



**Original Article**

## **Optimization of Dynamic and Sustainable Cellular Layout Based on the strategy of scaling Processing Speed and Process Routing in Energy Consumption and Workplace Safety**

Nader Ghanei\*, Gholam Reza Esmaeilian\*\*, Amir Saman Kheirkhah\*\*\*

### **Abstract**

Increasing concerns about environmental issues, resources constraint and social issues of employees have moved organizations to review production strategies and facility layout to provide an arrangement that takes into account all dimensions of sustainability (economic, social, and environmental). Therefore, in this research, a multi-objective mathematical model has been developed to achieve a balance between reducing layout costs, reducing electrical energy consumption, and improving the safety of the production environment for the operators. One prominent feature of the proposed model is the consideration of the strategy of scaling the processing speed of operations in machines alongside process routing. This is combined with concepts such as machine reliability, workload balancing, and operator allocation. In order to validate and assess the usability of the proposed model, the LP-metric method and examples derived from the relevant literature have been utilized. Considering the complexity of the model and the limitations of the GAMS software in providing timely solutions for large-scale problems, the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) has been employed. Finally, the proposed approach was used as a real case study in a gas stove and industrial oven production workshop. The results show a 62% savings in production costs from applying the proposed method.

**Keywords:** Cellular Layout; Sustainability; Process Alternative Routing; Safe Layout; Energy Eonsumption.

**How to Cite:** Ghanei, Nader; Esmaeilian, Gholam Reza; Kheirkhah, Amir Saman (2023). Optimization of Dynamic and Sustainable Cellular Layout Based on the strategy of scaling Processing Speed and Process Routing in Energy Consumption and Workplace Safety, *Ind. Manag. Persp.*, 13(4), 313-375 (In Persian).

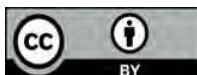
Received: Jun. 09, 2023; Revised: Sep. 18, 2023; Accepted: Des. 14, 2023; Published Online: Jan. 01, 2024.

\* Ph.D Student, Department of Industrial Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran.

\*\* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran.

Corresponding author. Email: [gre@pnu.ac.ir](mailto:gre@pnu.ac.ir)

\*\*\* Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## بهینه‌سازی چیدمان سلولی پویا و پایدار بر اساس راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش و مسیریابی فرایند در مصرف انرژی و ایمنی محیط کار

نادر قانع<sup>\*</sup>، غلامرضا اسماعیلیان<sup>\*\*</sup>، امیرسامان خیرخواه<sup>\*\*\*</sup>

### چکیده

افزایش نگرانی‌ها در خصوص مسائل زیست‌محیطی، کمبود منابع و مسائل رفاهی کارکنان، سازمان‌ها را به سمت تجدیدنظر در مورد استراتژی‌های تولید و چیدمان تسهیلات سوق داده است تا چیدمانی ارائه دهند که به تمام ابعاد پایداری (اقتصادی، رفاه اجتماعی و زیست‌محیطی) توجه داشته باشد؛ بنابراین در این پژوهش، یک مدل ریاضی چندهدفه به‌منظور ایجاد توازن بین کاهش هزینه‌های چیدمان، کاهش میزان مصرف انرژی الکتریکی و افزایش ایمنی محیط تولید برای کارکنان توسعه یافته است. ویژگی برجسته مدل پیشنهادی، در نظر گرفتن راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش عملیات در ماشین‌ها در کنار مسیریابی فرایند است که با مفاهیمی نظیر قابلیت اطمینان ماشین‌ها، تعادل بار کاری، تخصیص اپراتور ترکیب شده است. به‌منظور اعتبارسنجی و کاربردپذیری مدل پیشنهادی از روش معیار جامع و نمونه‌های برگرفته از مبانی نظری موضوع استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی مدل و ناتوانایی نرم‌افزار گمز در ارائه جواب برای مسائل با ابعاد بزرگ در زمان مطلوب، از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است. در نهایت رویکرد پیشنهادی به‌صورت یک مطالعه موردی واقعی در یک کارگاه تولید اجاق گاز و فرهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج، دستیابی به صرفه‌جویی ۶۲ درصدی در هزینه‌های تولید را از اعمال روش پیشنهادی نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** چیدمان سلولی؛ پایداری؛ مسیریابی جایگزین فرایند؛ چیدمان ایمن؛ مصرف انرژی.

**استناددهی:** قانع، نادر؛ اسماعیلیان، غلامرضا؛ خیرخواه، امیرسامان؛ (۱۴۰۲). بهینه‌سازی چیدمان سلولی پویا و پایدار بر اساس راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش و مسیریابی فرایند در مصرف انرژی و ایمنی محیط کار. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۳(۴)، ۳۱۳-۳۷۵.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱.

\* دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

\*\* استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: Email: [gre@pnu.ac.ir](mailto:gre@pnu.ac.ir)

\*\*\* دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بو علی سینا، همدان، ایران.



## ۱. مقدمه

افزایش رقابت و تنوع محصولات عرضه شده توسط رقبا در بازار، شرکت‌ها را متقاعد کرده است تا از استراتژی‌های کارآمد و متفاوتی در بخش تولید استفاده کنند تا بدون به خطر انداختن کیفیت، محصولات ارزان قیمت تولید کنند. طراحی کارآمد تسهیلات به علت کاهش زمان تحویل، موجودی در حال ساخت و بهبود نرخ تولید نقش مهمی در سیستم‌های تولید ایفا می‌کند [۸]. چیدمان فیزیکی ضعیف برخی یا همه مزیت‌های رقابتی مورد انتظار شرکت‌های تولیدی را از بین می‌برد. یافتن جواب مناسب برای مسئله چیدمان تسهیلات<sup>۱</sup> (FLP) بسیار مهم است؛ زیرا هزینه‌های جابه‌جایی مواد بین ۲۰ تا ۵۰ درصد کل هزینه‌های عملیاتی تولید برآورد شده است. چیدمان کارآمد تسهیلات می‌تواند این هزینه‌ها را حداقل ۱۰ درصد و حداکثر تا ۳۰ درصد کاهش دهد [۶۲]. چیدمان‌های متنوع و زیادی بر اساس نیازهای خاص در سیستم‌های تولیدی استفاده می‌شوند. برخی از پرکاربردترین چیدمان‌ها عبارت‌اند از: چیدمان محصولی؛ فرآیندی؛ موقعیت ثابت و سلولی. ترکیبی از این چیدمان‌ها نیز قابل استفاده است که به آن‌ها «چیدمان ترکیبی» گفته می‌شود. درحالی‌که هر نوع چیدمان متناسب با نیاز خاصی است، چیدمان سلولی نسبت به بقیه کارآمدتر است؛ زیرا از مزایای روش‌های تولید انبوه و انعطاف‌پذیر بهره می‌برد [۳۸]. چیدمان سلولی مبتنی بر فناوری گروهی و شامل گروه‌بندی قطعات دارای شباهت در ویژگی‌های طراحی و عملیاتی و الزامات فرآیند از نظر ماشین‌آلات و توالی پردازش در یک سلول است [۳۴]. کاهش مقدار جابه‌جایی مواد و هزینه، کاهش زمان راه‌اندازی، افزایش نرخ تولید، کاهش اندازه قطعه، کاهش کار در فرآیند، کاهش تقاضا برای تجهیزات و ابزار تولید، کاهش فضای مورد نیاز، بهبود کیفیت محصولات، تخصص بیشتر، کاهش زمان تحویل، کنترل بهتر کل عملیات و کاهش نیاز به تجهیزات، برخی از مزایای ملموس چیدمان سلولی نسبت به سایر چیدمان‌ها است [۲۲]. تولیدکنندگان مختلفی در جهان مانند پاناسونیک<sup>۲</sup>، فوجیتسو<sup>۳</sup>، ان‌ای‌سی<sup>۴</sup>، شارپ<sup>۵</sup>، سانپو<sup>۶</sup>، یاماها<sup>۷</sup>، هیتاچی<sup>۸</sup> و کُن<sup>۹</sup> در ژاپن و همچنین سامسونگ و ال‌جی<sup>۱۰</sup> در کره جنوبی برای پاسخگویی به نیازهای خود از چیدمان سلولی توسعه یافته استفاده کرده‌اند [۳۲]. بیشتر پژوهشگران برای رسیدن به چیدمان تسهیلات کارآمد، موضوع جابه‌جایی مواد/ قطعات (به صورت بین سلولی یا درون سلولی) را در نظر می‌گیرند و فرض می‌کنند که تسهیلات قابل اعتماد هستند؛ بنابراین

1. Facility Layout Problem (FLP)
2. Panasonic
3. Fujitsu
4. NEC
5. Sharp
6. Sanyo
7. Yamaha
8. Hitachi
9. Canon
10. Samsung & LG

امکان خرابی دستگاه‌ها را در مدل خود پیش‌بینی نمی‌کنند. در صورتی که در نظر نگرفتن خرابی دستگاه‌ها در مدل، باعث ایجاد گلوگاه در واقعیت خواهد شد.

از طرفی با ورود پایداری به عنوان یک حوزه نوظهور در تولید، علاوه بر جنبه‌های اقتصادی و هزینه‌های تولید، مسائل زیست‌محیطی و رفاه اجتماعی کارکنان به تولید اضافه شده است که باید در برنامه‌ریزی تولید و چیدمان تسهیلات مورد توجه جدی قرار گیرد. زمینه‌ای که شایسته توجه جدی در مسئله چیدمان تسهیلات است، بهره‌وری / صرفه‌جویی انرژی (به عنوان جنبه زیست‌محیطی پایداری) در چیدمان است. سازمان‌ها باید مصرف انرژی خود را تنظیم کنند تا به مزیت رقابتی نسبت به رقبای دست‌یابند. در سطح جهانی، به دلیل افزایش قابل توجه تقاضای انرژی در اقتصادهای نوظهور، کاهش ذخایر نفت در بسیاری از کشورها، تعرفه‌های انرژی به طور مداوم در حال افزایش است [۳۵]. کاهش مستمر منابع طبیعی و پیشرفت سریع در مرزهای اقتصادی و فناوری به افزایش مداوم مصرف انرژی الکتریکی<sup>۱</sup> در سراسر جهان منجر شده است. در سطح جهان، میزان مصرف انرژی در سال ۲۰۰۸ تقریباً ۹۸ اگزاژول بوده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ این میزان به ۴۴ درصد افزایش یابد [۶۳]. در این میان، بخش تولید به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان با حدود یک سوم استفاده از انرژی اولیه جهانی ظاهر شده است؛ بنابراین پیشنهاد شده است برای اجتناب از یک بحران بزرگ تلاش‌های جدی برای بهبود تولید انرژی، توزیع انرژی و مصرف انرژی صورت گیرد [۴۳]. این افزایش مصرف انرژی (به ویژه انرژی الکتریکی) با انتشار گازهای گلخانه‌ای، مانند دی‌اکسید کربن، به محیط‌زیست آسیب می‌رساند و همچنین هزینه مصرف انرژی الکتریکی به دلیل استفاده از انرژی الکتریکی به سرعت در حال افزایش است. با توجه به پژوهش بوگان<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، مصرف انرژی الکتریکی ۱۵ درصد از هزینه‌های کلی تولید را تشکیل می‌دهد [۹]؛ از این رو پرداختن به موضوع بهینه‌سازی مصرف انرژی در طراحی چیدمان تسهیلات امری ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین اکنون برای طراحی یک چیدمان پایدار از نظر محیطی، یعنی چیدمانی که از حداقل انرژی الکتریکی استفاده کند، باید میزان مصرف انرژی را به عنوان یک هدف اصلی در هنگام طراحی یک چیدمان در نظر گرفت.

فشار سازمان‌های غیردولتی، جوامع اجتماعی و رسانه‌ها در حال حاضر پژوهشگران و شرکت‌ها را وادار کرده است تا مسائل رفاه اجتماعی کارکنان مانند امنیت شغلی، استاندارد آلاینده‌های محیط کار و غیره را مدنظر قرار دهند [۴۲]. چیدمان تسهیلات نقش بسزایی در ایجاد ایمنی محیط کار کارکنان دارد و با یک چیدمان صحیح، علاوه بر کاهش هزینه‌های غیرضروری، بسیاری از خطرهای بالقوه حاصل از چیدمان اشتباه ماشین‌آلات به اپراتورها کاهش خواهد یافت.

