




Paper Type: Original Article

Presenting a Fuzzy Mathematical Programming Model for Allocating and Scheduling Parts in a Flexible Manufacturing System (FMS) and the Impact of Repairs and Maintenance on Product Quality

Jafar Hassan Beigi¹ , Meqdad Jahromi^{1,*} Mohammad Taghipour¹

¹ Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; jafar.hassanbigi@yahoo.com; m.jahromi@iau-tnb.ac.ir; mohamad_taghipour@yahoo.com.

Citation:

Received: 20 December 2023

Revised: 09 February 2024

Accepted: 18 April 2024

Hassan Beigi, J., Jahromi, M., & Taghipour, M. (2024). Presenting a fuzzy mathematical programming model for allocating and scheduling parts in a flexible manufacturing system (FMS) and the impact of repairs and maintenance on product quality. *Journal of Quality Engineering and Management*, 14(2), 105-126.

Abstract

Purpose: This study aims to develop a mathematical model for flexible job shop scheduling. The primary focus is on optimizing three objectives: the makespan, the maximum machine workload, and the total workload. The ultimate goal is to enhance productivity and flexibility in manufacturing systems.

Methodology: Two metaheuristic algorithms, NSGA-II and MOGWO, were used to solve the model. The model was first validated on a small scale, and then a sensitivity analysis was conducted on larger instances. The performance of the algorithms was compared based on accuracy and solution quality metrics.

Findings: The results indicate that MOGWO performs better on medium-sized problems, whereas in large-scale cases, the difference between the two algorithms is not significant. The highest sensitivity was observed among the objectives regarding production and maintenance costs. Additionally, a resource-allocation pattern and an optimal sequence of operations were derived.

Originality/Value: The originality of this research lies in developing and applying a multi-objective mathematical model for flexible job-shop scheduling that considers real-world constraints, including costs and resource limitations. The simultaneous use and detailed comparison of NSGA-II and MOGWO across different problem sizes is another contribution. Furthermore, the proposed operational pattern improves the applicability of the results in industrial environments.

Keywords: Flexible manufacturing, Gray wolf algorithm, Genetic algorithm, Optimization.



نوع مقاله: پژوهشی

ارایه یک مدل برنامه ریزی ریاضی فازی به منظور تخصیص و زمانبندی انجام قطعات در یک سیستم

تولید انعطاف پذیر (FMS) و تاثیر تعمیرات و نگهداری بر کیفیت محصول

جعفر حسن بیگی^۱، مقداد جهرمی^{۱*}، محمد تقی پور^۱
^۱گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف توسعه یک مدل ریاضی فازی برای زمانبندی تولید کارگاهی انعطاف پذیر انجام شده است. تمرکز اصلی بر بهینه سازی سه هدف: زمان تکمیل سفارش ها، بار کاری حداکثری ماشین ها و مجموع بار کاری است. هدف نهایی افزایش بهره وری و انعطاف پذیری در سیستم های تولیدی است.

روش شناسی پژوهش: از دو الگوریتم فرا ابتکاری *NSGA-II* و *MOGWO* برای حل مدل استفاده شده است. ابتدا مدل در مقیاس کوچک اعتبارسنجی شد و سپس در ابعاد بزرگ تر تحلیل حساسیت انجام گرفت. مقایسه عملکرد الگوریتم ها با شاخص های دقت و کیفیت راه حل ها صورت گرفت.

یافته ها: نتایج نشان داد *MOGWO* در مسایل متوسط عملکرد بهتری دارد، ولی در مسایل بزرگ تفاوت معناداری با *NSGA-II* ندارد. بیشترین حساسیت اهداف نسبت به هزینه ساخت و نگهداری مشاهده شد. همچنین الگوی تخصیص منابع و ترتیب بهینه فعالیت ها استخراج گردید.

اصالت / ارزش افزوده علمی: اصالت این پژوهش در توسعه و کاربرد یک مدل ریاضی ترکیبی برای زمانبندی سیستم های تولید انعطاف پذیر با چندین هدف متضاد و در نظر گرفتن محدودیت های واقعی از جمله هزینه ها و منابع تولیدی است. همچنین استفاده هم زمان از دو الگوریتم *NSGA-II* و *MOGWO* و مقایسه دقیق عملکرد آن ها در ابعاد مختلف، نوآوری دیگری از این تحقیق محسوب می شود. ارایه یک الگوی عملیاتی برای توالی فعالیت ها نیز به کاربردی تر شدن نتایج پژوهش در محیط های صنعتی کمک می کند.

کلیدواژه ها: تولید انعطاف پذیر، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی.

۱- مقدمه

به حداکثر رساندن سود شرکت و بهره برداری کامل از منابع تولید محدود، یک مساله بهینه سازی کلیدی در برنامه ریزی استراتژیک شرکت هاست. به علاوه، مساله اصلی دیگر چگونگی بهینه سازی عملکرد (خروجی) تولید داخلی شرکت با توجه به انواع محصولات است. در جهان صنعتی امروز، به تولید به عنوان یک سلاح رقابتی نگریسته می شود و سازمان های تولیدی در محیطی قرار گرفته اند که از ویژگی های آن می توان به افزایش فشارهای رقابتی، تنوع در محصولات، تغییر در انتظارات اجتماعی و افزایش سطح توقع مشتریان اشاره کرد. محصولات در حالی که باید بسیار کیفی باشند، تنها زمان کوتاهی در بازار می مانند و باید جای خود را به محصولات بدهند که با آخرین ذائقه، سلیقه و یا نیاز مشتریان سازگار هستند. بی توجهی به

خواست مشتری و یا قصور در تحویل به موقع ممکن است بسیار گران تمام شود. شرایط فوق سبب گردیده تا موضوع اطلاعات برای سازمان‌های تولیدی از اهمیت زیادی برخوردار شود. از طرف دیگر، آخرین بررسی‌ها حاکی از آن است که استراتژی رقابتی مبتنی بر بازار خود نیز به تدریج در حال گذر است و چشم‌انداز استراتژیک رقابت در آینده مبتنی بر منابع خواهد بود. به عبارت دیگر در حالی که شرکت‌ها امروزه موفقیت را در تبعیت و استفاده درست از قوانین، فرصت‌ها و شرایط دیکته شده توسط بازار می‌دانند، استراتژی مبتنی بر منابع بر این موضوع تاکید دارد که منفعت و موفقیت بیشتر با اتکا بر مزیت‌ها و منابع منحصربه‌فرد و قابل اطمینان شرکت و سرمایه‌گذاری به منظور توسعه و حفاظت از آن‌ها حاصل خواهد شد. البته منابع تولیدی موردنظر تنها شامل سرمایه، زمین، ماشین‌آلات و تجهیزات نمی‌شوند، بلکه بنای تولید نسل آینده بر تاکید و توجه به اطلاعات، مدیریت دانش و توجه ویژه به مساله آموزش افراد خواهد بود.

۲- بیان مساله

وضعیت به وجود آمده و تحولات صورت گرفته مذکور در حوزه فعالیت‌های تولیدی، اگرچه خود حاصل به‌کارگیری گسترده و همه‌جانبه فناوری‌های اطلاعاتی در این حوزه است، ولی در عین حال باعث توجه مضاعف سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی به مقوله اطلاعات و فناوری‌های مرتبط با آن شده است. این تحقیق با هدف تبیین موضوع فوق صورت گرفته است و سعی دارد تا نقش و تاثیر فناوری اطلاعات در وضعیت کنونی تولید و ساخت کالاها را به تصویر بکشد. اهمیت این بررسی از آنجا ناشی می‌شود که چند سالی است در کشور، افزایش تعداد واحدهای تولیدی و به تبع آن تحقق نسبی فضای رقابتی باعث گردیده تا توجه تولیدکنندگان و شرکت‌های صنعتی به کیفیت محصولات، افزایش سهم بازار و مساله صادرات معطوف گردد. از همین رو به نظر می‌رسد دانستن تحولات صورت گرفته در بخش‌های تولیدی جوامع پیشرفته می‌تواند در تعیین و شناخت بهتر مسیری که سازمان‌های تولیدی و صنعتی کشور برای ارتقای توان رقابتی خود باید طی کنند موثر واقع شود. در این مقاله شرح داده خواهد شد که چگونه توسعه‌های اخیر در حوزه فناوری اطلاعات به ویژه هوش مصنوعی و سیستم‌های خبره، وضعیت تولید در جوامع صنعتی را دگرگون ساخته است.

در طول چند دهه اخیر مفهوم سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر به عنوان یک جواب قابل قبول معتبر برای پاسخگویی به سوالات انعطاف‌پذیری و کارایی مطرح شده است. با این حال اگرچه این سیستم‌ها باعث افزایش انعطاف‌پذیری می‌شوند اما پیچیدگی‌هایی با خود به همراه دارند. هرگونه اشتباه در برنامه‌ریزی و به‌کارگیری این سیستم‌ها، ممکن است منجر به کاهش راندمان و قابلیت اطمینان تجهیزات و افزایش نیاز به سرمایه‌گذاری بی‌رویه هزینه‌های تولیدی شود. یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر هزینه زیادی دارد و تنها هنگامی بازگشت سرمایه‌گذاری دارای توجیه اقتصادی است که سیستم با راندمان بالایی به کار گرفته شود. لذا به منظور استفاده بهینه از امکانات و کاهش هزینه‌ها و نیز لزوم پاسخ سریع به تغییر در محصولات، برنامه‌ریزی تولید برای چنین محیط‌هایی اهمیت خاصی پیدا می‌نماید [1]. زمان‌بندی شامل برنامه‌ریزی و اولویت‌دهی فعالیت‌هایی است که لازم است به ترتیب عملیات انجام شوند. زمان‌بندی یک فعالیت تصمیم‌گیری است که به عنوان هدف، بهینه‌سازی یک یا چند هدف را بر عهده دارد. زمان‌بندی معمولاً به تخصیص کارها در بین یک مجموعه پیچیده از ماشین‌ها برمی‌گردد و توالی معمولاً در ارتباط با تغییر کامل مجموعه کارها یا ترتیبی که کارها باید روی یک ماشین معین پردازش شوند، می‌باشد.

بهینه‌سازی مساله تولید انعطاف‌پذیر حالت کلی‌تر از مساله تولید می‌باشد و از پیچیدگی بیشتری نسبت به آن برخوردار است. از این رو زمان انجام محاسبات به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و به همین دلیل استفاده از روش‌های بهینه‌سازی سنتی موثر نیست، یا اگر قابل استفاده باشند، بسیار زمان‌بر خواهند بود؛ بنابراین محققان به سمت روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری گام برداشته‌اند و در پی استفاده از الگوریتم‌های کارا تر هستند تا میزان انحرافات را نسبت به جواب بهینه اصلی کاهش دهند و جواب‌های حاصل به بهینه نزدیک‌تر باشند. در این تحقیق مساله سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن حرکت هم‌زمان قطعه و ابزار را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک در نظر گرفته شده و یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی برای سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر ارائه شده است که از عوامل موثر توسعه و رشد اقتصادی کشورهای توسعه‌نیافته و در حال توسعه می‌باشد و در بخش خصوصی، ابزاری اساسی برای تامین سودآوری و رضایتمندی به شمار می‌رود.

