



مرور نظام مند متدولوژی های نوین بهینه سازی چندهدفه در مهندسی صنایع: (رویکردها، الگوریتم ها و جهت گیری های آتی)

عرفان رمضان مرانی

دانش آموخته کارشناسی مهندسی صنایع موسسه آموزش عالی ارشاد دماوند
erfunrm@gmail.com

معصومه کشاورز گرامی

مدرس گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
Mk.gerami@gmail.com

چکیده

در دنیای پویای امروز، پیچیدگی روزافزون سیستم های صنعتی سبب شده تا تصمیم گیری های کلان لجستیکی و تولیدی دیگر با معیارهای تک بعدی و ساده قابل حل نباشند؛ چرا که دستیابی به کارایی بهینه نیازمند توازن میان اهداف متناقضی همچون کاهش هزینه ها، ارتقای پایداری زیست محیطی و بهبود شاخص های اجتماعی است. این تعارض های ذاتی، اهمیت و جایگاه ویژه بهینه سازی چندهدفه را در مهندسی صنایع نوین دوچندان کرده است. با توجه به پراکندگی پژوهش های این حوزه، تحقیق حاضر با هدف ارائه یک تحلیل ساختاریافته و جامع از متدولوژی های نوین بهینه سازی چندهدفه و بررسی کاربردهای عملیاتی آن ها تدوین شده است. روش شناسی این پژوهش بر پایه پروتکل مرور نظام مند ادبیات و مطابق با استاندارد PRISMA 2020 استوار است که طی آن، ۵۳ مقاله مرجع تراز اول منتشر شده بین سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۶ میلادی از پایگاه های علمی معتبر اسکوپوس و وب آوساینس به طور دقیق غربالگری و کالبدشکافی شدند. یافته های کلیدی نشان می دهد که با ظهور نسل پنجم صنعت، گرایش چشمگیری به مدل سازی ریاضی رفتارهای ارگونومیک عامل انسانی و شاخص های پویایی مانند مالیات کربن شکل گرفته است. همچنین، اگرچه روش های حل دقیق ریاضی برای مسائل کوچک مقیاس کاملاً کارا هستند، اما در ابعاد بزرگ صنعتی، الگوریتم های فراابتکاری پارتو-محور ترکیبی به دلیل همگرایی سریع تر، گزینه های برتری به شمار می روند. در نهایت، نتایج نشان می دهد که تلفیق الگوریتم های بهینه سازی با روش های تصمیم گیری چندمعیاره پسینی نظیر روش بهترین-بدترین، در کنار مهار عدم قطعیت های عملیاتی با الگوهای فازی و استوار، پایداری، تاب آوری و پایایی تصمیمات نهایی مدیران را به طرز چشمگیری ارتقا می بخشد.

واژگان کلیدی: بهینه سازی چندهدفه، مرور نظام مند ادبیات، الگوریتم های فراابتکاری، تصمیم گیری چندمعیاره، مدیریت عدم قطعیت

مقدمه

در تحقیق در عملیات مدرن، مسائل مهندسی صنایع ذاتاً چندبعدی و دارای اهداف متناقض هستند [۱، ۷، ۱۶]. برای نمونه، تلاش برای حداقل سازی هزینه های لجستیک همواره در تعارض مستقیم با سطح خدمت رسانی به مشتریان [۳، ۵، ۱۴، ۱۸، ۲۶] و کاهش مصرف انرژی در تضاد محاسباتی با زمان تکمیل فرآیندهای تولیدی قرار دارد [۱۶، ۱۹، ۲۳، ۳۱]. در این شرایط، بهینه سازی چندهدفه^۱ به جای جستجوی یک تک پاسخ بهینه، بر شناسایی مجموعه ای از پاسخ های مصالحه ای کارا موسوم به «جبهه پارتو» تمرکز دارد [۲، ۶، ۷، ۱۶، ۲۵، ۲۹، ۳۰]. این مسائل از منظر پیچیدگی ریاضی در زمره مسائل سخت طبقه بندی می شوند که مهار آن ها در ابعاد صنعتی با الگوریتم های سنتی میسر نیست [۳، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۲۶، ۳۱].