1. Electric Energy Consumption (EEC)

2. Bougain

طبق نظر دی‌لیرا-فلورس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۹)، طراحی چیدمان، عاملی حیاتی و رابط مسائل اقتصادی و ایمنی در یک کارگاه است [۱۱]. هنگام ایجاد چیدمان تسهیلات، طراحان باید به محدودیت‌های موجود توجه داشته باشند، مانند این واقعیت که برخی از جفت بخش‌ها بدون توجه به حجم جریان مواد بین آن‌ها به دلایل ایمنی باید در مکان‌های مجاور باشند [۶۲]؛ در نتیجه چیدمان عملی تسهیلات باید به‌جای یک موضوع واحد (برای مثال، هزینه جابه‌جایی مواد) چندین موضوع را برآورده سازد. ورود موضوعاتی مانند ایمنی چیدمان در مدل‌های طراحی چیدمان، نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد. در تلاش برای بهبود مدل‌های برنامه‌ریزی چیدمان تسهیلات، در پژوهش حاضر این موضوع بررسی می‌شود که چگونه می‌توان یک مدل جامع برای برآوردن کاهش هزینه‌های جابه‌جایی، بهره‌وری انرژی و ایمنی محیط ارائه کرد. بیشتر مواقع پارامترهای تولید، مانند تقاضا و زمان پردازش در هر دوره تولید متفاوت است؛ از این رو طراحی چیدمان بهینه تسهیلات در یک دوره ممکن است برای دوره‌های بعدی بهینه نباشد؛ بنابراین لازم است تا بهینه‌سازی اهداف ذکر شده در محیطی پویا انجام گیرد.

هدف موردنظر در این پژوهش، ارائه مدل ریاضی چندهدفه برای بهینه‌سازی چیدمان سلولی تسهیلات در یک محیط پویا است که هر سه جنبه پایداری را بررسی می‌کند. این جنبه‌ها در این پژوهش عبارت‌اند از: ۱. کمینه‌سازی هزینه چیدمان؛ ۲. کمینه‌سازی مصرف انرژی در چیدمان؛ ۳. حداکثرسازی ایمنی چیدمان (محیط کار) برای کارکنان از طریق کاهش خطرهای بالقوه قرارگیری تسهیلات در مکان‌های خاص. به‌منظور داشتن مدلی که تصمیمات آن با تصمیمات عملی در دنیای واقعی قابل‌مقایسه باشد، پوشش گسترده‌ای از ویژگی‌های مهم در چیدمان مانند مسیرهای تولید جابگزین، تقاضای متفاوت قطعات، توالی عملیات، چیدمان چندردیفی، پیکربندی مجدد، بازآرایی ماشین‌ها و محدودیت‌های ظرفیت سلول، مسائل مربوط به اپراتور و تخصیص آن‌ها، تعادل بارکاری در سلول‌ها، خرابی ماشین‌ها، هم‌جواری ماشین‌ها و مقیاس‌بندی سرعت پردازش عملیات ماشین‌ها در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی قابلیت استفاده در بیشتر صنایع تولیدی مانند صنایع خودرویی و لوازم‌خانگی را دارا است. سؤال‌هایی که این پژوهش به دنبال پاسخ به آن‌ها است عبارت‌اند از:

۱. چگونه می‌توان یک چیدمان سلولی بهینه با در نظر گرفتن اهداف پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) طراحی کرد؟
۲. تأثیر هر یک از تصمیمات اجتماعی (ایمنی چیدمان) و زیست‌محیطی (انرژی مصرفی در چیدمان) بر تصمیمات اقتصادی (هزینه‌های تولید) به چه صورت است؟
۳. تأثیر تغییر وزن هر یک از توابع هدف در مقدار آن‌ها به چه میزان است؟

۴. تأثیر تغییرات در میزان تقاضا و زمان عملیات بر روی کدام یک از توابع بیشتر است؟  
ادامه ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه پژوهش ارائه می‌شود. روش‌شناسی پژوهش، شرح مسئله و مدل پیشنهادی برای حل مسئله در بخش سوم ارائه خواهد شد. تحلیل داده‌ها و یافته‌های حاصل از پژوهش در بخش چهارم گزارش شده است و در نهایت بخش پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهادها اختصاص دارد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

از دهه ۱۹۷۰، علاقه روزافزونی به مسائل طراحی چیدمان ایجاد شده است. با این حال بیشتر مبانی نظری موجود، یک رویکرد بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن جابه‌جایی انجام‌شده ارائه داده‌اند. انتخاب چیدمان باید به صورت یکپارچه و بر اساس معیارهای پایداری (کارایی تولید، مسائل محیطی و اجتماعی) باشد. در ادامه، مروری بر مبانی نظری موجود و پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه چیدمان ارائه می‌شود.

**مسئله چیدمان سلولی.** طراحی چیدمان یک موضوع استراتژیک است و تأثیر بسزایی بر عملکرد یک صنعت تولیدی یا خدماتی دارد [۶۴]. تمرکز FLP روی چیدمان تجهیزات در کارخانه است که به کارآمدترین شکل تخصیص  $n$  تجهیز به  $n$  موقعیت مربوط می‌شود. خروجی FLP یک چیدمان برای تعیین موقعیت هر بخش است [۵۷]. با توجه به اهمیت این موضوع، پژوهش‌های زیادی منتشر شده است که عمدتاً بر روی حداقل کردن هزینه جابه‌جایی مواد در چیدمان تمرکز دارد. چیدمان تسهیلات سلولی به دلیل مزایای ملموس بسیار، نسبت به سایر چیدمان، کارآمدتر است. طراحی چیدمان سلولی عمدتاً با تشکیل سلول‌ها از طریق ترکیب قطعات در گروه‌های قطعه و ماشین‌های سلولی بر اساس شباهت‌های خاصی در نیازمندی‌های پردازش و ویژگی‌های طراحی آن‌ها سروکار دارد. این سلول‌ها باید به گونه‌ای شکل بگیرند که حداقل تغییرات در چیدمان در دوره‌های زمانی مختلف به وجود بیاید؛ زیرا چینش مجدد ماشین‌ها می‌تواند هزینه‌های زیادی را به سیستم تحمیل کند [۵۸]. در محیط تولید امروزی، تنوع و پیچیدگی محصول درخواستی در حال افزایش و در بازه‌های زمانی متغیر است؛ از این رو چیدمان تسهیلات سلولی باید متناسب با این تغییرات باشد. این نوع مسائل چیدمان تسهیلات با عنوان «مسئله چیدمان تسهیلات سلولی پویا»<sup>۱</sup> (DCFLP) معرفی می‌شوند. توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۷)، به منظور ارائه یک چیدمان سلولی استوار و با هدف به حداقل رساندن کل جابه‌جایی مواد بین سلولی و درون سلولی، یک مدل غیرخطی مختلط ارائه کردند. فرض مدل بر این بود که تقاضا دارای توزیع نرمال است. پژوهشگران مدل را خطی و با روش شاخه و کران حل کردند [۵۹]. کیا و همکاران (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای حل مسئله

1. Dynamic Cellular Facility Layout Problem (DCFLP)

چیدمان گروهی در سیستم تولید سلولی پویا پیشنهاد دادند که با مسئله تشکیل سلول، ادغام شده است. آن‌ها از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کارآمد برای حل مدل پیشنهادی استفاده کردند [۲۹].

رفیعی و قدسی (۲۰۱۳)، مسئله تشکیل سلول پویا<sup>۱</sup> (DCMS) را از طریق یک مدل ریاضی جدید دوهدفه مدل کردند. به عقیده آن‌ها مسائل مربوط به انسان به‌عنوان یک جنبه مهم در طراحی سیستم تولید سلولی در مبانی نظری مربوطه نادیده گرفته شده است. در این پژوهش، تابع هدف اول به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌های مسئله که شامل هزینه‌های خرید، جابه‌جایی ماشین، هزینه متغیر ماشین، هزینه جابه‌جایی بین سلولی، هزینه جابه‌جایی درون سلولی، هزینه اضافه‌کاری و هزینه جابه‌جایی نیروی کار بین سلول‌ها است و استفاده از نیروی کار از طریق تابع هدف دوم به حداکثر می‌رسد [۴۷]. باقری و بشیری (۲۰۱۴)، مسئله تشکیل سلول<sup>۲</sup> (CF) را با چیدمان بین سلولی و مسئله تخصیص اپراتور به صورت یکپارچه و هم‌زمان در یک محیط پویا مدل کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی برای به حداقل رساندن حرکات قطعات برون / درون سلولی، هزینه جابه‌جایی ماشین‌ها و هزینه اپراتور فرموله کردند [۷]. پایدار و همکاران (۲۰۱۴)، هزینه‌های جابه‌جایی مواد، که شامل هزینه‌های جابه‌جایی بین سلولی و درون سلولی با توجه به چیدمان ماشین‌ها است را از مهم‌ترین مسائل برای طراحی CMS دانستند و از سوی دیگر به اهمیت فرآیند انتخاب تأمین‌کننده به این دلیل که هزینه مواد اولیه سهم عمده‌ای در هزینه کل محصولات نهایی دارد و بیشتر کارخانه‌ها مجبور هستند مقدار زیادی از منابع خود را صرف خرید و حمل و نقل کنند، اشاره کردند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید برای ادغام برنامه‌ریزی تدارکات و تولید در زنجیره تأمین در کنار طراحی تشکیل سلول به‌طور هم‌زمان پیشنهاد کردند [۴۴]. کیا و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی ارائه کردند که کاستی‌های مدل قبلی (کیا و همکاران، ۲۰۱۲) را برطرف کرد [۳۰]. این مدل با در نظر گرفتن تعداد مکان‌ها، شکل و ابعاد مستطیلی سلول‌ها و مکان نقاط ورود و خروج قطعات به کارگاه به‌عنوان متغیرهای تصمیم، هر دو چیدمان بین سلولی و درون سلولی را بهینه کرد؛ همچنین یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل توسعه داده شد. فنگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸)، با در نظر گرفتن تعامل بین مسائل تشکیل و چیدمان سلولی در طراحی CMS، مدل پیشنهادی خود را که به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط بود، ارائه کردند. این مدل، شامل ترکیب هم‌زمان برخی ویژگی‌های خاص در طراحی CMS، مانند ابعاد نابرابر ماشین‌ها، ماشین‌های تکراری، مسیریابی فرآیند جایگزین، تقسیم‌بندی دسته‌ای محصولات

1. Dynamic Cellular Manufacturing System  
2. Cell Formation  
3. Feng, et al.

و برنامه‌ریزی تولید است. با توجه به دشواری محاسباتی مدل، دو رویکرد ترکیبی، یکی ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی (GALP) و دیگری ترکیبی از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده و برنامه‌ریزی خطی (SALP)، برای حل مؤثر مسائل با اندازه واقعی پیشنهاد شد [۱۶]. گل‌محمدی و همکاران (۲۰۲۲)، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه برای ادغام تشکیل سلول و چیدمان بین/ درون سلولی در فضای پیوسته با در نظر گرفتن شرایط فازی برای به حداقل رساندن هزینه کل جابه‌جایی قطعات و همچنین پیکربندی مجدد سلول‌ها در چیدمان توسعه دادند. جابه‌جایی درون و بین سلولی هم برای قطعات و هم برای ماشین‌ها وابسته به مسافت طی شده در یک فاصله مستقیم در یک محیط فازی در نظر گرفته شده است [۱۹]. رحیمی و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط را برای بررسی طراحی چیدمان سلولی به صورت هم‌زمان با در نظر گرفتن بسیاری از ویژگی‌های طراحی، مانند ماشین‌های مشابه/ یکسان، مسیرهای پردازش جایگزین، محصولات متنوع و اندازه سلول متغیر ارائه کرده‌اند. در مدل ارائه‌شده، با هدف به حداقل رساندن زمان کل تولید، تصمیماتی از جمله توالی عملیات و تخصیص سلول به مکان‌های کاندید در نظر گرفته شده است [۴۹]. درودیان و خوش‌قلب (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی جدید برای طراحی چیدمان تسهیلات استوار در سیستم تولید سلولی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا پیشنهاد کردند. مدل ارائه‌شده به طور هم‌زمان هزینه جابه‌جایی‌های درون سلولی و بین سلولی را حداقل کرده است. مدل غیرخطی عدد صحیح ابتدا خطی شده و سپس توسط روش شاخه و کران برای حالت بهینه حل شده است [۱۳].

