



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950

Vol. 14, Issue 3, No. 34, Autumn 2023



<https://doi.org/10.22108/POM.2023.137185.1506>

(Research paper)

## Optimizing the layout of facilities in a dynamic cellular manufacturing system based on the amount of energy consumption and the work environment safety considering operator allocation

**Gholam Reza Esmailian**

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran,  
gre@pnu.ac.ir

**Nader Ghanei \***

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran,  
n.ghanei@student.pnu.ac.ir

**Amirsaman Kheirkhah**

Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Bu-Ali Sina University,  
Hamedan, Iran, kheirkhah@basu.ac.ir

**Purpose:** The design of facility layout and production planning accordingly is significantly important in the manufacturing industries. This type of design in traditional units is mainly based on the lowest cost of moving materials and effective environmental indicators, and social factors are ignored in the planning and design of facility layout; Therefore, usually, the arrangement does not match the human capacity, the intensity of the employees' work is not scientific and it causes a lot of damage to the physical and mental health of the employees for a long time. Considering the importance of the mentioned items, paying attention to biological issues such as energy, which is one of the main concerns of the country, and social issues, such as the safety of the operator's work environment, which is followed by governmental and non-governmental associations, can be considered a positive and new step in the layout design.

**Design/methodology/approach:** In this paper, a multi-objective mathematical programming model has been developed in a dynamic cellular manufacturing system, taking into account the minimization of the costs of moving and rearranging the facilities, the minimization of the risks of the work environment (the potential risk of placing machinery in a certain place), and the consumption of electrical energy in product production operations. To make the model closer to reality, other issues

\* Corresponding author, Orcid: 0000-0002-2820-2531



related to the production environment such as hiring and firing operators in each period, training, wages and their allocation are also included in the model. The proposed model is solved by designing samples in different dimensions, applying the epsilon constraint method and meta-heuristic algorithm NSGA-II and MOPSO, using performance indicators, and associated comparison and analysis by T-test.

**Findings:** Performance indices (spacing metric, diversification metric, mean ideal distance, CPU time) in solution methods were calculated and compared based on information inspired by the subject literature and the design of 15 problems with different dimensions. The results indicated that the quality of the solutions obtained from the NSGA-II algorithm was better than other methods and in terms of the solution time, the solution was reached at least two times earlier than the epsilon constraint method.

**Research limitations/implications:** For future studies, it is suggested to investigate the performance of other meta-heuristic algorithms to solve the proposed model; Also, the combination of other real-world industrial factors such as financial and energy resource limitations, facility idle time, and unequal facility dimensions can be considerably valuable for future research. In addition, the uncertainty of the parameters, which is one of the main and practical issues in the real world, can be added to the model in terms of demand or processing time.

**Practical implications:** The dynamic cellular manufacturing system is one of the well-known manufacturing systems that provides the possibility of increasing the level of reactivity, flexibility and agility in production to compete in the market, but with the growth of industrial development and the increasing attention of societies to the amount of energy consumption and the conditions of employees in production with a new challenge. It has been faced in such a way that it should include sustainability issues from the very beginning and in the design of the facility layout. The proposed model has provided a stable, dynamic and optimal layout by creating a balance between the dimensions of sustainability (cost, energy and layout safety) in manufacturing industries.

**Social implications:** Ignoring social issues and mismanagement of human resources has resulted in unforeseen costs for manufacturing companies. This study attempts to propose a model that is closer to reality and provides a more accurate and safe arrangement by considering various dimensions of human resource management in production, such as hiring, firing, training, wages, and allocation, which are effective tools for decision-making in organizations, alongside workplace safety.

**Originality/value:** In this paper, a nonlinear mixed integer programming model is proposed for the facility layout problem in a dynamic and sustainable cellular space. In this model, the amount of energy consumption, which is one of the main issues that manufacturing industries deal with, has been addressed and has helped industries in improving their performance. Two approaches have been proposed for this issue. The amount of energy used to move the machines and the amount of energy used in processing each part/product based on the selection of the best route. In this model, the best production route is selected in such a way that, in addition to reducing production costs, energy consumption in moving parts and processing each operation should be reduced.

**Keywords:** Facility layout, Dynamic cellular manufacturing system, Sustainable manufacturing, Operator assignment, Epsilon constraint method, NSGA-II algorithm.



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۴، شماره ۳، پیاپی ۳۴، پاییز ۱۴۰۲

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶ ص ۱۱۷-۱۵۶



<https://doi.org/10.22108/POM.2023.137185.1506>

(مقاله پژوهشی)

## بهینه‌سازی چیدمان تسهیلات در یک سیستم تولید سلولی پویا، براساس میزان مصرف انرژی و ایمنی محیط کار و با در نظر گرفتن تخصیص اپراتور

غلامرضا اسماعیلیان<sup>\*</sup>، نادر قانعی<sup>۲</sup>، امیرسامان خیرخواه<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، gre@pnu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، n.ghanei@student.pnu.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، kheirkhah@basu.ac.ir

**چکیده:** سیستم تولید سلولی پویا، یکی از سیستم‌های تولیدی شناخته شده است که امکان افزایش میزان واکنش پذیری، انعطاف پذیری و چابکی را در تولید، به منظور رقابت در بازار فراهم می‌کند؛ ولی با رشد توسعه صنعتی و توجه روزافزون جوامع به میزان مصرف انرژی و شرایط کارکنان در تولید، با چالش جدیدی مواجه شده است؛ به نحوی که باید مباحث پایداری را از همان ابتدا و در طراحی چیدمان تسهیلات بگنجانند. این مقاله یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را در یک سیستم تولید سلولی پویا، با در نظر گرفتن میزان مصرف انرژی (الکتریکی) و توجه به ایمنی محیط کار کارکنان بررسی می‌کند. برای این امر یک مدل جدید، توسعه یافته است که حداقل سازی هزینه‌های جابه‌جایی و بازآرایی تسهیلات، حداقل سازی خطرات محیط کار (خطر بالقوه قرارگیری ماشین‌آلات در مکان خاص) و مصرف انرژی الکتریکی در عملیات تولید محصول را دنبال می‌کند. به منظور نزدیک شدن مدل به شرایط واقعی، دیگر موضوعات مربوط به محیط واقعی تولید، مانند استخدام و اخراج اپراتورها در هر دوره، آموزش، دستمزد و تخصیص نیز در مدل گنجانده شده است. مدل پیشنهادی با طراحی نمونه‌هایی در ابعاد مختلف و با استفاده از روش اپسیلون، محدودیت و الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و MOPSO حل و با استفاده از شاخص‌های عملکردی (میانگین فاصله از ایده‌آل، پراکندگی، یکنواختی و زمان پردازش) مقایسه و با استفاده از آزمون  $T$  تحلیل شده است. نتایج نشان داد کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم NSGA-II نسبت به دیگر روش‌ها بهتر بوده و از نظر زمان حل، حداقل ۲ برابر زودتر از روش اپسیلون محدودیت به جواب رسیده است.

**واژه‌های کلیدی:** چیدمان تسهیلات، سیستم تولید سلولی پویا، تولید پایدار، تخصیص اپراتور، روش اپسیلون

محدودیت، الگوریتم NSGA-II



## ۱- مقدمه

بیشتر محصولات و خدمات مورد نیاز برای رفاه مردم را فعالیت‌های صنعتی فراهم می‌کنند؛ برای مثال، غذا، پوشاک، انرژی، دارو، وسایل نقلیه و رایانه طی فرایندی خاص در تولید، حاصل می‌شوند. با توجه به اینکه محصولات و خدمات تولیدشدنی در صنایع بسیار متنوع‌اند، چالش‌هایی که صنایع با آن مواجه‌اند نیز، بسیار زیاد و خاص است. همیشه این نگرانی وجود دارد که مراحل ساخت، بهره‌برداری، کنترل فرآیند و به‌خصوص طراحی چیدمان در تولید، چگونه بهینه خواهد شد و این بهینگی از چه منظری است. معمولاً سرمایه‌گذاران به دنبال بهینه‌سازی سود فرآیندند و مهندس فرآیند ممکن است به افزایش بازده و قابلیت کنترل علاقه‌مند باشد. برای کارگران، افزایش ایمنی (کاهش ریسک) از اهمیت بالایی برخوردار است؛ در حالی که برای دولت‌ها، افزایش تعداد مشاغل یا کاهش آثار زیست‌محیطی و توجه به مصرف انرژی از اهداف اولیه است. طبق گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده<sup>۱</sup> (۲۰۱۳)، حدود ۵۴ درصد از کل انرژی تحویل‌شده در سراسر جهان را بخش صنعت مصرف می‌کند. طراحی چیدمان و برنامه‌ریزی در صنایع تولیدی (مانند صنعت آهن و فولاد، کاغذ یا مواد شیمیایی) اهمیت زیادی دارد. برای تولید محصولات، مقدار درخور توجهی انرژی در ماشین‌آلات مصرف می‌شود که هدف آن تبدیل ورودی (یعنی مواد خام) به خروجی مدنظر (یعنی محصولات نهایی) است. طبق پیش‌بینی انجام‌شده و با میانگین نرخ رشد مورد انتظار، ۱٫۳ درصد در سال در دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۴۰، انرژی الکتریسیته با رشدی سریع، به دومین منبع انرژی پس از گاز طبیعی تبدیل خواهد شد (اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، ۲۰۱۳). این موضوع نشان‌دهنده افزایش مداوم تقاضا برای به‌کارگیری این انرژی در مصارف صنعتی است؛ برای مثال در چین، حدود ۵۰ درصد از کل برق تولیدشده را صنایع تولیدی مصرف می‌کند (لیو و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴). مسئله چیدمان تسهیلات با عنوان جست‌وجو برای یافتن کارآمدترین چیدمان بخش‌ها و تسهیلات در یک کارخانه، در محدودیت‌های مختلف و در حالی تعریف می‌شود که تلاش می‌کند یک یا چند هدف را برآورده کند. بورگراف و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۱) معتقدند، مسئله چیدمان تسهیلات در لایه سلسله‌مراتب تاکتیکی سازمان‌ها قرار دارد و این فرض را برمی‌انگیزد که تصمیمات درست درباره چیدمان تسهیلات، سهم چشمگیری در موفقیت اقتصادی شرکت‌های تولیدی دارد. این امر به این دلیل است که ۲۰ تا ۵۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی و ۱۵ تا ۷۰ درصد از کل هزینه‌های تولید، به هزینه‌های جابه‌جایی مواد (نحوه چیدمان تسهیلات) نسبت داده می‌شود (گل‌محمدی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰). تامپکینز و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۰) نیز معتقدند که طراحی چیدمان مناسب کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی را در هزینه‌های خالص تولید در سال ایجاد می‌کند. طراحی بهینه چیدمان تسهیلات در واحدهای سنتی، عمدتاً این موضوع را در نظر می‌گیرد که آیا هزینه جابه‌جایی مواد کمترین است یا خیر و عمدتاً میزان مصرف انرژی یا دیگر شاخص‌های مؤثر زیست‌محیطی مرتبط با مصرف انرژی و عوامل انسانی در برنامه‌ریزی چیدمان و طراحی تسهیلات نادیده گرفته می‌شود، چیدمان با ظرفیت انسانی مطابقت ندارد و شدت کار کارکنان علمی نیست و برای مدت طولانی، آسیب زیادی به سلامت جسم و روح کارکنان وارد می‌کند. این موضوعات باعث شده است تا محققان میزان مصرف انرژی، هزینه مصرف انرژی، زمان‌بندی مصرف انرژی، شناسایی مسیر کارآمد در کاهش میزان مصرف انرژی (قانونی و الجداوی<sup>۶</sup>، ۲۰۲۰؛ ژانگ و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۲۱؛ کین و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۲۲؛ یانگ و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۳) و همچنین

عوامل اجتماعی و رفاهی کارکنان را در چیدمان تسهیلات، به صورت جداگانه بررسی کنند، به آنها اهمیت دهند و این عوامل را تضمین کننده کیفیت محصول، بهبود کارایی تولید، کاهش هزینه تولید و سلامت جسمی و روانی کارکنان معرفی کنند (لی و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۸؛ نیاکان و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۴). طی بررسی انجام شده، هیچ پژوهشی در متون طراحی چیدمان تسهیلات برای مواجهه با شرایط مشابه، مانند این مقاله ارائه نشده است. در این مقاله، ما یک مدل جدید از چیدمان تسهیلات مقرون به صرفه را با انرژی کارآمد و ایمن با تخصیص اپراتور پیشنهاد می کنیم، این مدل به سیاست هایی عکس العمل مناسب نشان می دهد که دولت ها و اتحادیه های دولتی و خصوصی درباره محیط زیست و سلامت کارکنان اعمال می کند. مدل پیشنهادی به طور هم زمان مصرف انرژی، ایمنی محیط کار، تخصیص و عوامل هزینه عملیات تولید و کارگر را در طراحی چیدمان در نظر می گیرد. با در نظر گرفتن کامل ویژگی های بیان شده، مدل پیشنهادی نه تنها هزینه های تولید را کاهش می دهد و از کارگران به بهترین شکل استفاده می کند، از محیط زیست نیز محافظت می کند.

ادامه ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه پژوهش ارائه شده است. بخش سوم شامل روش تحقیق، مدل پیشنهادی و روش حل مسئله است. تحلیل داده ها و یافته های حاصل از پژوهش، در بخش ۴ گزارش و در نهایت، نتیجه گیری و پیشنهادها در بخش ۵ آورده شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

در میان بسیاری از مؤلفه های مهم راه اندازی یک سیستم تولید مقرون به صرفه و مولد، مسئله چیدمان تسهیلات یک مسئله ضروری است که از دهه ۱۹۶۰، تلاش های زیادی از دیدگاه های مختلف به آن اختصاص یافته است و عمدتاً بر حداقل کردن هزینه جابه جایی مواد تمرکز دارد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). مسئله چیدمان تسهیلات به طور گسترده در پژوهش های مربوطه مطالعه شده است؛ برای مثال به پژوهش های ذیل اشاره می شود. مطهری و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۲۳) یک مدل خطی و چندهدفه یکپارچه را برای چیدمان گروهی در کنار تشکیل سلول و زمان بندی گروهی ارائه کرده اند. بهینه سازی زمان تکمیل، هزینه جابه جایی (حمل و نقل) و زمان بیکاری ماشین، اهدافی برای مدل پیشنهادی در نظر گرفته و در نهایت با روش های اپسیلون محدودیت و الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر مسلط (NSGA-II)، حل شده است. بخشی -خانیک و فاطمی قمی<sup>۱۳</sup> (۲۰۲۳) یک مدل یکپارچه را برای تولید سلولی پویا و برنامه ریزی تولید سلسله مراتبی، با تقاضاهای تصادفی ارائه کرده اند. آنها یک مطالعه موردی را در یک شرکت توسعه صنعتی و مکانیزاسیون کشاورزی انجام داده و مسائلی مانند طراحی چیدمان تسهیلات در هر دوره، ارائه ماشین آلات جدید برای افزایش ظرفیت تولید مورد نیاز و تنظیم ظرفیت تولید برای کمک به مدیران را در مدل خود بررسی کرده اند. فخرزاد و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۲۲)، مسئله چیدمان پویای سلولی را براساس زمان بندی، تخصیص اپراتور و محدودیت های منابع مالی بر ماشین ها و کارگران به طور هم زمان بررسی کرده اند، به گونه ای که هدف حداقل کردن هزینه کل، شامل هزینه ماشین ها، کارگران و حمل و نقل قطعات به همراه طراحی چیدمان در نظر گرفته شده است. سونشارونا و همکاران<sup>۱۵</sup> (۲۰۲۲) یک ابزار بهینه سازی فراابتکاری جدید را برای حل مسئله چیدمان تسهیلات، با ابعاد نابرابر برای پیکربندی چند ردیفی توسعه داده اند که فاصله جریان کل مواد را به حداقل می رساند. سلیم پور و همکاران<sup>۱۶</sup> (۲۰۲۱)، مسئله تشکیل سلول و چیدمان سلولی را در طراحی یک سیستم تولید سلولی، بررسی کرده اند.