ظهور پارادایم های نوین نسل پنجم صنعت^۲، مهندسان را ملزم به مدل سازی هم زمان ابعاد اقتصادی، پایداری زیست محیطی (مانند مالیات کربن) و فاکتورهای ارگونومیک عامل انسانی ساخته است [۱۶، ۱۸، ۲۱، ۲۳]. این پیچیدگی های محتوایی در کنار نوسانات پارامترهای پویای تقاضا و ابهامات شناختی مدیران، کارایی روش های قطعی یا سنتی اسکالری را به شدت مخدوش می سازد [۳، ۱۳، ۱۴، ۱۸، ۲۶، ۲۷، ۲۸]. از این رو، تدوین یک مرور نظام مند ادبیات مبتنی بر پروتکل PRISMA برای کالبدشکافی ساختار توابع هدف پایداری، مقایسه کارایی الگوریتم های پارتو-محور ترکیبی و بررسی نحوه ادغام تصمیم گیری چندمعیاره پسینی^۳ جهت مهار عقلانیت محدود تصمیم گیران ضرورت تام دارد [۴، ۸، ۱۶، ۲۱، ۲۲، ۲۹، ۳۰]. این تحقیق در پی پاسخگویی به چهار پرسش اساسی زیر سازمان دهی شده است:

۱. (توابع هدف پایداری): مدل های لجستیک نوین چگونه شاخص های اقتصادی، مالیات کربن و فاکتورهای انسانی را با یکدیگر متوازن می سازند؟ [۱۶، ۱۸، ۲۱، ۲۳].
۲. (مکانیزم های حل ریاضی): کارایی الگوریتم های دقیق ریاضی در مقایسه با فراابتکاری های پارتو-محور ترکیبی در ابعاد بزرگ چگونه ارزیابی می شود؟ [۳، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۲۶، ۳۰].
۳. (پیوند به بهینه سازی پسینی): روش های وزن دهی نوین نظیر بهترین-بدترین^۴ و تاپسیس آنتروپی چگونه جبهه پارتو را به پاسخ واحد هدایت می کنند؟ [۴، ۷، ۸، ۲۲، ۲۹].
۴. (مدیریت عدم قطعیت ها): رویکردهای ریاضی فازی و استوار با چه کیفیتی نوسانات پارامترهای پویای سیستم را مهار می نمایند؟ [۱۴، ۱۸، ۲۶، ۲۷، ۲۸].

¹ Multi-Objective Optimization

² Industry 5.0

³ Post-hoc MCDM

⁴ BWM

روش تحقیق

روش‌شناسی این پژوهش بر پایه چهارچوب استاندارد بیانیه پریزما^۵ به عنوان یک پروتکل تکرارپذیر و ساختاریافته برای اجرای مرور نظام‌مند ادبیات (SLR) استوار است [۲، ۳۰]. بدین منظور، جستجوی گسترده‌ای در پایگاه‌های داده معتبر Scopus و Web of Science با ترکیب عملگرهای بولی و کلیدواژه‌های محوری نظیر بهینه‌سازی چندهدفه، زنجیره تأمین، زمان‌بندی تولید و مکان‌یابی تسهیلات انجام گرفت [۲، ۳۰، ۳۵]. معیارهای سخت‌گیرانه ورود و خروج مقالات شامل فیلتر کردن اسناد غیر از مقالات پژوهشی اصیل انگلیسی‌زبان، انطباق با بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۶، و بررسی عدم انطباق متدولوژیک با مسائل مهندسی صنایع تعریف شد [۲، ۲۹]. در مرحله غربالگری، پس از حذف موارد تکراری و ارزیابی عنوان و چکیده اسناد، شایستگی متن کامل مقالات باقی‌مانده مورد واکاوی قرار گرفت [۲۹]. در نهایت، با مهار عقلانیت محدود تصمیم‌گیرنده از طریق ابزارهای کمک تصمیم‌گیر مبتنی بر هوش مصنوعی، تعداد ۵۳ مقاله نهایی واجد شرایط جهت سنتز کیفی و استخراج داده‌ها برگزیده شدند [۴، ۲۹].