رفیعی و محمدی‌طلب (۲۰۲۰)، یک مدل جدید برای طراحی یک CMS کارآمد پیشنهاد کردند. مفروضات اساسی مدل پیشنهادی آن‌ها شامل ادغام ماشین‌ابزار، خرابی ماشین و یادگیری - فراموشی نیروی کار و غیره است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تحلیلی آن‌ها نشان داد که خرابی ماشین نقش کلیدی در ارتقای عملکرد CMS، به‌ویژه در شرکت‌های با تقاضای بالا دارد [۴۷]. آقاجانی دلاور و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل ریاضی دوهدفه جدید برای طراحی CMS چهاربعدی (یعنی قطعه، ماشین، اپراتور و ابزار) در یک محیط پویا پیشنهاد کردند. اهداف اصلی مدل آن‌ها عبارت‌اند از: ۱. به حداقل رساندن کل هزینه‌ها از جمله هزینه پردازش توسط ابزار، هزینه‌های انتقال قطعات بین سلول‌های مختلف، هزینه راه‌اندازی ماشین و هزینه‌های آموزشی اپراتورها و ۲. به حداکثر رساندن سطح مهارت اپراتورها. با توجه به NP-hard بودن مدل پیشنهادی و عدم کارایی الگوریتم‌های دقیق در ارائه جواب‌های بهینه جهانی در زمان محاسباتی معقول، یک الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش چندهدفه<sup>۱</sup> (MOVDO) ارائه کردند و برای اعتبارسنجی آن سه الگوریتم فراابتکاری دیگر (الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی غیرمغلوب<sup>۲</sup> (NSGA-II)

1. Multi-Objective Vibration Damping Optimization (MOVDO)

2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)



(II)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۱</sup> (MOPSO) و بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم چندهدفه<sup>۲</sup> (MOIWO)) توسعه داده شد [۲]. منصور و همکاران (۲۰۲۱) با در نظر گرفتن مسئله تخصیص در کنار چیدمان تسهیلات، مدل پیشنهادی خود را ارائه کردند. هدف مدل پیشنهادی به حداقل رساندن مجموع وزنی کل هزینه‌های بین‌سلولی، درون‌سلولی و عملیات بود. از آنجاکه مدل از نوع NP-hard بوده و حل آن در یک زمان معقول دشوار است؛ بنابراین یک رویکرد ابتکاری دومارحله‌ای ارائه کردند که در مرحله نخست، یک مدل ریاضی برای حل هم‌زمان مسئله تشکیل سلول و تخصیص کارگران ارائه شده و در مرحله دوم، بر اساس خروجی مدل ریاضی در مرحله اول، یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله مربوط به طراحی چیدمان سیستم تولید سلولی پیشنهاد شده است. ابعاد واقعی ماشین‌ها و فواصل راهرو بین آن‌ها در نظر گرفته شده است تا بهترین تخصیص ممکن ماشین‌ها و سلول‌ها در کل سیستم احصا شود [۳۷]. سلیم‌پور و همکاران (۲۰۲۱)، مسئله تشکیل سلول و چیدمان سلولی را در طراحی یک سیستم تولید سلولی، با رویکرد استوار برای مقابله با تغییر مداوم ترکیب محصول و تقاضا بررسی کردند. در رویکرد پیشنهادی، چیدمان تسهیلات از یک دوره به دوره دیگر ثابت بوده و فقط موقعیت نقاط دریافت/ارسال در سلول‌ها تغییر کرده است [۵۳]. فخرزاد و همکاران (۲۰۲۲)، مسئله چیدمان سلولی پویا را بر اساس زمان‌بندی، تخصیص اپراتور و محدودیت‌های منابع مالی روی ماشین‌ها و کارگران به‌طور هم‌زمان و با هدف حداقل کردن هزینه کل، شامل هزینه ماشین‌ها، کارگران و حمل‌ونقل قطعات به همراه طراحی چیدمان بررسی کردند [۱۵]. بخشی خانیکی و فاطمی قمی (۲۰۲۳)، یک مدل یکپارچه را برای تولید سلولی پویا و برنامه‌ریزی تولید سلسله-مراتبی با تقاضا تصادفی ارائه کردند. آن‌ها یک مطالعه موردی در یک شرکت توسعه صنعتی و مکانیزه‌کردن کشاورزی انجام دادند و مسائلی مانند طراحی چیدمان تسهیلات در هر دوره، ارائه ماشین‌آلات جدید برای افزایش ظرفیت تولید موردنیاز و تنظیم ظرفیت تولید برای کمک به مدیران را در مدل خود بررسی کردند [۶]. مطهری و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل خطی و چندهدفه را برای مسئله چیدمان گروهی در کنار مسائلی مانند تشکیل سلول و زمان‌بندی گروهی ارائه کردند. بهینه‌سازی زمان تکمیل، هزینه جابه‌جایی (حمل‌ونقل) و زمان بیکاری ماشین به‌عنوان اهداف مدل چندهدفه پیشنهادی در نظر گرفته شده و در نهایت با استفاده از روش‌های اپسیلون محدودیت و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمغلوب (NSGA-II) مدل حل شده است [۴۰].

- 
1. Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm (MOPSO)
  2. Multi-Objective Invasive Weeds Optimization Algorithm (MOIWO)

**چیدمان پایدار.** اخیراً مدیریت عملیات پایدار توجه پژوهشگران و صنعت را به خود جلب کرده است. تعریف پایداری طبق «کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه» (۱۹۸۷)، برآوردن نیازهای نسل کنونی بدون به‌خطرانداختن توانایی نسل‌های آینده برای برآوردن نیازهای خود است. مفهوم «مدیریت عملیات پایدار» با توجه به محدودیت منابع طبیعی و تغییرات سریع در شرایط اقلیمی و افزایش نابرابری‌های اجتماعی به موضوعی جدی تبدیل شده است [۲۱]. این امر صنایع را وادار کرده است تا در شیوه‌های مدیریت عملیات خود تجدیدنظر کرده و به سه جنبه پایداری یعنی سیاره (زیست‌محیطی)، مردم (رفاه اجتماعی) و سود (اقتصادی) توجه کنند [۱۴]. طبق گزارش نیاکان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، اتخاذ شیوه‌های پایداری می‌تواند تا حد زیادی مزایای عملیاتی را بهبود بخشد؛ با این حال حوزه‌های بسیار کمی، پایداری را در تصمیمات استراتژیک ادغام کرده‌اند. بسیاری از حوزه‌های مهم در زنجیره تأمین مانند مسیریابی خودرو، طرح تولید کل و برنامه‌ریزی چیدمان تسهیلات فاقد مطالعاتی هستند که جنبه پایداری را در خود گنجانده باشد [۴۱]. هرچند نقش پایداری در FLP محدود است، اما امری مهم به‌شمار می‌آید و نیاز است که توسط هر سه جنبه پایداری هدایت شود، نه فقط برحسب سود (جنبه اقتصادی) [۴۲]. در ادامه پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه چیدمان که به جنبه‌های پایداری توجه کرده‌اند، بررسی شده است.

**معیارهای اقتصادی پایداری در چیدمان.** برای داشتن یک تولید کارآمد، برنامه‌ریزی چیدمان تسهیلات با در نظر گرفتن تخصیص ماشین‌آلات/تجهیزات در کارگاه یک امر مهم است [۴۵]. چیدمان تسهیلات تأثیر بسزایی در بهره‌وری و هزینه‌های تولید، زمان انتظار و بهره‌وری دارد [۳۳]. یک اصلی تعریف شاخص ارزیابی بر اساس فاصله و یافتن چیدمانی است که آن را به حداقل می‌رساند [۳۹]. آقازاده و همکاران (۲۰۱۱)، مقدار مسافت طی‌شده اپراتورها و محصولات، فاصله تسهیلات و فراوانی جابه‌جایی‌های انجام‌شده توسط اپراتورها را برای بررسی بهره‌وری تولید در نظر گرفتند [۳]. کمینه‌سازی مسافت کلی طی‌شده/ هزینه سفر برای هر واحد تولیدی برای تکمیل فرآیند تولید، هدف اصلی در پژوهش کانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، بوده است [۲۶].

**معیارهای اجتماعی در چیدمان.** ایمنی چیدمان به‌شدت با خسارت‌ها، جراحات و مرگ‌ومیر مرتبط است. اقدامات احتیاطی ایمنی ممکن است پرهزینه باشد؛ با این حال باید بین ایمنی و هزینه تعادل برقرار شود. اگرچه مدل‌های چیدمان موجود قادر به حداقل کردن هزینه جابه‌جایی منابع در چیدمان هستند، اما آن‌ها ایمنی را به‌عنوان یک هدف مهم و جداگانه در بهینه‌سازی چیدمان کارگاه‌ها و کارخانه‌ها نمی‌دانند [۲۸]. دی‌لیرا-فلورس و همکاران (۲۰۱۹)، مدلی با

1. Niakan  
2. Kang

رویکرد برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای حل سه مسئله چیدمان تجهیزات فرآیند، چیدمان تسهیلات و طراحی سیستم ابزار ایمنی به‌طور هم‌زمان توسعه دادند. هدف این رویکرد یافتن چیدمان تسهیلات بهینه بود که هزینه زمین، هزینه خط لوله و هزینه چرخه عمر هر سیستم ابزار ایمنی را به حداقل برساند، خطر انفجار را کاهش دهد و ایمنی را تا حد امکان حفظ کند [۱۱]. گوو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۳)، معتقدند که ایمنی مهم‌ترین مسئله در چیدمان کارخانه محسوب می‌شود. آن‌ها تأثیر عدم قطعیت بر آسیب‌پذیری تجهیزات را در نظر گرفتند و چیدمان کارخانه را پیشنهاد کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای به حداقل رساندن خطر دومینو استفاده کردند؛ همچنین یک ماتریس تصمیم برای تعیین اینکه آیا سطح ریسک چیدمان بهینه‌شده تجهیزات مورد نظر، قابل قبول است یا خیر، اعمال کردند [۲۰].

**معیارهای زیست‌محیطی در چیدمان.** در دنیای معاصر، دولت‌ها، مشتریان، رقبا و جوامع غیردولتی، سازمان‌ها را وادار می‌کنند که به مسائل زیست‌محیطی احترام بگذارند. در صورتی که الزامی برای در نظر گرفتن صریح و ادغام استراتژی محیطی در استراتژی کسب و کار، هرگز برای سازمان‌ها حیاتی نبوده است [۵۳]. با توجه به افزایش آگاهی زیست‌محیطی، مدیران و پژوهشگران سعی کردند در مسائل طراحی چیدمان خود، جنبه‌های زیست‌محیطی را در نظر بگیرند. نیاکان و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل دوهدفه برای تشکیل سلول‌های پویا با در نظر گرفتن عوامل محیطی پیشنهاد کردند. آن‌ها به حداقل رساندن عوامل محیطی مختلف مانند دورریزهای تولیدشده در قالب ضایعات مواد خام، تولید مواد شیمیایی آلاینده، انتشار کربن و اتلاف انرژی را برای هر عملیات روی هر ماشین در نظر گرفتند؛ سپس یک رویکرد ترکیبی از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط و تبرید شبیه‌سازی شده چندهدفه برای حل مدل پیشنهاد دادند [۴۱]. وانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸)، یک مدل ریاضی از دیدگاه صرفه‌جویی در انرژی ارائه کردند. آن‌ها در درجه اول تلاش کردند موقعیت تسهیلات را در یک کارخانه بزرگ صنعتی با ساختار چندطبقه مشخص کنند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه برای مدل استفاده کردند [۶۴]. اقبال و الغامدی<sup>۳</sup> (۲۰۱۸)، تلاش کردند تا یک مسئله تشکیل سلول را حل کنند که در آن هدف به حداقل رساندن کل انرژی پردازش و حمل و نقل است. آن‌ها تنظیمات اصلی کار - ماشین را مجدداً پیکربندی کردند و تقریباً ۲۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مقایسه با طرح اولیه را گزارش دادند [۲۳]. رثوف‌پناه و همکاران (۲۰۱۸)، با ارائه یک مدل ریاضی که شامل آلودگی ناشی از فعالیت‌های تولید و حمل و نقل است، به مسائل پایداری در

1. Guo, et al.

2. Wang, et al.

3. Iqbal & Al-Ghamdi

چیدمان سلولی پرداختند. آن‌ها برای حل مدل از الگوریتم تجزیه پندر<sup>۱</sup> بهره گرفتند [۵۰]. طپال و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۷)، مسئله چیدمان تسهیلات پویا را تحت الگوی تقاضای تصادفی فرموله کردند. آن‌ها عوامل مختلفی از جمله هزینه‌های جابه‌جایی مواد و چیدمان مجدد، دسترسی، نگهداری، فاصله جریان و مدیریت ضایعات را در نظر گرفتند تا بین سه جنبه مهم پایداری، یعنی رفاه اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی توازن برقرار کنند [۶۰].

