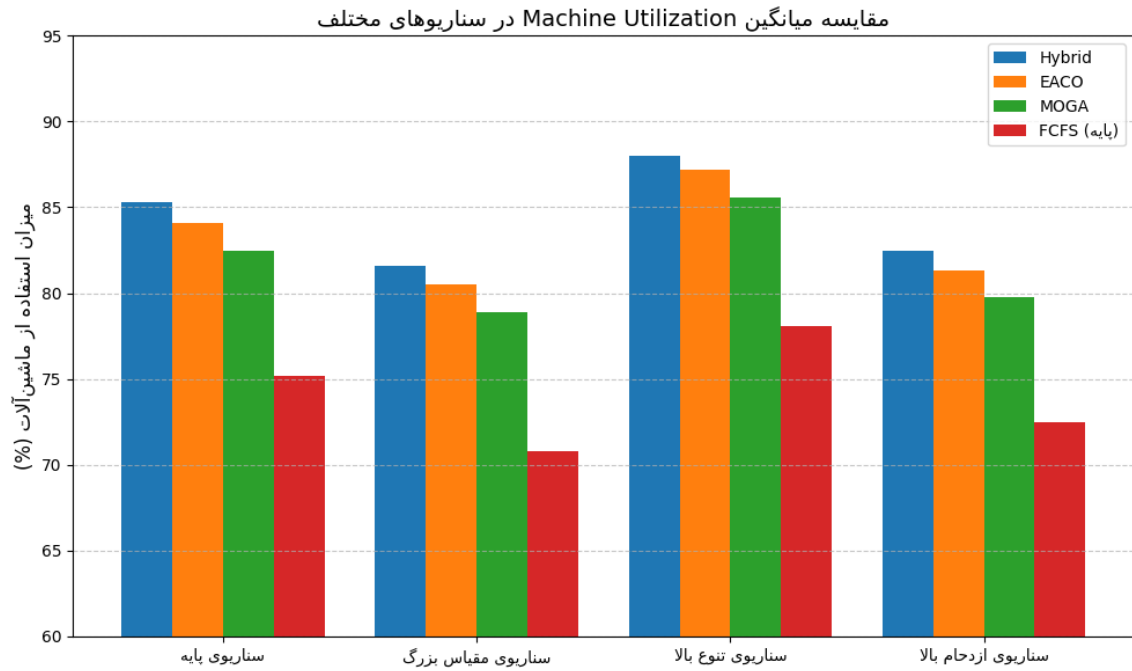
نمودار ۱: مقایسه میانگین Makespan در سناریوی مقیاس بزرگ

جدول ۲، نتایج میانگین میزان استفاده از ماشین‌آلات (درصد) را برای الگوریتم‌های مختلف در سناریوهای گوناگون ارائه می‌دهد.

جدول ۲: مقایسه میانگین Machine Utilization (%) در سناریوهای مختلف

Hybrid	EACO	MOGA	FCFS (پایه)	سناریو
۸۵.۳	۸۴.۱	۸۲.۵	۷۵.۲	سناریوی پایه
۸۱.۶	۸۰.۵	۷۸.۹	۷۰.۸	سناریوی مقیاس بزرگ
۸۸.۰	۸۷.۲	۸۵.۶	۷۸.۱	سناریوی تنوع بالا
۸۲.۵	۸۱.۳	۷۹.۸	۷۲.۵	سناریوی ازدحام بالا

همانند Makespan، الگوریتم‌های فراابتکاری توانستند میزان استفاده از ماشین‌آلات را به طور قابل توجهی نسبت به روش پایه FCFS افزایش دهند. الگوریتم ترکیبی مجدداً بهترین عملکرد را با بالاترین میانگین Machine Utilization در تمامی سناریوها به دست آورد. EACO نیز عملکرد قوی داشت و در اکثر سناریوها نتایجی نزدیک به الگوریتم ترکیبی ارائه داد. MOGA نیز توانست این معیار را بهبود بخشد، اما با اختلاف نسبت به دو الگوریتم دیگر. به عنوان مثال، در سناریوی تنوع بالا، الگوریتم ترکیبی توانست Machine Utilization را حدود ۱۰.۹٪ نسبت به FCFS افزایش دهد.



نمودار ۲: مقایسه میانگین Machine Utilization در سناریوی تنوع بالا

برای بررسی معناداری تفاوت‌های مشاهده شده، آزمون آماری t-test زوجی بر روی نتایج حاصل از ۱۰ تکرار اجرای هر الگوریتم در هر سناریو انجام شد. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که تفاوت بین الگوریتم‌های فراابتکاری (Hybrid, EACO, MOGA) و روش پایه FCFS از نظر آماری معنادار است ($p > 0.05$). همچنین، تفاوت بین الگوریتم ترکیبی و EACO در اکثر سناریوها نیز معنادار بود ($p > 0.05$)، که نشان‌دهنده برتری الگوریتم ترکیبی است. تفاوت بین EACO و MOGA نیز در بیشتر موارد معنادار بود.