آنها یک رویکرد سلولی استوار را پیشنهاد کرده‌اند که قادر به مقابله با تغییر مداوم ترکیب محصول و تقاضاست. در رویکرد پیشنهادی، چیدمان تسهیلات از یک دوره به دوره دیگر ثابت بوده و فقط موقعیت نقاط دریافت/ارسال سلول‌ها تغییر کرده است. درودیان و خوش‌قلب<sup>۱۷</sup> (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی جدید را برای طراحی چیدمان تسهیلات استوار در سیستم تولید سلولی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت پیشنهاد کرده‌اند. مدل ارائه شده به‌طور هم‌زمان، هزینه جابه‌جایی‌های درون‌سلولی و بین سلولی را به حداقل رسانده است. مدل غیرخطی عدد صحیح، ابتدا خطی و سپس با حل‌کننده شاخه و کران در حالت بهینه حل شده است. رحیمی و همکاران<sup>۱۸</sup> (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط را برای بررسی طراحی چیدمان سلولی به‌صورت هم‌زمان، با در نظر گرفتن بسیاری از ویژگی‌های طراحی، مانند ماشین‌های یکسان، مسیرهای پردازش جایگزین، محصولات متنوع و اندازه سلول متغیر ارائه کرده‌اند. در مدل ارائه شده، با هدف به حداقل رساندن زمان کل تولید، تصمیماتی از جمله توالی عملیات و تخصیص سلول به مکان‌های کاندید، در نظر گرفته شده است. مرادی‌گوهره و منصور<sup>۱۹</sup> (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چندهدفه (MINLP) را برای مسئله چیدمان تسهیلات تک‌طبقه ارائه کرده‌اند. فضای نگهداری در اطراف هر تسهیل و تعمیر و نگهداری اضطراری تسهیلات، از جمله مواردی است که در مدل لحاظ شده است. در پژوهش گل محمدی و همکاران<sup>۲۰</sup> (۲۰۲۰)، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه برای ادغام تشکیل سلول و چیدمان بین/درون‌سلولی در فضای پیوسته، با در نظر گرفتن شرایط فازی برای به حداقل رساندن هزینه کل جابه‌جایی قطعات و همچنین پیکربندی مجدد سلول‌ها توسعه داده شده است. جابه‌جایی درون و بین سلولی هم، برای قطعات و هم برای ماشین‌ها به مسافت طی شده در یک فاصله مستقیم در یک محیط فازی در نظر گرفته شده است. غدیرپور و همکاران<sup>۲۰</sup> (۲۰۲۰) با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در مسیریابی، سه مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای مسائل چیدمان تسهیلات پویا و تصادفی با مساحت نابرابر، پیشنهاد کرده‌اند. در این پژوهش، تقاضا در سه مدل جداگانه در نظر گرفته شده است که از توزیع‌های پواسون، نمایی و نرمال تبعیت می‌کند. در پژوهش ویتایاساک و همکاران<sup>۲۱</sup> (۲۰۱۹)، مدلی به‌منظور طراحی چیدمان استوار تسهیلات در طول دوره‌های متعدد، با تقاضای پویا و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری تسهیلات به‌صورت یکپارچه، توسعه یافته است. در این مدل، فاصله جریان مواد با استفاده از الگوریتم ژنتیک، با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و تعمیر و نگهداری ماشین به حداقل رسیده است. در این مدل، سه سناریوی نگهداری پیشگیرانه، تعمیر و نگهداری اصلاحی و هر دو با هم مقایسه شده است. در پژوهش رئوف‌پناه و همکاران<sup>۲۲</sup> (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای حداقل‌سازی میزان جابه‌جایی قطعات در چیدمان و آلودگی ناشی از فعالیت‌های تولید و حمل‌ونقل در ترکیب مسائل پایداری، با سیستم تولید سلولی ارائه و برای حل آن، از الگوریتم تجزیه بندر<sup>۲۳</sup> استفاده شده است. مسلمی‌پور و همکاران<sup>۲۴</sup> (۲۰۱۸) یک الگوریتم پیشنهادی را برای حل مسئله چیدمان تسهیلات پویا (چند دوره‌ای) در هر دو حالت قطعی و تصادفی ارائه کرده‌اند. کومار و سینگ<sup>۲۵</sup> (۲۰۱۸) اعتقاد داشتند برای مقابله با شرایط در حال تغییر، یک چیدمان باید کارآمد و مؤثر باشد، به همین منظور یک مدل ریاضی چیدمان تسهیلات سلولی پایدار تصادفی دوهدفه را پیشنهاد کردند. مدل پیشنهادی، هزینه جابه‌جایی مواد را برای جابه‌جایی بین/درون‌سلولی و مصرف انرژی در سیستم‌های تولید سلولی را به‌طور هم‌زمان به حداقل رسانده است. یک مدل طراحی چیدمان پویا را خیرخواه و همکاران<sup>۲۶</sup> (۲۰۱۵)، با در نظر گرفتن همبستگی با طراحی سیستم جابه‌جایی مواد با هدف

حداقل سازی هزینه کل ارائه کرده‌اند. مدل ارائه شده به دنبال ارائه بهترین گزینه برای چیدمان تسهیلات و جابه‌جایی مواد برای هر دوره در افق برنامه‌ریزی است و شامل موضوعاتی نظیر مجموع هزینه‌های جابه‌جایی مواد برای همه دوره‌ها، مجموع هزینه‌های بازآرایی، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر وسایل جدید جابه‌جاکننده مواد و هزینه کنارگذاشتن وسایل جابه‌جاکننده مواد موجود بوده است. باقری و بشیری<sup>۲۷</sup> (۲۰۱۴)، یک مسئله چیدمان سلولی را با در نظر گرفتن تخصیص اپراتور و تشکیل سلول ارائه کردند. اهداف مدل پیشنهادی آنها عبارت‌اند از: حداقل سازی جابه‌جایی‌های درون سلولی قطعات، هزینه جابه‌جایی ماشین و مسائل مربوط به اپراتور که برای حل آن، روش معیار جامع را پیشنهاد کردند. کیا و همکاران<sup>۲۸</sup> (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای سیستم تولید سلولی پویا، با ادغام دو موضوع اصلی در طراحی این نوع سیستم تولیدی (تشکیل سلول، چیدمان گروهی) پیشنهاد و یک روش SA کارآمد را نیز برای حل مدل توسعه دادند.

خلاصه‌ای از پژوهش‌های ارائه شده در بخش پیشینه پژوهش، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مرور پژوهش‌ها در حوزه مسئله طراحی چیدمان

Table 1- A summary of the literature review of the facility layout design problem

روش حل	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	نویسنده (سال)						
	۷۳	۷۲	۷۱	۶۲	۶۱	۵۱	۴۱	۳۲	۳۱	۲۲	۲۱	۱۲	۱۱	
$\epsilon$ -constraint, NSGA-II, MOPSO	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	این پژوهش
$\epsilon$ -constraint, NSGA-II	*	*						*	*	*	*	*	*	مطهری و همکاران (۲۰۲۳)
GAMS	*	*	*					*	*					بخشی-خانگی و فاطمی قمی (۲۰۲۳)
GA	*	*		*				*	*	*	*	*	*	فخرزاد و همکاران (۲۰۲۲)
BBO	*									*	*			سونشارونا و همکاران (۲۰۲۲)
MNSGA-II	*							*	*	*	*	*	*	سلیم‌پور و همکاران (۲۰۲۱)
GAMS	*	*						*	*	*	*	*	*	درودیان و خوش‌قلب (۲۰۲۱)
VDO, GA, ALO	*	*								*			*	رحیمی و همکاران (۲۰۲۰)
GA, KA, RDA	*	*	*					*	*	*	*	*	*	گل محمدی و همکاران (۲۰۲۰)
GA	*	*						*	*			*	*	غدیرپور و همکاران (۲۰۲۰)
GA	*	*										*	*	ویتایاساک و همکاران (۲۰۱۹)
BDA	*	*						*	*	*	*	*	*	رئوف‌پناه و همکاران (۲۰۱۸)
Hybrid	*							*	*			*	*	مسلمی‌پور و همکاران (۲۰۱۸)
SA	*						*	*	*	*	*	*	*	کومار و سینگ (۲۰۱۸)
PSO	*							*	*	*	*	*	*	خیرخواه و همکاران (۲۰۱۵)
LP-Metric	*	*	*	*						*	*	*	*	باقری و بشیری (۲۰۱۴)
SA	*	*	*					*	*	*	*	*	*	کیا و همکاران (۲۰۱۲)

۱: تابع هدف؛ ۱۱: تک‌هدفه؛ ۱۲: چندهدفه؛ ۲: چیدمان تسهیلات؛ ۲۱: چیدمان درون سلولی؛ ۲۲: چیدمان بین سلولی؛ ۳: هزینه چیدمان؛ ۳۱: هزینه چیدمان درون سلولی؛ ۳۲: هزینه چیدمان بین سلولی؛ ۴: مباحث زیست محیطی؛ ۴۱: انرژی؛ ۵: مباحث اجتماعی؛ ۵۱: خطرات و ایمنی؛ ۶: تخصیص اپراتور؛ ۶۱: به ماشین؛ ۶۲: به سلول؛ ۷: ویژگی‌های تولید؛ ۷۱: مسیر جایگزین؛ ۷۲: توالی عملیات؛ ۷۳: محدودیت ظرفیت سلول.

## شکاف پژوهش

با بررسی مقالات ارائه شده در پیشینه موضوع، موارد ذیل به عنوان شکاف موجود، بیان می شود. ما در این مقاله به دنبال پوشش این شکاف هاییم:

- مهم ترین خلأ احصاشده در حوزه چیدمان تسهیلات، توجه نکردن به موضوعات زیست محیطی و رفاه اجتماعی (ابعاد پایداری) است که در این پژوهش سعی شده است تا با ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه، اهمیت موضوع بیان و شکاف احصاشده، پوشش یابد. به همین منظور، تعریف متمایزی از ابعاد پایداری برای چیدمان تسهیلات ارائه شده است تا علاوه بر توجه به موضوعات جابه جایی و هزینه های مربوط به آن، که از نظر پژوهشگران، پرتکرارترین و مهم ترین عامل است (بعد اقتصادی)، میزان مصرف انرژی (بعد زیست محیطی) به عنوان یکی از حساس ترین مسائل صنایع تولیدی و روز کشور و ایمنی چیدمان برای کارکنان (بعد اجتماعی) نیز، برجسته شود.

- توجه نکردن به مدیریت منابع انسانی در مدل های ارائه شده در پیشینه پژوهش، باعث تحمیل هزینه های پیش بینی نشده به شرکت های تولیدی خواهد شد. در این پژوهش سعی شده است تا با توجه به ابعاد مختلف مدیریت منابع انسانی در تولید، مانند استخدام، اخراج، آموزش، دستمزد و تخصیص، که ابزار کارآمدی برای تصمیم گیری در سازمان ها به شمار می آیند، مدل به واقعیت نزدیک تر و چیدمان تسهیلات دقیق تر انجام شود.

- توجه نکردن به اهمیت مسیریابی فرایند جایگزین در مدل سازی. برای یافتن بهترین شرایط تولید در واقعیت، باید ماشین آلات مختلف، تمامی مسیرهای تولید یک قطعه را بررسی کنند. این امر در کاهش هزینه های تولید و مصرف انرژی، مؤثر است.

## ۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر از لحاظ هدف، در زمره پژوهش های توسعه ای کاربردی و از نظر روش، با توجه به جایگاه مدل سازی ریاضی در تحقیق در عملیات، در گروه تحقیقات توصیفی-کمی دسته بندی می شود.

## مفروضات مسئله

### الف. مفروضات مربوط به تابع هزینه

۱. مساحت و اندازه تسهیلات برابر است؛
۲. هیچ مانع یا تقسیم فیزیکی بین سلول ها وجود ندارد و هزینه های مربوط به پیکربندی مجدد سلول، فقط شامل حذف/نصب و حرکت ماشین های بین سلولی می شود؛
۳. زمان انتقال قطعات و ماشین صفر، در نظر گرفته شده است؛
۴. هزینه خرید ماشین آلات در نظر گرفته نمی شود؛
۵. یک اپراتور تنها به یک سلول اختصاص می یابد. انتقال اپراتور بین سلول ها مجاز نیست؛
۶. یک اپراتور براساس توانایی اش به بیش از یک ماشین اختصاص می یابد؛
۷. یک اپراتور با صرف هزینه آموزشی برای کار با ماشینی خاص در دوره تولید، آموزش داد؛
۸. یک اپراتور در هر دوره به طور مستقل استخدام یا اخراج می شود؛



۹. آموزش بین دوره‌ها انجام می‌شود و زمان آن صفر است؛
۱۰. هزینه جابه‌جایی قطعات بین سلولی به مسافت طی شده و فاصله بین دو ماشین، به فاصله مکان‌های تعیین شده از یکدیگر بستگی دارد؛
۱۱. طراح، تعداد سلول‌ها و حد پایین و بالای ظرفیت سلول را تعریف می‌کند و این در افق برنامه‌ریزی ثابت است.
- ب. مفروضات مشترک تابع هدف هزینه و تابع انرژی**
۱. تقاضای هر قطعه در هر دوره تولید، مشخص است؛
۲. هر ماشین تنها یک عملیات را در هر زمان پردازش می‌کند؛
۳. توالی فرآیند هر نوع قطعه برحسب برگه مسیر آن مشخص و در هر دوره، انعطاف‌پذیری در مسیر تولید لحاظ می‌شود؛
۴. تقاضا و زمان پردازش برای هر قطعه در هر دوره، مشخص شده است.
- پ. مفروضات مشترک تابع هدف هزینه و ایمنی**
۱. تعداد مکان‌های کاندید برای سلول، از پیش معلوم بوده و در افق برنامه‌ریزی ثابت و از نظر اندازه، مشابه در نظر گرفته شده‌اند؛
۲. هزینه و زمان استقرار سلول، صفر در نظر گرفته شده است.

#### اندیس‌ها

$p$	اندیس برای قطعات ( $p = 1, \dots, P$ )
$c$	اندیس برای سلول ( $c = c' = 1, \dots, C$ )
$m$	اندیس برای ماشین ( $m = m' = 1, \dots, M$ )
$h$	اندیس برای دوره زمانی ( $h = 1, \dots, H$ )
$j$	اندیس برای عملیات ( $j = 1, \dots, SE_p^h$ )
$g$	اندیس برای مکان ( $g = g' = 1, \dots, G$ )
$k$	اندیس برای اپراتور ( $k = 1, \dots, K$ )

#### پارامترهای ورودی

$P$	تعداد قطعات
$C$	حداکثر تعداد سلول‌های مجاز در هر دوره
$M$	تعداد ماشین‌ها
$H$	تعداد دوره‌های زمانی
$G$	تعداد مکان
$K$	تعداد اپراتور
$O$	تعداد مسیر
$C_p^{IE}$	هزینه حرکت بین سلولی برای قطعه $p$
$C_p^{IA}$	هزینه حرکت درون سلولی برای قطعه $p$
$C_m^{MO}$	هزینه جابه‌جایی ماشین $m$ براساس هر واحد فاصله

هزینه نصب و جداسازی ماشین $m$	$C_m^{IU}$
هزینه متغیر ماشین $m$	$C_m^V$
هزینه آموزش برای اپراتور $k$ برای انجام عملیات با ماشین $m$	$C_{k,m}^{TR}$
دستمزد اپراتور $k$ برای انجام عملیات با ماشین $m$ (هر ساعت)	$C_{k,m}^{SA}$
هزینه استخدام اپراتور $k$	$C_k^{HI}$
هزینه اخراج اپراتور $k$	$C_k^{FI}$
تقاضای قطعه $p$ در دوره $h$	$D_p^h$
فاصله بین دو مکان کاندید $g$ و $g'$	$dis_{g,g'}$
اگر عملیات $j$ قطعه $p$ در مسیر $o$ و با ماشین $m$ در دوره $h$ انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$U_{p,o,j,m}^h$
حداقل تعداد اپراتور که باید در هر دوره تولیدی استخدام شود.	$Min\ QQ$
حد بالای ظرفیت سلول $c$ برای گنجاندن ماشین	$u_c$
حد پایین ظرفیت سلول $c$ برای گنجاندن ماشین	$l_c$
حداکثر تعداد اپراتور مورد نیاز در ماشین $m$	$u_m$
حداقل تعداد اپراتور مورد نیاز در ماشین $m$	$l_m$
حداکثر تعداد ماشین که به اپراتور $k$ تخصیص می‌یابد.	$u_k$
حداقل تعداد ماشین که به اپراتور $k$ تخصیص می‌یابد.	$l_k$
اگر اپراتور $k$ توانایی انجام عملیات با ماشین $m$ را در دوره اول داشته باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$Z_{k,m}^1$
زمان مورد نیاز برای اجرای عملیات $j$ قطعه $p$ روی ماشین نوع $m$ در مسیر $o$ در دوره $h$	$T_{o,p,j,m}^h$
زمان در دسترس بودن ماشین نوع $m$ در دوره $h$	$TM_m^h$
مقدار انرژی مصرفی در ماشین نوع $m$ برای پردازش قطعه $p$	$EN_{p,m}$
مقدار انرژی مصرفی برای جابه‌جایی قطعه $p$ در مسیر $o$	$EN_{p,o}$
درصد خطر بالقوه موجود در قرارگیری ماشین نوع $m$ در مکان $g$	$IN_{m,g}$

#### متغیرهای تصمیم

اگر ماشین $m$ به سلول $c$ در دوره $h$ تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$X_{m,c}^h$
اگر سلول $c$ به مکان $g$ در دوره $h$ تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$S_{c,g}^h$
اگر اپراتور $k$ در دوره $h$ استخدام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$Q_k^h$
اگر اپراتور $k$ به ماشین $m$ در دوره $h$ تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$R_{k,m}^h$
اگر اپراتور $k$ به سلول $c$ در دوره $h$ تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$Y_{k,c}^h$
اگر اپراتور $k$ توانایی انجام عملیات با ماشین $m$ را در دوره $h$ نداشته باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است. ( $k \geq 2$ )	$Z_{k,m}^h$
اگر مسیر $o$ به قطعه $p$ در دوره $h$ تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت، برابر صفر است.	$V_{o,p}^h$

### ۳-۱- مدل ریاضی

توابع هدف مدل پیشنهادی، از سه بخش تشکیل شده است: بخش اول به مسائل اقتصادی در طراحی چیدمان، شامل هزینه‌های ماشین، قطعه و اپراتور مربوط است؛ بخش دوم با مسائل اجتماعی در طراحی چیدمان، شامل میزان خطرات بالقوه قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های خاص و بخش سوم با مسائل زیست‌محیطی، شامل حداقل‌سازی میزان مصرف انرژی در طی فرایند تولید هر قطعه و میزان مصرف انرژی در فرایند جابه‌جایی قطعات در چیدمان ارتباط دارد.