**مدل‌های چندهدفه برای چیدمان پایدار تسهیلات.** طراحی چیدمان معمولاً در مراحل اولیه طراحی کارخانه انجام می‌شود و مستلزم همکاری متخصصان مختلف است. این طراحی باید توسعه‌های آینده (منطقه دردسترس)، اثرات زیست‌محیطی، ساخت‌وساز، نگهداری، کارایی و ایمنی در کارخانه را در نظر بگیرد. اسکالیا و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۹) یک مطالعه کتاب‌سنجی برای مسئله چیدمان تسهیلات برای شناسایی روندهای اصلی پژوهش‌ها در دهه‌های گذشته ارائه کردند. آن‌ها ۹۹۲ مقاله منتشر شده بین سال‌های ۱۹۶۳ تا ۲۰۱۹ را بازبینی کردند و به این نتیجه رسیدند که پژوهش‌های آینده می‌توانند رویکردهای چندهدفه را برای حل FLP ارائه دهند [۵۵]. بررسی مبانی نظری موضوع نشان داد که پژوهشگران برای وارد کردن ابعاد پایداری در سیستم‌های تولیدی زمانی از مدل‌سازی‌های چندهدفه استفاده کرده‌اند که توابع با یکدیگر در تضاد بوده و بهبود یک عامل پایداری با بدتر شدن عامل دیگر همراه بوده است؛ بنابراین تلاش کرده‌اند تا با ایجاد توازن بین ابعاد پایداری، چیدمانی متعادل و دقیق پیشنهاد کنند. برای مثال، می‌توان به پژوهش نیاکان و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۶) اشاره کرد. آن‌ها در مدل ریاضی پیشنهادی خود تلاش کردند تا بین عوامل اقتصادی و محیطی توازن برقرار کنند؛ درحالی‌که جنبه‌های اجتماعی را به‌عنوان محدودیت در نظر گرفتند. هدف نخست در مدل آن‌ها شامل هزینه‌های تولید، جابه‌جایی قطعات و اپراتور بوده و تابع هدف دوم نیز شامل به‌حداقل رساندن میزان اتلاف انرژی ماشین‌آلات در تولید است. آن‌ها به‌منظور کاهش پیچیدگی مدل، مسائل اجتماعی (حداکثر مقدار مجاز نویز برای کارگران) را به‌عنوان محدودیت در نظر گرفتند و چیدمان تسهیلات نهایی را پیشنهاد کردند [۴۱]. نیاکان و همکاران (۲۰۱۶) همچنین با ارائه یک تابع دو هدفه، با ایجاد توازن بین معیار اقتصادی (هزینه‌ها) و مسائل اجتماعی (خطر برای کارکنان) چیدمان نهایی خود را ارائه دادند و در پیشنهادهای خود بر لزوم توجه به مسائل زیستی (انرژی) تأکید کردند [۴۲]. جعفرزاده و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۲) با ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه در سیستم

- 
1. Benders Decomposition Algorithm
  2. Tayal, et al.
  3. Scalia, et al.
  4. Niakan, et al.
  5. Jafarzadeh

تولید سلولی پایدار با توابع هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها، به حداقل رساندن انتشار CO<sub>2</sub> و به حداقل رساندن کمبود محصول (رضایت مشتری) توازن را بین تمامی ابعاد پایداری برقرار کردند [۲۴]. طپال و همکاران (۲۰۱۷) با توجه به ابعاد مختلف پایداری و وجود تضاد بین آن‌ها اقدام به ارائه چیدمان نهایی کردند [۶۰].

**شکاف پژوهشی.** مهم‌ترین خلأی که در میان پژوهش‌های موجود می‌توان به آن اشاره کرد، کم‌توجهی به مبحث پایداری به‌عنوان یکی از موضوع‌های روز و تأثیرگذار در بهبودسازی چیدمان تسهیلات در محیط تولید سلولی است. به‌عبارت‌دیگر در پژوهش‌های اخیر، موضوع چیدمان تسهیلات در بیشتر موارد با در نظر گرفتن میزان جابه‌جایی و هزینه‌ای که این جابه‌جایی به سیستم تولیدی تحمیل می‌کند، مدل شده است؛ در صورتی که ثابت شده است موضوعاتی مانند کاهش مصرف انرژی اگر در مدل‌سازی در نظر گرفته شوند، قادر خواهند بود تا ۱۵ درصد در هزینه‌های سیستم تولیدی کاهش ایجاد کنند و در کاهش آلاینده‌گی نیز مؤثر باشد؛ بنابراین در این پژوهش مدل‌سازی مباحث زیست‌محیطی و معیارهای اجتماعی (مباحث پایداری) در چیدمان تسهیلات به‌عنوان نوآوری اصلی این پژوهش مطرح می‌شود.

نکته حائز اهمیت که این پژوهش را از سایر پژوهش‌ها متمایز می‌کند، توجه به میزان مصرف انرژی (الکتریکی) در فرایند تولید است که به‌عنوان بزرگ‌ترین معضل صنایع تولیدی کشور در شرایط کنونی به‌شمار می‌رود. برای مدیریت مصرف انرژی در این پژوهش از راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش قطعات در تولید و مسیریابی فرایند استفاده شده است؛ به‌نحوی که هر عملیات با سه سرعت متفاوت قابل‌انجام است و در نهایت بهترین سرعت برای انجام هر عملیات انتخاب می‌شود.

در حال حاضر، فشار سازمان‌های غیردولتی، جوامع اجتماعی و رسانه‌ها، پژوهشگران و شرکت‌ها را وادار کرده است تا رفاه اجتماعی را مسائل خود در نظر بگیرند. برای مثال، برخی از شرکت‌های معروف مانند شل، نایک و وال‌مارت<sup>۱</sup> به‌دلیل گزارش‌های رسانه‌ای منتشر شده از فعالیت‌های اجتماعی خود و آگاهی عمومی نسبت به رفاه اجتماعی آن‌ها، آسیب‌های زیادی دیده‌اند [۳۲]؛ بنابراین در این پژوهش تلاش شده است عوامل اجتماعی در مدل پیشنهادی گنجانده شود تا منافع کارکنان نیز در نظر گرفته شود. علی‌رغم اهمیت عوامل اجتماعی، این موضوع در بیشتر مدل‌های چیدمان تسهیلات سلولی نادیده گرفته می‌شود و تصمیم‌گیران به‌نوعی چیدمانی را پیشنهاد می‌دهند که بیشترین کاهش را در هزینه‌ها به‌وجود آورد. در این

1. Shell, Nike & Wal-Mart

پژوهش به‌منظور مدل‌سازی عوامل اجتماعی در چیدمان از موضوع کاهش خطرهای بالقوه محیط کار استفاده شده است که خود به‌عنوان نوآوری دیگر این پژوهش محسوب می‌شود. بیشتر مطالعات منتشرشده در بخش سیستم تولید سلولی بر این فرض استوار است که ماشین‌ها در کل خط تولید قابل‌اعتماد هستند و بدون هیچ‌گونه خرابی عمل می‌کنند و از آنجاکه چنین مفروضاتی معمولاً واقع‌بینانه نیستند، برای کمک به پوشش این شکاف بین فرض و واقعیت، مدل جدیدی پیشنهاد شده است که علاوه بر قابلیت اطمینان ماشین، مسیریابی فرآیند جایگزین، تعادل بار کاری و تخصیص نیروی کار را در یک محیط پویا در نظر گیرد. جدول ۱، خلاصه‌ای از پژوهش‌های مرتبط با موضوع و ویژگی‌های مطرح‌شده در آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. فهرستی از ویژگی‌های مهم در طراحی چیدمان سلولی

| ردیف | ویژگی‌ها   |
|------|--|
| ۱    | چیدمان گروهی   |
| ۱-۱  | چیدمان بین سلولی   |
| ۱-۲  | چیدمان درون سلولی  |
| ۲    | هزینه جابه‌جایی مواد   |
| ۲-۱  | هزینه جابه‌جایی بین سلولی  |
| ۲-۲  | هزینه جابه‌جایی درون سلولی   |
| ۳    | مسیریابی جایگزین   |
| ۳-۱  | انتخاب بهترین مسیر از مسیریابی‌های مشخص شده توسط کاربر                   |
| ۳-۲  | انتخاب از میان تمام گزینه‌های ممکن بر اساس عملکرد و نوع ماشین            |
| ۴    | محدودیت اندازه سلول  |
| ۵    | بیکربندی مجدد سلول   |
| ۶    | آموزش کارکنان  |
| ۷    | هزینه‌های استخدام/اخراج کارکنان  |
| ۸    | هزینه دستمزد کارکنان   |
| ۹    | جابه‌جایی ماشین‌آلات   |
| ۱۰   | نرخ شکست ماشین‌آلات  |
| ۱۱   | زمان تعمیرات دوره‌ای ماشین‌آلات  |
| ۱۲   | تعادل بار کاری   |
| ۱۳   | میزان مصرف انرژی   |
| ۱۳-۱ | کاهش میزان مصرف انرژی بر اساس راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش در هر عملیات |
| ۱۳-۲ | کاهش میزان مصرف انرژی بر اساس راهبرد جابه‌جایی قطعات (AGV)               |
| ۱۴   | ایمنی و خطرها در چیدمان  |



| پژوهشگر (سال)              | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| (۲۰۲۳)                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| مطهری و همکاران،<br>(۲۰۲۳) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | *  | *  | *  | *  |
| پژوهش حاضر                 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | *  | *  | *  | *  |

جدول ۳. مقایسه روش‌های حل در مقالات حوزه چیدمان تسهیلات به صورت سلولی

| پژوهشگر (سال)               | روش حل             | پژوهشگر (سال)              | روش حل                             |
|-----------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------|
| کیا و همکاران، (۲۰۱۲)       | SA                 | کومار و سینگ، (۲۰۱۸)       | SA                                 |
| رفیعی و قدسی، (۲۰۱۳)        | ACO                | گل محمدی و همکاران، (۲۰۲۰) | GA, KA, RDA                        |
| باقری و بشیری (۲۰۱۴)        | LP-metric          | رفیعی و محمدی‌طلب، (۲۰۲۰)  | Exact (GAMS)                       |
| پایدار و همکاران، (۲۰۱۴)    | RO                 | آقاجانی و همکاران، (۲۰۲۰)  | MOVDO, MOIW, MOPSO, MOIWO          |
| کیا و همکاران، (۲۰۱۵)       | GA, SA             | رحیمی و همکاران، (۲۰۲۰)    | VDO, GA, ALO                       |
| سختایی و همکاران، (۲۰۱۶)    | RO                 | درودیان و خوش‌قلب، (۲۰۲۱)  | Exact (GAMS)                       |
| دلگشایی و همکاران، (۲۰۱۶)   | GA                 | سلیم پور و همکاران، (۲۰۲۱) | MNSGA-II                           |
| علایی و داوودپور، (۲۰۱۷)    | RO                 | منصور و همکاران، (۲۰۲۱)    | HA                                 |
| شفیق و همکاران، (۲۰۱۷)      | Integrated LP-SA   | فخرزاد و همکاران، (۲۰۲۲)   | GA                                 |
| فنگ و همکاران، (۲۰۱۸)       | LP-SA and LP-GA    | بخشی و فاطمی قمی، (۲۰۲۳)   | Exact (GAMS)                       |
| رتوف‌پناه و همکاران، (۲۰۱۸) | BD                 | مطهری و همکاران، (۲۰۲۳)    | -constraint, $\epsilon$<br>NSGA-II |
| پژوهش حاضر                  | NSGA-II, LP-Mertic |                            |                                    |

HA: heuristic approach, MOIWO: multi-objective invasive weeds optimization, MOPSO: multi-objective particle swarm optimization, NSGA-II: non-dominated sorting genetic algorithm, MOVDO: multi-objective vibration damping optimization algorithm, SA: simulated annealing, RO: robust optimisation, GA: genetic algorithm, LP: linear programming, ACO – ant colony optimisation, BD: benders decomposition

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

شرح مسئله. با بررسی مبانی نظری موضوع و به منظور پوشش شکاف‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش، یک مدل ریاضی چندهدفه برای چیدمان سلولی پویا و پایدار شامل میزان مصرف انرژی (به‌عنوان جنبه محیط‌زیست)، هزینه‌ها (به‌عنوان جنبه اقتصادی) و ایمنی (به‌عنوان جنبه اجتماعی پایداری) با در نظر گرفتن سایر ویژگی‌های تولید پیشنهاد می‌شود.