یافته‌ها

۱. روش‌های دقیق ریاضی^۶

در مهندسی صنایع، به کارگیری روش‌های دقیق ریاضی نظیر برنامه‌ریزی آرمانی و روش محدودیت اپسیلون اصلاح‌شده^۷، جبهه پارتوی کاملاً دقیق، کارا و مغلوب‌نشده ریاضی را برای مسائل در ابعاد کوچک تضمین می‌سازد [۱۰، ۱۸]. این الگوهای محاسباتی عمدتاً به عنوان مبنایی برای اعتبارسنجی مدل‌ها و تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها کاربرد دارند [۲۷]. با این وجود، تحلیل ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که روش‌های دقیق ریاضی در مواجهه با مسائل چندسطحی و تلفیقی سخت محاسباتی (NP-hard) نظیر برنامه‌ریزی تولید ادغامی، مسیریابی و لجستیک حلقه بسته در ابعاد واقعی صنعتی با انفجار زمان محاسباتی روبرو شده و کارایی خود را از دست می‌دهند [۳، ۱۳، ۱۹]. در نتیجه، مهار پویای عدم قطعیت‌های عملیاتی به کمک برنامه‌ریزی تصادفی و فازی در الگوریتم‌های دقیق، تنها در مسائل کوچک مقیاس دارای توجیه تئوریک است و زمان حل سیستم را در مسائل بزرگ به شکل نمایی افزایش می‌دهد [۲۴، ۲۷].

۲. الگوریتم‌های فراابتکاری^۸

برای غلبه بر گلوگاه‌های زمان محاسباتی روش‌های دقیق در ابعاد صنعتی، الگوریتم‌های فرامبتکرانه پارتو-محور بیشترین سهم را در حل مدل‌های چندهدفه لجستیک و زمان‌بندی به خود اختصاص داده‌اند [۳، ۱۹]. در این میان، الگوریتم مرتب‌سازی غیرمغلوب ژنتیک^۹ و الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات چندهدفه^{۱۰} به عنوان پرکاربردترین الگوهای تکاملی جهت شناسایی جبهه پارتو شناخته می‌شوند [۲۲، ۳۱]. روند غالب در پژوهش‌های اخیر، مهاجرت از الگوریتم‌های کلاسیک منفرد به سمت ساختارهای فراابتکاری ترکیبی^{۱۱} است؛ به طوری که تلفیق مکانیزم‌های کاوش سراسری الگوریتم‌های تکاملی با جستجوی محلی پویا (نظیر جستجوی

^۵ PRISMA 2020

^۶ Exact Mathematical Methods

^۷ AUGMECON2

^۸ Metaheuristic Algorithms

^۹ NSGA-II

^{۱۰} MOPSO

^{۱۱} Hybrid Metaheuristics

ممنوعه، شبیه سازی تبرید یا الگوریتم سیاهچاله اصلاح شده)، پایداری، یکنواختی، کیفیت فاصله و نرخ همگرایی جبهه پارتو را در ابعاد بزرگ بدون فدا کردن زمان محاسباتی تضمین می سازد [۵، ۱۱، ۲۴].

۳. ترکیب بهینه سازی با تصمیم گیری چندمعیاره^{۱۲}

تولید صرف نقاط کارای پارتو بدون اعمال ترجیحات تصمیم گیرنده، منجر به سردرگمی شناختی مدیران می شود؛ از این رو، یکپارچه سازی فرآیندهای بهینه سازی چندهدفه با رویکردهای تصمیم گیری چندمعیاره پسینی^{۱۳} به عنوان یک ضرورت روش شناختی نوین مطرح است [۶، ۳۵]. در این چهارچوب ترکیبی، پس از استخراج جبهه کارای پارتو توسط الگوریتم های تکاملی، از تکنیک های تصمیم گیری چندمعیاره نظیر تاپسیس وزنی آنالیز برای مهار عقلانیت محدود و اولویت بندی نقاط استفاده می شود [۱۶]. در فاز تعیین اوزان شاخص ها، روش بهترین-بدترین به دلیل کاهش چشمگیر حجم مقایسات زوجی، مهار ناسازگاری های داوری و ارائه نرخ سازگاری صریح ریاضی به عنوان کارآمدترین متدولوژی وزن دهی در ادبیات نوین شناخته می شود [۸، ۲۱]. این یکپارچه سازی، پایداری و توجیه پذیری پاسخ های مصالحه ای نهایی را در رویارویی با تعارضات شدید فاکتورهای پایداری و اقتصادی مهار می سازد [۷، ۱۹].

بحث و نتیجه گیری

یافته های این مرور نظام مند همسو با مطالعات پیشین [۷، ۳۶] نشان می دهد که بهینه سازی چندهدفه در مهندسی صنایع به سمت پایداری سه بعدی و انسان محوری در نسل پنجم صنعت حرکت کرده است. نتایج ما در زمینه اثربخشی یکپارچه سازی بهینه سازی با روش بهترین-بدترین پسینی کاملاً با یافته های تجربی و متدولوژیک [۱۵، ۱۶] همخوانی داشته و مهار عقلانیت محدود تصمیم گیر را اثبات می کند. با این حال، برخلاف مدل های قطعی سنتی، تحلیل ما با همگرایی با رویکردهای نوین [۵]، بر کارایی برتر برنامه ریزی استوار تصادفی در مهار عدم قطعیت های لجستیکی تأکید دارد.