**الف- توابع اقتصادی (هزینه‌ها) در چیدمان:** هزینه‌ها، محور اصلی توجهات در تولید را به خود جلب کرده است.

$$MIN OFE = OF_1 + OF_2 + OF_3 + OF_4 + OF_5 + OF_6 + OF_7 + OF_8$$

**هزینه‌های جابه‌جایی قطعات:** روابط (۱) و (۲) هزینه‌های جابه‌جایی بین سلولی و درون‌سلولی را نشان می‌دهد. جابه‌جایی بین سلولی قطعات، زمانی انجام می‌شود که بعضی از عملیات قطعه باید در سلول دیگری دنبال شود؛ در نتیجه رابطه (۱) تلاش می‌کند تا با کاهش میزان جابه‌جایی قطعه در بین سلول‌ها، هزینه جابه‌جایی بین سلولی را کاهش دهد. اما زمانی که دو عملیات متوالی از یک قطعه، با ماشین‌های مختلف و در یک سلول انجام شوند، جابه‌جایی درون‌سلولی اتفاق می‌افتد. با کاهش میزان جابه‌جایی‌های درون‌سلولی، هزینه جابه‌جایی درون‌سلولی، مطابق رابطه (۲) کمینه می‌شود.

$$OF_1 = \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_h^p} \sum_{j=1}^{S_{p,o}^h-1} V_{o,p}^h \quad (1)$$

$$OF_2 = \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_h^p} \sum_{j=1}^{S_{p,o}^h-1} V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h \cdot X_{m',c'}^h \cdot S_{c,g}^h \cdot S_{c',g'}^h \cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot U_{o,p,(j+1),m'}^h \cdot dis_{g,g'} \cdot D_p^h \cdot C_p^{IE} \quad (2)$$

**هزینه پیکربندی مجدد سلول‌ها:** این هزینه، از دو بخش هزینه‌های جابه‌جایی و هزینه‌های نصب و جداسازی ماشین‌ها در هر دوره تشکیل شده است.

**هزینه جابه‌جایی ماشین‌ها:** این جابه‌جایی بین دوره‌ها انجام می‌شود و هزینه آن با استفاده از معادله (۳) به حداقل می‌رسد. این جابه‌جایی‌ها به مسافت بین دو سلولی بستگی دارد که ماشین می‌پیماید.

$$OF_3 = \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G X_{m,c}^h \cdot X_{m,c'}^{h+1} \cdot S_{c,g}^h \cdot S_{c',g'}^{h+1} \cdot dis_{g,g'} \cdot C_m^{Mo} \quad (3)$$

**هزینه جداسازی و نصب ماشین‌ها:** نصب و جداسازی ماشین‌ها بین دوره‌ها انجام می‌شود و هزینه آن با استفاده از معادله (۴) به حداقل می‌رسد.

$$OF_4 = \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G C_m^{IU} \cdot \left| \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h \cdot S_{c,g}^h - \sum_{c=1}^C X_{m,c}^{h+1} \cdot S_{c,g}^{h+1} \right| \quad (4)$$

هزینه متغیر ماشین‌ها: این هزینه متناسب با زمان پردازش قطعات در نظر گرفته و مطابق معادله (۵) کمینه می‌شود.

$$OF_5 = \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{o,p}^h} \sum_{m=1}^M V_{o,p}^h \cdot D_p^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot T_{p,o,j,m}^h \cdot C_m^V \quad (5)$$

هزینه‌های استخدام، اخراج و آموزش نیروی کار: هزینه‌های استخدام و آموزش نیروی کار، به ترتیب با روابط (۶) و (۷) به حداقل می‌رسد. فرض بر این است که اگر یک نیروی کار برای کار با یک ماشین خاص آموزش دیده باشد، یا در دوره قبل به ماشینی تخصیص یافته باشد، این اثر یادگیری برای دوره‌های بعدی، بدون هیچ هزینه آموزشی اضافی در نظر گرفته می‌شود.

$$OF_6 = \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K (H_k^h \cdot C_k^{HI} + (1 - H_k^h) \cdot C_k^{FI}) \quad (6)$$

$$OF_7 = \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h \cdot Y_{k,c}^h \cdot Z_{k,m}^h \cdot H_k^h \cdot R_{k,m}^h \cdot C_{k,m}^{TR} \quad (7)$$

هزینه دستمزد نیروی کار: این هزینه متناسب با مدت زمانی محاسبه می‌شود که عملیات پردازش ماشین‌ها به طول می‌انجامد و نیروی کار در کنار ماشین حضور دارد. با توجه به متغیر بودن زمان پردازش هر ماشین در هر مسیر و برای هر عملیات، این زمان و متناسب با آن، پرداختی به نیروی کار، تغییر می‌یابد.

$$OF_8 = \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{o,p}^h} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M V_{o,p}^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot T_{p,o,j,m}^h \cdot R_{k,m}^h \cdot D_p^h \cdot C_{k,m}^{SA} \quad (8)$$

ب- توابع زیست‌محیطی (انرژی) در چیدمان: برای طراحی یک چیدمان پایدار از نظر محیطی، یعنی چیدمانی که از حداقل انرژی الکتریکی استفاده می‌کند، باید EC را یک هدف اصلی در هنگام طراحی یک چیدمان در نظر بگیریم. در این پژوهش، برای محاسبه میزان EC، دو رویکرد پیشنهاد شده است.

$$MIN OFG = OF_9 + OF_{10}$$

۱- رویکرد اول: با توجه به اهمیت و وزن موضوع جابه‌جایی مواد در تولید سلولی، انرژی الکتریکی استفاده‌شده در حین حمل قطعات در بین ماشین‌ها برای هر مسیر تولید، باید در مرحله طراحی چیدمان گنجانده شود؛

$$OF_9 = \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{o,p}^h-1} V_{o,p}^h \quad (9)$$

$$\cdot X_{m,c}^h \cdot X_{m',c'}^h \cdot S_{c,g}^h \cdot S_{c',g'}^h \cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot U_{o,p,(j+1),m'}^h \cdot D_p^h \cdot EN_{P,o}$$

۲- رویکرد دوم: میزان EC در فرایند تولید قطعات است. با توجه به متفاوت بودن زمان پردازش هر قطعه و وجود مسیرهای جایگزین برای تولید آنها، محاسبه میزان EC علاوه بر کاهش میزان مصرف انرژی، هزینه‌های تولید را نیز کاهش می‌دهد.

$$OF_{10} = \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{o,p}^h} \sum_{m=1}^M V_{o,p}^h \cdot D_p^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot EN_{P,m} \quad (10)$$

تابع اجتماعی (خطرات محیط) در چیدمان: برخی از ماشین‌ها در چیدمان تسهیلات، باید از یکدیگر فاصله داشته باشند، در حالی که ماشین‌های دیگر باید به دلیل ملاحظات فنی و ایمنی، در کنار هم قرار گیرند؛ برای مثال، ماشین‌هایی که ارتعاش، گردوغبار، صدا یا دماهای بالا تولید می‌کنند، ممکن است به جداسازی از مونتاژ الکترونیکی و آزمایش نهایی نیاز داشته باشند. به علاوه، ماشین‌های خاصی باید در همان سلول‌ها قرار گیرند؛ برای مثال، ممکن است یک ایستگاه عملیات حرارتی و یک ایستگاه آهنگری به دلایل ایمنی، در مجاورت یکدیگر قرار گیرند. ماشین‌هایی که یک منبع مشترک دارند، یا ماشین‌هایی که به مهارت اپراتور خاصی نیاز دارند نیز، ممکن است در یک سلول قرار گیرند. تابع خطرات ارائه شده در این پژوهش، مبتنی بر میزان خطرات ناشی از استقرار تسهیلات در مکان‌های کاندید بوده و براساس دستورالعمل‌های نظارتی، شرایط محیطی کار، هنجارهای آلودگی و نوع محصول، احصا شده است.

$$OFS = \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h * S_{c,g}^h * IN_{m,g} \quad (11)$$

در این معادله،  $IN_{m,g}$  میزان خطرات ناشی از استقرار تسهیل  $m$  در مکان  $g$  است و  $OFS$  تابع خطر حاصل از استقرار مجموع تسهیلات  $m$  در مکان‌های کاندید  $g$  است. در ادامه و در جدول ۲، مقیاس تعیین خطر  $IN_{m,g}$  ارائه شده است.

جدول ۲- تعیین سطح خطر بین تسهیل و مکان

Table 2- determine the hazard between the facility and place

بدون خطر (معمول)	احتیاط	هشدار (آسیب جزئی)	هشدار (آسیب شدید)	خطر (تهدیدکننده زندگی)
۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱

#### محدودیت‌ها

$$\sum_{c=1}^C X_{m,c}^h = 1 \quad \forall m, h; \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \leq U_c \quad \forall c, h; \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \geq L_c \quad \forall c, h; \quad (14)$$

$$\sum_{c=1}^C S_{c,g}^h \leq 1 \quad \forall g, h; \quad (15)$$

$$\sum_{g=1}^G S_{c,g}^h = 1 \quad \forall c, h; \quad (16)$$

$$\sum_{c=1}^C Y_{k,c}^h = Q_k^h \quad \forall k, h; \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K Q_k^h \geq \min QQ \quad \forall h; \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K R_{k,m}^h \geq L_m \quad \forall m, h; \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K R_{k,m}^h \leq U_m \quad \forall m, h \quad (20)$$

$$R_{k,m}^h \leq Q_k^h \quad \forall k, m, h; \quad (21)$$

$$Y_{k,c}^h \leq Q_k^h \quad \forall k, c, h; \quad (22)$$

$$\sum_{m=1}^M R_{k,m}^h \leq Q_k^h \cdot U_k \quad \forall k, h; \quad (23)$$

$$\sum_{m=1}^M R_{k,m}^h \geq Q_k^h \cdot L_k \quad \forall k, h; \quad (24)$$

$$R_{k,m}^h \leq \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h \cdot Y_{k,c}^h \quad \forall k, m, h; \quad (25)$$

$$Z_{k,m}^{h+1} = (1 - R_{k,m}^h) \cdot Z_{km}^h \quad \forall k, m, h = 1, \dots, H - 1; \quad (26)$$

$$\sum_{o=1}^{R_p^h} V_{o,p}^h = 1 \quad \forall p, h; \quad (27)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{o,p}^h} V_{o,p}^h \cdot D_p^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot T_{p,o,j,m}^h \leq TM_m^h \quad \forall m, h; \quad (28)$$

$$Q, V, R, S, X, Y, Z \in \{0,1\} \quad (29)$$

محدودیت (۱۲)، مشخص می‌کند که هر ماشین باید فقط به یک سلول تخصیص داده شود. محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) ظرفیت سلول‌ها را محدود می‌کند. محدودیت (۱۵) بیان می‌کند که هر مکان، فقط برای یک سلول است و محدودیت (۱۶)، هر سلول را تنها به یک مکان منتخب تخصیص می‌دهد. محدودیت (۱۷) نیز بیان می‌کند که هر اپراتور استخدام‌شده، باید تنها به یک سلول تخصیص داده شود. محدودیت (۱۸)، حداقل تعداد اپراتورهای استخدام‌شده را در هر دوره مشخص می‌کند. حداقل و حداکثر تعداد اپراتورهای موردنیاز برای هر ماشین، به ترتیب با محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) مشخص می‌شوند. محدودیت (۲۱) بیان می‌کند که اگر اپراتوری در یک دوره استخدام شده باشد، به یک ماشین و با محدودیت (۲۲)، به یک سلول تخصیص می‌یابد. حداکثر و حداقل تعداد ماشین‌هایی که هر اپراتور به آن تخصیص می‌یابد، به ترتیب با محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) مشخص می‌شود. محدودیت (۲۵) بیان می‌کند که شرط تخصیص اپراتور به ماشین، حضور هم‌زمان ماشین و اپراتور در یک سلول مشابه است. آموزش با محدودیت (۲۶) در نظر گرفته می‌شود و بیان می‌کند که اپراتور آموزش دیده در یک دوره، به یادگیری مجدد برای کار با همان ماشین در دوره‌های بعدی، نیازی نخواهد داشت. محدودیت (۲۷) نشان می‌دهد که فقط یک مسیر فرآیند، به عنوان مسیر بهینه برای تولید هر قطعه انتخاب می‌شود. محدودیت (۲۸) تضمین می‌کند مدت زمانی که از ماشین برای پردازش استفاده شده است، از کل ظرفیت زمانی در دسترس بودن ماشین تجاوز نمی‌کند. در محدودیت (۲۹)، نوع متغیرها تعریف می‌شود که در آن، همه متغیرهای باینری‌اند.

### ۳-۳- خطی سازی مدل ریاضی

مدل ریاضی پیشنهادی به دلیل وجود توابع (۱)، (۲)، (۳)، (۴)، (۶)، (۷)، (۸)، (۹) و محدودیت‌های (۲۵) و (۲۶)، غیرخطی است، بنابراین برای تبدیل آن به یک مسئله خطی، از تکنیک‌های خطی سازی استفاده شود.

### اولین تکنیک خطی سازی

عبارت  $Z = X_1 * X_1 * \dots * X_n$  را نظر بگیرید. در اینجا، فرض می‌شود به ازای مقادیر  $(i = 1, 2, \dots, n)$  متغیر  $X_i$  باینری است؛ بنابراین، متغیر  $Z$  تنها زمانی ۱ است که همه متغیرهای  $X_i$  برابر ۱ باشند. اگر یکی از متغیرهای  $X_i$  صفر باشد، ضرب آن به وضوح صفر خواهد بود. با توجه به این نکته، متغیر باینری  $Z$  را با ضرب متغیرهای باینری  $X_i$  با افزودن برخی قیود، جایگزین می‌شود.

$$Z \leq X_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (30)$$

$$Z \geq \sum_{i=1}^n X_i - (n - 1) \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (31)$$

عبارت اول، دوم، سوم، ششم، هفتم، هشتم، نهم و بخشی از عبارت چهارم (ضرب متغیرها) تابع هدف که مدل را غیرخطی کرده‌اند، با استفاده از این نوع خطی‌سازی، خطی می‌شود. برای این کار باید متغیرهای زیر تعریف شوند:

$$XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h = V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h \cdot S_{c,g}^h \cdot X_{m',c'}^h \cdot S_{c',g'}^h \quad \forall p, o, m, m', c, c', g, g', h;$$

$$XSA_{p,o,m,m',c}^h = V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h \cdot X_{m',c}^h \quad \forall p, o, m, m', c, h;$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h = X_{m,c}^h \cdot S_{c,g}^h * X_{m,c'}^{h+1} \cdot S_{c',g'}^{h+1} \quad \forall m, c, c', g, g', h = 1, \dots, H - 1;$$

$$XY_{m,k,c}^h = X_{m,c}^h \cdot Y_{k,c}^h \quad \forall k, m, c, h;$$

$$RZ_{k,m}^h = R_{k,m}^h \cdot Z_{k,m}^h \quad \forall k, m, h;$$

$$XYRZQ_{m,k,c}^h = RZ_{k,m}^h \cdot XY_{m,k,c}^h \cdot Q_k^h \quad \forall k, m, c, h;$$

$$XS_{m,g,c}^h = X_{m,c}^h \cdot S_{g,c}^h \quad \forall m, g, c, h;$$

$$VR_{i,o,k,m}^h = V_{o,p}^h \cdot R_{k,m}^h \quad \forall i, o, k, m, h;$$

با تغییر توابع هدف به فرم بالا، باید محدودیت‌های زیر را به مدل خطی جدید افزود.

$$XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \leq V_{o,p}^h \quad (32)$$

$$XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \leq X_{m,c}^h \quad (33)$$

$$XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \leq S_{c,g}^h \quad (34)$$

$$XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \leq X_{m',c'}^h \quad (35)$$

$$XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \leq S_{c',g'}^h \quad (36)$$

$$XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \geq V_{o,p}^h + X_{m,c}^h + S_{c,g}^h + X_{m',c'}^h + S_{c',g'}^h - 4 \quad (37)$$

$$XSA_{p,o,m,m',c}^h \leq V_{o,p}^h \quad (38)$$

$$XSA_{p,o,m,m',c}^h \leq X_{m,c}^h \quad (۳۹)$$

$$XSA_{p,o,m,m',c}^h \leq X_{m',c}^h \quad (۴۰)$$

$$XSA_{p,o,m,m',c}^h \geq V_{o,p}^h + X_{m,c}^h + X_{m',c}^h - 3 \quad (۴۱)$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h \leq X_{m,c}^h \quad (۴۲)$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h \leq S_{c,g}^h \quad (۴۳)$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h \leq X_{m,c'}^{h+1} \quad (۴۴)$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h \leq S_{c',g'}^{h+1} \quad (۴۵)$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h \geq X_{m,c}^h + S_{c,g}^h + X_{m,c'}^{h+1} + S_{c',g'}^{h+1} - 3 \quad (۴۶)$$

$$XY_{m,k,c}^h \leq X_{m,c}^h \quad (۴۷)$$

$$XY_{m,k,c}^h \leq Y_{k,c}^h \quad (۴۸)$$

$$XY_{m,k,c}^h \geq X_{m,c}^h + Y_{k,c}^h - 1 \quad (۴۹)$$

$$RZ_{k,m}^h \leq R_{k,m}^h \quad (۵۰)$$

$$RZ_{k,m}^h \leq Z_{k,m}^h \quad (۵۱)$$

$$RZ_{k,m}^h \geq R_{k,m}^h + Z_{k,m}^h - 1 \quad (۵۲)$$

$$XYRZQ_{m,k,c}^h \leq RZ_{k,m}^h \quad (۵۳)$$

$$XYRZQ_{m,k,c}^h \leq XY_{m,k,c}^h \quad (۵۴)$$

$$XYRZQ_{m,k,c}^h \leq Q_k^h \quad (۵۵)$$

$$XYRZQ_{m,k,c}^h \geq RZ_{k,m}^h + XY_{m,k,c}^h + Q_k^h - 2 \quad (۵۶)$$

$$XS_{mg,c}^h \leq S_{g,c}^h \quad (۵۷)$$

$$XS_{m,g,c}^h \leq X_{m,c}^h \quad (۵۸)$$

$$XS_{m,g,c}^h \geq X_{m,c}^h + S_{g,c}^h - 1 \quad (۵۹)$$

$$VR_{p,o,k,m}^h \leq V_{o,p}^h \quad (۶۰)$$

$$VR_{p,o,k,m}^h \leq R_{k,m}^h \quad (۶۱)$$

$$VR_{p,o,k,m}^h \geq V_{o,p}^h + R_{k,m}^h - 1 \quad (۶۲)$$



### دومین تکنیک خطی سازی

عبارت  $Z = |X_1 - X_2|$  را در نظر بگیرید. در اینجا فرض می‌شود که متغیرهای  $X_1$  و  $X_2$  باینری‌اند. برای خطی کردن چنین عبارت غیرخطی، باید متغیرهای تصادفی جدید  $X'_1$  و  $X'_2$  را در نظر گرفت و آنها را با  $Z = X'_1 + X'_2$  در تابع هدف اصلی جایگزین کرد. در این حالت، محدودیت  $X_1 - X_2 = X'_1 - X'_2$  به مدل اضافه می‌شود.