در مدل پیشنهادی فضای کف کارگاه به مکان‌های هم‌اندازه تقسیم شده است؛ به نحوی که فاصله آن‌ها از یکدیگر مشخص است و از میان این مکان‌ها، با توجه به هزینه، مقدار جابه‌جایی بین سلولی / درون سلولی هر قطعه و توالی عملیات، سلول‌ها تشکیل و ماشین‌ها به آن تخصیص می‌یابند. هزینه جابه‌جایی بین سلولی به قطعاتی مربوط می‌شود که عملیات روی آن‌ها در یک سلول انجام نمی‌شود و برای تکمیل فرایند ساخت باید به سلول‌های دیگر و ماشین‌آلات آنجا جابه‌جایی داشته باشند. قطعاتی با این ویژگی را «قطععات استثنا» می‌نامند.



هزینه جابه‌جایی درون سلولی و بین سلولی توسط ضرایب  $C_p^{IE}$  و  $C_p^{IA}$  تعیین می‌شود و طبیعی است که ضریب هزینه جابه‌جایی بین سلولی از ضریب هزینه جابه‌جایی درون سلولی بیشتر و بزرگ‌تر باشد. مجموعه‌ای از کارها تعریف شده که برای هر یک چند مسیر انجام تعریف شده است. این کارها شامل تعدادی عملیات است که زمان انجام هر یک روی هر ماشین نیز مشخص است. هر کار باید توسط ماشین‌های مربوطه مورد پردازش قرار گیرد تا همه کارها به‌طور کامل انجام شوند؛ به‌علاوه از محدودیت مجاورت برای تسهیلات استفاده شده است تا مشخص شود کدام ماشین‌ها در هر سلول باید و کدام‌یک نباید در کنار یکدیگر قرار گیرند.

### مفروضات اصلی مسئله

- پیکربندی چیدمان به‌صورت چند ردیفه است؛
- هیچ مانع یا تقسیم فیزیکی در پیکربندی چیدمان وجود ندارد و هزینه‌های مربوط به پیکربندی مجدد فقط شامل حذف/ نصب و هزینه جابه‌جایی بین سلولی ماشین‌آلات می‌شود؛
- زمان لازم برای جابه‌جایی قطعات و ماشین‌آلات و آموزش کارکنان صفر در نظر گرفته شده است.
- هر ماشین می‌تواند تنها یک عملیات را در هر زمان پردازش کند؛
- هر قطعه دارای چند مسیر فرآیند جایگزین است؛
- تقاضا برای هر نوع قطعه در هر دوره مشخص فرض شده است؛
- هزینه جابه‌جایی بین سلولی قطعه به فاصله بین دو سلول بستگی دارد؛ درحالی‌که هزینه جابه‌جایی درون سلولی مستقل از فاصله است؛
- تعداد سلول‌ها مشخص است؛
- حد بالایی و پایینی اندازه ظرفیت سلول مشخص است.

### مدل پژوهش

#### 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 ( $g = g' = 1, \dots, G$ )
- $o$ : اندیس برای مسیر ( $o = 1, \dots, SR_p^h$ )

$k$ : اندیس برای اپراتور ( $k = 1, \dots, K$ )  
 $f$ : اندیس برای سرعت ( $f = 1, \dots, F$ )

### پارامترها

$P$ : 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

$J$ : تعداد عملیات

$F$ : تعداد حالت‌ها برای سرعت

$C_p^{IE}$ : هزینه حرکت بین سلولی برای قطعه  $p$

$C_p^{IA}$ : هزینه حرکت درون سلولی برای قطعه  $p$

$C_m^{Mo}$ : هزینه جابه‌جایی ماشین  $m$  بر اساس هر واحد فاصله

$C_m^{IU}$ : هزینه نصب و جداسازی ماشین  $m$

$C_{k,m}^{TR}$ : هزینه آموزش برای اپراتور  $k$  برای انجام عملیات با ماشین  $m$

$C_{k,m}^{SA}$ : دستمزد اپراتور  $k$  برای انجام عملیات با ماشین  $m$  (هر ساعت)

$C_k^{HI}$ : هزینه استخدام اپراتور  $k$

$C_k^{FI}$ : هزینه اخراج اپراتور  $k$

$D_p^h$ : تقاضای قطعه  $p$  در دوره  $h$

$u_c$ : حد بالای ظرفیت سلول  $c$  برای گنجاندن ماشین

$l_c$ : حد پایین ظرفیت سلول  $c$  برای گنجاندن ماشین

$u_m$ : حداکثر تعداد اپراتور موردنیاز در ماشین  $m$

$l_m$ : حداقل تعداد اپراتور موردنیاز در ماشین  $m$

$u_k$ : حداکثر تعداد ماشین که می‌تواند به اپراتور  $k$  تخصیص یابد.

$l_k$ : حداقل تعداد ماشین که می‌تواند به اپراتور  $k$  تخصیص یابد.

$q$ : درصد تغییرات بار سلولی

$Z_{k,m}^1$ : 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.

$T_{o,p,j,m}$ : زمان موردنیاز برای اجرای عملیات  $j$  قطعه  $p$  روی ماشین نوع  $m$  در مسیر  $O$   
 $\theta$ : مجموعه‌ای از جفت ماشین‌ها به صورت زیر که در آن  $m^a$  و  $m^b$  نمی‌توانند در یک سلول  
 مشابه باشند  $\{(m^a, m^b) / m^a, m^b \in \{1, 2, \dots, M\}, m^a \neq m^b\}$ .  
 $\Omega$ : مجموعه‌ای از جفت ماشین‌ها به صورت زیر که در آن  $m^d$  و  $m^c$  باید در یک سلول مشابه  
 باشند  $\{(m^c, m^d) / m^c, m^d \in \{1, 2, \dots, M\}, m^c \neq m^d\}$ .  
 $EEC_{m,j,o}$ : مقدار انرژی مصرف شده توسط ماشین نوع  $m$  در عملیات  $j$  از مسیر  $O$   
 $IN_{m,g}$ : درصد خطر بالقوه موجود در قرارگیری ماشین نوع  $m$  در مکان  $g$   
 $dis_{g,g'}$ : فاصله بین دو مکان کاندید  $g$  و  $g'$   
 $Min Q$ : حداقل تعداد اپراتور که باید در هر دوره تولیدی استخدام شود.  
 $U_{o,p,j,m}^h$ : اگر عملیات  $j$  قطعه  $p$  در مسیر  $O$  و توسط ماشین  $m$  در دوره  $h$  انجام شود، برابر ۱ و  
 در غیر این صورت برابر صفر است.  
 $NECI_{m,f}$ : نرخ افزایش در مصرف انرژی اگر عملیات اختصاص داده شده به ماشین  $m$  در سطح  
 سرعت  $f$ : پردازش شود.  
 $NTD_{m,f}$ : نرخ کاهش در زمان پردازش اگر عملیات اختصاص داده شده به ماشین  $m$  در سطح  
 سرعت  $f$ : پردازش شود.  
 $TM_m$ : ظرفیت زمانی ماشین نوع  $m$   
 $TW_K$ : ظرفیت زمانی اپراتور  $W$   
 $MTBF_m$ : میانگین زمان بین خرابی ماشین نوع  $m$  و برابر  $\frac{1}{\lambda_m}$  است.  
 $MTTR_m$ : میانگین زمانی تعمیر ماشین نوع  $m$   
 $GBR_m$ : هزینه خرابی ماشین نوع  $m$

### متغیرهای تصمیم

$X_{m,c}^h$ : اگر ماشین  $m$  به سلول  $c$  در دوره  $h$  تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر  
 صفر است.  
 $S_{c,g}^h$ : اگر سلول  $c$  به مکان  $g$  در دوره  $h$  تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر  
 است.  
 $Q_k^h$ : اگر اپراتور  $k$  در دوره  $h$  استخدام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.  
 $R_{k,m}^h$ : اگر اپراتور  $k$  به ماشین  $m$  در دوره  $h$  تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر  
 صفر است.

$Y_{k,c}^h$ : اگر اپراتور  $k$  به سلول  $c$  در دوره  $h$  تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Z_{k,m}^h$ : 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. ( $k \geq 2$ )

$V_{o,p}^h$ : اگر مسیر  $o$  به قطعه  $p$  در دوره  $h$  تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$B_{o,p,j,f}^h$ : اگر عملیات  $j$  قطعه  $p$  در مسیر  $o$  و با سرعت  $f$  در دوره  $h$  انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$EF_{k,m}^h$ : درصدی از ظرفیت زمانی اپراتور  $k$  که صرف فعالیت با ماشین نوع  $m$  در دوره  $h$  می‌شود.

### مدل ریاضی

$$\text{Min } OF_1 =$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h-1} V_{o,p}^h * X_{m,c}^h * X_{m',c'}^h * S_{c,g}^h * S_{c',g'}^h * U_{o,p,j,m}^h * U_{o,p,(j+1),m'}^h * dis_{g,g'} * D_p^h * C_p^{IE} \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h-1} V_{o,p}^h * X_{m,c}^h * X_{m',c}^h * U_{o,p,j,m}^h * U_{o,p,(j+1),m'}^h * D_p^h * C_p^{IA} \quad \text{رابطه (۲-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G X_{m,c}^h * X_{m,c'}^{h+1} * S_{c,g}^h * S_{c',g'}^{h+1} * dis_{g,g'} * C_m^{Mo} \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G C_m^{IU} * \left| \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h * S_{c,g}^h - \sum_{c=1}^C X_{m,c}^{h+1} * S_{c,g}^{h+1} \right| \quad \text{رابطه (۴-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K (Q_k^h * C_k^{HI} + (1 - Q_k^h) * C_k^{FI}) \quad \text{رابطه (۵-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C Q_k^h * R_{k,m}^h * X_{m,c}^h * Y_{k,c}^h * Z_{k,m}^h * C_{k,m}^{TR} \quad \text{رابطه (۶-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h-1} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * R_{k,m}^h * NTD_{m,f} * C_{k,m}^{SA} \quad \text{رابطه (۷-۱)}$$

$$+ \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * V_{o,p}^h * NTD_{m,f} * CBR/MTBF_M \quad \text{رابطه (۸-۱)}$$

$$\text{Min } OF_2 = \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h-1} V_{o,p}^h * U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * B_{o,p,j,f}^h * NECI_{m,f} * EEC_{m,j,o} \quad \text{رابطه (۹-۱)}$$

$$\text{Min } OF_3 = \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h * S_{c,g}^h * IN_{m,g} \quad \text{رابطه (۱۰-۱)}$$

محدودیت‌ها

- $\sum_{c=1}^C X_{m,c}^h = 1 \quad \forall m, h ;$  (۲) رابطه
- $\sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \leq U_c \quad \forall c, h ;$  (۳) رابطه
- $\sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \geq L_c \quad \forall c, h ;$  (۴) رابطه
- $\sum_{c=1}^C S_{c,g}^h \leq 1 \quad \forall g, h ;$  (۵) رابطه
- $\sum_{g=1}^G S_{c,g}^h = 1 \quad \forall c, h ;$  (۶) رابطه
- $\sum_{c=1}^C Y_{k,c}^h = Q_k^h \quad \forall k, h ;$  (۷) رابطه
- $\sum_{k=1}^K Q_k^h \geq \min Q_k \quad \forall h ;$  (۸) رابطه
- $\sum_{k=1}^K R_{k,m}^h \geq L_m \quad \forall m, h ;$  (۹) رابطه
- $\sum_{k=1}^K R_{k,m}^h \leq U_m \quad \forall m, h ;$  (۱۰) رابطه
- $R_{k,m}^h \leq Q_k^h \quad \forall k, m, h ;$  (۱۱) رابطه
- $Y_{k,c}^h \leq Q_k^h \quad \forall k, c, h ;$  (۱۲) رابطه
- $\sum_{m=1}^M R_{k,m}^h \leq Q_k^h * U_k \quad \forall k, h ;$  (۱۳) رابطه
- $\sum_{m=1}^M R_{k,m}^h \geq Q_k^h * L_k \quad \forall k, h ;$  (۱۴) رابطه
- $R_{k,m}^h \leq \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h * Y_{k,c}^h \quad \forall k, m, h ;$  (۱۵) رابطه
- $Z_{k,m}^{h+1} = (1 - R_{k,m}^h) * Z_{k,m}^h \quad \forall k, m, h = 1, \dots, H - 1 ;$  (۱۶) رابطه
- $\sum_{o=1}^{SR_p^h} V_{o,p}^h = 1 \quad \forall p, h ;$  (۱۷) رابطه
- $\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M X_{m,c}^h * U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * V_{o,p}^h * NTD_{m,f} \geq \frac{a}{c} * \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M X_{m,c}^h * U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * V_{o,p}^h * NTD_{m,f} \quad \forall c, h ;$  (۱۸) رابطه
- $X_{m^a,c}^h + X_{m^b,c}^h \leq 1 \quad (m^a, m^b) \in \theta, \forall c, h ;$  (۱۹) رابطه
- $X_{m^c,c}^h + X_{m^d,c}^h = 0 \quad (m^c, m^d) \in \Omega, \forall c, h ;$  (۲۰) رابطه
- $\sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{f=1}^F B_{o,p,j,f}^h = 1$  (۲۱) رابطه
- $\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * V_{o,p}^h * NTD_{m,f} * (1 + \frac{MTTR_m}{MTBF_M}) \leq TM_m$  (۲۲) رابطه
- $\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * V_{o,p}^h * NTD_{m,f} \leq$  (۲۳) رابطه
- $\sum_{k=1}^K TW_k * EF_{k,m}^h$  (۲۴) رابطه
- $\sum_{m=1}^M EF_{k,m}^h < 1$  (۲۴) رابطه
- $EF_{k,m}^h \leq R_{k,m}^h$  (۲۵) رابطه
- $Q, V, R, S, X, Y, Z, B \in \{0,1\}$  (۲۶) رابطه

**توصیف توابع هدف.** توابع هدف از سه بخش تشکیل شده است: بخش اول مربوط به مسائل اقتصادی در طراحی چیدمان شامل هزینه‌های ماشین، قطعه و اپراتور است؛ بخش دوم مربوط به مسائل زیست‌محیطی شامل حداقل سازی میزان مصرف انرژی در طی فرایند تولید هر قطعه در چیدمان و بخش سوم مربوط به مسائل اجتماعی در طراحی چیدمان شامل میزان خطرهای بالقوه قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های خاص است.