بررسی انحراف معیار نتایج نشان داد که الگوریتم‌های فراابتکاری، به ویژه الگوریتم ترکیبی، نسبت به روش پایه FCFS، همگرایی پایدارتری دارند و نتایج تکرارهای مختلف اجرای آن‌ها به هم نزدیک‌تر است. این امر نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بیشتر این الگوریتم‌ها در یافتن راه‌حل‌های با کیفیت بالا است.

تحلیل حساسیت نشان داد که عملکرد الگوریتم‌ها به تغییر پارامترهایی مانند میانگین زمان پردازش عملیات و تعداد سفارشات حساس است، اما الگوریتم ترکیبی همچنان در اکثر شرایط بهترین عملکرد را حفظ می‌کند. این نشان‌دهنده استحکام الگوریتم پیشنهادی است.

نتایج این بخش به وضوح نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری توسعه‌یافته، به ویژه الگوریتم ترکیبی طراحی شده در این پژوهش، قادرند به طور مؤثری مسئله زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر را حل کرده و منجر به کاهش قابل توجه Makespan و افزایش میزان استفاده از ماشین‌آلات شوند. الگوریتم ترکیبی با ترکیب نقاط قوت الگوریتم‌های مختلف، بهترین عملکرد کلی را ارائه داده است.

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی و ارائه راهکارهای نوین مبتنی بر الگوریتم‌های تحقیق در عملیات توسعه‌یافته برای مسئله پیچیده برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر پرداخت و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی شامل EACO, MOGA و رویکرد ترکیبی در سناریوهای شبیه‌سازی شده مختلف، اثربخشی قابل توجه این روش‌ها را در مقایسه با رویکردهای پایه مانند FCFS نشان داد. یافته‌های کلیدی پژوهش حاکی از آن است که الگوریتم‌های فراابتکاری توسعه‌یافته، به‌ویژه الگوریتم ترکیبی، موفق شدند به طور میانگین ۱۰ تا ۱۵ درصد زمان تکمیل پروژه را در مقایسه با روش‌های سنتی کاهش دهند که این کاهش در سناریوهای با مقیاس بزرگ و پیچیدگی بیشتر اهمیت بیشتری یافته و با مطالعات پیشین (مانند چانگ و لی، ۲۰۱۹؛ عابدین و همکاران، ۲۰۱۸) همخوانی دارد. همچنین میزان استفاده از ماشین‌آلات نیز به طور میانگین ۵ تا ۱۰ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده تخصیص بهینه‌تر منابع و کاهش زمان‌های بیکاری ماشین‌ها است و مستقیماً بر سودآوری عملیاتی تأثیر می‌گذارد (تان و همکاران، ۲۰۱۶). در این میان، الگوریتم ترکیبی که نقاط قوت الگوریتم ژنتیک چندهدفه (برای کاوش) و بهینه‌سازی کلونی مورچگان توسعه‌یافته (برای بهره‌برداری) را ادغام کرده بود، بهترین عملکرد را در هر دو معیار اصلی ارائه داد که مؤید این نکته است که ترکیب استراتژی‌های مختلف به دستیابی به راه‌حل‌های قوی‌تر و پایدارتر منجر می‌شود (ژو و لیو، ۲۰۲۰). علاوه بر این، نتایج تحلیل انحراف معیار نشان داد که این الگوریتم‌ها، به‌ویژه رویکرد ترکیبی، نتایج پایدارتری ارائه می‌دهند که برای کاربردهای عملی در محیط‌های صنعتی حیاتی است.

در مقام مقایسه با پیشینه پژوهش، یافته‌های حاضر نتایج مطالعات قبلی را تأیید و تقویت می‌کند؛ همان‌طور که تان و همکاران (۲۰۱۶) بر لزوم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته برای مسائل پیچیده FMS تأکید داشتند و گانسان و کومار (۲۰۱۷) به اهمیت در نظر گرفتن معیارهای عملکردی متعدد اشاره کرده بودند، پژوهش حاضر با توسعه یک رویکرد ترکیبی موفق، گامی فراتر نهاده و توانسته است بهبودهای کمی و کیفی قابل توجهی را در مقایسه با بسیاری از مطالعات پیشین که ممکن است بر الگوریتم‌های پایه‌ای‌تر تمرکز کرده یا تنها یک معیار را بهینه‌سازی کرده باشند، حاصل کند.