عبارت چهارم در تابع هدف، که باعث غیرخطی شدن مدل شده است، به وسیله این تکنیک خطی سازی، خطی می‌شود. برای انجام این کار، باید محدودیت‌های زیر به مدل اضافه شوند.

$$\left| \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^h - \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^{h+1} \right| = BA_{m,g}^h + BB_{m,g}^h$$

$$\sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^h - \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^{h+1} = BA_{m,g}^h - BB_{m,g}^h \quad \forall m, g, h, h \in (1, 2, \dots, H-1) \quad (63)$$

### مدل ریاضی خطی شده

مدل نهایی خطی شده به صورت ذیل است:

$$\text{Min OFE} = \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{p,o}^h-1} XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \quad (64)$$

$$\cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot U_{o,p,(j+1),m'}^h \cdot dis_{g,g'} \cdot D_p^h \cdot C_p^{IE} \quad (65)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{SE_p^h-1} XSA_{p,o,m,m',c}^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot U_{p,o,(j+1),m'}^h \cdot D_p^h \cdot C_p^{IA} \quad (66)$$

$$+ \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P XSR_{m,c,c',g,g'}^h \cdot dis_{g,g'} \cdot C_m^{Mo} \quad (67)$$

$$+ \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P (BA_{mg}^h + BB_{mg}^h) \cdot C_m^{IU} \quad (68)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{o,p}^h} \sum_{m=1}^M V_{o,p}^h \cdot D_p^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot T_{p,o,j,m}^h \cdot C_m^V \quad (69)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K (Q_k^h \cdot C_k^{HI} + (1 - Q_k^h) \cdot C_k^{FI}) \quad (70)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C XYRZQ_{mkc}^h \cdot C_{k,m}^{TR} \quad (71)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_p^h-1} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M U_{p,o,j,m}^h \cdot D_p^h \cdot T_{p,o,j,m}^h \cdot VR_{p,o,k,m}^h \cdot C_{k,m}^{SA} \quad (72)$$

$$\text{Min OFG} = \quad (73)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{SE_p^h} XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \cdot D_p^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot U_{p,o,(j+1),m'}^h \cdot EN_{p,o} \quad (74)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{R_p^h} \sum_{j=1}^{S_{o,p}^h} \sum_{m=1}^M V_{o,p}^h \cdot D_p^h \cdot U_{p,o,j,m}^h \cdot EN_{p,m} \quad (75)$$

$$\text{Min OFS} = \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G \sum_{c=1}^C XS_{m,c,g}^h * IN_{m,g} \quad (76)$$

محدودیت‌های مدل خطی شامل محدودیت‌های بدون تغییر (۱۲) - (۲۴) و (۲۷) - (۲۹)، محدودیت‌های جدید

(۳۲) - (۶۳) و (۶۶) و محدودیت (۲۵) با (۷۵) و (۲۶) با (۷۶) جایگزین می‌شوند.

$$R_{km}^h \leq \sum_{c=1}^C XY_{kmc}^h \quad \forall k, m, h; \quad (75)$$

$$Z_{km}^{h+1} = (Z_{km}^h - RZ_{km}^h) \quad \forall k, m, h = 1, \dots, H - 1; \quad (76)$$

$$R_{km}^h, XY_{kmc}^h, Z_{km}^h, XS_{mgc}^h, XSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h, XYRZ_{mkc}^h, XSA_{p,o,m,m',c}^h, XSR_{mcc'gg'}^h, \quad (77)$$

$$BA_{mg}^h, BB_{mg}^h, VR_{p,o,k,m}^h \in \{0,1\}$$

محدودیت‌های مربوط به هر تابع هدف، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- محدودیت‌های مربوط به هر یک از توابع هدف

Table 3- Constraints related to each of the objective functions

Min OFS تابع هدف سوم (خطرات)	Min OFG تابع هدف دوم (مصرف انرژی)	Min OFE تابع هدف اول (هزینه‌ها)
محدودیت‌ها: (۲-۶)، (۱۹)، (۴۷-۴۹) و (۵۶)	محدودیت‌ها: (۲-۶)، (۱۷-۱۹)، (۲۲-۲۷) و (۵۶)	محدودیت‌ها: (۲-۱۴)، (۱۷-۱۹) و (۵۶) و (۲۲)

### ۳-۳- محاسبه تعداد متغیرها و محدودیت‌های مدل

به منظور تعیین پیچیدگی مدل MILP پیشنهادی، جداول ۴ و ۵ به ترتیب، تعداد متغیرها و محدودیت‌ها را گزارش می‌کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعداد متغیرهای تصمیم با  $G$  (تعداد مکان‌های کاندید)،  $M$  (تعداد ماشین‌ها) و  $C$  (تعداد سلول‌ها) رابطه درجه دوم دارد. در محدودیت‌ها نیز،  $G$  و  $M$  و  $C$  رابطه درجه دوم دارند. این دو جدول، افزایش سریع تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها را با افزایش مقادیر پارامتر، نشان می‌دهد.

### محاسبه تعداد متغیرها

جدول ۴- تعداد متغیرهای باینری در مدل خطی

Table 4- The number of binary variables in the linear model

متغیر	تعداد	متغیر	تعداد	متغیر	تعداد
$X_{mc}^h$	$M \times C \times H$	$Y_{kc}^h$	$K \times C \times H$	$XS_{mcg}^h$	$M \times C \times G \times H$
$S_{cg}^h$	$C \times G \times H$	$RZ_{km}^h$	$K \times M \times H$	$XSE_{pomm'cc'gg'}^h$	$P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H$
$R_{km}^h$	$K \times M \times H$	$XY_{kmc}^h$	$K \times M \times C \times H$	$XYRZ_{mkc}^h$	$M \times K \times C \times H$
$Z_{km}^h$	$K \times M \times H$	$BA_{mg}^h$	$M \times G \times H$	$XSA_{pomm'c}^h$	$P \times O \times M^2 \times C \times H$
$Q_k^h$	$K \times H$	$BB_{mg}^h$	$M \times G \times H$	$XSR_{mcc'gg'}^h$	$M \times C^2 \times G^2 \times H$
$V_{o,p}^h$	$O \times P \times H$	$VR_{p,o,k,m}^h$	$P \times O \times K \times M \times H$		
مجموع = $3(K \times M \times H) + (K \times c \times H) + (K \times H) + (M \times C \times H) + (C \times G \times H) + 2(M \times G \times H) + 2(K \times M \times C \times H) + (M \times C \times G \times H) + (P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H) + (P \times O \times M^2 \times C \times H) + (M \times C^2 \times G^2 \times H) + (O \times P \times H) + (P \times O \times K \times M \times H)$					

محاسبه تعداد محدودیت‌ها

جدول ۵- تعداد محدودیت‌ها در مدل خطی

Table 5- The number of constraints in the linear model

تعداد	محدودیت	تعداد	محدودیت	تعداد	محدودیت
(۱۲)	$M \times H$	(۳۲)	$P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H$	(۵۰)	$K \times M \times H$
(۱۳)	$C \times H$	(۳۳)	$P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H$	(۵۱)	$K \times M \times H$
(۱۴)	$C \times H$	(۳۴)	$P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H$	(۵۲)	$K \times M \times H$
(۱۵)	$G \times H$	(۳۵)	$P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H$	(۵۳)	$K \times M \times C \times H$
(۱۶)	$C \times H$	(۳۶)	$P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H$	(۵۴)	$K \times M \times C \times H$
(۱۷)	$K \times H$	(۳۷)	$P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H$	(۵۵)	$K \times M \times C \times H$
(۱۸)	$H$	(۳۸)	$P \times O \times M^2 \times C \times H$	(۵۶)	$K \times M \times C \times H$
(۱۹)	$M \times H$	(۳۹)	$P \times O \times M^2 \times C \times H$	(۵۷)	$M \times C \times G \times H$
(۲۰)	$M \times H$	(۴۰)	$P \times O \times M^2 \times C \times H$	(۵۸)	$M \times C \times G \times H$
(۲۱)	$K \times M \times H$	(۴۱)	$P \times O \times M^2 \times C \times H$	(۵۹)	$M \times C \times G \times H$
(۲۲)	$K \times C \times H$	(۴۲)	$M \times C^2 \times G^2 \times H$	(۶۰)	$P \times O \times K \times M \times H$
(۲۳)	$K \times H$	(۴۳)	$M \times C^2 \times G^2 \times H$	(۶۱)	$P \times O \times K \times M \times H$
(۲۴)	$K \times H$	(۴۴)	$M \times C^2 \times G^2 \times H$	(۶۲)	$P \times O \times K \times M \times H$
(۲۵)	$K \times M \times H$	(۴۵)	$M \times C^2 \times G^2 \times H$	(۶۳)	$M \times G \times H$
(۲۶)	$K \times M \times H$	(۴۶)	$M \times C^2 \times G^2 \times H$	(۷۵)	$K \times M \times H$
(۲۷)	$P \times H$	(۴۷)	$K \times M \times C \times H$	(۷۶)	$K \times M \times H$
(۲۸)	$M \times H$	(۴۸)	$K \times M \times C \times H$	(۷۷)	Binary variables
(۲۹)	Binary variables	(۴۹)	$K \times M \times C \times H$		

مجموع =  $4(M \times H) + 3(C \times H) + (G \times H) + 3(K \times H) + (H) + 8(K \times M \times H) + (K \times C \times H) + (M \times G \times H) + 6(K \times M \times C \times H) + 3(M \times C \times G \times H) + 6(P \times O \times M^2 \times C^2 \times G^2 \times H) + 4(P \times O \times M^2 \times C \times H) + 3(P \times O \times K \times M \times H) + (P \times H) + 5(M \times C^2 \times G^2 \times H)$   
 +number of constraints relate to Binary variables (29), (77)

۳-۴- روش‌های حل

برخلاف مدل‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه، مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، تنها یک جواب ندارند که حاوی بهترین مقادیر برای همه توابع هدف باشد. به علت وجود توابع هدف متضاد، بهترین مقدار یک تابع هدف ممکن، برای دیگر توابع به بدترین مقدار منجر می‌شود. در این پژوهش، سه نوع تابع هدف هزینه‌ها، مصرف انرژی و خطرات قرارگیری ماشین‌ها در محل‌های کاندید محیط کار، در نظر گرفته شده است. هر نوع ماشین، سطح خاصی از مصرف انرژی را دارد. این سطح مصرف انرژی با هزینه هر دستگاه در تضاد است؛ یعنی هرچه ماشین، انرژی کمتری مصرف کند، هزینه متغیر آن بیشتر است. درباره ایمنی ماشین‌ها نیز، به همین ترتیب است. به عبارت دیگر هر ماشین براساس دستورالعمل‌های نظارتی، شرایط محیطی کار، هنجارهای آلودگی و نوع محصول، نباید در بعضی مکان‌ها قرار گیرند؛ بنابراین هرچه هزینه بیشتری برای ماشین شده باشد، میزان خطرات محیطی آن کمتر خواهد بود.

در چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه، یک جبهه پارتو، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه است که جواب‌های دیگر ندارد. این مجموعه از جواب‌ها اجازه نمی‌دهد که هیچ‌یک از توابع هدف، بدون تأثیر منفی بر عملکرد دیگر توابع بهبود یابد. برای بهینه‌سازی چندهدفه، جبهه پارتو برای تجزیه و تحلیل توازن بین اهداف و یافتن بهترین جوابی استفاده می‌شود که این اهداف را به چالش می‌اندازد (ماوروتاس<sup>۲۹</sup>، ۲۰۰۹). شرایطی مانند غیرخطی بودن، چندهدفه بودن، پیچیدگی و ماهیت NP-hard مسئله، در حل مدل پیشنهادی وجود دارد. در این بخش، سه رویکرد مختلف برای حل مدل مذکور معرفی شده است. روش اپسیلون محدودیت، یک روش تصمیم‌گیری چندهدفه<sup>۳۰</sup> (MODM) برای حل مدل در نظر می‌گیرد و به ایجاد یک جبهه بهینه پارتو منجر می‌شود؛ از جمله مزایای رویکرد اپسیلون محدودیت، به موارد ذیل اشاره می‌شود:

- روش اپسیلون محدودیت، پاسخ‌های کارآمد غیردقیق را ایجاد می‌کند. این موضوع برخلاف روش وزن‌دهی است که فقط جواب‌های دقیق را تولید می‌کند. ممکن است در روش وزن‌دهی به علت وجود ترکیب‌های وزنی متفاوت، جواب‌های کارآمد یکسانی تولید شوند، به همین دلیل جواب‌های زائد نیز، وجود خواهد داشت. اما با استفاده از روش محدودیت اپسیلون، جواب‌های مختلفی در زمان حل شدن مدل به دست می‌آید (بالامان<sup>۳۱</sup>، ۲۰۱۶).

- روش اپسیلون، محدودیت را با تعیین تعداد نقاط عطف در بازه هر یک از توابع هدف و تعداد پاسخ‌های تولید شده کارآمد را کنترل می‌کند، در حالی که در روش وزن‌دهی، این امر به راحتی امکان‌پذیر نیست (ماوروتاس، ۲۰۰۹).

اگرچه روش‌های MODM، مانند اپسیلون محدودیت، جواب‌های پارتوی بهینه را ارائه می‌دهند، بسیار زمان‌برند. به همین دلیل، دو الگوریتم فراابتکاری شامل بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۳۲</sup> (MOPSO) و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مغلوب<sup>۳۳</sup> (NSGA-II)، که از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه‌اند، برای حل مدل پیشنهادی توسعه داده شده‌اند. مفهوم جواب غیر مغلوب، به شرح زیر است.

### جواب غیر مغلوب

برای یک مسئله تک‌هدفه، بهترین جواب به‌سادگی تعیین می‌شود؛ برای مثال در مسئله‌ای که به شکل کمینه‌سازی تعریف می‌شود، جواب با کمترین مقدار، جواب بهینه است. با این حال در دنیای واقعی، تصمیم‌گیرندگان بیشتر با مسائل چندهدفه سروکار دارند که در آن هیچ جواب بهینه واحدی برای همه اهداف وجود ندارد. در چنین مسائلی، مجموعه‌ای از جواب‌های غیر مغلوبی به دست می‌آید که جواب بهتر از آن وجود نداشته باشد. به عبارت دیگر، اگر جواب عملی دیگری بهتر از  $x$  در یک یا چند تابع هدف، بدون بدتر شدن توابع دیگر وجود نداشته باشد، غیر مغلوب نامیده می‌شود (ارگات<sup>۳۴</sup>، ۲۰۰۵).

$$\text{Min } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\} \quad (78)$$

s.t:

$$x \in S$$

در اینجا  $x$  بردار متغیرهای تصمیم و  $f_i(x)$  نشان‌دهنده  $i$  امین تابع هدف است.  $p$  تعداد توابع هدف و  $S$  نشان‌دهنده فضای پاسخ به مسئله است.  $x$  یک جواب کارآمد است و تابع متناظر آن، غیر غالب نامیده می‌شود، آن هم اگر فقط جوابی مانند  $x'$  وجود داشته باشد، به نحوی که  $f_i(x') \leq f_i(x) \forall i = 1, 2, \dots, p$

۳-۴-۱- روش اپسیلون محدودیت

در روش اپسیلون محدودیت، ابتدا یکی از توابع هدف، تابع هدف اصلی در نظر می‌گیریم و سپس بقیه توابع هدف را به صورت زیر محدود می‌کنیم:

$$\text{Min } f_1(x_1) \quad (79)$$

s. t:

$$f_2(x) \leq \varepsilon_2$$

$$f_3(x) \leq \varepsilon_3$$

...

$$f_n(x) \leq \varepsilon_n \quad X \in S$$

$\varepsilon_i$  نشان‌دهنده سطح رضایت از تابع هدف و  $i$  نشان‌دهنده تغییرات سیستماتیک مختلفی است که به جواب‌های مختلف منجر می‌شود. اگر برخی از توابع هدف از نوع ماکزیمم‌شونده باشند، محدودیت‌های مرتبط به صورت  $f_i(x) \geq \varepsilon_i$  نوشته می‌شوند. مراحل انجام این روش، به شرح ذیل است:

- ابتدا از بین توابع هدف، یکی را انتخاب کنید که تابع هدف جدید نامیده می‌شود و مابقی نیز باید به‌عنوان محدودیت، به مدل اضافه شوند. مسئله با این تابع هدف حل و نتایج آن ارائه می‌شود.
- مرحله قبل برای تمامی توابع هدف تکرار می‌شود و مقدار بهینه تابع هدف‌ها به دست می‌آید.

$$SOP_i : \text{Min } f_i(x_i) \quad (80)$$

$$s. t: \quad (x_i^*, f_i(x_i^*))$$

- یک جدول تعادل را ایجاد کنید تا هر سطر آن، مقدار توابع هدفی را نشان دهد که با توجه به حل معادله  $i$  در مرحله قبل به دست آمده است.

- پس از آن، حداکثر و حداقل مقادیر هر تابع هدف در هر ستون تعیین می‌شود (برای مثال،  $y_i^{min}$  و  $y_i^{max}$  برای تابع هدف  $i$  ام). جدول ۶ ساختار جدول تعادل را نشان می‌دهد.