**تابع مربوط به مسئله اقتصادی (هزینه‌های تولید).** نخستین عبارت تابع هدف رابطه (۱-۱) هزینه جابه‌جایی قطعه بین سلولی را در چیدمان به حداقل می‌رساند. رابطه دوم (۲-۱) هزینه جابه‌جایی قطعه در درون سلول را در چیدمان به حداقل می‌رساند. رابطه سوم (۳-۱) و چهارم (۴-۱) هزینه پیکربندی مجدد سیستم را به حداقل می‌رساند. این هزینه به ترتیب شامل هزینه جابه‌جایی ماشین و هزینه نصب و جداسازی ماشین است. رابطه پنجم (۵-۱) به هزینه‌های استخدام و اخراج اپراتورها مربوط می‌شود. رابطه ششم (۶-۱) در تابع هدف، هزینه‌های آموزش اپراتورها را به حداقل می‌رساند. حقوق و دریافتی اپراتور با رابطه هفتم (۷-۱) تابع هدف به حداقل می‌رسد. در تابع هشتم (۸-۱) هزینه خرابی ماشین‌ها بر اساس حجم کاری هر دستگاه، هزینه خرابی و میانگین فاصله زمانی بین هر دو خرابی محاسبه می‌شود.

**تابع مربوط به محیط‌زیست (کاهش میزان مصرف انرژی در فرایند تولید).** در رابطه (۱-۹) برای بررسی میزان مصرف انرژی از دو راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش عملیات در هر ماشین و انتخاب مسیر فرایند، استفاده می‌شود. در این تابع هدف، راهبرد انتخاب مسیر به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا مسیری را برای تولید هر قطعه/ محصول انتخاب کنند که کمترین میزان مصرف انرژی را به سیستم تحمیل می‌کند. در این پژوهش از راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش عملیات ارائه‌شده توسط فرقانی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲)، استفاده شده است [۱۷]. با توجه به نحوه مدل‌سازی این موضوع، بالا رفتن سرعت پردازش به افزایش مصرف انرژی در تابع دوم و کاهش زمان و هزینه‌های تولید در تابع هدف اول ارائه منجر می‌شود، رابطه عکس این توابع باعث شد تا مدل اصلی به صورت چندهدفه ارائه شود.

**تابع مربوط به مسئله اجتماعی (کاهش خطرهای محیطی).** معمولاً تجزیه و تحلیل ایمنی و پیکربندی چیدمان کارخانه‌ها پس از تکمیل چیدمان چنین کارخانه‌هایی انجام می‌شود. این امر فضای کمی برای اصلاحات طراحی برای بهبود سطوح ایمنی کلی کارخانه باقی می‌گذارد که

می‌تواند به عواقب کشنده، اختلال در فعالیت‌های تولید و خسارات جبران‌ناپذیر به کارخانه و محیط اطراف منجر شود. از نظر ایمنی، این امر به ادغام اصول ایمنی در مراحل طراحی کارخانه‌ها منجر شده است. با این حال مطالعات نشان داده‌اند که پیکربندی چیدمان در بعضی صنایع مانند صنایع شیمیایی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در حدود ۷۹ درصد از حوادث نقش دارد [۳۱]؛ بنابراین توسعه ابزارهای مناسب برای تنظیم چیدمان‌های ایمن‌تر اهمیت می‌یابد.

تابع ارائه‌شده در این قسمت که با رابطه (۱-۱۰) ارائه شده است، یک تابع مبتنی بر مقدار خطرهای استقرار تسهیلات در مکان‌های کاندید بر اساس دستورالعمل‌های نظارتی، شرایط محیطی کاری، هنجارهای آلودگی و نوع محصول در حال تولید است. به این صورت که برای قرارگیری هر ماشین در مکان کاندید، یک ضریب خطر بالقوه‌ای (ریسک) در نظر گرفته شده است و مقدار تابع هدف آن از مجموع تمام مقادیر خطر حاصل از استقرار پیشنهادی برای چیدمان تسهیلات در مکان‌های کاندید محاسبه می‌شود. هر چه این مقدار کمتر باشد، برای تخصیص گزینه بهتری است.

جدول ۴. تعیین سطح خطر بین تسهیل و مکان کاندید

| بدون خطر (معمول) | احتیاط     | هشدار (آسیب جزئی) | هشدار (آسیب شدید) | خطر (تهدیدکننده زندگی) |
|------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| ۰ تا ۰/۲         | ۰/۲ تا ۰/۴ | ۰/۴ تا ۰/۶        | ۰/۶ تا ۰/۸        | ۰/۸ تا ۱               |

جدول ۵، ماتریس خطرهای استقرار را برای یک مثال با ۵ تسهیل، ۱۰ مکان، ۱ دوره و ۵ سلول با ظرفیت ۱ ماشین نشان می‌دهد. در استقرار پیشنهادی بر اساس این تابع، تسهیلات به دنبال بهترین مکان با کمترین میزان خطر خواهند بود.

جدول ۵. تعیین سطح خطر بین تسهیل و مکان کاندید

|    | G1    | G2    | G3    | G4    | G5    | G6    | G7    | G8    | G9    | G10   |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M1 | ۰/۱۷۲ | ۰/۸۴۳ | ۰/۵۵۰ | ۰/۹۱۰ | ۰/۷۵۶ | ۰/۷۸۴ | ۰/۹۶۲ | ۰/۰۱۴ | ۰/۱۲۶ | ۰/۸۸۱ |
| M2 | ۰/۳۰۱ | ۰/۲۹۲ | ۰/۲۲۴ | ۰/۷۸۲ | ۰/۹۵۱ | ۰/۸۵۳ | ۰/۳۶۹ | ۰/۵۱۴ | ۰/۷۵۳ | ۰/۱۱۲ |
| M3 | ۰/۳۵۰ | ۰/۸۵۶ | ۰/۰۶۷ | ۰/۱۲۵ | ۰/۱۳۴ | ۰/۵۲۴ | ۰/۰۲۵ | ۰/۸۵۳ | ۰/۹۷۸ | ۰/۱۸۹ |
| M4 | ۰/۵۰۰ | ۰/۹۹۸ | ۰/۵۷۹ | ۰/۲۳۶ | ۰/۷۴۱ | ۰/۳۵۲ | ۰/۴۷۱ | ۰/۸۶۳ | ۰/۳۵۷ | ۰/۰۵۶ |
| M5 | ۰/۱۴۳ | ۰/۴۸۱ | ۰/۵۶۴ | ۰/۵۸۱ | ۰/۲۲۱ | ۰/۰۸۵ | ۰/۶۶۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۲۵۸ | ۰/۹۹۷ |

طبق فرمول پیشنهادی، میزان خطرهای محیطی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Min } OF_3 = \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h * S_{c,g}^h * IN_{m,g}$$

این مقدار برای مثال بالا برابر است با:

$$0/404 = 0/085 + 0/056 + 0/025 + 0/224 + 0/014 = \text{تابع خطرات محیطی}$$

تخصیص نهایی سلول‌ها و تسهیلات به مکان‌های کاندید در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به این جدول، هر ماشین تنها در یک سلول و یک مکان مستقر می‌شود. در جدول ۶، بعد از تخصیص هر تسهیل به مکان موردنظر، سطر و ستون مربوط به آن حذف شده و برای تسهیل بعدی از مابقی سطرها و ستون‌ها استفاده می‌شود. به این ترتیب ماشین ۱ تا ۵ در مکان‌های G8، G3، G7، G10 و G6 مستقر می‌شوند.

جدول ۶. تخصیص تسهیلات به مکان‌های کاندید

| G10   | G9    | G8    | G7    | G6    | G5    | G4    | G3    | G2    | G1    |        |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0/881 | 0/126 | 0/014 | 0/962 | 0/784 | 0/756 | 0/910 | 0/550 | 0/843 | 0/172 | C1, M1 |
| 0/112 | 0/753 | 0/514 | 0/369 | 0/853 | 0/951 | 0/782 | 0/224 | 0/292 | 0/301 | C2, M2 |
| 0/189 | 0/978 | 0/853 | 0/025 | 0/524 | 0/124 | 0/125 | 0/067 | 0/856 | 0/350 | C3, M3 |
| 0/056 | 0/357 | 0/863 | 0/471 | 0/352 | 0/741 | 0/236 | 0/579 | 0/998 | 0/500 | C4, M4 |
| 0/997 | 0/258 | 0/001 | 0/665 | 0/085 | 0/221 | 0/581 | 0/564 | 0/481 | 0/143 | C5, M5 |

هر ترکیبی غیر از این به افزایش سطح خطرات در چیدمان پیشنهادی منجر خواهد شد. ترکیب این تابع هدف با تابع هدف اول (هزینه) به دنبال متوازن کردن چیدمان به شکلی است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، سطح ایمنی در سطح قابل‌قبولی کنترل شود.

**توصیف محدودیت‌ها.** رابطه ۲، مشخص می‌کند که هر ماشین باید فقط به یک سلول تخصیص داده شود. روابط ۳ و ۴، ظرفیت سلول‌ها را محدود می‌کنند. رابطه ۵، نشان می‌دهد که هر مکان، فقط برای یک سلول است و رابطه ۶، هر سلول را تنها به یک مکان منتخب تخصیص می‌دهد. رابطه ۷، نشان می‌دهد که هر اپراتور استخدام‌شده باید تنها به یک سلول تخصیص داده شود. رابطه ۸، حداقل تعداد اپراتورهای استخدام‌شده در هر دوره را مشخص می‌کند. حداقل و حداکثر تعداد اپراتورهای موردنیاز برای هر ماشین به ترتیب با روابط ۹ و ۱۰، مشخص می‌شوند. رابطه ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نشان می‌دهند که اگر اپراتوری در یک دوره استخدام شده باشد باید به یک ماشین و یک سلول تخصیص یابد. حداکثر و حداقل تعداد ماشین‌هایی که هر اپراتور می‌تواند به آن تخصیص یابد، به ترتیب با روابط ۱۳ و ۱۴، مشخص می‌شوند. رابطه ۱۵، نشان می‌دهد که شرط تخصیص اپراتور به ماشین، حضور هم‌زمان ماشین و اپراتور در یک سلول مشابه است. آموزش با رابطه ۱۶، در نظر گرفته می‌شود و نشان می‌دهد که اپراتور آموزش‌دیده در یک دوره نیازی به یادگیری مجدد برای کار با همان ماشین در دوره‌های بعدی



نخواهد داشت. رابطه ۱۷، نشان می‌دهد که فقط یک مسیر فرآیند به‌عنوان مسیر بهینه برای هر قطعه انتخاب می‌شود. رابطه ۱۸، تغییرات بار هر سلول را در طول یک دوره تولید متعادل می‌کند. در این محدودیت مقدار تعادل بار کاری با نماد  $q$  مشخص می‌شود که در بازه  $[0, 1]$  قرار دارد. کمینه مقدار بار کاری مجاز در هر سلول برابر  $\frac{q}{c}$  درصد از بار کلی است که در زمان پردازش ایجاد می‌شود. رابطه ۱۹، اطمینان ایجاد می‌کند که جفت ماشین موجود در مجموعه  $\theta$  نباید در یک سلول قرار گیرند. با رابطه ۲۰، این اطمینان حاصل می‌شود که جفت ماشین‌های موجود در مجموعه  $\Omega$  باید در یک سلول قرار گیرند. رابطه ۲۱، سطح سرعت ماشین را در انجام هر عملیات برای هر قطعه در هر مسیر و دوره تعیین می‌کند. رابطه ۲۲، تضمین می‌کند که کل زمان کارکرد هر ماشین از زمان موجود تجاوز نمی‌کند. رابطه ۲۳، تضمین می‌کند که ظرفیت زمانی اپراتورهای مختلف برای کار با هر ماشین در هر دوره از زمان‌های پردازش قطعات مختلف توسط هر ماشین بزرگ‌تر باشد. رابطه ۲۴، نشان می‌دهد که درصد کل زمان صرف‌شده توسط یک اپراتور بر روی ماشین‌های مختلف در یک دوره باید کمتر از ۱ باشد. در رابطه ۲۵، هر اپراتور با شرط تخصیص به هر ماشین، بخشی از ظرفیت زمانی خود را به آن ماشین سرویس می‌دهد. در رابطه ۲۶، نوع متغیرها تعریف می‌شود که در آن، همه متغیرهای باینری هستند.