۳- ضرورت انجام تحقیق

تولید انعطاف‌پذیر سیاست نسبتاً جدیدی است که توسط شرکت‌های موفق برای توسعه و افزایش رقابت به کار گرفته می‌شود. با استفاده از تولید انعطاف‌پذیر می‌توان انواع محصولات متناسب با نیاز مشتری را تولید کرد. تولید انعطاف‌پذیر به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که مراحل تولید بین

تولید محصولات متعدد را تغییر دهد و به‌طور سریع و موثر پاسخگوی نیازهای مشتریان باشد؛ در کنار آن، روش‌های مختلفی به‌منظور حل مسایل بهینه‌سازی وجود دارد. بعضی از این روش‌ها به‌صورت تکراری و بر مبنای گرادیان، نقطه بهینه تابع هدف را می‌یابند. این روش‌ها معمولاً سرعت بالایی دارند ولی در عوض مشکل افتادن در دام بهینه محلی را با خود حمل می‌کنند. در مقابل روش‌های فرا ابتکاری وجود دارند که اغلب برگرفته از تکامل جسمی و ژنتیکی بوده و به جستجوی نقطه بهینه مطلق تابع می‌پردازند. امروزه بسیاری از سازمان‌های صنعتی و خدماتی، دولتی و خصوصی فعالیت‌های خود را در قالب تولید انعطاف‌پذیر تعریف می‌کنند. با توجه به اینکه در این سازمان‌ها معمولاً اهداف چندگانه در نظر گرفته می‌شود، وجود یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی با قابلیت در نظر گرفتن اهداف متفاوت می‌تواند بسیار مفید باشد؛ بنابراین نتایج این تحقیق می‌تواند برای این گونه سازمان‌ها مفید باشد. همچنین می‌تواند در مبحث برنامه‌ریزی تولید در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار گیرد. در صنعت افراد نیازمند حل سریع مساله زمان‌بندی تولید در مقیاس بزرگ می‌باشند. این موضوع باعث گرایش محققان به سمت روش‌های فرا ابتکاری شده است. روش‌های فرا ابتکاری معمولاً به جواب بهینه دسترسی پیدا نمی‌کنند، بلکه جواب‌هایی نزدیک به بهینه تولید می‌نمایند.

۴- اهداف تحقیق

هدف علمی و کلی این تحقیق توسعه مدل ریاضی برای مساله سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر است در حالی که حرکت قطعه و ابزار به‌صورت هم‌زمان می‌باشد و برخی پارامترها به‌صورت فازی در نظر گرفته شده است. اهداف فرعی که در این مطالعه دنبال می‌شوند به شرح زیر می‌باشند:

۱. مطالعه و بررسی تحقیقات انجام‌گرفته در حوزه سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر
۲. مدل‌سازی ریاضی فازی مساله تولید انعطاف‌پذیر برای حل مسایل کوچک و متوسط
۳. ارایه روش حل برای مساله تولید انعطاف‌پذیر به کمک الگوریتم‌های فرا ابتکاری
۴. ارزیابی کارایی روش‌های پیشنهادی و مقایسه الگوریتم‌ها با یکدیگر
۵. امکان‌به‌کارگیری مدل و نتایج حاصل از این تحقیق به‌منظور برنامه‌ریزی‌های بهتر در سیستم‌های تولیدی در کلیه مراکز و کارخانه‌ها و صنایع با شرایط مشابه

۵- مراحل انجام تحقیق

اولین گام در انجام تحقیق مطالعه ادبیات موضوع به‌منظور کسب دانش و تعیین جایگاه تحقیق حاضر در میان مطالعات انجام شده می‌باشد. در ادامه به‌منظور تعیین اعتبار مدل ارایه شده یک مثال کوچک به‌صورت دستی حل می‌شود و پارامترها و متغیرهای مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از مدل‌سازی مساله، با استفاده از نرم‌افزارهای اعتبارسنجی مدل مانند لینگو و یا گمز در سایز کوچک مساله را حل کرده و سپس با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مساله را در سایزهای کوچک و بزرگ حل می‌کنیم.

۶- پیشینه تحقیق

مساله موردبررسی در این تحقیق یک مساله برنامه‌ریزی تولید انعطاف‌پذیر در حالت تک دوره‌ای می‌باشد. در این مساله قطعات مختلفی وجود دارد که در مواقع موردنیاز و در طول مدت‌زمان تولید، توسط وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار ۱ مربوطه بین ماشین‌های مختلف موجود در سیستم حرکت می‌کنند. برای انجام عملیات مختلف روی این قطعات، نیاز به ابزارهایی می‌باشد که این ابزارهای بین ماشین‌ها با وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار که مخصوص ابزار می‌باشد جابه‌جا می‌شوند. در ادبیات، این امکان حرکت قطعات و ابزارها را سیاست ترکیب ماشین - ابزار پویا می‌نامند. لازم به ذکر است که این تحقیق یک مساله چند هدفه است و اهدافی از جمله حداقل کردن زمان تکمیل کل کار و حداقل کردن هزینه‌های تولید و

¹ Automated Guided Vehicle (AGV)

حمل محصولات هستیم. به دلیل اینکه جز مسایل چند جمله‌ای غیر دقیق سخت¹ می‌باشد، در مدت زمان قابل قبولی حل این مساله شدنی نیست [2]؛ بنابراین برای حل این مساله از روش‌های فرا ابتکاری گوناگونی استفاده شده است [3]، [4]. تعیین دقیق اینکه کدام یک از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به نتیجه بهتری دست خواهد یافت امری پیچیده است. در سیاست حرکت ابزار و قطعه به‌طور هم‌زمان یا ترکیب ماشین ابزار پویا در طول افق برنامه‌ریزی تولید، ابزارها و قطعات با وسایل هدایت‌شونده مختص به خود بین ماشین‌ها جابه‌جا می‌شوند. این سیاست باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این سیستم‌ها می‌شود. به طوری که زمان‌های بیکاری ماشین‌ها کمتر شده و همچنین زمان انتظار قطعات برای انجام عملیات‌های مربوطه کاهش می‌یابد که نهایتاً انتظار می‌رود در این حالت زمان تکمیل سفارش‌ها کاهش یابد، این سیاست اولین بار توسط جهرمی و همکاران [5] برای مساله تخصیص عملیات به ترکیب ماشین‌ابزار در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر ارائه شد. چن و سارنکر [6] یک مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی صفر و یک برای مساله تخصیص عملیات به ماشین‌ابزار با سیاست حرکت قطعات بین ماشین‌ها ارائه داد و این مساله را با الگوریتم فرا ابتکاری مورچگان حل کردند. آن‌ها برای این منظور مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی صفر و یک چند هدفه آرمانی را برای مساله تخصیص عملیات‌ها به ترکیبات ماشین‌ابزار ارائه کرده که آرمان‌ها را به‌صورت فازی در نظر گرفتند و آن را با الگوریتم فرا ابتکاری مورچگان بدون در نظر گرفتن چند هدفه بودن مدل حل نمودند.

بویارگن و همکاران [7] به ارائه یک الگوریتم ابتکاری برای حل مساله تخصیص عملیات به ماشین‌ابزار با سیاست حرکت ابزار بین ماشین‌ها ارائه کردند به طوری که در این الگوریتم ابتکاری، نحوه انتخاب ابزار برای انجام عملیات‌های موجود، بر مبنای نسبت عمر ابزار به اندازه ابزار برای نصب روی هر ماشین در نظر گرفته شده بود. چن و هو [8] رویکرد مسایل چندهدفه برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید در محیط سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن چهار هدف کمینه کردن مجموع زمان شناوری قطعات، عدم تعادل بارکاری ماشین‌ها، بزرگترین بار کاری ماشین‌ها و کل هزینه ماشین‌کاری ارائه نمودند. نگر جونا و همکاران [9] یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای رویکرد برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای برای حل مساله کمینه کردن عدم تعادل بار کاری ارائه کرده‌اند که محدودیت‌های تکنولوژیکی از جمله زمان در دسترس بودن ماشین‌ها و محدودیت نصب ابزار روی ماشین‌ها را در نظر می‌گیرد.

مهدوی و همکاران [10] مدلی چندهدفه برای مساله تخصیص عملیات به ترکیب ماشین‌ابزار در محیط سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با سیاست حرکت قطعه در طول دوره زمانی تولید ارائه کردند که مدل آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک می‌باشد، در واقع مدل برنامه‌ریزی خطی آن‌ها همان مدل چن و سارنکر [6] می‌باشد با این تفاوت که مدل چن و سارنکر به‌صورت یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی آرمانی ارائه شده ولی مهدوی و همکاران [10] مدل خود را به‌صورت چندهدفه ارائه کرده‌اند و به دنبال پیدا کردن بهترین مرز بهینه پاراتو می‌باشند. پرسی و همکاران [11] رویکردی ابتکاری که در سطوح بالای آن اندازه انباشته‌ها مشخص می‌شوند و در سطوح پایینی آن اندازه انباشته‌ها توالی داده شده و از طریق زمان‌بندی به هم ارتباط پیدا می‌کنند ارائه کرده‌اند. لا و همکاران [3] یک مدل چندهدفه برای حل مساله زمان‌بندی سیستم تولید انعطاف‌پذیر که در آن میانگین زمان شناوری قطعات و میانگین تاخیر کارها و میانگین زمان بیکاری ماشین‌ها به‌طور هم‌زمان کمینه می‌شوند ارائه کرده است.