جدول ۶- ساختار جدول تعادل در روش اپسیلون محدودیت (بیجارچیان و همکاران<sup>۳۶</sup>، ۲۰۲۰)

Table 6- The structure of the equilibrium table in the epsilon constraint method (Bijarchiyan et al., 2020)

$SOP_i$	$f_2(x_i)$	...	$f_p(x_i)$
$x_2^*$	$f_2(x_2^*)$	...	$f_p(x_2^*)$
.	.	...	.
$x_p^*$	$f_2(x_p^*)$	...	$f_p(x_p^*)$
$y_i^{min}$	$f_2(x_2^*)$	...	$f_p(x_p^*)$
$y_i^{max}$	$Max(f_2(x_i^*))$	...	$Max(f_p(x_i^*))$

- مقدار هر  $\varepsilon$  در محدوده‌ای از مقادیر تابع هدف مربوطه، در جدول تعادل قرار دارد و مطابق رابطه ذیل محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $q$  تعداد دفعات اجرای مدل و  $n$  تعداد عدد طبیعی (از ۱ تا تعداد اجرا) است.

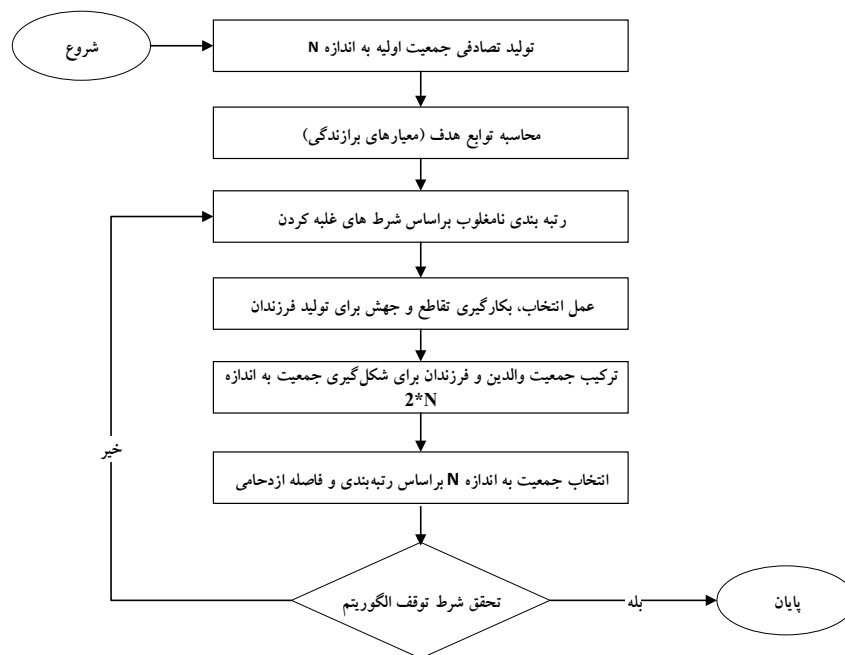
$$\varepsilon_{i,n_i} = y_i^{max} - \left[ \frac{y_i^{max} - y_i^{min}}{q_i} \right] \cdot n_i \quad n_i = 0, 1, 2, \dots, q_i \quad (81)$$

- فواصل حاصل، معمولاً به قسمت‌های مساوی تقسیم و نقاطی به‌عنوان مقادیر  $\varepsilon$  انتخاب می‌شوند.  
- اگر جواب مدنظر از یکی از نقاط بهینه به دست آمد، حل مسئله متوقف می‌شود، در غیر این صورت، محدوده  $\varepsilon$  به فواصل بیشتری تقسیم می‌شود و مقادیر  $\varepsilon$  در محدوده‌های جدید تغییر می‌یابد تا بهینه پارتوی نهایی حاصل شود.

### ۳-۴-۲- الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مغلوب نوع ۲

این الگوریتم، یک الگوریتم تکاملی و توسعه‌یافته روش NSGA است، به‌طور هم‌زمان از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک و مفهوم پارتو بهره می‌برد و در مبانی نظری، یکی از پرکاربردترین و کاراترین روش‌های حل معرفی می‌شود. در این الگوریتم، داده‌های گذشته براساس سابقه الگوریتم، استخراج و در فرآیند جست‌وجو، از آنها استفاده می‌شود. کروموزوم، رشته‌ای از اعداد است که ژن نامیده می‌شود. در هر تکرار، کروموزوم‌های جدید (فرزندان) با عملگرهای الگوریتم (تقاطع/ترکیب<sup>۳۷</sup> و جهش<sup>۳۸</sup>) تولید می‌شوند؛ سپس، فرزندان ارزیابی و به‌وسیله یک روش انتخابی، کروموزوم‌هایی با کیفیت بیشتر برگزیده می‌شوند، به‌طوری که کروموزوم‌های انتخاب‌شده، تعداد جمعیتی مانند جمعیت اولیه دارند و به نسل بعدی منتقل می‌شوند. در این فرآیند، الگوریتم به بهترین کروموزوم همگرا می‌شود که نشان‌دهنده حل بهینه یا زیربهینه است. پارامترهای این الگوریتم شامل، اندازه جمعیت، تعداد تکرار، نرخ جهش و تقاطع است (کریمیان و سمثونی<sup>۳۹</sup>، ۱۴۰۲). مراحل این الگوریتم، طبق نظر دب و همکاران<sup>۴۰</sup> (۲۰۰۲)، به شرح ذیل است:

- ۱- جمعیت اولیه براساس مقیاس و قیود مسئله ایجاد می‌شود. در این مرحله به ازای جمعیت اولیه، جواب‌های تصادفی به وجود می‌آید؛
  - ۲- معیارهای برازندگی محاسبه می‌شود. در این مرحله، مقدار توابع هدف به ازای هر جواب، محاسبه و سپس جواب‌های غیر مغلوب، مشخص می‌شود؛
  - ۳- شرط‌های غلبه‌کردن مشخص و جمعیت براساس آن مرتب شود؛
  - ۴- فاصله ازدحامی محاسبه شود؛
  - ۵- انتخاب از بین جمعیت اولیه آغاز شود؛
  - ۶- در صورت رسیدن به شرایط توقف، الگوریتم متوقف شود.
- با توجه به اینکه در طول نسل جدید با استفاده از عملگرهای جهش و تقاطع، هیچ تضمینی برای بهبود جواب‌های به‌دست‌آمده وجود ندارد، فرض می‌شود که الگوریتم چندهدفه پیشنهادی، به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو در زمانی همگرا می‌شود که معیار توقف برآورده می‌شود. خلاصه مراحل بالا در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- مراحل الگوریتم ژنتیک رتبه بندی غیر مغلوب نوع ۲ (شریفی قزوینی و همکاران<sup>۴۱</sup>، ۲۰۱۸)

Fig. 1- Steps of NSGA-II (Sharifi Ghazvini et al., 2018)

### نحوه نمایش جواب

برای حل یک مسئله به وسیله الگوریتم ژنتیک رتبه بندی غیر مغلوب نوع ۲، باید مسئله را در مرحله اول به فرم مورد نیاز این الگوریتم تبدیل کرد تا به وسیله یک کروموزوم نمایش دادنی باشد. رشته جوابها در الگوریتم ژنتیک، کروموزوم و هر عضو در کروموزوم، ژن نامیده می شود. به منظور نمایش پاسخها در این مسئله، از رشته ای از اعداد اعشاری استفاده شده است. در این پژوهش، ژنهای موجود در هر کروموزوم براساس اعداد اعشاری بین ۰ و ۱ کدگذاری می شوند، به طوری که متغیرهای مسئله براساس آن در نظر گرفته و مقادیر آن محاسبه می شود. ساختار جواب نشان داده شده در جدول ۷، نقطه ای را در فضای امکان پذیر جواب، نشان می دهد و به طور کلی نمایش آن در هر رویکرد فراابتکاری مهم است. این ساختار که با بردارهای ریاضی جداگانه نشان داده شده است، چهار قسمت (متغیر) دارد و هر بردار ریاضی آن، دارای درایه های مشخصی است که در جدول ۸ ارائه شده است. در جدول ۷، اندیس M نشان دهنده شاخص ماشینها، C برای شاخص سلول، T برای شاخص دورهها، G برای شاخص مکانها و K برای شاخص اپراتورهاست. بخش اول به تعیین ماشین واقع در هر سلول در هر دوره مربوط است. بنابراین طول این بخش (تعداد درایه های تولید شده) برابر با  $C \times G \times H$  است؛ برای مثال برای مسئله ای که ۴ ماشین، ۲ سلول، ۲ دوره، ۳ مکان، ۵ اپراتور، ۴ قطعه، ۳ مسیر و ۳ عملیات دارد، این مقدار برابر ۱۲ درایه خواهد بود ( $3 \times 2 \times 2 = 12$ ). ابعاد متغیرهای اصلی در مسئله، به صورت ذیل تعریف شده است:

جدول ۷- نمایش اندازه درایه‌ها

Table 7- Display of the number of elements

V	R	S	X	نام متغیر
مسیر در قطعه در دوره	اپراتور در ماشین در دوره	سلول در مکان در دوره	ماشین در سلول در دوره	تعریف متغیر
$O \times P \times H$	$K \times M \times H$	$C \times G \times H$	$M \times C \times H$	فرمول ابعاد متغیر
$4 \times 2 \times 2 = 16$	$5 \times 4 \times 2 = 40$	$2 \times 3 \times 2 = 12$	$4 \times 2 \times 2 = 16$	تعداد درایه

جدول ۸- نمایش پاسخ‌ها

Table 8- responses' display

...	۰/۸۶	۰/۶۷	۰/۱۵	۰/۸۳	۰/۱۳	۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۲۸	۰/۸۵	۰/۷۱	X	محتویات درایه X
...	۰/۳۱	۰/۷۰	۰/۳۵	۰/۸۷	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۱۵	۰/۸۰	۰/۳۶	۰/۵۸	S	محتویات درایه S
...	۰/۶۴	۰/۷۱	۰/۵۸	۰/۶۶	۰/۱۸	۰/۹۷	۰/۶۵	۰/۰۴	۰/۹۶	۰/۴۴	R	محتویات درایه R
...	۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۹۷	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۸۱	۰/۵۱	۰/۶۲	۰/۳۶	۰/۶۷	V	محتویات درایه V

در مجموع یک بردار ریاضی با تعداد ۸۴ درایه تشکیل می‌شود که مقادیر بین ۰ و ۱ به صورت تصادفی به آن تخصیص یافته و مقادیر چهار متغیر بالا از آن بردار، محاسبه شده است. در ادامه با توجه به ابعاد هر متغیر، تعداد درایه به دست آمده به ترتیب، به ماتریسی با ابعاد همسان با آن متغیر تبدیل می‌شود؛ برای مثال ابتدا ۱۲ درایه دوم را برای متغیر S جدا و برحسب ابعاد آن (C, G, H)، به یک ماتریس ۳ بعدی تبدیل می‌کنیم (جدول ۹). برای محاسبه متغیر بعدی، این ۱۲ درایه حذف و در ادامه، ۴۰ درایه سوم برای متغیر R جدا می‌شود.

H2		H1		
C2	C1	C2	C1	
۰/۳۵	۰/۸۷	۰/۳۶	۰/۵۸	G1
۰/۳۱	۰/۷۰	۰/۱۵	۰/۸۰	G2
۰/۸۵	۰/۱۴	۰/۴۸	۰/۵۰	G3

جدول ۹- نمایش جواب برای تخصیص مکان به سلول

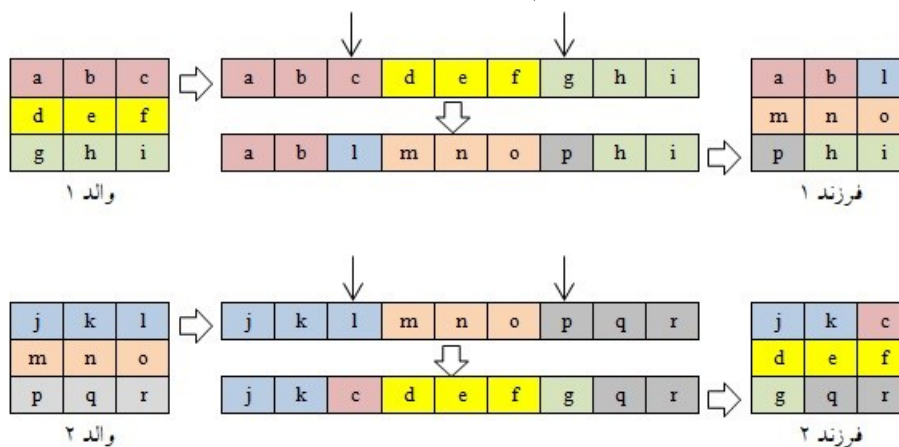
Table 9- Showing the solution for assigning a location to a cell in each period

برای انتخاب اینکه در دوره اول، کدام سلول در مکان ۱ قرار گیرد، مقادیر بردار S را برای سلول ۱ در دوره اول، به ترتیب نزولی مرتب می‌کنیم و با توجه به محدودیت موجود در مسئله که هر سلول باید به ۱ مکان تخصیص یابد، سلول با مقدار S بالاتر را به آن مکان تخصیص می‌دهیم و با حذف آن مکان، از شرکت کردن مجدد آن در عملیات تخصیص مرحله بعد جلوگیری می‌شود. به این ترتیب، خواهیم داشت: در دوره اول، مکان G2 با مقدار ۰/۸۰ به سلول ۱ و G3 با مقدار ۰/۴۸ به سلول ۲ اختصاص می‌یابد. در این مرحله، محدودیت هر سلول در یک مکان رعایت می‌شود؛ بنابراین تعداد ۲ مکان تخصیص نیافته باقی می‌ماند. در دوره دوم نیز سلول ۱ با مقدار ۰/۸۷ به مکان ۱ و G3 با مقدار ۰/۸۵ به سلول ۲ تخصیص می‌یابد.



## عملگر تقاطع

تقاطع روی دو کروموزوم به عنوان والد اعمال می شود که به طور تصادفی انتخاب می شوند و اطلاعات آنها را برای تولید دو فرزند ترکیب می کنند. الگوریتم پیشنهادی از تقاطع دو نقطه ای استفاده می کند. در این روش در هر کروموزوم، والد دو نقطه به تصادف انتخاب و عملیات برش از آنجا انجام می شود. در ادامه هر بردار ریاضی، به سه قسمت تقسیم می شود که برای تولید جواب جدید (فرزند)، بخش های ایجاد شده در بردار ریاضی والد ۱ و ۲ با یکدیگر ترکیب می شوند. شکل ۲ بیانگر نحوه انجام این ترکیب و ایجاد جواب جدید است.

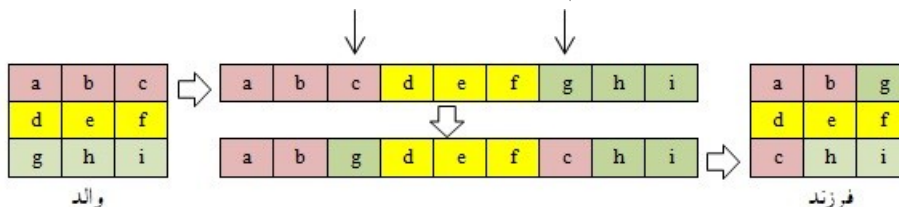


شکل ۲- ایجاد کروموزوم های جدید (فرزند) براساس عملگر تقاطع دو نقطه ای

Fig. 2- Generating of new chromosomes (child) based on the two crossover operators

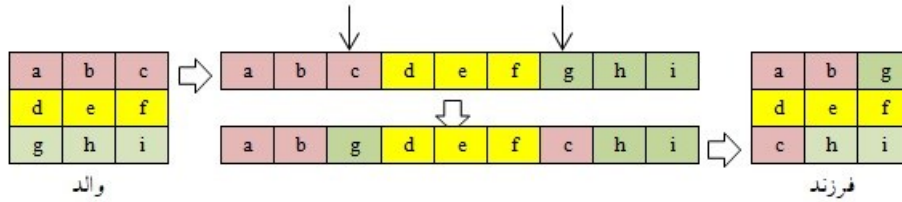
## عملگر جهش

این عملگر برای انتقال از یک جواب متداول به جواب مجاورش، در یک الگوریتم جست و جوی محلی به کار گرفته می شود و از بهینگی زود هنگام و افتادن در بهینگی محلی، جلوگیری می کند. در این عملگر به منظور ایجاد کروموزوم های جدید، ابتدا یک جواب والد به صورت تصادفی انتخاب می شود و با اجرای روش های swap، Reversion و Insertion (انتخاب به صورت تصادفی و با احتمال مساوی)، برخی از سلول های آن مطابق شکل های ۳ تا ۵ تغییر می کند. در روش Swap، دو درایه تصادفی انتخاب و محتویات آن دو با هم جابه جا می شود. در روش Reversion دو درایه به تصادف انتخاب و درایه های بین آنها به صورت آینه جابه جا می شود. روش Insertion (الحاقی) درایه تصادفی اولیه به بعد از درایه دوم انتقال می یابد.