**خطی‌سازی مدل ریاضی.** مدل ریاضی پیشنهادی به دلیل وجود رابطه‌های (۱-۱)، (۱-۲)، (۱-۳)، (۱-۴)، (۱-۶)، (۱-۹) و (۱-۱۰) به‌عنوان تابع هدف و رابطه‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۸ به‌عنوان محدودیت، غیرخطی است؛ بنابراین برای تبدیل آن‌ها به یک مسئله خطی از تکنیک‌های خطی‌سازی استفاده می‌شود. تکنیک‌های مورد استفاده برای خطی‌سازی و تبدیل توابع هدف و محدودیت‌های غیرخطی به معادلات خطی در ادامه بیان شده است.

**اولین تکنیک خطی‌سازی.** عبارت  $Z = X_1 * X_1 * \dots * X_n$  را نظر بگیرید. در اینجا فرض می‌شود که متغیر  $X_i$  به‌ازای مقادیر  $(i = 1, 2, \dots, n)$  باینری است؛ بنابراین متغیر  $Z$  تنها زمانی می‌تواند ۱ باشد 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 می‌توان متغیر باینری  $Z$  را با ضرب متغیرهای باینری  $X_i$  با افزودن برخی قیود جایگزین کرد.

$$Z \leq X_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$Z \geq \sum_{i=1}^n X_i - (n - 1) \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

عبارت اول، دوم، سوم و ششم و بخشی از عبارت چهارم (ضرب متغیرها) تابع هدف که باعث غیرخطی بودن مدل شده‌اند را می‌توان با استفاده از این نوع خطی‌سازی خطی کرد. برای این کار باید متغیرهای زیر تعریف شوند:

$$\begin{aligned} VXSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h &= V_{o,p}^h * X_{m,c}^h * S_{c,g}^h * X_{m',c'}^h * S_{c',g'}^h \\ VXA_{p,o,m,m',c}^h &= V_{o,p}^h * X_{m,c}^h * X_{m',c}^h \\ XSR_{m,c,c',g,g'}^h &= X_{m,c}^h * S_{c,g}^h * X_{m,c'}^{h+1} * S_{c',g'}^{h+1} \\ XY_{m,k,c}^h &= X_{m,c}^h * Y_{k,c}^h \\ XS_{m,g,c}^h &= X_{m,c}^h * S_{g,c}^h \\ RZ_{k,m}^h &= R_{k,m}^h * Z_{k,m}^h \\ XYRZQ_{m,k,c}^h &= RZ_{k,m}^h * XY_{m,k,c}^h * Q_k^h \\ BV_{o,p,j,f}^h &= B_{o,p,j,f}^h * V_{o,p}^h \\ VX_{o,p,m,c}^h &= V_{o,p}^h * X_{m,c}^h \end{aligned}$$

با تغییر توابع هدف به فرم بالا، محدودیت‌های زیر باید به مدل خطی جدید اضافه شود.

$$\begin{aligned} VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h &\leq X_{m,c}^h && \text{رابطه (۲۹)} \\ VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h &\leq S_{c,g}^h && \text{رابطه (۳۰)} \\ VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h &\leq X_{m',c'}^h && \text{رابطه (۳۱)} \\ VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h &\leq S_{c',g'}^h && \text{رابطه (۳۲)} \\ VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h &\leq V_{o,p}^h && \text{رابطه (۳۳)} \\ VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h &\geq V_{o,p}^h + X_{m,c}^h + S_{c,g}^h + X_{m',c'}^h + S_{c',g'}^h - 4 && \text{رابطه (۳۴)} \\ VXA_{p,o,m,m',c}^h &\leq X_{m,c}^h && \text{رابطه (۳۵)} \\ VXA_{p,o,m,m',c}^h &\leq X_{m',c}^h && \text{رابطه (۳۶)} \\ VXA_{p,o,m,m',c}^h &\leq V_{o,p}^h && \text{رابطه (۳۷)} \\ VXA_{p,o,m,m',c}^h &\geq V_{o,p}^h + X_{m,c}^h + X_{m',c}^h - 2 && \text{رابطه (۳۸)} \\ XSR_{m,c,c',g,g'}^h &\leq X_{m,c}^h && \text{رابطه (۳۹)} \\ XSR_{m,c,c',g,g'}^h &\leq S_{c,g}^h && \text{رابطه (۴۰)} \\ XSR_{m,c,c',g,g'}^h &\leq X_{m,c'}^{h+1} && \text{رابطه (۴۱)} \\ XSR_{m,c,c',g,g'}^h &\leq S_{c',g'}^{h+1} && \text{رابطه (۴۲)} \\ XSR_{m,c,c',g,g'}^h &\geq X_{m,c}^h + S_{c,g}^h + X_{m,c'}^{h+1} + S_{c',g'}^{h+1} - 3 && \text{رابطه (۴۳)} \\ XY_{m,k,c}^h &\leq X_{m,c}^h && \text{رابطه (۴۴)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
XY_{m,k,c}^h &\leq Y_{k,c}^h && \text{رابطه (۴۵)} \\
XY_{m,k,c}^h &\geq X_{m,c}^h + Y_{k,c}^h - 1 && \text{رابطه (۴۶)} \\
RZ_{k,m}^h &\leq R_{k,m}^h && \text{رابطه (۴۷)} \\
RZ_{k,m}^h &\leq Z_{k,m}^h && \text{رابطه (۴۸)} \\
RZ_{k,m}^h &\geq R_{k,m}^h + Z_{k,m}^h - 1 && \text{رابطه (۴۹)} \\
XYRZQ_{m,k,c}^h &\leq RZ_{k,m}^h && \text{رابطه (۵۰)} \\
XYRZQ_{m,k,c}^h &\leq XY_{m,k,c}^h && \text{رابطه (۵۱)} \\
XYRZQ_{m,k,c}^h &\leq Q_k^h && \text{رابطه (۵۲)} \\
XYRZQ_{m,k,c}^h &\geq RZ_{k,m}^h + XY_{m,k,c}^h + Q_k^h - 2 && \text{رابطه (۵۳)} \\
XS_{m,g,c}^h &\leq S_{g,c}^h && \text{رابطه (۵۴)} \\
XS_{m,g,c}^h &\leq X_{m,c}^h && \text{رابطه (۵۵)} \\
XS_{m,g,c}^h &\geq X_{m,c}^h + S_{g,c}^h - 1 && \text{رابطه (۵۶)} \\
VXS_{o,p,m,c,g}^h &\leq V_{o,p}^h && \text{رابطه (۵۷)} \\
VXS_{o,p,m,c,g}^h &\leq X_{m,c}^h && \text{رابطه (۵۸)} \\
VXS_{o,p,m,c,g}^h &\leq S_{g,c}^h && \text{رابطه (۵۹)} \\
VXS_{o,p,m,c,g}^h &\geq X_{m,c}^h + V_{o,p}^h + S_{g,c}^h - 1 && \text{رابطه (۶۰)} \\
BV_{o,p,j,f}^h &\leq V_{o,p}^h && \text{رابطه (۶۱)} \\
BV_{o,p,j,f}^h &\leq B_{o,p,j,f}^h && \text{رابطه (۶۲)} \\
BV_{o,p,j,f}^h &\geq B_{o,p,j,f}^h + V_{o,p}^h - 1 && \text{رابطه (۶۳)} \\
VX_{o,p,m,c}^h &\leq X_{m,c}^h && \text{رابطه (۶۴)} \\
VX_{o,p,m,c}^h &\leq V_{o,p}^h && \text{رابطه (۶۵)} \\
VX_{o,p,m,c}^h &\geq V_{o,p}^h + X_{m,c}^h - 1 && \text{رابطه (۶۶)}
\end{aligned}$$

**دومین تکنیک خطی سازی.** عبارت  $Z = |X_1 - X_2|$  را در نظر بگیرید. در اینجا فرض می شود که متغیرهای  $X_1$  و  $X_2$  باینری هستند. برای خطی کردن چنین عبارت غیرخطی باید متغیرهای تصادفی جدید  $X'_1$  و  $X'_2$  را در نظر گرفت و آن ها 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 می شود. عبارت چهارم در تابع هدف که باعث غیرخطی شدن مدل شده است، می تواند به وسیله این تکنیک خطی سازی خطی شود. برای انجام این کار، محدودیت های زیر باید به مدل اضافه شوند.

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^h - \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^{h+1} \right| = BA_{m,g}^h + BB_{m,g}^h \\ & \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^h - \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^{h+1} = BA_{m,g}^h - BB_{m,g}^h \\ & \forall m, g, h, \quad h \in (1, 2, \dots, H-1) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۶۷)}$$

$$R_{km}^h \leq \sum_{c=1}^C XY_{k,m,c}^h \quad \forall k, m, h; \quad \text{رابطه (۶۸)}$$

$$Z_{km}^{h+1} = (Z_{km}^h - RZ_{km}^h) \quad \forall k, m, h = 1, \dots, H-1; \quad \text{رابطه (۶۹)}$$

$$\begin{aligned} & XY_{km,c}^h, Z_{km}^h, XS_{m,g,c}^h, VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h, VX_{o,p,m,c}^h \\ & R_{km}^h, XYRZ_{mkc}^h, VXA_{o,p,m,m',c}^h, BA_{m,g}^h, BB_{m,g}^h, XSR_{mcc'gg'}^h, BV_{o,p,j,f} \in \{0,1\} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۷۰)}$$

مدل ریاضی خطی شده. مدل نهایی خطی شده به صورت زیر است:

$$\text{Min } OF_1 = \quad \text{رابطه (۱۰-۱)}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \\ & U_{o,p,j,m}^h * U_{o,p,(j+1),m'}^h * dis_{g,g'}^h * D_p^h * \\ & VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h * C_p^{IE} \end{aligned}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^{h-1}} VXA_{p,o,m,m',c}^h \quad \text{رابطه (۱۱-۱)}$$

$$\begin{aligned} & U_{o,p,j,m}^h * U_{o,p,(j+1),m'}^h * D_p^h * C_p^{IA} \\ & + \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G XSR_{m,c,c',g,g'}^h * \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۲-۱)}$$

$$\begin{aligned} & dis_{g,g'}^h * C_m^{Mo} \\ & + \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G (BA_{m,g}^h + BB_{m,g}^h) * C_m^{IU} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۳-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K (Q_k^h * C_k^{HI} + (1 - Q_k^h) * C_k^{FI}) \quad \text{رابطه (۱۴-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C XYRZ_{mkc}^h * C_{k,m}^{TR} \quad \text{رابطه (۱۵-۱)}$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^{h-1}} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * \quad \text{رابطه (۱۶-۱)}$$

$$\begin{aligned} & T_{o,p,j,m}^h * R_{k,m}^h * NTD_{m,f} * C_{k,m}^{SA} \\ & + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * T_{o,p,j,m}^h * V_{o,p}^h * \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۷-۱)}$$

$$\begin{aligned} & NTD_{m,f} * CBR_m / MTBF_m \\ & \text{Min } OF_2 = \quad \text{رابطه (۱۸-۱)} \end{aligned}$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^{h-1}} BV_{o,p,j,f} *$$

$$T_{o,p,j,m}^h * U_{o,p,j,m}^h * D_p^h * NECI_{m,f} * EEC_{m,j,o}$$

$$\text{Min } OF_3 = \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C XS_{m,c,g}^h * IN_{m,g} \quad \text{رابطه (۱-۱۸)}$$

محدودیت‌های مدل خطی شامل محدودیت‌های بدون تغییر که در روابط ۲ تا ۱۴، ۱۷ و ۱۹ تا ۲۶ به آن‌ها اشاره شده است و محدودیت‌های جدید در روابط ۲۹ تا ۶۶ و ۷۰ هستند که در این بین، رابطه ۱۵ با ۶۸ و رابطه ۱۶ با ۶۹ جایگزین می‌شوند.