جهرمی و همکاران [5] از یک روش فرا ابتکاری به نام بهینه‌سازی مورچگان پاراتویی برای حل مساله انتخاب ترکیب ماشین‌ابزار مناسب برای انجام سفارش‌ها استفاده کرده‌اند سیاستی که آن‌ها استفاده کرده‌اند سیاست حرکت قطعه در طول دوره زمانی تولید بوده است و تابع هدف آن‌ها کمینه کردن هزینه تولید و زمان کل ساخت بوده است. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پیشرفته با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم‌های ساخت کارگاهی انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار داده‌اند. در کار آن‌ها عامل‌های انسانی در امر مدل‌سازی در نظر گرفته شده است و یک رویکرد جدید برای اعمال اثر یادگیری در مساله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پیشرفته ارائه شد. همچنین با توجه به پیچیدگی محاسباتی مدلی که آن‌ها، یک الگوریتم ژنتیک چندمرحله‌ای برای حل مدل پیشنهادی آن‌ها ارائه شده است. جهرمی و همکاران در سال [2]، مساله زمان‌بندی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن سیاست ترکیب ماشین-ابزار پویا یعنی سیاستی که در آن امکان حرکت هم‌زمان قطعات و ابزارها با وسایل هدایت‌شونده مختص به خود در طول دوره زمانی تولید وجود دارد، مورد بررسی قرار دادند. مولفان یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی صفر و یک ارائه دادند. همچنین به دلیل ماهیت $NP\text{-Hard}$ بودن

¹ Non-deterministic Polynomial Hard (NP-Hard)

آن، یک الگوریتم تکاملی خاص ارائه نمودند [2]. بوآزا و همکاران [12] به ارائه مساله برنامه‌ریزی پویا برای محصولات هوشمند در سیستم تولید انعطاف‌پذیر پرداختند. مولفان ماشین‌های نامربوط، خانواده‌های متفاوت از محصولات، مجموعه عملیات متفاوتی را در نظر گرفتند. لی و همکاران [13] یک روش بهینه‌سازی برای تولید کارگاهی و ماشین‌کاری انعطاف‌پذیر با بازه‌های کاری پویا و خرابی ماشین را در نظر گرفتند. در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی که به هنگام بروز وقایع پویا، مشاغل و وضعیت برنامه ماشین را به‌روز می‌کند، پیشنهاد شده است. این روش دو حالت برای مصرف انرژی ابزار ماشین در نظر می‌گیرد: ماشین‌کاری واقعی و بیکار بودن دستگاه / آماده‌به‌کار. مدل بهینه‌سازی، کل مصرف انرژی و زمان مصرف را در نظر می‌گیرد و از روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای دستیابی به یک راه‌حل استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در تنظیم برنامه در پاسخ به حوادث پویا موثر است.

یانگ و همکاران [14] مساله بهینه‌سازی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن اختلالات نامشخص در خرابی ماشین را در نظر گرفتند. در این مقاله مساله برنامه‌ریزی برای سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر تحت اختلالات نامطمئن خرابی ماشین که در آن تخصیص ماشین و برنامه‌های کاری باید تعیین شود برای دستیابی به مجموعه‌ای از نیازهای تولید مطالعه می‌شود. برای این منظور یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی بر اساس مفهوم سناریوی آستانه ارائه شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی محققان در مقایسه با رویکردهای مختلف استاندارد در دستیابی به موعد برنامه‌ریزی شده تحت عدم اطمینان عملکرد خوبی دارد. کاربرد عملی رویکرد معرفی شده با استفاده از یک نرم‌افزار صنعت مهر زنی واقعی تایید شده است که در آن قطعات مهر زنی انواع مختلف موتور سیم‌پیچ صوتی هستند که در محرک‌های درایو دیسک سخت تجاری استفاده می‌شوند.

در این تحقیق سعی شده است مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک برای مساله زمان‌بندی در محیط سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن سیاست حرکت هم‌زمان قطعه و ابزار در بین ماشین‌ها ارائه شود. اکثر محققین در بررسی این مساله، تنها حرکت قطعه و یا ابزار را به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار داده‌اند و حرکت هم‌زمان آن‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. فرض خواهیم کرد در سیستم، سیاست تعمیرات و نگهداری وجود دارد. همچنین فرض خواهیم کرد که برخی پارامترها به‌صورت فازی است، به‌علاوه فرض خواهیم کرد که چندین کارخانه در مساله وجود دارد و به دنبال حداقل کردن زمان تکمیل کل کار و حداقل کردن هزینه‌های تولید و حمل محصولات هستیم.

۷- شرح مدل

در این تحقیق مساله سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن حرکت هم‌زمان قطعه و ابزار به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم فرض می‌شود که سیاست تعمیر و نگهداری وجود داشته و برخی پارامترها به‌صورت فازی در نظر گرفته می‌شود. ضمناً فرض می‌شود که چندین کارخانه در مساله وجود دارد که هر کارخانه قادر به تولید تعدادی محصول می‌باشد و پس از تولید هر محصول در کارخانه این محصول به انبار محصولات ارسال می‌شود. به‌عبارت‌دیگر قطعات از انبار مرکزی وارد سیستم تولید می‌شود و در خصوص اینکه هر قطعه بهتر است در کدام کارخانه تولید شود تصمیم‌گیری می‌شود سپس قطعه موردنظر به کارخانه انتخاب‌شده منتقل شده و در خصوص اینکه بر روی کدام ماشین و ابزار عملیات قطعه انجام گیرد تصمیم‌گیری می‌شود با توجه به اینکه امکان خرابی تجهیزات در نظر گرفته شده است لذا هزینه و زمان تعمیر و نگهداری پیش‌بینی شده و می‌تواند منجر به افزایش هزینه کل سیستم و زمان ساخت کل شود.

پس از انجام عملیات قطعه به انبار منتقل می‌شود اما در خصوص اینکه هر قطعه به کدام کارخانه منتقل شده و از کدام کارخانه خارج شود تصمیم‌گیری شده و در نهایت قطعه با در نظر گرفتن هزینه انتقال به انبار منتقل می‌شود. هر قطعه دارای عملیات متعددی می‌باشد که به‌صورت متوالی چیده و دارای تقدم و تاخر می‌باشد. شمای کلی مدل به شرح ذیل می‌باشد:

شکل ۱- شماتیک مدل.

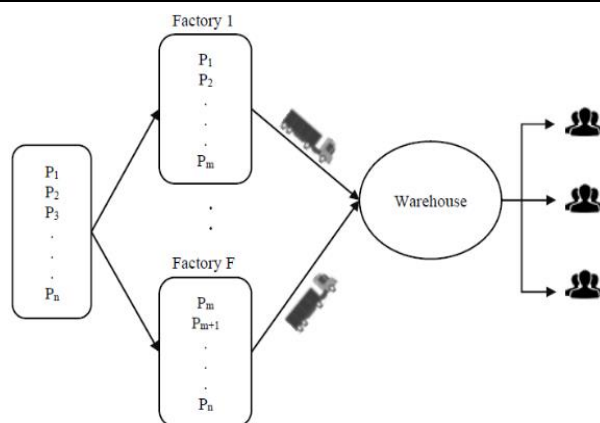


Figure 1- Model schematic.

همان‌گونه که دیده می‌شود قطعات از یک انبار مرکزی به کارخانه‌ها انتقال داده شده و هر قطعه صرفاً به یک کارخانه وارد می‌شود در نتیجه در خصوص کارخانه مورد نظر تصمیم‌گیری شده و عملیات ساخت قطعه با در نظر گرفتن هزینه و زمان افزوده شده به دلیل تعمیر و نگهداری احتمالی افزوده می‌گردد و در نهایت قطعه از کارخانه خارج و به سمت انبار منتقل می‌شود. سه هدف در این مدل به شرح زیر می‌باشد:

۱. حداقل ساختن زمان کار
۲. حداقل ساختن هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری
۳. حداقل ساختن هزینه حمل و نقل

در ادامه مفروضات مدل به شرح ذیل می‌باشد:

۱. مدل به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.
۲. پارامترهای هزینه ساخت، هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه عملیات و زمان ساخت به صورت فازی در نظر گرفته می‌شوند.
۳. هر قطعه دارای عملیات متفاوتی است که هر کدام از عملیات با ترکیب ماشین و ابزار به عنوان گزینه‌های پیشنهادی صورت می‌گیرد.
۴. زمان مربوط به نصب قطعات و ابزار روی ماشین‌های مختلف صفر در نظر گرفته شده است.
۵. بین عملیات هر قطعه یا سفارش روابط پیش‌نیازی و پس‌نیازی وجود دارد در واقع این بدین مفهوم است که عملیات هر قطعه باید به ترتیب انجام شود.
۶. یک ابزار در هر واحد زمانی نمی‌تواند به صورت هم‌زمان روی دو ماشین یا بیشتر مورد استفاده قرار گیرد به بیان دیگر هر ابزار در هر واحد زمانی حداکثر روی یک ماشین می‌تواند وجود داشته باشد.
۷. زمان حمل و نقل به زمان ساخت اضافه نمی‌شود.
۸. زمان تعمیر و نگهداری به زمان ساخت اضافه می‌کند.
۹. هر قطعه صرفاً در یک کارخانه باید ساخته شود.

اندیس‌ها

قطعه	p
عملیات	o
ابزار	l
ماشین	m
کارخانه	f

پارامترها

هزینه ساخت قطعه p در کارخانه f	\overline{PC}_{pf}
هزینه عملیات قطعه P با ماشین m با ابزار l	\overline{MC}_{pomlf}
هزینه تعمیر و نگهداری و عملیات o قطعه p با ابزار l روی ماشین m در کارخانه f	\overline{NC}_{pomlf}
هزینه حمل قطعه p برای انجام عملیات o به کارخانه f	SC_{pof}
هزینه حمل قطعه P از کارخانه f به انبار	CF_{pf}
اگر ماشین m در کارخانه f نیازمند تعمیر و نگهداری باشد ۱ و در غیراین صورت صفر است.	λ_{mf}
اگر ابزار l روی ماشین m در کارخانه f نیازمند تعمیر و نگهداری باشد ۱ و در غیراین صورت صفر است.	β_{mfl}
زمان تعمیر و نگهداری ماشین m در کارخانه f	$T\lambda_{mf}$
زمان تعمیر و نگهداری ابزار l روی ماشین m در کارخانه f	$T\beta_{mfl}$
زمان انجام عملیات o روی قطعه p با ماشین m تحت ابزار l در کارخانه f	\tilde{T}_{pomlf}

متغیرهای تصمیم

اگر عملیات ساخت قطعه p در کارخانه f انجام شود ۱ و در غیراین صورت صفر است.	X_{pf}
اگر عملیات o قطعه p با استفاده از ماشین m با ابزار l در کارخانه f انجام شود.	Y_{pomlf}
اگر عملیات o قطعه p با ابزار l روی ماشین m در کارخانه f همراه با تعمیر و نگهداری انجام شود ۱ و در غیراین صورت صفر است.	V_{pomlf}
اگر عملیات o قطعه p در کارخانه f شروع شود ۱ و در غیراین صورت صفر است.	S_{pof}
اگر عملیات o قطعه p در کارخانه f تمام شود ۱ و در غیراین صورت صفر است.	FF_{pof}
زمان شروع عملیات o برای انجام قطعه p در کارخانه f با استفاده از ماشین m و ابزار l	ST_{pofml}
زمان خاتمه عملیات o برای انجام قطعه p در کارخانه f با استفاده از ماشین m و ابزار l	FT_{pofml}
زمان ساخت	C_{MAX}

$$MIN Z1 = C_{MAX}. \quad (1)$$

رابطه (۱) به عنوان تابع هدف اول به دنبال حداقل ساختن زمان تکمیل کار می باشد.