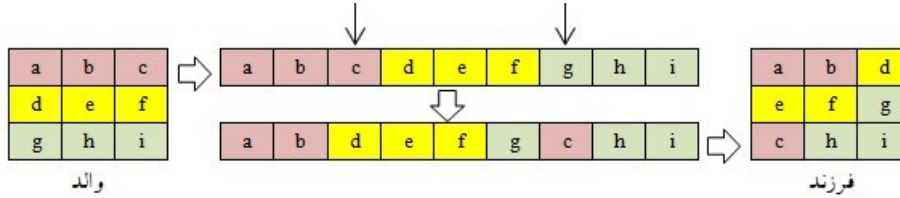
شکل ۳- ایجاد کروموزوم های جدید (فرزند) براساس روش Swap

Fig.3- Generating of new chromosomes (child) based on Swap method



شکل ۴- ایجاد کروموزوم‌های جدید (فرزند) براساس روش Reversion

Fig. 4- Generating of new chromosomes (child) based on Reversion method



شکل ۵- ایجاد کروموزوم‌های جدید (فرزند) براساس روش Insertion

Fig. 5- Generating of new chromosomes (child) based on Insertion method

در روش پیشنهادی، حداکثر تعداد تکرار از پیش تعیین شده، برای شرط توقف الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۴-۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

ابرهارت و کندی<sup>۴۲</sup> (۱۹۹۵) برای نخستین بار الگوریتم بهینه‌سازی ذرات را معرفی کردند که جزء الگوریتم‌های جمعیت‌محور به شمار می‌آید. این الگوریتم از رفتار طبیعی و گروهی پرندگان در یافتن غذا، که در یک منطقه اتفاق می‌افتد، الهام گرفته است. این رفتار هماهنگ، غریزی است و هیچ واحد کنترل مرکزی، این اجتماع را هدایت نمی‌کند. از الگوریتم MOPSO به‌عنوان یک فناوری تکاملی مبتنی بر هوش گروهی یاد می‌شود که مسئله همگرایی آهسته را به‌طور مؤثر حل می‌کند و به‌راحتی در مواجهه با مسائل با ابعاد بالا و چندهدفه، به بهینگی محلی دست می‌یابد. در حال حاضر، MOPSO در بسیاری از زمینه‌های بهینه‌سازی، به‌ویژه در زمینه بهینه‌سازی مهندسی اعمال شده است. مسئله بهینه‌سازی چیدمان تسهیلات مطالعه‌شده در این مقاله، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با ابعاد بالاست که برای حل با الگوی MOPSO بسیار مناسب است. در این الگوریتم، پرنده‌های اولیه (یعنی جواب‌ها) به‌طور تصادفی تولید می‌شوند و سپس یک سرعت اولیه، به هر یک از آنها اختصاص می‌یابد. با توجه به سرعت فعلی پرنده، فاصله آن از بهترین موقعیت در تجربه شخصی و فاصله آن از بهترین موقعیت پایه‌گذاری‌شده به‌وسیله پرندگان رهبر (بهترین جواب‌های جهانی یافت‌شده)، سرعت و موقعیت جدیدی با استفاده از فرمول رابطه (۸۲) و (۸۳) برای پرنده محاسبه می‌شود. اگر موقعیت جدید بر بهترین تجربه شخصی تسلط داشته باشد، جایگزین تجربه شخصی قدیمی خواهد شد، در غیر این صورت یکی از آنها به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. این محاسبات در رابطه (۸۴) و (۸۵) انجام می‌شود. نمادهای الگوریتم به شرح زیر است:

$X_i$  نشان‌دهنده موقعیت فعلی ذره است.  $V_i$  سرعت ذره،  $P_i$  بهترین تجربه شخصی،  $G_i$  بهترین موقعیت یافت‌شده به‌وسیله ذرات رهبر،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی بین ۰ و ۱،  $w$  را به‌عنوان وزن اینرسی نشان می‌دهد.  $c_1$  و  $c_2$  مقادیر شتاب‌اند.  $w$ ،  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر وزنی سرعت فعلی، بهترین موقعیت در تجربه شخصی و بهترین تجربه جهانی بر سرعت جدیدند. الگوریتم MOPSO پیشنهادی، مجموعه NDS را ذرات رهبر فرض می‌کند.

همان طور که در رابطه (۸۲) مشخص است، تنها یک رهبر باید برای هر ذره ( $G_i$ ) انتخاب شود، در حالی که مجموعه NDS چندین عضو دارد. فاصله تراکم لیدرها از مجموعه NDS، با توجه به شاخصشان انتخاب می شوند. اگر تعداد NDSها از اندازه آرشیو بیشتر شود، الگوریتم، NDSهای با کمترین مقادیر، فاصله تراکمی را از مجموعه NDS حذف می کنند.

$$V_i(t) = w(t-1)V_i(t) + c_1r_1(P_i(t-1) - X_i(t-1)) + c_2r_2(G_i(t-1) - X_i(t-1)) \quad (82)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (83)$$

$$P_i(t) = P_i(t-1) \text{ if } f(X_i(t)) \geq f(P_i(t-1)) \quad (84)$$

$$P_i(t) = X_i(t) \text{ if } f(X_i(t)) \leq f(P_i(t-1)) \quad (85)$$

مراحل الگوریتم MOPSO به صورت ذیل تعریف می شود:

- ۱- جمعیت اولیه ایجاد و ذرات جمعیت ارزیابی شدند؛
- ۲- اعضای غیر مغلوب، جمعیت را جدا و آنها را در مخزن ذخیره می کند؛
- ۳- فضای هدف کشف شده، باید دسته بندی شود؛
- ۴- از میان مخزن برای هر ذره، یک رهبر انتخاب می شود؛
- ۵- برای هر ذره، بهترین تجربه شخصی به روزرسانی می شود؛
- ۶- عضوهای غیر مغلوب جمعیت فعلی، به مخزن اضافه می شود؛
- ۷- اعضای مغلوب آرشیو حذف می شوند.
- ۸- ظرفیت مخزن با ظرفیت تعیین شده مقایسه شود و عضوهای اضافه حذف شوند.
- ۹- شرایط توقف الگوریتم بررسی می شود. اگر شرط توقف محقق نشده به گام ۳ برگردد، در غیر این صورت الگوریتم پایان می یابد.

### نحوه نمایش جواب

به منظور نمایش جواب، مسئله پیشنهادی در الگوریتم MOPSO هر ذره به صورت یک درایه تعریف شده و در یک بردار ریاضی به کار رفته است. تعداد درایه های هر بردار، برابر حاصل ضرب تعداد متغیرهای تشکیل دهنده آن است؛ برای مثال، برای مسئله ای که یک بردار ( $X$ ) برحسب سه متغیر ( $M, C, H$ ) دارد و تعداد  $M$  برابر ۴، تعداد  $C$  برابر ۲ و تعداد  $H$  برابر ۲ است، تعداد درایه های بردار ریاضی، مطابق شکل ۶ برابر ۱۶ خواهد بود.

مقادیر X	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۷۳	۰/۱۳	۰/۸۳	۰/۱۵	۰/۶۷	۰/۸۶	۰/۵۶	۰/۱۲	۰/۶۸	۰/۴۰	۰/۵۱	۰/۹۸
----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

شکل ۶- تولید جواب اولیه برای بردار x

Fig. 6- Generating the initial solution for the vector x

در ادامه با توجه به ابعاد بردار،  $X$  برداری ۳ بعدی مطابق جدول ۱۰ تشکیل می دهیم که مقادیر آن از اعداد تصادفی تولید و در مرحله قبل اخذ می شود. مقدار و درایه هر کدام از اعضای این ماتریس، مشخص کننده نحوه تخصیص هر ماشین به هر سلول در هر دوره خواهد بود.

## جدول ۱۰- نمایش جواب برای تخصیص ماشین به سلول

Table 10-Showing the solution for assigning a machine to a cell in each period

	H1		H2	
	C1	C2	C1	C2
M1	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۶۷	۰/۸۶
M2	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۵۶	۰/۱۲
M3	۰/۷۳	۰/۱۳	۰/۶۸	۰/۴۰
M4	۰/۸۳	۰/۱۵	۰/۵۱	۰/۹۸

برای انتخاب اینکه در دوره اول کدام ماشین‌ها در سلول ۱ قرار می‌گیرند، مقادیر بردار  $X$  را برای سلول ۱ در دوره اول، به ترتیب نزولی مرتب می‌کنیم و با توجه به محدودیت موجود در مسئله، که به هر سلول حداقل ۱ ماشین تخصیص می‌یابد، ماشین با مقدار  $X$  بالاتر را به آن سلول تخصیص می‌دهیم و با حذف آن ماشین، از شرکت کردن مجدد آن در عملیات تخصیص مرحله بعد، جلوگیری می‌شود. به این ترتیب، خواهیم داشت: در دوره اول، ماشین‌های  $M4$  با مقدار  $۰/۸۳$  به سلول ۱ و  $M1$  با مقدار  $۰/۸۵$  به سلول ۲ اختصاص می‌یابد. در این مرحله، محدودیت حداقل یک ماشین در هر سلول رعایت می‌شود. برای ادامه فرایند، دو ماشین تخصیص یافته قبلی حذف می‌شوند و برای رعایت محدودیت در هر سلول، حداکثر ۲ ماشین تخصیص می‌یابد و فرایند بالا دوباره تکرار می‌شود. به این ترتیب، ماشین  $M3$  با مقدار  $۰/۷۳$  به سلول ۱ و  $M2$  با مقدار  $۰/۰۴$  به سلول ۲ اختصاص می‌یابد. شایان ذکر است در مرحله آخر،  $M2$  تنها ماشین باقی مانده برای تخصیص است؛ اگرچه مقدار آن کم است، تخصیص به سلول ۲ انجام می‌شود. در دوره دوم نیز ماشین‌های  $M1$  و  $M3$  به ترتیب با مقادیر  $۰/۶۸$  و  $۰/۵۶$  به سلول ۱ و  $M4$  و  $M2$  با مقادیر  $۰/۹۸$  و  $۰/۱۲$  به سلول ۲ تخصیص می‌یابند.

## ۳-۵- معیارهای مقایسه کارایی روش‌های چندهدفه

با توجه به اینکه مسائل چندهدفه، جواب‌های غیر مغلوب تولید می‌کنند، برای مقایسه الگوریتم‌ها، به معیارهایی نیاز داریم که براساس جواب‌های غیر مغلوب طراحی شوند. در این مقاله، از معیارهای عملکرد زیر برای مقایسه استفاده شده است:

۳-۵-۱- شاخص یکنواختی فضا<sup>۴۳</sup>

متریک فاصله، این امکان را به ما می‌دهد تا یکنواختی نقطه پخش شده در مجموعه جواب را تعیین کنیم. جواب‌های با مقدار فاصله کمتر، اولویت بیشتری خواهند داشت و نشان‌دهنده فاصله کمتر جواب‌های مجموعه پارتو از یکدیگر و یکنواختی بیشتر جواب‌هاست. تعریف این متریک در زیر آمده است:

$$Spacing = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})}{|Q|}} \quad (۸۶)$$

$d_i$  برابر با کمینه مجموع فاصله نقطه پارتوی  $i$  ام از هر یک از نقاط پارتوی مجاور و  $\bar{d}$  میانگین مقادیر و  $|Q|$  اندازه مجموعه پارتو است.

### ۳-۵-۲- شاخص پراکندگی<sup>۴۴</sup>

در این معیار، طول قطر فضای مکعبی با استفاده از دورترین مقادیر جواب‌های غیر مغلوب، محاسبه می‌شود. این فاصله با استفاده از فاصله اقلیدسی، بین دو جواب در فضای هدف به دست می‌آید. جواب‌های با مقدار بالاتر از این متریک، کیفیت بهتری خواهد داشت که نشان‌دهنده عملکرد برتر الگوریتم مربوطه است. مقدار متناظر این متریک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^L (\max_{i=1:|Q|} f_i^i - \min_{i=1:|Q|} f_i^i)^2} \quad (۸۷)$$

در این رابطه  $L$  تعداد اهداف و  $|Q|$  اندازه مجموعه پارتو است.

### ۳-۵-۳- میانگین فاصله ایده‌آل<sup>۴۵</sup>

این متریک عمدتاً برای محاسبه فاصله جواب‌های پارتو، از یک جواب ایده‌آل استفاده می‌شود. جواب‌های با مقدار MID کمتر، بهتر از جواب‌های دیگر خواهند بود. مقدار متناظر این متریک، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (۸۸)$$

$$C_i = \sqrt{(f_{1i} - f_1^*)^2 + (f_{2i} - f_2^*)^2 + \dots + (f_{li} - f_l^*)^2} \quad (۸۹)$$

در این رابطه،  $C_i$  فاصله هر جواب/نقطه از مجموعه پارتو از نقطه ایده‌آل است که به صورت اقلیدسی محاسبه شده است. همچنین  $f_{li}$  مقدار تابع هدف  $l$  ام در جواب  $i$  ام را نشان می‌دهد.

### ۳-۵-۴- زمان پردازش<sup>۴۶</sup>

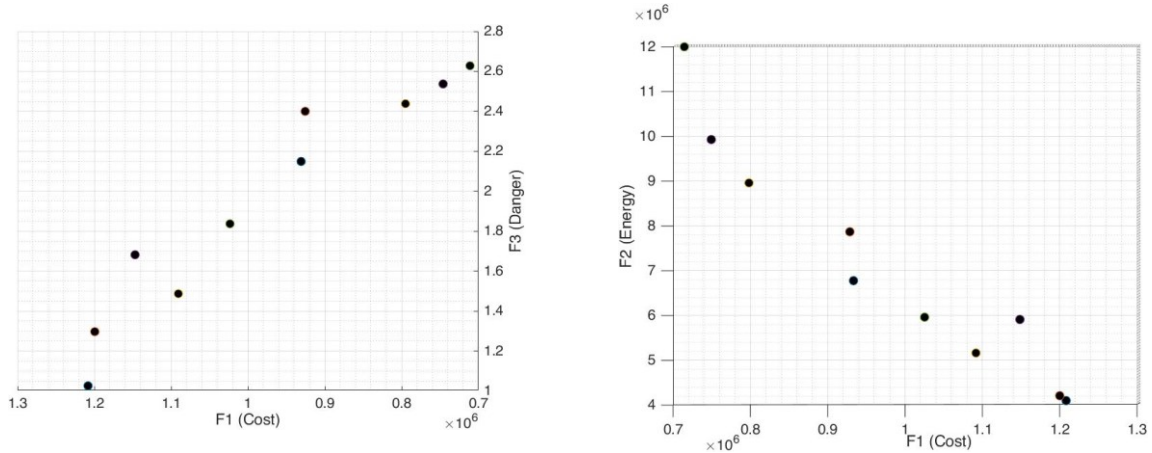
مدت زمانی که واحد پردازش مرکزی (CPU) برای پردازش ساختار یک برنامه کامپیوتری یا سیستم عامل به کار می‌برد. زمان CPU برحسب ساعت یا ثانیه اندازه‌گیری می‌شود و تنها زمانی را در بر می‌گیرد که در طی آن برنامه، واقعاً از CPU برای انجام کارهایی مانند انجام عملیات حسابی و منطقی استفاده می‌شود؛ برای مثال، انتظار برای عملیات ورودی/خروجی (I/O) یا وارد شدن به حالت کم‌مصرف (بیکار) زمان CPU نیست.

### ۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

#### ۴-۱- تأیید و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

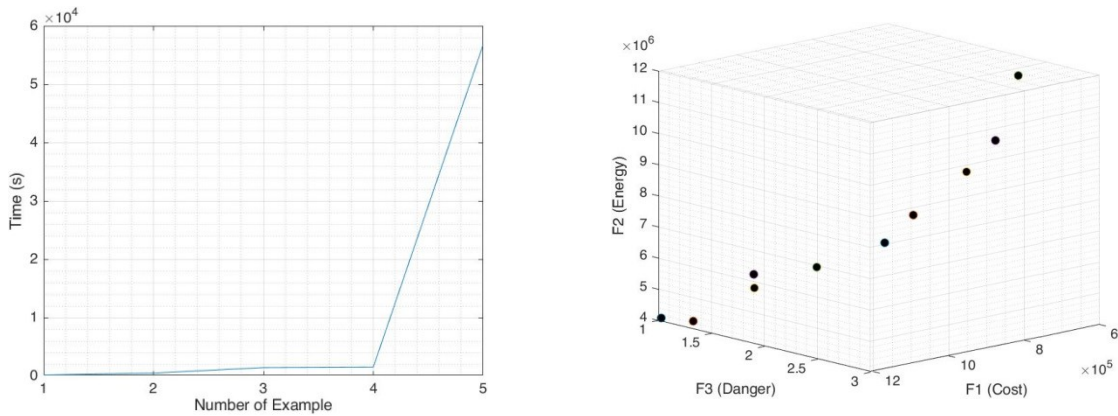
در این بخش، تعداد ۵ مثال در مقیاس کوچک که در جدول ۱۱ ارائه شده است، برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی بررسی می‌شوند. با توجه به ماهیت چند هدفه مدل پیشنهادی و نمایش مرز پارتو این توابع، از روش اسپیلون محدودیت استفاده شده است که در نرم‌افزار گمز نسخه ۲/۲۵ کدنویسی و سپس با استفاده از حل‌کننده سی‌پلکس حل شده است. اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل در جدول ۱۲، نمایش داده شده است؛ برای مثال در نمونه ۱، برای طراحی چیدمان تسهیلات، تعداد سه مکان کاندید به صورت ردیفی، دو سلول، چهار ماشین، پنج اپراتور با مهارت‌های متنوع و همچنین چهار نوع قطعه/محصول در دو دوره زمانی در نظر گرفته شده است. نتایج

حل مسئله پیشنهادی با نرم افزار گمز و روش اپسیلون محدودیت در ادامه نمایش داده شده است که به ایجاد جبهه پارتو منجر می شود. شایان ذکر است تمامی محاسبات در یک رایانه ۶۴-بیت با مشخصات Intel® Core™ i7 – 7500 با فرکانس ۳٫۴ گیگاهرتز و با ۸ گیگابایت رم انجام شده است.