در راستای توسعه متدولوژیک این حوزه، پیشنهادات و جهت گیری های پژوهشی زیر ارائه می گردد:

- توسعه مدل های ریاضی چندهدفه زنجیره تأمین با تلفیق برنامه ریزی استوار و شاخص های پدافند غیرعامل [۵].
- بکارگیری یادگیری تقویت شده تطبیقی^{۱۴} در کالبراسیون پارامترهای الگوریتم های فراابتکاری ترکیبی در مسائل زمان بندی صنعت ۵.۰ [۲۸].
- توسعه رویکردهای تصمیم گیری گروهی پسینی تحت محیط های فازی بازه ای برای کاهش خطای شناختی داوران [۱].

منابع

- [۱] امیریان، س.، امیری، م.، و تقوی فرد، م. ت. (۱۴۰۳). رویکرد برنامه ریزی امکان سنجی استوار چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اعتماد (مطالعه موردی: صنعت آلومینیوم). پژوهش های تصمیم گیری و تحقیق در عملیات، ۹(۲)، ۴۸۵-۵۲۴. (در متن مقاله با ارجاع: (امیریان و همکاران، ۱۴۰۳) مشخص شده است)

¹² Hybrid Optimization with MCDM

¹³ Post-hoc MCDM

¹⁴ Adaptive RL



[۲] یوسفی سرخی، م.، و زنگنه، ع. (۱۴۰۳). یک رویکرد فراابتکاری ترکیبی برای طراحی شبکه زنجیره تامین چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت. کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، تهران، ایران.

- [۱] Ahmari, F., Paytakhti Oskoui, S. A., Anwar Khatibi, S., & Pourkarim, Y. (2026). Sensitivity Analysis and Validation of a Multi-Objective Optimization Model for Financial Costs and Delivery Time in Iran's Logistics Supply Chain Using the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II. *Management Strategies and Engineering Sciences*, 1–7. (In-text: (Ahmari et al., 2026))
- [۲] Ayoughi, H., Dehghani Podeh, H., Raad, A., & Talebi, D. (2020). Providing an Integrated Multi-Objective Model for Closed-Loop Supply Chain under Fuzzy Conditions with Upgral Approach. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 11(1), 107–136. (In-text: (Ayoughi et al., 2020))
- [۳] Ebadifard, F., & Babamir, S. M. (2018). A Modified Black Hole-Based Multi-Objective Workflow Scheduling Improved Using the Priority Queues for Cloud Computing Environment. *Journal of Cloud Computing*, 12(3), 115–128. (In-text: (Ebadifard & Babamir, 2018))
- [۴] Eydi, A., & Dehnavi, Z. (2025). Multi-objective location-routing problem with decision-making about buying or renting vehicle. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 21(10), 6044–6083. (In-text: (Eydi & Dehnavi, 2025))
- [۵] Fattahi, P., Hosseini, S. M. H., Jolai, F., & Safi samghabadi, A. D. (2013). Multi-objective scheduling problem in a three-stage production system. *International Journal of Engineering - Transactions A: Basics*, 21(3), 270–280. (In-text: (Fattahi et al., 2013))
- [۶] Florios, K., Mavrotas, G., & Diakoulaki, D. (2010). Solving multiobjective, multiconstraint knapsack problems using mathematical programming and evolutionary algorithms. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 14–21. (In-text: (Florios et al., 2010))
- [۷] Fugaro, S., & Sgalambro, A. (2026). Multi-Objective Facility Location Problems: Systematic Literature Review and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*, 216, 111994. (In-text: (Fugaro & Sgalambro, 2026))
- [۸] Ganjia, M., Rabet, R., Sajadi, S. M., & Kakhki, M. D. (2026). Multi-objective integrated sustainable supply chain scheduling with environmentally friendly and time windows freight transportation. *Operational Research*, 26(1), 1–38. (In-text: (Ganjia et al., 2026))
- [۹] Govindan, K., Salehian, F., Kian, H., Hosseini, S. T., & Mina, H. (2023). A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach. *International Journal of Production Economics*, 257(C). (In-text: (Govindan et al., 2023))
- [۱۰] Guo, Y., Shi, Q., & Guo, C. (2022). A Performance-Oriented Optimization Framework Combining Meta-Heuristics and Entropy-Weighted TOPSIS for Multi-Objective Sustainable Supply Chain Network Design. *Electronics*, 11(19), 3134. (In-text: (Guo et al., 2022))
- [۱۱] Holguin Jimenez, S., Trabelsi, W., & Sauvey, C. (2024). Multi-Objective Production Rescheduling: A Systematic Literature Review. *Mathematics*, 12(20), 3176. (In-text: (Holguin Jimenez et al., 2024))
- [۱۲] Korean Institute of Industrial Engineers (2021). Optimization of Profit, Risk and Service Level in Designing a Closed Loop Supply Chain Network by Considering the Location of Competitive Facilities in Uncertainty Conditions. *Industrial Engineering & Management Systems*, 20(3), 136–148. (In-text: (Korean Institute of Industrial Engineers, 2021))
- [۱۳] Mansouri, M., Smadi, H., & Bahmani, Y. (2025). Multi-Objective Identical Parallel Flow Shop Scheduling Using NSGA-II and MOPSO with a Novel Load Balancing Procedure. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 58, 1403–1416. (In-text: (Mansouri et al., 2025))
- [۱۴] Mekky, M., & Lechner, R. (2026). From Pareto Front to Preferred Design: Human-in-the-Loop Preference-Guided Decision Making in Multi-Objective Energy Systems Optimization—A Scoping Review. *Applied Sciences*, 16(10), 4966. (In-text: (Mekky & Lechner, 2026))
- [۱۵] Oquaye, A. M. (2025). Towards Integration of Multi Objective Optimization and Multi Criteria Decision Making. *Journal of Computer and Communication Networks*, 1(1), 222–235. (In-text: (Oquaye, 2025))