$$MIN Z2 = \sum_p \sum_f \overline{PC}_{pf} \cdot X_{pf} + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \overline{MC}_{pomlf} \cdot Y_{pomlf} + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \overline{NC}_{pomlf} \cdot \lambda_{mf} \cdot V_{pomlf} + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \overline{NC}_{pomlf} \cdot \beta_{mfl} \cdot V_{pomlf}. \quad (2)$$

رابطه (۲) تابع هدف دوم مساله است که به دنبال حداقل ساختن هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری به واسطه محاسبه هزینه تولید و تعمیر و نگهداری در صورت نیاز به تعمیر و نگهداری و همچنین هزینه عملیات می باشد در واقع هزینه عملیات هزینه متغیر و هزینه ساخت هزینه ثابت کارخانه می باشد.

$$z3 = \sum_p \sum_o \sum_f SC_{pof} \cdot S_{pof} + \sum_p \sum_o \sum_f CF_{pf} \cdot FF_{pof}. \quad (3)$$

رابطه (۳) به دنبال حداقل ساختن هزینه حمل و نقل به عنوان تابع هدف سوم مساله می باشد که این هزینه به دو بخش هزینه حمل قطعه از مبدا به کارخانه و از کارخانه به انبار می باشد.

$$MAX = \max (FT_{pofml}). \quad (4)$$

رابطه (۴) نشانگر این است که زمان تکمیل ساخت برابر با حداکثر زمان خاتمه ساخت یک قطعه می باشد.

$$ST_{pofml} + \tilde{T}_{pomlf} + \lambda_{mf} \cdot T\lambda_{mf} + \beta_{mfl} + T\beta_{mfl} = ST_{p+1ofml}. \quad (5)$$

رابطه (۵) نشانگر تقدم و تاخر فعاليت‌ها بوده و بيان مي‌کند که زمان شروع عمليات قطعه بعدي برابر با زمان شروع قطعه قبلي، زمان ساخت قطعه قبلي و همچنين زمان تعمير و نگهداري ماشين يا انبار در صورت نياز به تعمير و نگهداري مي‌باشد.

$$ST_{pofml} + \bar{T}_{pomlf} + \lambda_{mf} \cdot T\lambda_{mf} + \beta_{mfl} + T\beta_{mfl} = FT_{pofml}. \quad (6)$$

رابطه (۶) نشانگر زمان تکميل ساخت یک قطعه با در نظر گرفتن زمان شروع عمليات قطعه، زمان ساخت و زمان تعمير و نگهداري ماشين و انبار مي‌باشد.

$$FT_{pofml} = ST_{p+1ofml}. \quad (7)$$

رابطه (۷) بيان مي‌کند که زمان خاتمه یک قطعه برابر با زمان شروع عمليات قطعه بعدي خواهد بود.

$$\sum_f X_{pf} = 1. \quad (8)$$

رابطه (۸) نشان مي‌دهد امکان ساخت یک قطعه فقط در یک کارخانه امکان‌پذير است.

$$Y_{pomlf} \leq X_{pf}. \quad (9)$$

رابطه (۹) نشان مي‌دهد اگر قطعه‌اي در کارخانه‌اي براي توليد انتخاب نشده باشد امکان انتخاب ماشين براي عمليات آن وجود ندارد.

$$\sum_m Y_{pomlf} = 1. \quad (10)$$

رابطه (۱۰) بيان مي‌کند که هر قطعه صرفاً بر روی یک ماشين قابل انجام بوده و امکان انجام آن بر روی چند قطعه وجود ندارد.

$$V_{pomlf} \leq Y_{pomlf}. \quad (11)$$

رابطه (۱۱) بيان مي‌کند اگر عملياتي روی ماشيني صورت نگيرد امکان تعمير و نگهداري براي آن وجود ندارد.

$$\sum_m V_{pomlf} = 1. \quad (12)$$

رابطه (۱۲) نشان مي‌دهد که امکان تعمير و نگهداري صرفاً براي هر عمليات و هر قطعه روی یک ماشين امکان‌پذير است.

$$S_{pof} \leq X_{pf}. \quad (13)$$

رابطه (۱۳) نشان مي‌دهد اگر کارخانه‌اي براي توليد یک قطعه انتخاب نشود امکان شروع عمليات آن قطعه در آن کارخانه وجود ندارد.

$$FF_{pof} \leq X_{pf}. \quad (14)$$

رابطه (۱۴) نشان مي‌دهد اگر کارخانه‌اي براي توليد یک قطعه انتخاب نشود امکان خاتمه عمليات آن قطعه در آن کارخانه وجود ندارد.

$$\sum_f S_{pof} = 1. \quad (15)$$

رابطه (۱۵) بيان مي‌کند که شروع هر فعاليت صرفاً در یک کارخانه امکان‌پذير است.

$$\sum_f FF_{pof} = 1. \quad (16)$$

رابطه (۱۶) بيان مي‌کند که خاتمه هر فعاليت صرفاً در یک کارخانه امکان‌پذير است.

$$ST_{pofml} \leq MX_{pf}. \quad (17)$$

رابطه (۱۷) نشان مي‌دهد که زمان شروع یک فعاليت براي هر قطعه در هر کارخانه در صورتي محاسبه مي‌شود که ساخت آن قطعه به کارخانه موردنظر تخصيص يافته باشد.

$$S_{pof} = FF_{pof}. \quad (18)$$

رابطه (۱۸) نشان مي‌دهد که زمان خاتمه یک فعاليت براي هر قطعه در هر کارخانه در صورتي محاسبه مي‌شود که ساخت آن قطعه به کارخانه موردنظر تخصيص يافته باشد.

$$X_{pf} \in \{0,1\}. \quad (19)$$

$$Y_{pomlf} \in \{0,1\}. \quad (20)$$

$$V_{pomlf} \in \{0,1\}. \quad (21)$$

$$S_{pof} \in \{0,1\}. \quad (22)$$

$$FF_{pof} \in \{0,1\}. \quad (23)$$

رابطه (۱۹) تا رابطه (۲۳) شانگر بازه متغیرهای باینری مساله است.

$$ST_{pofml} \geq 0. \quad (24)$$

$$FT_{pofml} \geq 0. \quad (25)$$

$$CMAX \geq 0. \quad (26)$$

رابطه (۲۴) تا رابطه (۲۶) نشانگر بازه متغیرهای عدد صحیح مساله است.

فازی زدایی

با توجه به غیرقطعی بودن مدل از روش خیمنز برای فازی زدایی مدل استفاده می‌شود. با فازی زدایی، رابطه‌های (۲)، (۵)، (۶) که دارای ماهیت فازی می‌باشد به ترتیب به روابط ذیل تبدیل می‌شوند.

$$\begin{aligned} \sum_p \sum_f \frac{PC1_{pf} + 2PC2_{pf} + PC3_{pf}}{4} \cdot X_{pf} + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \frac{MC1_{pf} + 2MC2_{pf} + MC3_{pf}}{4} \cdot Y_{pomlf} \\ + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \frac{NC1_{pf} + 2NC2_{pf} + NC3_{pf}}{4} \cdot \lambda_{mf} \cdot V_{pomlf} \\ + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \frac{NC1_{pf} + 2NC2_{pf} + NC3_{pf}}{4} \cdot \beta_{mfl} \cdot V_{pomlf} \end{aligned} \quad (27)$$

$$ST_{pofml} + \frac{T1_{pfmo} + 2T2_{pfmo} + T3_{pfmo}}{4} + \lambda_{mf} \cdot T\lambda_{mf} + \beta_{mfl} + T\beta_{mfl} = ST_{p+1ofml}. \quad (28)$$

$$FT_{pofml} + \frac{T1_{pfmo} + 2T2_{pfmo} + T3_{pfmo}}{4} + \lambda_{mf} \cdot T\lambda_{mf} + \beta_{mfl} + T\beta_{mfl} = FT_{p+1ofml}. \quad (29)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود رابطه (۲۷) تا رابطه (۲۹) شکلی فازی زدایی شده رابطه‌های (۲)، (۵)، (۶) می‌باشند.

۸- روش حل و تحلیل یافته‌ها

روش حل در تحقیق حاضر دو الگوریتم *NSGAI* و الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه یا *MOGWO* می‌باشد که در ابتدا اعتبارسنجی مدل صورت گرفته و سپس مساله در ابعاد بزرگ حل شده و نتایج حل دو الگوریتم *NSGAI* و *MOGWO* باهم مقایسه شده و با روش دقیق نیز قیاس می‌گردد. سپس تحلیل حساسیت پارامتری صورت گرفته و در انتها تحلیل عدم قطعیت و اثر آن بر اهداف مساله موردبررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های موردنظر در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌گردند.

۸-۱- اعتبارسنجی مدل

در این بخش اعتبارسنجی مدل صورت می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی مدل، مدل در ابعاد کوچک حل شده و نتایج حاصل از سه هدف یعنی زمان ساخت، هزینه تعمیر و نگهداری و ساخت و هزینه حمل و نقل با افزایش ابعاد در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر تعیین می‌شود که با افزایش ابعاد چه تاثیری بر اهداف حاصل شده و در صورت افزایش مقادیر اهداف می‌توان گفت مدل دارای اعتبار می‌باشد ضمن اینکه جدا از مقادیر توابع هدف، زمان محاسبه نیز در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۱ ابتدا ابعاد کل مساله معرفی می‌شود. همان‌گونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود ۳۰ مثال در نظر گرفته شده که در هر مساله نسبت به مساله قبلی ابعاد افزایش می‌یابد و این افزایش ابعاد می‌تواند سنجه‌ای در خصوص اعتبار مدل باشد اگر

افزایش ابعاد منجر به افزایش مقادیر توابع هدف و زمان محاسبه شود می توان گفت مدل از اعتبار لازم برخوردار می باشد نتایج این اعتبار سنجی در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۱- ابعاد مساله.

Table 1- Dimensions of the problem.

مساله	قطعه	عملیات	ابزار	ماشین	کارخانه
1	5	3	1	2	1
2	5	3	1	3	1
3	6	3	1	3	1
4	6	3	2	3	1
5	7	4	2	3	1
6	7	4	2	4	1
7	8	4	2	4	1
8	8	4	2	4	2
9	9	4	2	4	2
10	9	4	2	5	2
11	10	5	2	5	2
12	10	5	3	5	2
13	11	5	3	5	2
14	11	5	3	6	2
15	12	5	3	6	2
16	12	5	3	6	3
17	13	6	3	6	3
18	14	6	3	6	3
19	14	6	4	6	3
20	14	6	4	7	3
21	15	6	4	7	3
22	15	6	4	7	4
23	16	7	4	7	4
24	16	7	5	7	4
25	17	7	5	8	4
26	18	7	5	8	4
27	18	8	5	8	4
28	19	8	5	8	4
29	19	8	5	9	4
30	20	8	5	10	4

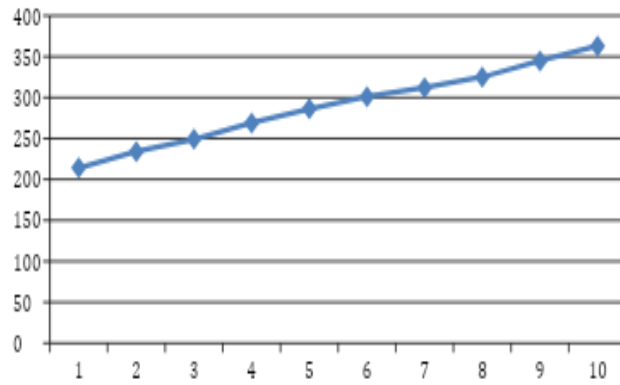
جدول ۲- اعتبار سنجی مدل.