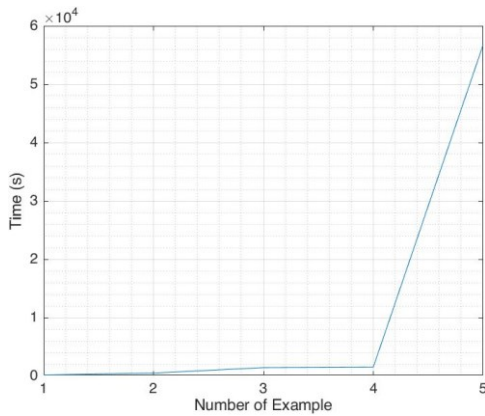
شکل ۷- مرزهای پارتوی دوبعدی ناشی از حل مسئله برای اعتبارسنجی مدل- روش اپسیلون محدودیت

Fig. 7- 2D Pareto frontiers resulting from problem solving for model validation-Epsilon-constraint method



شکل ۸- مرزهای پارتو سه بعدی برای اعتبارسنجی مدل

Fig. 8- 3D Pareto frontiers for model validation



شکل ۹- تغییر زمان حل با افزایش ابعاد مسئله در نمونه های کوچک

Fig. 9- The amount of change in solution time with increasing problem dimensions in small samples

بر اساس مرز دو بعدی پارتو که با روش اپسیلون محدودیت تشکیل شده است (شکل ۷)، می توان نتیجه گرفت که عملکرد تابع هدف دوم و سوم با تابع اول در تضاد هستند، یعنی با افزایش هزینه ها به طور جداگانه، میزان مصرف انرژی و خطرات بالقوه محیطی کاهش می یابد. در شکل ۸ نمایشی از مرز سه بعدی پارتو و وضعیت توابع هدف مشخص شده است. نرم افزار گمز می تواند مسائل ۱ تا ۵ را در زمان معقول حل کند، ولی مسائل ۶ تا ۱۵ که به با ابعاد متوسط و بزرگ معرفی شده اند، به دلیل افزایش درخور توجه زمان محاسبه، تقریباً با این روش حل نمی شوند. این موضوع و همچنین بیان پیچیدگی مسئله چیدمان تسهیلات به وسیله دیگر نویسندگان (سلیم پور و همکاران، ۲۰۲۱) دلیلی بر ماهیت NP-hard مسئله است.

جدول ۱۱- مشخصات نمونه‌های طراحی شده در اندازه‌های مختلف

Table 11- Specifications of the samples designed in different sizes

مرجع	ابعاد مسئله	شماره نمونه	تعداد قطعه	تعداد ماشین	تعداد عملیات	تعداد مسير	تعداد سلول	تعداد اپراتور	تعداد دوره	تعداد مکان
سختی و همکاران <sup>۴۷</sup> (۲۰۱۶)	کوچک	۱	۴	۴	۴	۴	۲	۵	۲	۴
		۲	۵	۴	۴	۴	۲	۵	۲	۴
		۳	۵	۵	۴	۴	۲	۶	۲	۴
		۴	۵	۵	۴	۴	۲	۶	۲	۴
		۵	۵	۵	۴	۴	۳	۶	۲	۴
چانگ و همکاران <sup>۴۸</sup> (۲۰۱۳)	متوسط	۶	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۳	۱۲	۲	۴
		۷	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۳	۱۲	۲	۴
		۸	۱۲	۱۰	۱۲	۵	۳	۱۲	۲	۴
		۹	۱۲	۱۰	۱۲	۵	۳	۱۲	۲	۴
		۱۰	۱۲	۱۰	۱۲	۶	۳	۱۲	۲	۴
سختی و همکاران (۲۰۱۶)	بزرگ	۱۱	۲۴	۱۴	۱۴	۴	۲	۱۵	۲	۶
		۱۲	۲۴	۱۴	۱۴	۷	۲	۱۵	۲	۶
		۱۳	۲۴	۱۴	۱۴	۷	۴	۱۵	۲	۶
		۱۴	۲۴	۱۴	۱۴	۷	۴	۲۰	۲	۶
		۱۵	۲۴	۱۶	۱۶	۷	۴	۲۰	۲	۶

در ادامه، هر ۵ مسئله نمونه قسمت قبل (ابعاد کوچک) با الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO حل شده است که در نرم‌افزار متلب نسخه R2020b کدنویسی شده‌اند. به منظور مقایسه نتایج حاصل از روش اپسیلون محدودیت و الگوریتم‌های پیشنهادی، از شاخص‌های عملکردی مانند شاخص یکنواختی، پراکندگی، میانگین فاصله ایده‌آل و زمان پردازش استفاده می‌شود. حل مکرر<sup>۴۹</sup> برای حذف ماهیت تصادفی الگوریتم‌های فراابتکاری در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور، هریک از روش‌ها و الگوریتم‌های پیشنهادی در مسائل، با ابعاد کوچک ۵ بار، در ابعاد متوسط ۳ بار و در ابعاد بزرگ ۲ بار اجرا و مقدار میانگین هریک از شاخص‌های عملکردی، مشخص شده است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های عملکردی براساس در نظر گرفتن مقدار میانگین آنها در نمونه‌های با ابعاد کوچک، در جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد بهترین زمان پردازش، بهترین مقدار DM با الگوریتم NSGA-II، بهترین مقدار MID با الگوریتم اپسیلون محدودیت و بهترین مقدار SM با الگوریتم MOPSO به دست آمده است.

جدول ۱۲- تولید داده‌های مسئله  
Table 12- Problem data generation

ردیف	پارامترها	علامت	مقادیر	واحد
۱	هزینه استخدام	$C_k^{HI}$	$U(60, 80)$	دلار
۲	هزینه اخراج	$C_k^{FI}$	$U(40, 60)$	دلار
۳	هزینه آموزش	$C_{k,m}^{TR}$	$U(105, 125)$	دلار
۴	هزینه دستمرد	$C_{k,m}^{SA}$	$U(0/17, 0/30)$	دلار
۵	هزینه جابه‌جایی درون سلولی قطعه	$C_p^{IA}$	۲/۵	دلار
۶	هزینه جابه‌جایی بین سلولی قطعه	$C_p^{IE}$	$U(5, 10)$	دلار
۷	هزینه جابه‌جایی بین سلولی ماشین	$C_m^{Mo}$	۵۰	دلار
۸	هزینه نصب و جداسازی ماشین	$C_m^{IU}$	۵۰	دلار
۹	هزینه متغیر در تولید	$C_v^m$	$U(2, 15)$	دلار
۱۰	میزان مصرف انرژی به وسیله ماشین	$EN_{P,m}$	$U(10, 170)$	کیلووات ساعت
۱۱	میزان مصرف انرژی در جابه‌جایی قطعه	$EN_{P,o}$	$U(110, 360)$	کیلووات ساعت
۱۲	زمان در دسترس برای ماشین	$TM_m^h$	۵۰۰	ساعت
۱۳	زمان پردازش	$T_{o,p,j,m}^h$	$U(0,1, 0,9)$	ساعت
۱۴	میزان تقاضای محصول	$D_p^h$	$U(60, 120)$	واحد
۱۵	خطرات بالقوه ماشین‌ها	$IN_{m,g}$	$U(0, 1)$	-

جدول ۱۳- مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO  
Table 13-Optimal parameter values of NSGA-II and MOPSO algorithms

الگوریتم چندهدفه	پارامتر	اندازه مسئله		
		کوچک	متوسط	بزرگ
NSGA-II	اندازه جمعیت در الگوریتم پیشنهادی (Pop)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
	تعداد نسل‌ها در الگوریتم پیشنهادی (Iter)	۱۰۰	۱۵۰	۱۰۰
	احتمال انتخاب کروموزوم‌ها برای عمل تقاطع (Pc)	۰/۳	۰/۲	۰/۳
	احتمال انتخاب کروموزوم‌ها برای عمل جهش (Pm)	۰/۷	۰/۸	۰/۷
MOPSO	اندازه ذره در الگوریتم پیشنهادی (Pop)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
	ضریب $C_1$	۲	۱	۲
	ضریب $C_2$	۲	۱	۲
	ضریب N-Grid	۳	۵	۳

روش اسپیلون محدودیت فقط برای مسائل با ابعاد کوچک کارایی دارد و تنها برای این مسائل می‌تواند در زمان منطقی یک مجموعه جواب پارتو ارائه دهد. با توجه به NP-hard بودن مدل، هرچه ابعاد مسائل افزایش می‌یابد، زمان پردازش افزایش چشم‌گیر می‌یابد و روش اسپیلون محدودیت، کارایی خود را از دست می‌دهد (شکل ۹)؛ لذا نمی‌توان از این روش برای حل و ارزیابی مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ استفاده کرد؛ به همین منظور برای نمونه‌های با ابعاد متوسط و بزرگ نیز دو الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی (NSGA-II و MOPSO) و شاخص‌های عملکردی مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای این امر تعداد ۵ نمونه با ابعاد متوسط (نمونه‌های ۶ تا ۱۰) و ۵ نمونه با ابعاد بزرگ (نمونه‌های ۱۱ تا ۱۵) که از ادبیات موضوع الهام گرفته شده، تعریف شده است. ابعاد این مسائل نمونه



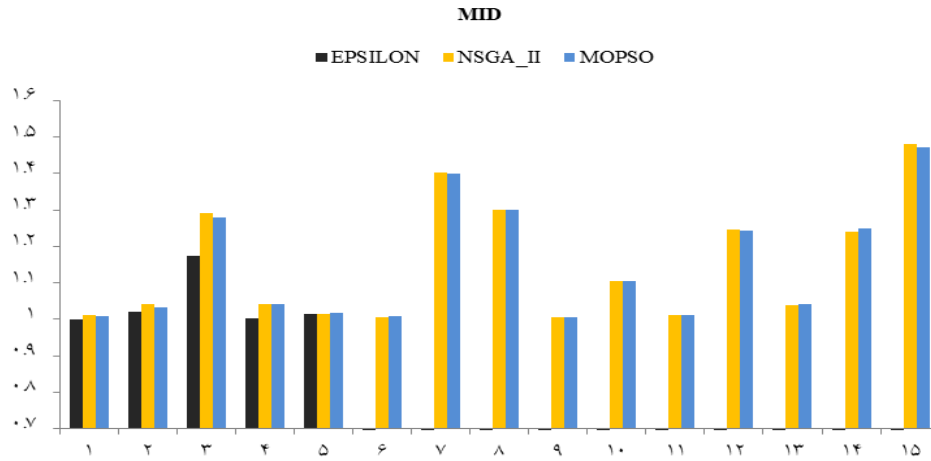
در جدول ۱۱، پارامترهای مسئله در جدول ۱۲، پارامترهای تنظیم شده دو الگوریتم فراابتکاری در جدول ۱۳ و نتایج حاصل در جدول ۱۴ آورده شده است.

جدول ۱۴- مقایسه شاخص‌های عملکردی حاصل از محاسبات مسائل

Table 14- Comparison of performance indicators resulting from problem calculations

اپسیلون محدودیت				الگوریتم MOPSO				الگوریتم NSGA-II				شماره																											
Time	SM	DM	MID	Time	SM	DM	MID	Time	SM	DM	MID	مسئله																											
۱۶۵	۱/۴۲	۲۵۰۸۳	۱/۰۰۱	۷۹/۹۴۸	۱/۴۵۹۳	۲۲۰۴۵	۱/۰۰۸	۵۵/۰۶۸	۱/۳۹۳	۲۵۰۸۳	۱/۰۱۱۵	۱																											
۴۸۳	۱/۱۳	۲۲۰۴۲/۵	۱/۰۲۱	۷۷/۳۹۱	۱/۱۶۲	۲۳۰۸۰/۰۹	۱/۰۳۱	۵۹/۶۷	۱/۱۳۲	۲۴۰۷۱/۳۴	۱/۰۴۱	۲																											
۱۴۱۸	۰/۹۹	۱۰۵۵۳/۲	۱/۱۷۵	۵۴/۷۱۶	۰/۹۹۸	۱۱۶۶۲/۱۵	۱/۲۸۱	۶۲/۱۷۳	۰/۹۹۰	۱۲۹۲۰/۲۵	۱/۲۹۳	۳																											
۱۵۰۱	۱/۲	۱۹۶۰۴/۵	۱/۰۰۳	۱۰۳/۹۶۴	۱/۲۳۴	۲۲۴۰۳/۲۶	۱/۰۴۵	۸۴/۱۳۲	۱/۲۴۱	۲۲۵۹۳/۲۶	۱/۰۴۲	۴																											
۵۶۷۸۷	۱/۳۱	۱۲۴۷۵	۱/۰۱۳	۲۵۰/۷۲۳	۱/۳۱۰	۱۳۷۱۰	۱/۰۱۷	۲۲۸/۰۹۷	۱/۳۴۹	۱۴۰۷۵	۱/۰۱۴	۵																											
N/A				۱۶۵۱/۵۳				۱/۳۴۱۵				۱۶۰۲۶				۱/۰۰۸				۱۵۶۹/۱۱				۱/۲۵۶۶				۱۵۹۶۸				۱/۰۰۶				۶			
				۳۶۵۳/۵۶				۱/۲۸۸۳				۲۷۰۱۸/۱				۱/۴۰۰				۳۴۸۳/۶۶				۱/۱۰۶۴				۲۶۰۷۴/۶				۱/۴۰۲۷				۷			
				۳۴۱۷/۴۹				۱/۲۱۴۷				۳۶۱۰۶/۲				۱/۳۰۱				۳۳۶۷/۸۷				۱/۱۴۸۶				۳۶۱۰۲/۶				۱/۰۰۴۱				۸			
				۳۸۰۲/۶۷				۱/۴۸۰۸				۳۴۶۷۳/۳				۱/۰۰۴				۳۶۶۰/۵۶				۱/۳۳۸۱				۳۲۱۵۴				۱/۱۰۵۲				۹			
				۴۹۸۸/۳۱۷				۱/۳۵۵				۳۴۰۶۸/۳۷				۱/۱۰۵۳				۴۸۳۶/۹۵				۱/۲۷۷۴				۱۳۱۳۵				۱/۰۱۲۵				۱۰			
				۱۰۱۲۴/۲۵				۱/۴۷۸				۳۶۷۵۰				۱/۰۱۲				۱۰۰۲۴/۸۷				۱/۳۲۴				۳۶۵۴۱/۳۵				۱/۰۱۲				۱۱			
				۱۲۱۲۴/۷۴				۱/۱۹۵				۳۵۲۳۰				۱/۲۴۳				۱۲۰۲۴/۲۵				۱/۲۵۵				۳۴۷۵۱				۱/۲۴۵				۱۲			
				۱۱۱۰۴/۳۸				۰/۹۸۵				۲۹۸۵۲				۱/۰۴۲				۱۰۰۳۴/۴۹				۱/۰۰۵				۲۹۰۰۱/۷۴				۱/۰۳۹				۱۳			
				۱۱۲۰۴/۱۴				۱/۴۲۱				۳۹۴۴۱				۱/۲۵۲				۱۱۰۲۴/۱۲				۱/۳۵۸				۳۹۰۷۴				۱/۲۴۳				۱۴			
				۱۵۰۲۴/۴۹				۱/۳۸۵				۲۹۸۷۴				۱/۴۷۱				۱۴۰۲۴/۳۷				۱/۳۹۸				۲۹۴۵۱/۴				۱/۴۸۲				۱۵			

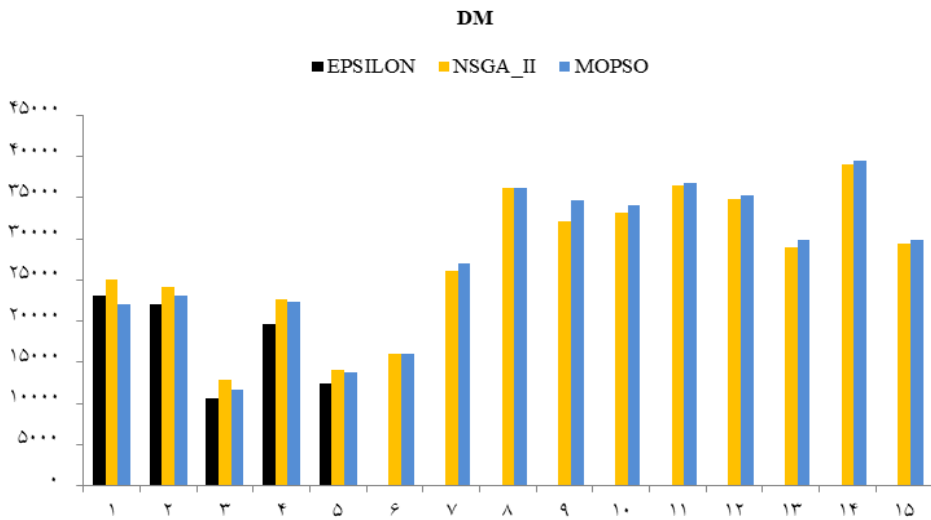
نتایج مقایسه بین الگوریتم‌ها در جدول ۱۴ نشان می‌دهد مقادیر شاخص‌های CPU Time، SM در الگوریتم NSGA-II بهتر از الگوریتم MOPSO است و در شاخص MID عملکرد دو الگوریتم به هم نزدیک است. شاخص DM در الگوریتم MOPSO مقادیر بهتری را نشان می‌دهد. این مقایسه با استفاده از نمودارهای زیر بررسی شدنی است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نمایان است، مقدار شاخص MID در نمونه‌های با اندازه کوچک در روش اپسیلون محدودیت، از دیگر الگوریتم‌ها کمتر است. در نمونه‌های با اندازه متوسط و بزرگ و با کنار گذاشته شدن روش اپسیلون محدودیت، مقدار این شاخص برای الگوریتم NSGA-II از الگوریتم MOPSO بهتر است.