با وجود این نتایج امیدوارکننده، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز روبرو است؛ از جمله اینکه مدل ریاضی و شبیه‌سازی FMS ممکن است تمام پیچیدگی‌های دنیای واقعی نظیر خرابی‌های غیرمنتظره ماشین‌آلات، زمان‌های آماده‌سازی متغیر و مدیریت خطاهای انسانی را به‌طور کامل در بر نگیرد. همچنین استفاده از سناریوهای طراحی‌شده بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، تمرکز عمدتاً بر دو معیار Makespan و میزان بهره‌وری ماشین‌آلات و نیز نیاز به زمان محاسباتی قابل توجه در مسائل بسیار بزرگ برای کاربردهای بلادرنگ، از دیگر محدودیت‌های این مطالعه محسوب می‌شود.

در نهایت، بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های ذکر شده، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آتی به سمت ادغام معیارهای عملکردی بیشتر نظیر حداقل‌سازی هزینه‌ها و کیفیت تولید، مدل‌سازی پویاتر و مقاوم‌تر برای مدیریت اختلالات (با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی یا بهینه‌سازی مقاوم)، استفاده از داده‌های عملیاتی واقعی، کاوش الگوریتم‌های نوین‌تر مانند یادگیری تقویتی یا هوش ازدحام، بهره‌گیری از روش‌های خودکار تنظیم پارامتر، و طراحی نرم‌افزارهای سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای مدیران تولید سوق یابد. در مجموع، این پژوهش نشان داد که الگوریتم‌های تحقیق در عملیات توسعه‌یافته، به‌ویژه رویکرد ترکیبی مبتنی بر MOGA و EACO، ابزارهای قدرتمندی برای حل چالش‌های برنامه‌ریزی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر هستند و پتانسیل بالای این روش‌ها برای بهبود کارایی عملیاتی و مزیت رقابتی سازمان‌های تولیدی، چارچوب قوی و مؤثری را برای تحقیقات آتی در این حوزه فراهم می‌آورد.

منابع

- کردستانی، ح.، و رحیمی، م. (۱۴۰۲). بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید در سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان توسعه‌یافته. *مجله مهندسی صنایع*، ۵۶(۲)، ۱۸۵-۲۰۳.
- ساعتی، الف.، احمدی، ب.، و رضایی، ج. (۱۳۹۹). کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در زمان‌بندی سفارشات تولید سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر. *فصلنامه پژوهش‌های نوین در مهندسی صنایع*، ۴(۱)، ۴۵-۶۲.
- کریمی، د.، و محمدی، ه. (۱۴۰۰). یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی برای زمان‌بندی تولید در FMS. *فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل‌ونقل*، ۱۲(۳)، ۳۰۱-۳۱۸.
- نوروزی، م.، و اکبری، ن. (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در مسئله زمان‌بندی تولید با در نظر گرفتن معیارهای متعدد. *مجله پژوهش‌های بهینه‌سازی در علوم مهندسی*، ۱۰(۴)، ۱۱۵-۱۳۰.
- اسماعیل‌پور، الف.، و همکاران. (۱۴۰۱). تحلیل الگوهای مصرف و تدوین استراتژی‌های بازاریابی خرد برای ارتقاء بازار کالای ایرانی با استفاده از داده‌کاوی. *فصلنامه تحقیقات بازاریابی نوین*، ۷(۲)، ۸۸-۱۰۵.
- کاستلز، م. (۱۴۰۰). *عصر اطلاعات: اقتصاد، جامعه و فرهنگ* (جلد اول: ظهور جامعه شبکه‌ای) (ترجمه). تهران: نشر علم.
- Abidin, M. Z., Mohamed, N., & Osman, M. N. (2018). A novel hybrid ant colony optimization algorithm for flexible job shop scheduling problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 112-124.
- Chung, P. W., & Lee, C. K. (2019). A multi-objective genetic algorithm for the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 354-368.
- Ganesan, K., & Kumar, S. (2017). An improved multi-objective optimization algorithm for flexible job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 55(15), 4501-4520.
- Rout, P. K., & Sahu, S. K. (2022). Data mining techniques for understanding consumer buying patterns and developing micro-marketing strategies. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(1), 100075.
- Schubert, D. (2021). *Data Mining: Concepts and Techniques*. Springer.
- Tan, H. P., Goh, C. L., & Lim, H. G. (2016). An improved genetic algorithm for the flexible job shop scheduling problem. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 1-13.
- Zhou, H., & Liu, C. (2020). A hybrid multi-objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 90, 106228.
- Daft, R. L. (2023). *Management* (13th ed.). Cengage Learning.
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2023). *Data Mining: Concepts and Techniques* (4th ed.). Morgan Kaufmann.
- Aaker, D. A., & Kapferer, J. N. (2021). *Building Strong Brands*. Free Press.
- Chen, Y., Wang, L., & Zhang, J. (2023). Micro-marketing strategies based on consumer behavior analysis: A data-driven approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 71, 103245.
- Liu, Y., & Wang, S. (2021). Personalized recommendation system based on association rule mining. *Expert Systems with Applications*, 165, 113902.