Table 2- Model validation.

مساله	زمان ساخت	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل و نقل	زمان حل
1	214	148752	21547	21
2	234	150137	21687	38
3	249	151215	21798	58
4	269	152852	21991	69
5	286	154311	22136	88
6	301	155433	22251	100
7	312	157413	22395	110
8	325	159254	22562	125
9	345	160483	22728	137
10	363	162329	22866	154
11			Low Memory	
12			Low Memory	
13			Low Memory	
14			Low Memory	

در جدول فوق مشاهده می شود که با افزایش ابعاد مساله مقادیر توابع هدف و همچنین زمان محاسبه افزایش یافته و مساله با استفاده از روش دقیق تا مساله دهم قابل حل بوده است؛ اما از مساله یازدهم به بعد ما با خطای *Low Memory* مواجه شده ایم که این امر نشان می دهد از مثال ۱۱ به بعد

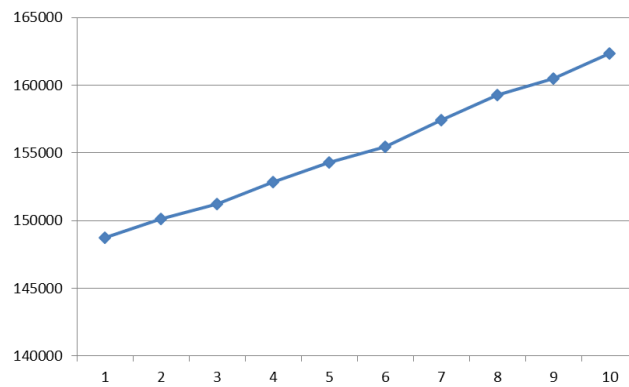
مساله با استفاده از روش های دقیق قابل حل نبوده و به سبب $NpHard$ بودن می بایست از الگوریتم های فرا ابتکاری برای حل آن استفاده شود. نتایج افزایش پارامترهای اهداف مساله در شکل های ذیل ارایه شده است.



شکل ۲- افزایش مقدار تابع هدف اول با افزایش ابعاد مساله.

Figure 2- Increasing the value of the first objective function with increasing problem dimensions.

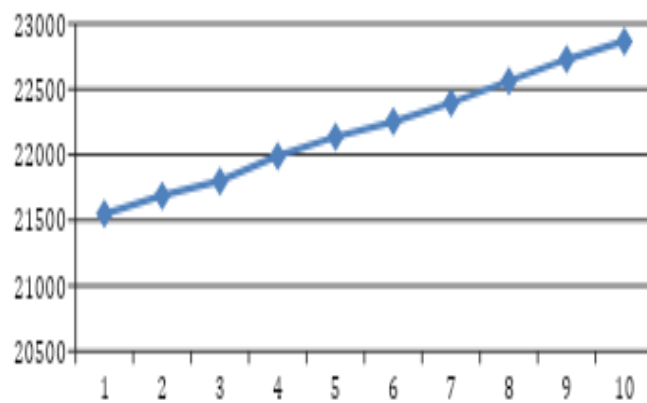
در شکل فوق دیده می شود با افزایش ابعاد مقدار تابع هدف اول مساله یعنی زمان ساخت نیز افزایش یافته است.



شکل ۳- افزایش مقدار تابع هدف دوم با افزایش ابعاد مساله.

Figure 3- Increasing the value of the second objective function with increasing problem dimensions.

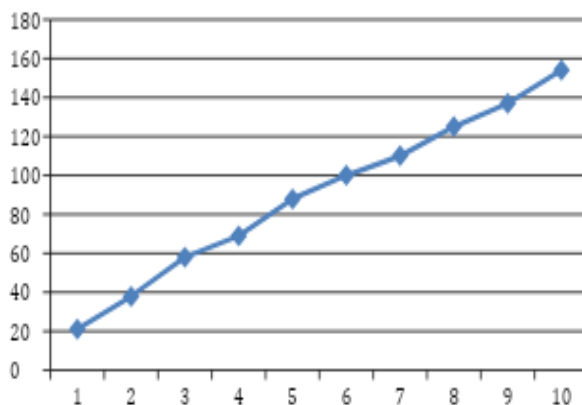
هزینه های تعمیر و نگهداری و ساخت نیز با افزایش ابعاد مساله دچار افزایش شده است که این امر موید اعتبار مدل می باشد.



شکل ۴- افزایش مقدار تابع هدف سوم با افزایش ابعاد مساله.

Figure 4- Increasing the value of the third objective function with increasing problem dimensions.

در شکل فوق دیده می‌شود که با افزایش ابعاد مساله یعنی هزینه حمل و نقل نیز افزایش یافته است.



شکل ۵- افزایش زمان محاسبه با افزایش ابعاد مساله.

Figure 5- Increase in computation time with increasing problem dimensions.

زمان محاسبه می‌تواند به‌عنوان چهارمین معیاری باشد که برای اعتبار سنجی مدل استفاده می‌شود با افزایش ابعاد مساله از مساله اول تا دهم شاهد افزایش زمان محاسبه می‌باشیم که این امر نشانگر اثبات اعتبار مدل می‌باشد.

تا این جای کار مساله در ابعاد کوچک حل شد و نتایج آن منجر به اعتبار سنجی گردید؛ اما همان‌گونه که مشاهده شد روش دقیق تا مثال‌های مشخصی قادر به حل مسایل می‌باشد و با افزایش ابعاد نمی‌توان انتظار داشت که روش دقیق همچنان جوابگو باشد. از سوی دیگر در دنیای واقعی مسایل زمان‌بندی محدود به تعداد کمی قطعه یا ماشین‌آلات نیست و ممکن است حجم ماشین‌آلات بیش از آن چیزی باشد که در روش دقیق اعمال گردید لذا در اینجا از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای جبران نقص روش‌های دقیق در حل مسایل بزرگ استفاده می‌شود. در جدول ذیل نتایج حاصل از حل مدل در ابعاد کوچک بزرگ و متوسط با استفاده از روش‌های دقیق، الگوریتم *NSGAI* و *MOGWO* ارایه گردیده است و ۴ معیار تعداد نقاط پارتو، معیار پراکندگی، شاخص فاصله تا نقطه ایده آل و زمان حل به ثانیه ارایه گردیده است. نتایج در جدول ۳ ارایه شده است.

برای روشن شدن مقایسه از شکل برای مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود.



شکل ۶- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید نقاط پارتو.

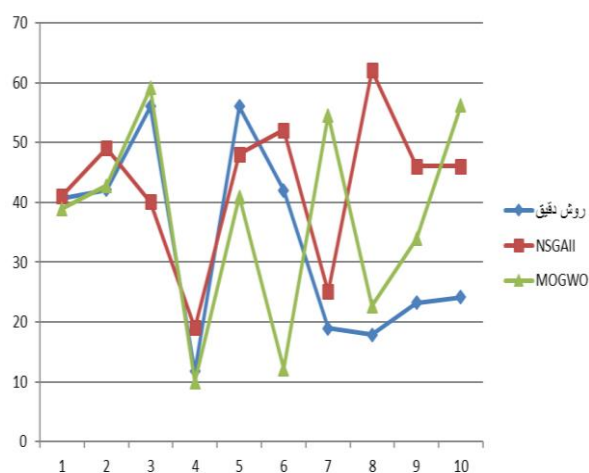
Figure 6- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of generating Pareto points.

در شکل فوق مقایسه روش‌های مورد استفاده بر اساس مسایل ۱ تا ۱۰ ارایه گردیده و نتایج به‌صورت شکل پارتو ارایه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش دقیق در مساله پنجم موفق به تولید بیشترین نقاط پارتو شده و از آنجایی که معیار نقاط پارتو بر اساس بیشینه‌ترین می‌باشد یعنی هر روشی که بیشترین نقاط را تولید کرده باشد دارای عملکرد بهتری است لذا می‌توان گفت در خصوص این مساله روش دقیق عملکرد بهتری داشته است اما به دلیل نوسانات بالا در تولید نقاط پارتو چندان نمی‌توان روش دقیق را معیار دانست و می‌توان گفت الگوریتم *MOGWO* از دو روش دیگر در تولید نقاط پارتو موفق‌تر بوده است.

جدول ۳- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر معیارهای چهارگانه.

Table 3- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of four criteria.