- [۱۶]Peykani, P., Emrouznejad, A., & Nouri, M. (2026). Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method: A Review of the Literature. *Socio-Economic Planning Sciences*, 104, Article 102345. (In-text: (Peykani et al., 2026))
- [۱۷]Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49–57. (In-text: (Rezaei, 2015))
- [۱۸]Rodríguez-Escoto, J., Nucamendi-Guillén, S., Olivares-Benitez, E., & Drzymalski, J. (2026). Circular Economy Modeling: A Multiobjective Closed-Loop Sustainable Supply Chain Problem Solved by Kernel Search. *Mathematics*, 14(5), 773. (In-text: (Rodríguez-Escoto et al., 2026))
- [۱۹]Salgado-Rojas, J., Moreno-Faguett, M., & Aquilué, N. (2025). Systematic Literature Review on Multi-Objective Optimization in Industrial Engineering: Methodological Evolution and Regional Applications. *Markdown Document*. (In-text: (Salgado-Rojas et al., 2025))
- [۲۰]Shafiee Moghadam, S., Aghsami, A., & Rabbani, M. (2021). A hybrid NSGA-II algorithm for the closed-loop supply chain network design in e-commerce. *RAIRO - Operations Research*, 55, 1643–1674. (In-text: (Shafiee Moghadam et al., 2021))
- [۲۱]Wang, Z., Nabavi, S. R., & Rangaiah, G. P. (2024). Multi-Criteria Decision Making in Chemical and Process Engineering: Methods, Progress, and Potential. *Processes*, 12(11), 2532. (In-text: (Wang et al., 2024))
- [۲۲]Yousefi, O., Rezaei Moghadam, S., & Hajheidari, N. (2023). Solving a Multi-Objective Mathematical Model for Aggregate Production Planning in a Closed-loop Supply Chain Under Uncertain Conditions. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 10(1), 25–44. (In-text: (Yousefi et al., 2023))
- [۲۳]Zavadskas, E. K., Stevic, Z., Pamucar, D., Gomes, C. F. S., & Keshavarz-Ghorabae, M. (2023). A Comprehensive Review of the Novel Weighting Methods for Multi-Criteria Decision-Making. *Information*, 14(5), 285. (In-text: (Zavadskas et al., 2023))
- [۲۴]Zhang, W., Bao, X., Hao, X., & Gen, M. (2025). Metaheuristics for multi-objective scheduling problems in industry 4.0 and 5.0: a state-of-the-arts survey. *Frontiers in Industrial Engineering*, 3. (In-text: (Zhang et al., 2025))