شکل ۱۰- مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص میانگین فاصله از ایده‌آل

Fig. 10- Algorithm comparison in terms of the MID

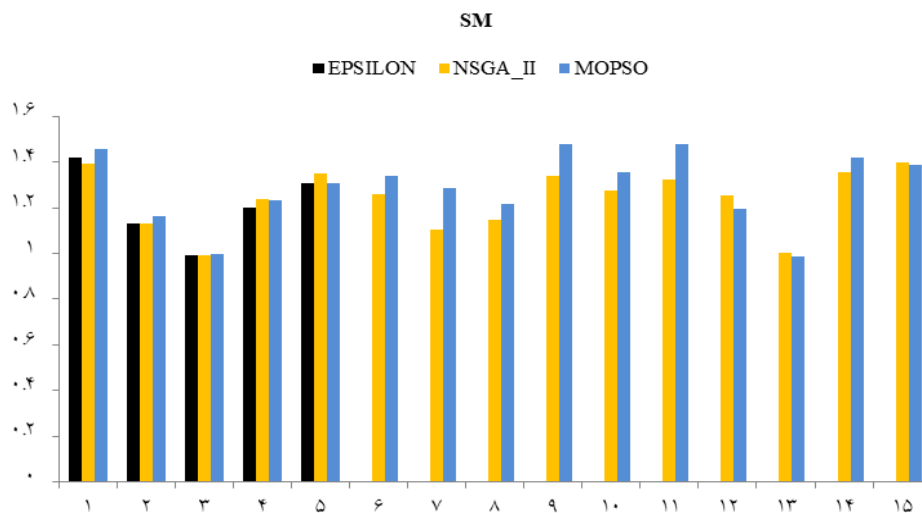
شکل ۱۱ نشان می‌دهد مقدار شاخص DM برای نمونه‌های با اندازه کوچک در الگوریتم NSGA-II و در نمونه‌های با ابعاد متوسط و بزرگ الگوریتم MOPSO، مقادیر بهتری را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۱۱- مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص پراکندگی

Fig. 11- Algorithm comparison in terms of the DM

با توجه به شکل ۱۲، مقدار شاخص SM برای نمونه‌های با اندازه کوچک، متوسط و بزرگ در الگوریتم NSGA-II مقادیر بهتری است.

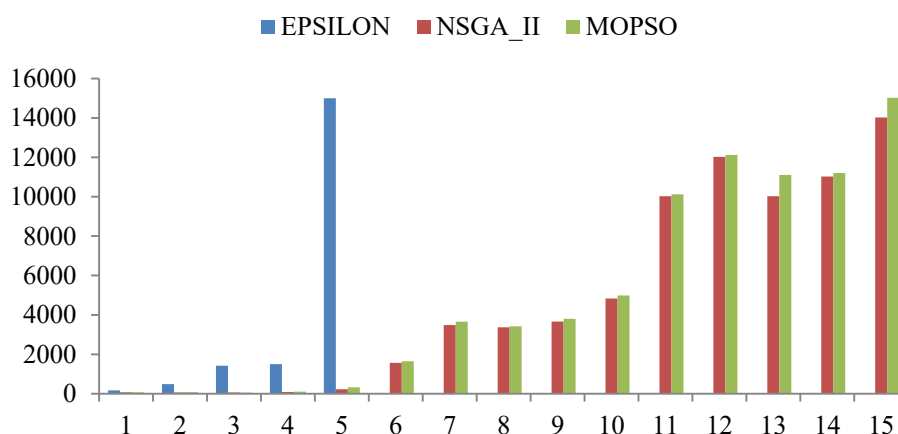


شکل ۱۲- مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص یکنواختی فضا

Fig. 12- Algorithm comparison in terms of the SM

شکل ۱۳ نمایانگر این نکته است که زمان حل الگوریتم، رابطه مستقیمی با ابعاد مسئله دارد، به طوری که با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل و محاسبه نیز افزایش یافته است. نکته حائز اهمیت در این شکل، رشد نمایی زمان حل مسائل با روش اپسیلون محدودیت است، به نحوی که به یک باره با افزایش تعداد سلول از ۲ به ۳ و افزایش تعداد مکان کاندید از ۳ به ۴، رشد نمایی را شاهدیم. مقدار این افزایش حدود ۵۷۰۰۰ ثانیه است که به علت حفظ مقیاس جدول برای نمایش دیگر نمونه‌ها، این مقدار ۱۶۰۰۰ ثبت شده است. بهترین زمان حل در این شاخص، برای تمامی مسائل مربوط به الگوریتم NSGA-II است.

### CPU Time



شکل ۱۳- مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص زمان پردازش

Fig. 13- Algorithm comparison in terms of the CPU Time

در ادامه به منظور اطمینان از تحلیل‌ها و نتایج احصاشده درباره نحوه عملکرد دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO از آزمون‌های استاندارد استفاده شده است. برای این امر در مرحله اول، نرمال بودن شاخص‌ها آزمون شده است. برای این امر، از آزمون کولموگروف اسمیرنوف استفاده شده است. فرض صفر در آزمون کولموگروف

اسمیرنف، توزیع نرمال داده‌هاست. به عبارت دیگر اگر میزان معناداری، بزرگ‌تر از ۰.۰۵ باشد، فرض صفر تأیید می‌شود، یعنی توزیع داده‌ها نرمال است. با توجه به مقدار p-value که برای تمام شاخص‌های عملکردی مقدراری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ را نمایش می‌دهد، فرض نرمال بودن برای تمام شاخص‌ها برقرار است. در این پژوهش، به‌منظور مقایسه دو الگوریتم پیشنهادی از آزمون T استفاده شده است که مقدار فاصله اطمینان در آن ۹۵ درصد است. فرض صفر برای این آزمون، یکسان بودن عملکرد هر شاخص در هر دو الگوریتم پیشنهادی است و در مقابل فرض یک برای این آزمون، عملکرد متفاوت بین دو الگوریتم را نشان می‌دهد. برتری الگوریتم‌های پیشنهادی در هر شاخص، در ستون آخر جدول ۱۵ ارائه شده است.

جدول ۱۵- نتایج آزمون فرض برای مقایسه دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO پیشنهادی

Table 15- Hypothesis test results for comparing two proposed NSGA-II and MOPSO algorithms

ردیف	شاخص عملکردی	نوع آزمون	الگوریتم	معناداری P-Value	نتیجه	الگوریتم برتر
۱	MID	T	NSGA-II MOPSO	۰/۳۴۲	فرض صفر رد نمی‌شود	تفاوتی ندارند
۲	DM	T	NSGA-II MOPSO	۰/۰۱۴	فرض صفر رد می‌شود	MOPSO
۳	SM	T	NSGA-II MOPSO	۰/۰۴۲	فرض صفر رد می‌شود	NSGA-II
۴	CPU Time	T	NSGA-II MOPSO	۰/۰۲۶	فرض صفر رد می‌شود	NSGA-II

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل چندهدفه برای طراحی چیدمان تسهیلات، با در نظر گرفتن ابعاد پایداری در سیستم تولید سلولی در شرایط پویا پیشنهاد و برای اعتبارسنجی، حل مدل پیشنهادی و دستیابی به یک مجموعه جواب پارتوی مناسب، از روش اسپیلون محدودیت و الگوریتم‌های فراابتکاری MOPSO و NSGA-II استفاده شده است. همچنین به‌منظور بررسی عملکرد روش‌ها و الگوریتم‌های پیشنهادی، جواب‌های به دست آمده از حل چند مسئله نمونه در ابعاد مختلف، که از پیشینه موضوع اقتباس شده است، از نظر شاخص‌های پراکندگی، میانگین فاصله از ایده‌آل، یکنواختی فضا و مدت زمان پردازش مقایسه شدند. بررسی نتایج حاصل از مقایسه‌ها نشان داد الگوریتم NSGA-II در ایجاد مجموعه جواب پارتوی غیر مغلوب در مسائلی با ابعاد کوچک، کارایی بهتری نسبت به MOPSO و اسپیلون محدودیت دارد، به‌خصوص این کارایی در شاخص مدت زمان لازم برای حل مسائل، بیشتر نمایان است. با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل مدل به روش اسپیلون محدودیت به‌شدت افزایش یافته است؛ بنابراین این روش کارایی خود را برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ در زمان مناسب از دست داده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل با ابعاد بزرگ، از آزمون T استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در مجموع عملکرد الگوریتم NSGA-II در بیشتر مواقع از الگوریتم MOPSO بهتر است. برای انجام مطالعات آتی، بررسی عملکرد دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل پیشنهادی، پیشنهاد می‌شود. همچنین ترکیب دیگر عوامل صنعتی دنیای واقعی، مانند محدودیت منابع و انرژی مصرفی در مرحله جابه‌جایی، زمان بیکاری تسهیلات و ابعاد نامساوی تسهیلات، برای تحقیقات آتی بسیار باارزش است. علاوه بر این، عدم قطعیت پارامترها، که یکی از موضوعات اصلی و کاربردی در دنیای واقعی است، در میزان تقاضا یا زمان پردازش به مدل اضافه می‌شود.

## References

- Bagheri, M., & Bashiri, M. (2014). A new mathematical model towards the integration of cell formation with operator assignment and inter-cell layout problems in a dynamic environment. *Applied Mathematical Modelling*, 38(4), 1237-1254. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.08.026>
- Bakhshi-Khaniki, H., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2023). Integrated Dynamic Cellular Manufacturing Systems and Hierarchical Production Planning with Worker Assignment and Stochastic Demand. *International Journal of Engineering*, 36(2), 348-359. <https://doi.org/10.5829/ije.2023.36.02b.14>
- Balaman, Ş. Y. (2016). Investment planning and strategic management of sustainable systems for clean power generation: An  $\epsilon$ -constraint based multi objective modelling approach. *Journal of cleaner production*, 137, 1179-1190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.202>
- Bijarchiyan, M., Sahebi, H., & Mirzamohammadi, S. (2020). A sustainable biomass network design model for bioenergy production by anaerobic digestion technology: using agricultural residues and livestock manure. *Energy, Sustainability and Society*. <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00252-7>
- Burggraef, P., Wagner, J., & Heinbach, B. (2021). Bibliometric study on the use of machine learning as resolution technique for facility layout problems. *IEEE Access*, 9, 22569-22586. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054563>
- Chang, C. C., Wu, T. H., & Wu, C. W. (2013). An efficient approach to determine cell formation, cell layout and intracellular machine sequence in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.07.009>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Doroudyan, M., & Khoshghalb, A. (2021). Robust design for facility layout problem in cellular manufacturing systems with uncertain demand. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 17th International Industrial Engineering Conference, 13(Special issue), 1-11. [https://www.jise.ir/article\\_135699.html](https://www.jise.ir/article_135699.html)
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, <https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215>
- Eia. (2013). Annual Energy Outlook. United States Energy Informaiton Administration (US EIA), 25. <https://www.eia.org/topics>
- Ehrgott, M. (2005). Multicriteria Optimization, *Springer Science & Business Media*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-22199-0>
- Fakhrzad, M. B., Barkhordary, F., & Afari Nodoushan, A. J. (2022). A Mathematical Model for Dynamic Cell Formation Problem Based on Scheduling, Worker Allocation, and Financial Resources Constraint. *Industrial Management Journal*, 13(3), 435-463. <https://doi.org/10.22059/imj.2021.323160.1007843>
- Ghadirpour, M., Rahmani, D., & Moslemipour, G. (2020). Routing flexibility for unequal-area stochastic dynamic facility layout problem in flexible manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 31(2), 269-285. <https://doi.org/10.22068/ijiepr.31.2.269>
- Ghanei, S., & AlGeddawy, T. (2020). An integrated multi-period layout planning and scheduling model for sustainable reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 19(01), 31-64. <https://doi.org/10.1142/s0219686720500031>
- Golmohammadi, A.-M., Honarvar, M., Hosseini-Nasab, H., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). A bi-objective optimization model for a dynamic cell formation integrated with machine and cell layouts in a fuzzy environment. *Fuzzy Information and Engineering*, 12(2), 204-222. <https://doi.org/10.1080/16168658.2020.1747162>

- Karimyan, S., & Samouei, P. (2023). Non-deterministic supply chain planning for consumable operating room items considering surgeon satisfaction: MOHS, NSGA-II, and ARAS methods. *Research in Production and Operations Management*, 14(1), 85-120. <https://doi.org/10.22108/pom.2023.134258.1453>
- Kheirkhah, A., Navidi, H., & Bidgoli, M. M. (2015). Dynamic facility layout problem: a new bilevel formulation and some metaheuristic solution methods. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 62(3), <https://doi.org/10.1109/TEM.2015.2437195>
- Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R. K., M., & Khorrami, J. (2012). Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2642-2658. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.01.012>
- Kumar, R., & Singh, S. P. (2018). Simulated annealing-based embedded meta-heuristic approach to solve bi-objective robust stochastic sustainable cellular layout. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 19(1), 69-93. <https://doi.org/10.1007/s40171-017-0174-4>
- Li, J., Tan, X., & Li, J. (2018). Research on Dynamic Facility Layout Problem of Manufacturing Unit Considering Human Factors. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 6040561. <https://doi.org/10.1155/2018/6040561>
- Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., & Gindy, N. (2014). An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of cleaner production*, 65, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.060>
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
- Morady Gohareh, M., & Mansouri, E. (2020). A Mixed Integer Nonlinear Programming for Facility Layout Problem with Maintenance Constraints. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 9(4), 27-37. <https://doi.org/20.1001.1.27170314.2020.9.4.3.1>
- Moslemipour, G., Lee, T. S., & Loong, Y. (2018). Solving stochastic dynamic facility layout problems using proposed hybrid AC-CS-SA meta-heuristic algorithm. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 28(1), 1-31. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2018.088561>
- Motahari, R., Alavifar, Z., Zareh Andaryan, A., Chipulu, M., & Saberi, M. (2023). A multi-objective linear programming model for scheduling part families and designing a group layout in cellular manufacturing systems. *Computers & Operations Research*, 151, 106090. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106090>
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2014). A Multi-objective Mathematical Model Considering Economic and Social Criteria in Dynamic Cell Formation. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44736-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44736-9_6)
- Qin, H.-X., Han, Y.-Y., Zhang, B., Meng, L.-L., Liu, Y.-P., Pan, Q.-K., & Gong, D.-W. (2022). An improved iterated greedy algorithm for the energy-efficient blocking hybrid flow shop scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 69, 100992. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100992>
- Rahimi, V., Arkat, J., Farughi, H. (2020). A vibration damping optimization algorithm for the integrated problem of cell formation, cellular scheduling, and intercellular layout. *Computers & Industrial Engineering*, 143, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106439>
- Raoofpanah, H., Ghezavati, V., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). Solving a new robust green cellular manufacturing problem with environmental issues under uncertainty using Benders decomposition. *Engineering Optimization*, 51(7), 1229-1250. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44736-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44736-9_6)
- Sakhaii, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bagheri, M., & Vatani, B. (2016). A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with

- unreliable machines. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 169-191. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.05.005>
- Sharifi Ghazvini, M., Ghezavati, V., Makui, A., & Raissi, S. (2018). A New Multi-objective Model for Projects Portfolio Optimization considering Integrated Efficiency-risk Approach using NSGA-II. *Research in Production and Operations Management*, 9(2), 139-157. <https://doi.org/10.22108/jpom.2018.109207.1107>
- Salimpour, S., Pourvaziri, H., & Azab, A. (2021). Semi-robust layout design for cellular manufacturing in a dynamic environment. *Computers & Operations Research*, 133, 105367. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105367>
- Sooncharoena, S., Vitayasaka, S., Pongcharoena, P., & Hicksa, C. (2022). Development of a modified biogeography-based optimisation tool for solving the unequal-sized machine and multi-row configuration facility layout design problem. *SCIENCEASIA*, 48, 12-20. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2022.S002>
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/>
- Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2019). Robust machine layout design under dynamic environment: Dynamic customer demand and machine maintenance. *Expert Systems with Applications: X*, 3, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.eswax.2019.100015>
- Yang, L., Deuse, J., & Jiang, P. (2013). Multiple-attribute decision-making approach for an energy-efficient facility layout design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 795-807. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.027>
- Zhang, Z., Wu, L., Wu, Z., Zhang, W., Jia, S., & Peng, T. (2022). Energy-Saving Oriented Manufacturing Workshop Facility Layout: A Solution Approach Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization. *Sustainability*, 14(5), 2788. <https://doi.org/10.3390/su14052788>
- Zhang, Z., Wu, L., Zhang, W., Peng, T., & Zheng, J. (2021). Energy-efficient path planning for a single-load automated guided vehicle in a manufacturing workshop. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107397. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107397>

<sup>1</sup>- US Energy Information Administration (EIA)

<sup>2</sup>- Liu et al.

<sup>3</sup>- Burggraef et al.

<sup>4</sup>- Golmohammadi et al.

<sup>5</sup>- Tompkins et al.

<sup>6</sup>- Ghanei and AlGeddawy

<sup>7</sup>- Zhang et al.

<sup>8</sup>- Qin et al.

<sup>9</sup>- Yang et al.

<sup>10</sup>- Li et al.

<sup>11</sup>- Niakan et al.

<sup>12</sup>- Motahari et al.

<sup>13</sup>- Bakhshi-Khaniki and Fatemi Ghomi

<sup>14</sup>- Fakhrazad et al.

<sup>15</sup>- Sooncharoena et al.

<sup>16</sup>- Salimpour et al.

<sup>17</sup>- Doroudyan et al.

<sup>18</sup>- Rahimi et al.

<sup>19</sup>- Morady Gohareh and Mansouri

<sup>20</sup>- Ghadirpour et al.

<sup>21</sup>- Vitayasak et al.

<sup>22</sup>- Raoofpanah et al.

<sup>23</sup>- Benders decomposition algorithm (BDA)

<sup>24</sup>- Moslemipour et al.

<sup>25</sup>- Kumar and Singh

<sup>26</sup>- Kheirkhah et al.

- 27- Bagheri & Bashiri
- 28- Kia et al.
- 29- Mavrotas
- 30- Multi-Objective Decision-Making
- 31- Balaman
- 32- Multi Objective Particle Swarm Optimization
- 33- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
- 34- Ehrgott
- 35- Single-Objective Problem
- 36- Bijarchiyan et al.
- 37- crossover
- 38- Mutation
- 39- Karimyan & Samouei
- 40- Deb et al.
- 41- Sharifi Ghazvini et al.
- 42- Eberhart & Kennedy
- 43- Spacing metric (SM)
- 44- Diversification Metric (DM)
- 45- Mean ideal distance (MID)
- 46- CPU time (or processing time)
- 47- Sakhaii et al.
- 48- Chang et al.
- 49- Replication