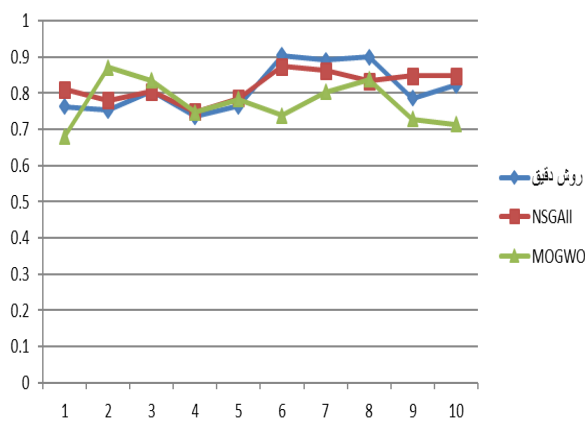
مساله	MOGWO				NSGAI				روش دقیق			
	زمان حل به ثانیه	شاخص MID	معیار پراکندگی	تعداد نقاط پارتو	زمان حل به ثانیه	شاخص MID	معیار پراکندگی	تعداد نقاط پاره تو	زمان حل به ثانیه	شاخص MID	معیار پراکندگی	تعداد نقاط پاره تو
1	42	0.68	38.92406	11	32	0.811267	41.09543	9	21	0.762732	40.67675	12
2	49	0.87	42.7857	12	47	0.781056	49.0596	6	38	0.753148	42.07769	10
3	68	0.83	59.12778	8	58	0.80517	40.07317	9	58	0.8062	56.07379	9
4	76	0.75	9.973629	11	70	0.748386	19.06003	9	69	0.735135	11.72262	11
5	92	0.78	40.95506	13	81	0.786143	48.05177	10	88	0.76437	56.07423	16
6	103	0.74	12.14174	8	102	0.874783	52.09897	10	100	0.904561	42.05845	7
7	116	0.80	54.58385	10	112	0.862393	25.08553	9	110	0.891556	18.98152	8
8	133	0.84	22.65526	9	135	0.834281	62.05682	11	125	89.985	17.854	5
9	149	0.73	33.90457	13	150	0.848825	46.09091	11	137	78.554	23.245	3
10	161	0.71	56.17748	8	175	0.847949	46.05904	7	154	82.254	24.14825	5
11	172	0.73	33.65536	11	179	0.881353	38.58047	7				
12	178	0.82	46.0075	10	190	0.9042	48.06004	12				
13	186	0.76	29.60076	13	211	0.898588	41.0665	7				
14	203	0.67	51.49927	14	227	0.853414	48.59033	10				
15	221	0.77	57.69063	15	252	0.875969	56.71907	9				
16	243	0.71	39.70712	15	262	0.779495	49.9478	12				
17	267	0.76	57.17827	10	285	0.671017	51.74392	12				
18	284	0.82	45.51992	16	300	0.819318	42.18944	11				
19	311	0.83	43.23898	6	324	0.88473	41.19319	16				
20	333	0.81	40.27758	11	344	0.819344	54.07759	11				
21	359	0.67	47.35149	9	355	0.846073	36.00683	6				
22	372	0.80	43.16729	8	378	0.810771	56.7108	12				
23	396	0.73	46.33943	8	407	0.774527	48.21727	11				
24	422	0.88	40.19785	12	429	0.87506	45.29695	12				
25	440	0.82	60.67836	10	446	0.851545	49.13354	8				
26	463	0.72	41.22107	11	459	0.801163	46.60002	16				
27	487	0.76	50.72197	12	478	0.713219	37.71592	10				
28	510	0.69	45.68458	10	493	0.677046	53.18086	11				
29	531	0.82	58.42622	11	514	0.749076	36.622	13				
30	546	0.76	37.7584	7	537	0.835031	58.96158	13				



شکل ۷- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید معیار پراکندگی.

Figure 7- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of generating the dispersion criterion.

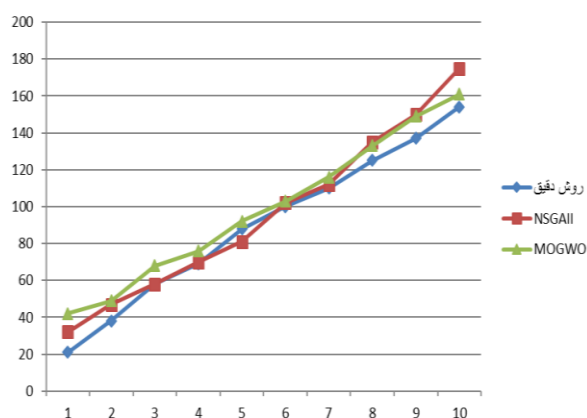
از نظر معیار پراکندگی که روشی مبتنی بر کمینه‌ترین‌ها می‌باشد، می‌توان گفت الگوریتم MOGWO پراکندگی کمتری را ایجاد کرده است و الگوریتم NSGAI نسبتاً میزان زیادی پراکندگی را به وجود آورده است.



شکل ۸- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر فاصله تا نقطه ایده آل.

Figure 8- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of distance to the ideal point.

فاصله تا نقطه ایده آل معیار دیگری است که کمترین‌ها در آن عملکرد بهتری دارند. نتایج شکل فوق نشان می‌دهد که الگوریتم *MOGWO* بیش از سایر روش‌ها کمترین فاصله تا نقطه ایده آل را به وجود آورده و بنابراین این الگوریتم دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده می‌باشد.

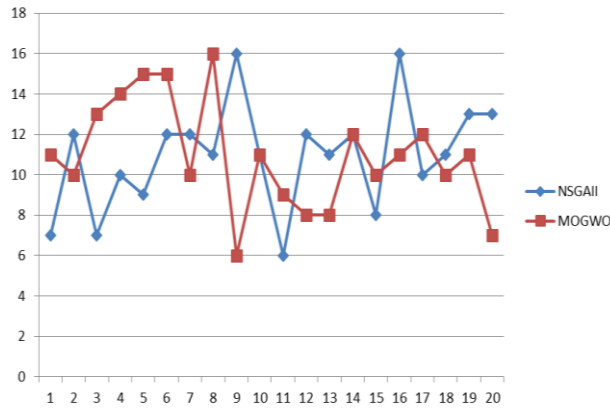


شکل ۹- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر زمان محاسبه.

Figure 9- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of computation time.

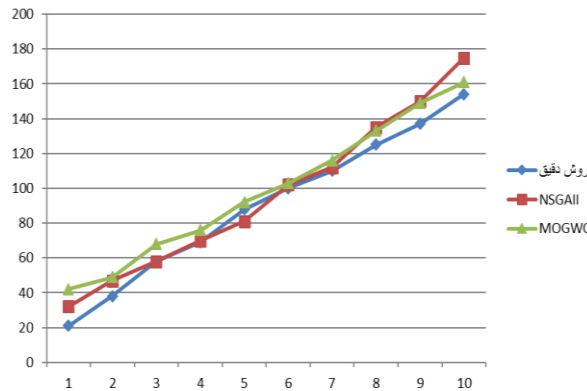
شکل فوق نشان می‌دهد که در زمان محاسبه به‌عنوان چهارمین معیار روش دقیق دارای کمترین زمان می‌باشد البته نمی‌توان تفاوت چندانی بین سه روش مشاهده کرد اما روش دقیق با فاصله‌ای اندک از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

تا اینجا مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مثال‌های با ابعاد کوچک صورت گرفت که به دلیل آنکه روش دقیق قادر به حل صرفاً مسایل کوچک می‌باشد در ادامه مثال‌های بزرگ و متوسط با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری *MOGWO* و *NSGAI* صورت می‌گیرد. لذا از مثال یازدهم تا سی ام مقایسه این الگوریتم‌ها از نظر کارایی صورت می‌گیرد و نتایج در قالب شکل‌های بعدی ارائه می‌گردد.



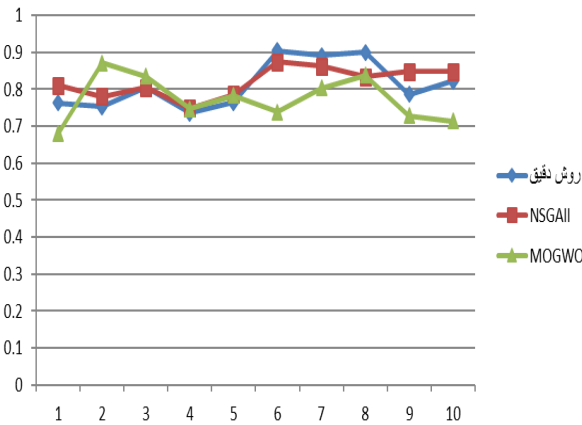
شکل ۱۰- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید معیار پراکندگی.
 Figure 10- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of generating the dispersion criterion.

از نظر معیار پراکندگی که روشی مبتنی بر کمینه‌ترین‌ها می‌باشد، می‌توان گفت الگوریتم *MOGWO* پراکندگی کمتری را ایجاد کرده است و الگوریتم *NSGAI* نسبتاً میزان زیادی پراکندگی را به وجود آورده است.



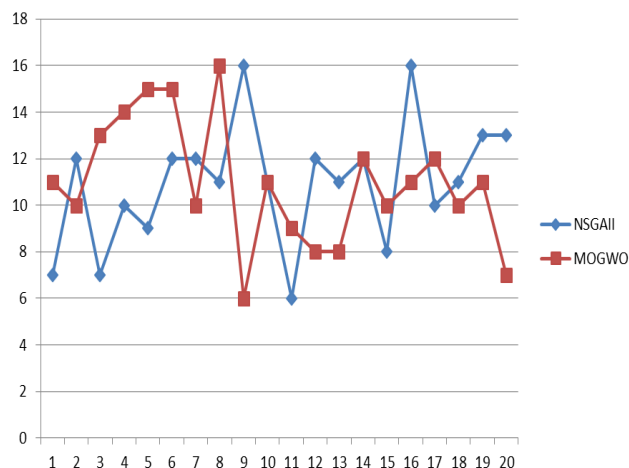
شکل ۱۱- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر فاصله تا نقطه ایده آل.
 Figure 11- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of distance to the ideal point.

فاصله تا نقطه ایده آل معیار دیگری است که کمترین‌ها در آن عملکرد بهتری دارند. نتایج شکل فوق نشان می‌دهد که الگوریتم *MOGWO* بیش از سایر روش‌ها کمترین فاصله تا نقطه ایده آل را به وجود آورده و بنابراین این الگوریتم دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده می‌باشد.



شکل ۱۲- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر زمان محاسبه.
 Figure 12- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of computation time.

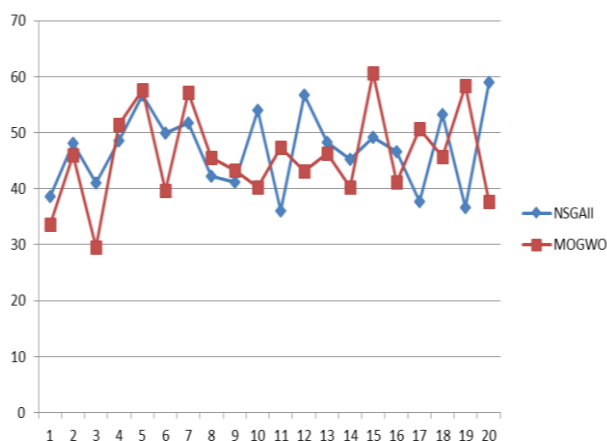
شکل فوق نشان می‌دهد که در زمان محاسبه به‌عنوان چهارمین معیار روش دقیق دارای کمترین زمان می‌باشد البته نمی‌توان تفاوت چندانی بین سه روش مشاهده کرد اما روش دقیق با فاصله‌ای اندک از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. تا اینجا مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مثال‌های با ابعاد کوچک صورت گرفت که به دلیل آنکه روش دقیق قادر به حل صرفاً مسایل کوچک می‌باشد در ادامه مثال‌های بزرگ و متوسط با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری *MOGWO* و *NSGAI* صورت می‌گیرد. لذا از مثال یازدهم تا سی‌ام مقایسه این الگوریتم‌ها از نظر کارایی صورت می‌گیرد و نتایج در قالب شکل‌های بعدی ارائه می‌گردد.



شکل ۱۳- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید نقاط پارتو در مسایل بزرگ و متوسط.

Figure 13- Comparison of meta-heuristic algorithms in terms of generating Pareto points in large and medium-sized problems.

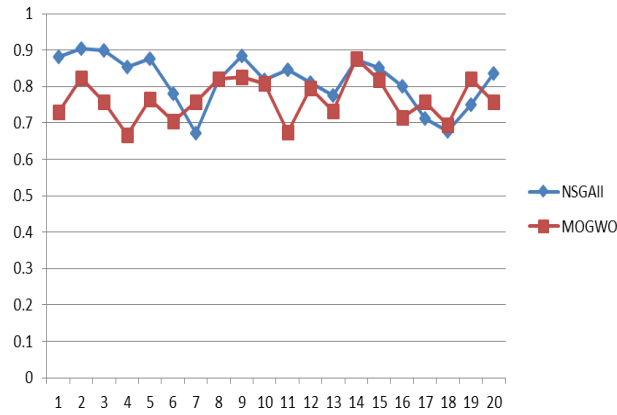
همان‌گونه که دیده می‌شود از نظر تولید نقاط پارتو الگوریتم *NSGAI* در مجموع در مثال‌های بزرگ توانسته است نقاط پارتوی بیشتری را تولید کند البته در مثال‌های متوسط شاهد چیرگی الگوریتم *MOGWO* می‌باشد اما در مثال‌های بزرگ کاملاً شرایط تغییر کرده و الگوریتم *NSGAI* به نسبت تولیدات بیشتری از منظر نقاط بهینه پارتو دارا می‌باشد.



شکل ۱۴- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر معیار پراکندگی در مسایل بزرگ و متوسط.

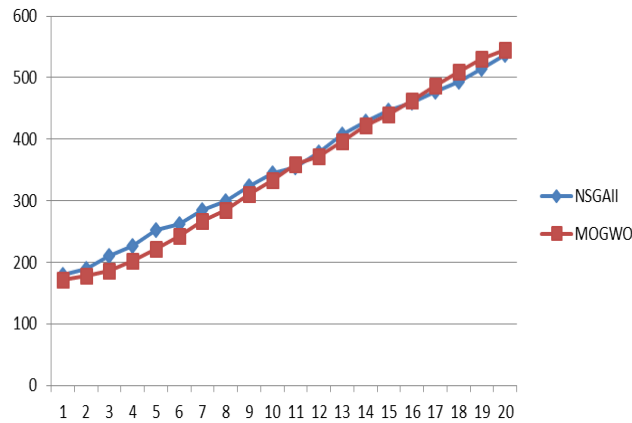
Figure 14- Comparison of metaheuristic algorithms in terms of dispersion criterion in large and medium problems.

در شکل فوق دیده می‌شود که الگوریتم *MOGWO* از نظر معیار پراکندگی در مسایل متوسط وضعیت بهتری را دارد اما هر چه مسایل بزرگتر می‌شود به نظر می‌رسد کارایی الگوریتم *NSGAI* بهتر می‌شود بنابراین می‌توان در مجموع گفت که در خصوص معیار پراکندگی تفاوت چندانی بین دو الگوریتم وجود ندارد.



شکل ۱۵- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر فاصله تا نقطه ایده آل در مسایل بزرگ و متوسط.
Figure 15- Comparison of metaheuristic algorithms in terms of distance to the ideal point in large and medium problems.

در خصوص فاصله تا نقطه ایده آل الگوریتم *MOGWO* هم در مسایل متوسط و هم در مسایل بزرگ عملکرد بهتری را نشان می‌دهد چراکه فاصله کمتری تا نقطه ایده آل به وجود آورد است. این عملکرد در شکل فوق کاملاً محسوس است.



شکل ۱۶- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر زمان محاسبه در مسایل بزرگ و متوسط.
Figure 16- Comparison of metaheuristic algorithms in terms of computation time for large and medium problems.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مسایل متوسط عملکرد *MOGWO* بهتر از *NSGAI* می‌باشد اما در مسایل بزرگ تفاوت چندانی بین دو الگوریتم دیده نمی‌شود.

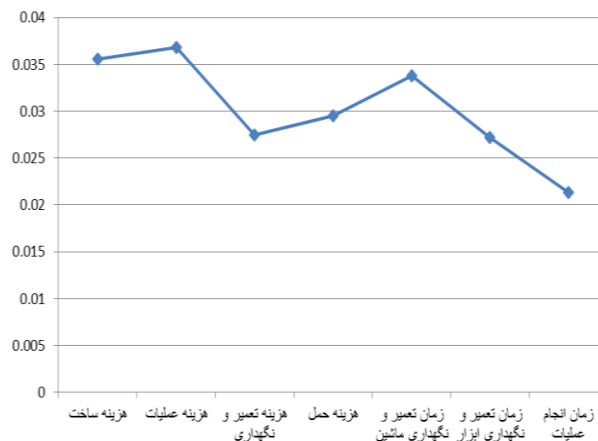
۸-۲- مقایسه تحلیل‌ها

در این بخش به مقایسه تحلیل‌ها پرداخته شده و مشخص می‌شود که بیشترین اثرگذاری به تفکیک هر پارامتر بر هر هدف کدام است.

جدول ۴- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر زمان ساخت.

Table 4- Comparison of the effect of different parameters on construction time.

زمان انجام عملیات	زمان تعمیر و نگهداری ابزار	زمان تعمیر و نگهداری ماشین	هزینه حمل	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه عملیات	هزینه ساخت	زمان ساخت
0.004464	0.006696	0.006696	0.004464	0.002232	0.006696	0.011161	10%
0.008889	0.015521	0.008869	0.011111	0.011136	0.017738	0.013245	20%
0.013216	0.017467	0.015385	0.017582	0.017621	0.028322	0.015251	30%
0.017391	0.025751	0.025974	0.023758	0.025974	0.036017	0.025751	40%
0.021368	0.027197	0.033755	0.029536	0.027426	0.03681	0.035565	50%



شکل ۱۷- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر زمان ساخت.

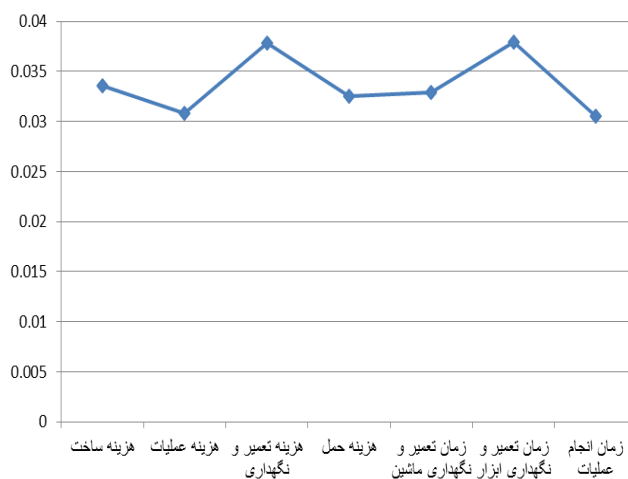
Figure 17- Comparison of different effects on construction time.

همان‌گونه که دیده می‌شود اثرگذارترین پارامتر بر زمان ساخت هزینه عملیات می‌باشد که بیش از ۳/۵٪ منجر به افزایش زمان ساخت می‌شود کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات است که اندکی بیش از ۲٪ اثرگذار است.

جدول ۵- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه تعمیر و نگهداری.

Table 5- Comparison of the effect of different parameters on maintenance costs.

زمان انجام عملیات	زمان تعمیر و نگهداری ابزار	زمان تعمیر و نگهداری ماشین	هزینه حمل	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه عملیات	هزینه ساخت	هزینه تعمیر و نگهداری
0.004843	0.007673	0.006766	0.005289	0.009389	0.008569	0.005601	10%
0.010805	0.015828	0.011684	0.011835	0.017212	0.015358	0.011803	20%
0.016492	0.0237	0.019934	0.018579	0.024557	0.020253	0.020469	30%
0.024408	0.030689	0.02472	0.026363	0.030615	0.025928	0.028021	40%
0.030491	0.037931	0.032908	0.032509	0.037826	0.030847	0.033596	50%



شکل ۱۸- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه تعمیر و نگهداری.

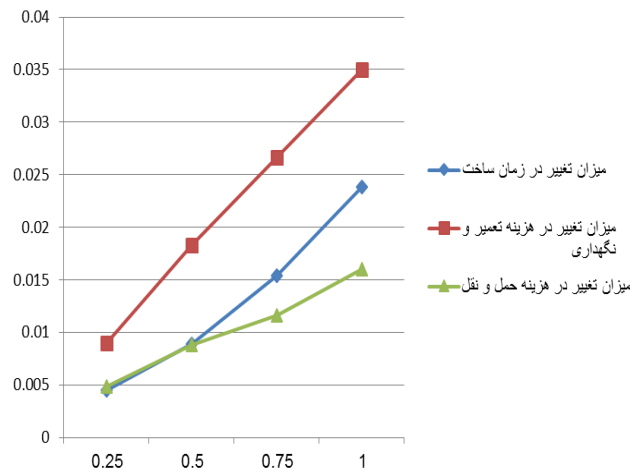
Figure 18- Comparison of the effect of different parameters on maintenance costs.

بر اساس شکل فوق دیده می‌شود که زمان تعمیر نگهداری ابزار و هزینه تعمیر و نگهداری دارای بیشترین اثر بر هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشند و نکته جالب‌توجه این است که اثر زمان تعمیر و نگهداری ابزار بیش از زمان تعمیر و نگهداری ماشین می‌باشد. اثرگذاری این دو پارامتر به میزان ۳/۷٪ می‌باشد. کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات و هزینه عملیات به میزان ۳٪ می‌باشد.

جدول ۶- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه حمل و نقل.

Table 6- Comparison of the effect of different parameters on transportation costs.

هزینه حمل و نقل	هزینه ساخت	هزینه عملیات	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل	زمان تعمیر و نگهداری ماشین	زمان تعمیر و نگهداری ابزار	زمان انجام عملیات
10%	0.004055	0.004568	0.004446	0.003982	0.004788	0.004422	0.003444
20%	0.008491	0.007927	0.006956	0.008735	0.008825	0.00822	0.007498
30%	0.012304	0.010833	0.009564	0.01112	0.012508	0.012254	0.011647
40%	0.016372	0.01518	0.013086	0.014242	0.016661	0.01487	0.015334
50%	0.019837	0.019608	0.017593	0.017593	0.019713	0.017165	0.018678



شکل ۱۹- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه حمل و نقل.

Figure 19- Comparison of the effect of different parameters on transportation costs.

همان گونه که دیده می شود بیشترین اثرگذاری بر هزینه حمل و نقل از سوی پارامتر هزینه ساخت به میزان تقریباً ۲٪ می باشد در حالی که دو پارامتر بعدی اثرگذار هزینه عملیات و زمان تعمیر و نگهداری ماشین به میزان ۱/۹۵٪ می باشد که فاصله چندانی با پارامتر اولیه نشان نمی دهد. کم اثرگذاری ترین پارامتر زمان تعمیر و نگهداری ابزار می باشد که اثر ۱/۷ درصدی را نشان می دهد.

۸-۳ - تحلیل عدم قطعیت

با توجه به عدم قطعیت مورد نظر در مدل تحقیق حاضر تحلیل عدم قطعیت با توجه به مقدار آلفا انجام شده و نشان داده می شود که با افزایش عدم قطعیت کدام هدف بیش از همه متاثر می شود. نتایج در جدول ذیل نشان داده شده است.

جدول ۷- بررسی اثر عدم قطعیت بر اهداف تحقیق.

Table 7- Examining the effect of uncertainty on research objectives.

آلفا	زمان ساخت	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل و نقل	میزان تغییر در زمان ساخت	میزان تغییر در هزینه تعمیر و نگهداری	میزان تغییر در هزینه حمل و نقل
0	448	208532	40936			
0.25	450	210404	41135	0.004464	0.008977	0.004861
0.5	454	214258	41498	0.008889	0.018317	0.008825
0.75	461	219966	41981	0.015419	0.026641	0.011639
1	472	227666	42652	0.023861	0.035005	0.015983



شکل ۲۰- بررسی اثر عدم قطعیت بر اهداف تحقیق.

Figure 20- Examining the effect of uncertainty on research objectives.

همان گونه که دیده می شود عدم قطعیت منجر به بدتر شدن جواب در خصوص هدف دوم یعنی تغییر در هزینه تعمیر و نگهداری می شود پس از آن بیشترین اثر بر پارامتر زمان ساخت و پس از آن بر هزینه حمل و نقل مشاهده می شود. در واقع با آلفای ۱ ما شاهد هستیم که $3/5\%$ بر هزینه تعمیر و نگهداری اضافه می شود که این نشانگر بدتر شدن جواب می شود اما در خصوص زمان ساخت این مقدار نزدیک به $2/5\%$ و در خصوص هزینه حمل و نقل $1/5\%$ می باشد بنابراین بیشترین اثرگذاری عدم قطعیت بر هزینه تعمیر و نگهداری می باشد.

۹- پاسخ به سوالات تحقیق

چگونه می توان عملیات از یک قطعه در هر کارخانه را با فرض اینکه برخی پارامترها به صورت فازی است تخصیص داد به طوری که حداقل زمان تکمیل به دست آید؟

اثرگذارترین پارامتر بر زمان تکمیل، هزینه عملیات می باشد که بیش از $3/5\%$ منجر به افزایش زمان ساخت می شود کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات است که اندکی بیش از 2% اثرگذار است.

زمان بندی تخصیص این قطعات وقتی برخی پارامترها فازی می باشد و نگهداری تعمیرات در نظر گرفته شده است چگونه می باشد؟

بر اساس نتایج زمان تعمیر و نگهداری ابزار دارای بیشترین اثر بر هزینه تعمیر و نگهداری می باشند و همچنین اثر زمان تعمیر و نگهداری ابزار بیش از زمان تعمیر و نگهداری ماشین می باشد. اثرگذاری این دو پارامتر به میزان $3/7\%$ می باشد. کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات و هزینه عملیات به میزان 2% می باشد. در صورت $NP-hard$ بودن مدل، کدینگ آن به صورت یک روش فرا ابتکاری چگونه است؟

در این حالت برای حل مساله از یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم های جانسون استفاده خواهد شد. در این روش سیستم تولید به دو مرحله کلی پردازش و تکمیل تفکیک خواهد شد و با در نظر گرفتن زمان پردازش مجموعه قطعات هر محصول و زمان تکمیل آن قاعده جانسون برای تعیین توالی محصولات توسعه داده می شود سپس روش های ابتکاری برای زمان بندی پردازش قطعات در جریان تولید انبوه بررسی می شود. از آنجاکه در این پژوهش زمان های آماده سازی و انتقال قطعه اهمیت بالایی دارد برای این شرایط نیز روشی مبتنی بر الگوریتم های فرا ابتکاری و الگوریتم های شاخه و کران برای مسایل توسعه داده می شود.

۱۰- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق توسعه مدل ریاضی برای مساله سیستم های تولید انعطاف پذیر بود. با توجه به افزایش فشارهای رقابتی موجود در صنایع مختلف تولیدکنندگان انعطاف پذیر ضمن جلب رضایت مشتریان سعی می کنند که محصولات را طبق خواست مشتری و مناسب با بازار تولید کنند. براین

اساس آن‌ها می‌توانند محصولات خود را با قیمت بهتر و بالاتر بفروشند تا بدین ترتیب مرزهای سود بالاتر را حفظ کنند؛ اما رقبایی که به شیوه انبوه تولید می‌کنند بیشتر تحت تاثیر بازار هستند و این بازار و مشتری است که قیمت را بر آن‌ها تحمیل می‌کند. اغلب دیده شده است که تولید کالاهای مشتری‌پسند در محیطی که از تکنولوژی بالایی برخوردار است مشکل و حتی ممکن است فروش نرود. در این شرایط تولیدکنندگانی که استراتژی انعطاف‌پذیر را اتخاذ کرده‌اند، می‌توانند با اتخاذ استراتژی‌های منعطف و به‌موقع از این شرایط جان سالم بدر ببرند.

مساله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر یکی از موضوعات بارز در برنامه‌ریزی تولید می‌باشد. اهداف مساله کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل آخرین سفارش (max) حداکثر بار کاری ماشین‌ها ($Wmax$) و بارکاری کل (W) یعنی مجموع بار کاری تمام ماشین‌ها است. مساله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر جز مسایل $NP-hard$ محسوب می‌شود؛ بنابراین به دست آوردن جواب بهینه برای مسایل با سائز متوسط و بزرگ در زمان معقول امکان‌پذیر نیست و باید از روش‌های ابتکاری با فرا ابتکاری برای حل مساله استفاده نمود. به همین منظور دو الگوریتم $MOGWO$ و $NSGAI$ برای حل این مساله استفاده شده به طوری که در ابتدا اعتبار سنجی مدل صورت گرفته و برای این منظور مدل در ابعاد کوچک حل شده و نتایج حاصل از سه هدف یعنی زمان ساخت، هزینه تعمیر و نگهداری و ساخت و هزینه حمل‌ونقل با افزایش ابعاد در نظر گرفته شد. پس از حل مدل در ابعاد کوچک نتایج حاصل از متغیرهای تصمیم برای مشخص شدن این‌که جایگشت‌های مساله زمان‌بندی به تفکیک قطعه، ماشین، کارخانه و ابزار به چه صورت است و نتایج در قالب یک الگو ارائه گردید. در الگوی ساخته‌شده ترتیب و توالی جایگشت‌های مساله تعیین شده و مشخص شد که کدام ماشین به کدام قطعه در کدام کارخانه و کدام ابزار تخصیص یافته است و بهترین توالی فعالیت‌ها ایجاد شد. از معیارهایی که بر دقت عملکرد تاثیر دارد شال، تولید بیشترین نقاط پارتو، کمترین فاصله تا نقطه ایده آل، کمترین زمان است. نتایج نشان می‌دهد در مسایل متوسط عملکرد $MOGWO$ بهتر از $NSGAI$ می‌باشد؛ اما در مسایل بزرگ تفاوت چندانی بین دو الگوریتم دیده نشده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از داوران محترم به‌دلیل ارائه دیدگاه‌ها و پیشنهادهای علمی سازنده که نقش مؤثری در ارتقای کیفیت این پژوهش داشته‌اند، ابراز می‌دارند.

منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از سوی نهادها، سازمان‌ها یا مراکز تحقیقاتی انجام شده است.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در انجام این پژوهش وجود ندارد.

منابع

- [1] Abou Gamila, M., & Motavalli, S. (2003). A modeling technique for loading and scheduling problems in FMS. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 19(1-2), 45-54. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(02\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(02)00061-3)
- [2] Jahromi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A., & Saghaei, A. (2017). A new mathematical model for a scheduling problem of dynamic machine-tool selection and operation allocation in a flexible manufacturing system: A modified evolutionary algorithm. *Scientia iranica*, 24(2), 765-777. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4060>
- [3] Low, C., Yip, Y., & Wu, T. H. (2006). Modelling and heuristics of FMS scheduling with multiple objectives. *Computers & operations research*, 33(3), 674-694. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.013>
- [4] Celen, M., & Djurdjanovic, D. (2012). Operation-dependent maintenance scheduling in flexible manufacturing systems. *CIRP journal of manufacturing science and technology*, 5(4), 296-308. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.09.005>

- [5] Jahromi, M. H. M. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). A novel 0-1 linear integer programming model for dynamic machine-tool selection and operation allocation in a flexible manufacturing system. *Journal of manufacturing systems*, 31(2), 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.07.008>
- [6] Chan, F. T. S., & Swarnkar, R. (2006). Ant colony optimization approach to a fuzzy goal programming model for a machine tool selection and operation allocation problem in an FMS. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 22(4), 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.08.001>
- [7] Buyurgan, N., Saygin, C., & Kilic, S. E. (2004). Tool allocation in flexible manufacturing systems with tool alternatives. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 20(4), 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.01.001>
- [8] Chen, J. H., & Ho, S.Y. (2005). A novel approach to production planning of flexible manufacturing systems using an efficient multi-objective genetic algorithm. *International journal of machine tools and manufacture*, 45(7–8), 949–957. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.10.010>
- [9] Nagarjuna, N., Mahesh, O., & Rajagopal, K. (2006). A heuristic based on multi-stage programming approach for machine-loading problem in a flexible manufacturing system. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 22(4), 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.07.006>
- [10] Mahdavi, I., Jazayeri, A., Jahromi, M., Jafari, R., & Iranmanesh, H. (2008). P-ACO approach to assignment problem in FMSs. *Proceedings of world academy of science, engineering and technology*, 42(5), 196–203. <https://www.academia.edu/download/103090636/14341.pdf>
- [11] Persi, P., Ukovich, W., Pesenti, R., & Nicolich, M. (1999). A hierarchic approach to production planning and scheduling of a flexible manufacturing system. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 15(5), 373–385. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00034-4](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00034-4)
- [12] Bouazza, W., Hamdadou, D., Sallez, Y., & Trentesaux, D. (2019). *Manufacturing letters*. <https://B2n.ir/tj8213>
- [13] Lee, C. S., Kim, S. S., & Choi, J. S. (2003). Operation sequence and tool selection in flexible manufacturing systems under dynamic tool allocation. *Computers & industrial engineering*, 45(1), 61–73. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(03\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(03)00019-6)
- [14] Yang, Y., Huang, M., Wang, Z. Y., & Zhu, Q. B. (2020). Robust scheduling based on extreme learning machine for bi-objective flexible job-shop problems with machine breakdowns. *Expert systems with applications*, 158, 113545. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113545>