**روش حل.** هدف از بهینه‌سازی، یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. مسائل بهینه‌سازی را که دربرگیرنده چند تابع هدف هستند، «مسائل چندهدفه» می‌نامند. برای حل مسائل ریاضی چندهدفه، روش‌های متعددی معرفی شده است [۱۸، ۲۵، ۲۷]. در این پژوهش برای حل مدل ریاضی پیشنهادی در ابعاد کوچک از روش معیار جامع (۱) و برای ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است.

**روش معیار جامع.** این روش جزو روش‌های قدیمی حل مسائل چندهدفه است. این روش به دو دلیل موردتوجه است: ۱. این روش نیازمند اطلاعات بسیار کمی از طرف تصمیم‌گیرنده است و وابستگی به تصمیم‌گیرنده ندارد؛ ۲. سهولت فهم این روش در اجرای مدل‌های کاربردی [۳۶]. این روش با تعریف تابع سازگاری به‌دنبال حداقل‌سازی انحراف توابع هدف از جواب ایده‌آل است؛ به‌عبارت‌دیگر هر جوابی که کمترین فاصله را از نقطه ایده‌آل داشته باشد، بهترین جواب است. روابط زیر مقدار انحراف از جواب ایده‌آل را برای تابع هدف کمی‌سازی نشان می‌دهد:

$$\text{رابطه (۷۱)} \quad \text{Minimize } L = \left[ \sum_{u=1}^U W_u \left[ \frac{\text{obj}_u - \min \text{obj}_u}{\max \text{obj}_u - \min \text{obj}_u} \right]^p \right]^{\frac{1}{p}}$$

$$\text{رابطه (۷۲)} \quad \text{obj}_u = h_u(x) \quad \forall u \in U,$$

$$\text{رابطه (۷۳)} \quad g_j(x) \leq b_j \quad \forall j \in J.$$

پارامتر  $W_u$  اهمیت (وزن) هدف  $u$  را نشان می‌دهد. در روش معیار جامع، فاصله هر تابع هدف تا جواب ایده‌آل بر طول بازه تقسیم می‌شود تا تفاوت در مقیاس‌های اهداف حذف شود. پارامتر  $p$  مقدار سطح اهمیت در انحرافات است. هنگامی که به سمت بی‌نهایت حرکت می‌کند، بر روی انحراف تأکید بیشتری می‌شود. درنهایت پس از حل تابع هدف در رابطه ۷۱، با قیود ارائه‌شده در روابط ۷۲ و ۷۳، مقدار بهینه را برای هر هدف  $u$  به‌دست می‌آید. در این پژوهش

سه تابع هدف وجود دارد. به دلیل وجود بیش از دو هدف و کاهش زمان حل مقدار  $p$  برابر ۱ فرض شده است [۳۶].

**گام نخست:** ابتدا با حل جداگانه تمام توابع هدف بر اساس محدودیت‌های مربوطه، مقدار بهینه هر یک به دست می‌آید.

**گام دوم:** مقادیر ضدایده‌آل (بدترین مقدار ممکن) با حل توابع هدف معکوس به دست می‌آید؛ یعنی کمینه‌سازی به بیشینه‌سازی تبدیل می‌شود و برعکس.

**گام سوم:** این مقادیر در رابطه ۷۱، جایگذاری می‌شوند و بر اساس محدودیت‌های آن به حداقل می‌رسد.

**گام چهارم:** مقادیر بهینه و انحراف  $L$  در نهایت از طریق حل مدل به دست می‌آیند. با توجه به این نکته که  $W_u$  وزن اهمیت تابع هدف  $u$ ام است، رابطه ۷۴ برقرار می‌باشد:

$$\sum_{u=1}^U W_u = 1 \quad \text{رابطه (۷۴)}$$

**الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب.** این الگوریتم نخستین بار توسط دب و همکاران (۲۰۰۲)، معرفی شد و از پرکاربردترین و معروف‌ترین الگوریتم‌های چندهدفه محسوب می‌شود [۵] و در سنوات اخیر برای حل مسائل پیچیده بخصوص مسائل ترکیباتی مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. NSGA-II نسخه بهبودیافته‌ای از الگوریتم NSGA است که به دلیل محدودیت‌های موجود و پیچیدگی محاسباتی، توسط پژوهشگران مورد انتقاد قرار گرفته است. NSGA-II از تکنیک مرتب‌سازی نامغلوب و عملگر فاصله ازدحام<sup>۱</sup> برای رتبه‌بندی و انتخاب بهترین جبهه‌های جمعیتی استفاده می‌کند؛ همچنین از نظر محاسباتی سریع بوده و پیچیدگی کلی آن حداکثر  $O(MN^2)$  است که در آن  $M$  تعداد توابع هدف و  $N$  اندازه جمعیت است. این الگوریتم از دو عملگر تقاطع و جهش برای ترکیب جمعیت فعلی و ایجاد فرزندان به‌عنوان نسل بعدی استفاده می‌کند که در نتیجه آن بهترین افراد از نظر عدم تسلط و تنوع به‌عنوان جواب انتخاب می‌شوند.

**نحوه نمایش جواب.** مهم‌ترین مرحله در حل مسائل با استفاده از روش‌های فراابتکاری، انتخاب نمایش جواب است [۵۱]. در این پژوهش یک ساختار جواب جدید برای اطمینان از برآورده شدن تمام محدودیت‌ها و ایجاد جواب‌های امکان‌پذیر (موجه) ارائه شده است.

در الگوریتم ژنتیک هر کروموزوم شامل مجموعه‌ای از جواب‌ها است و هر عضو آن، ژن نامیده می‌شود. در این پژوهش کروموزوم پیشنهادی به صورت ماتریس حاوی تعدادی سطر و ستون مشخص در نظر گرفته شده است. به‌طور دقیق‌تر، یک کروموزوم در این پژوهش از پنج

---

1. Crowding Distance

بخش تشکیل شده است: بخش اول با توجه به ماشین‌هایی که به هر سلول و در هر دوره ( $X$ ) تخصیص می‌یابد، سازمان‌دهی شده است؛ بخش دوم، سوم، چهارم و پنجم به ترتیب با سلول‌هایی که به هر مکان در هر دوره تخصیص می‌یابد ( $S$ )، اپراتورهایی که به هر ماشین در هر دوره تخصیص می‌یابد ( $R$ )، مسیرهایی که به هر قطعه در هر دوره تخصیص می‌یابد ( $V$ ) و سرعت‌هایی که به هر ماشین در هر دوره تخصیص می‌یابد ( $B$ )، تکمیل می‌شود. به این ترتیب اندازه بردار ریاضی (کروموزوم) نهایی برابر  $(|X|+|S|+|R|+|V|+|B|)$  است. هر متغیر متناسب با ابعاد آن یک ماتریس (کروموزوم) است که درایه (ژن)‌های آن می‌تواند مقادیر اعشاری بین صفر و ۱ را اخذ کنند.

اندازه بردار ریاضی و درایه‌های آن برای ۲ دوره، ۵ ماشین، ۳ مکان، ۲ سلول، ۵ اپراتور، ۴ محصول و ۳ مسیر، ۳ عملیات و ۳ حالت برای سرعت در جدول ۷، نشان داده شده است.

جدول ۷. نمایش اندازه درایه‌ها

| نام متغیر   | X  | S  | R  | V  | B   |
|-------------|----|----|----|----|-----|
| تعداد درایه | ۱۶ | ۱۲ | ۴۰ | ۱۶ | ۲۱۶ |

طبق جدول ۷، تعداد کل درایه‌های بردار ریاضی برای جمعیت اولیه برابر ۳۰۰ است  $(۳۰۰=۱۶+۱۲+۴۰+۱۶+۲۱۶)$ . این ۳۰۰ درایه مقادیر تصادفی و اعشاری بین صفر و ۱ را دریافت می‌کند. در ادامه برای متغیر  $S$  تعداد ۱۶ درایه از ۳۰۰ درایه اولیه به تصادف انتخاب و آن ۱۶ درایه به یک ماتریس با ابعاد متغیر  $S$  (سه‌بعدی  $(G, C, H)$ ) تبدیل می‌شود. در ادامه نحوه انتخاب بهترین مکان برای هر سلول (مربوط به بخش دوم کروموزوم پیشنهادی) ارائه شده است.

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

گام ۱- مشخص کردن مکان‌های کاندید برای سلول ۱ در دوره ۱

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

گام ۲- تخصیص بهترین مکان به سلول ۱ و حذف سطر و ستون مربوط به آن

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

گام ۳- مشخص کردن مکان‌های کاندید برای سلول ۲ در دوره ۱

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

گام ۴- تخصیص بهترین مکان به سلول ۲ در دوره ۱

شکل ۱. نمایش مراحل انتخاب جواب برای متغیر  $S$

به منظور تخصیص سلول ۱ به هر مکان در دوره ۱، بالاترین مقدار در این ستون انتخاب و سلول موردنظر به آن مکان تخصیص می‌یابد. در این صورت:  
در دوره اول، مکان  $G2$  با مقدار  $۰/۸۰$  به سلول ۱ تخصیص می‌یابد. در ادامه سطر مربوط به  $G2$  حذف می‌شود و برای انتخاب سلول دوم  $G3$  با مقدار  $۰/۴۸$  به سلول ۲ اختصاص می‌یابد. برای دوره دوم نیز مطابق دوره اول این عملیات تکرار می‌شود. در نهایت درایه‌های انتخاب شده مقدار ۱ و مابقی مقدار صفر می‌گیرند.

**جمعیت اولیه<sup>۱</sup>**. با مشخص شدن نحوه کدگذاری کروموزوم‌ها، جمعیت اولیه تعریف می‌شود. جمعیت اولیه باید مجموعه گسترده‌ای از جواب‌های متنوع و مناسب باشد. چندین استراتژی و روش را می‌توان برای به دست آوردن جمعیتی با این ویژگی‌ها به کار برد. متداول‌ترین آن‌ها برای تولید جمعیت اولیه به دلیل سرعت بالا در اجرا و ایجاد تنوع، استفاده از روش تصادفی است؛ بنابراین در این پژوهش از روش تصادفی برای تولید جمعیت اولیه استفاده شده است.

**رتبه‌بندی غیرمغلوب**. در این روش، اعضای جمعیت با استفاده از مفهوم تسلط پارتو مرتب می‌شوند. فرآیند مرتب‌سازی غیرمغلوب با اختصاص نخستین رتبه به اعضای غیرمغلوب جمعیت

1. Initial population



اولیه آغاز می‌شود. این اعضای رتبه اول در نخستین جبهه قرار می‌گیرند و از جمعیت اولیه حذف می‌شوند. پس از آن، روش مرتب‌سازی غیرمغلوب بر روی اعضای باقی‌مانده جمعیت انجام می‌شود؛ همچنین اعضای غیرمغلوب جمعیت باقیمانده رتبه دوم را به خود اختصاص می‌دهند و در جبهه دوم قرار می‌گیرند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که کل اعضای جمعیت بر اساس رتبه‌های خود در جبهه‌های مختلف قرار گیرند.

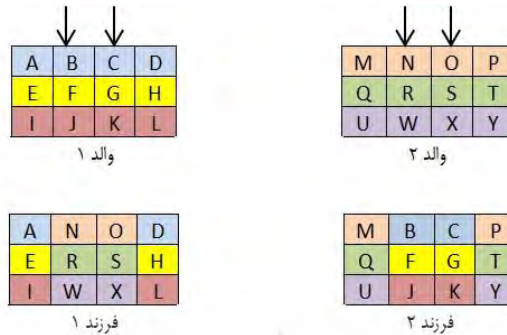
**فاصله ازدحام.** فاصله ازدحام برای تخمین تراکم جواب‌های اطراف یک جواب خاص محاسبه می‌شود. میانگین فاصله دو جواب در امتداد هر یک از اهداف است. ازدحام در اینجا به معنای این است که جواب‌هایی که فاصله تراکم کمتری دارند و در نزدیکی هم هستند، در نسل بعدی حفظ می‌شوند. این امر باعث حفظ تنوع جواب‌ها در جمعیت شده و مانع از تمرکز نقاط در یک ناحیه خاص می‌شود. به عبارت دیگر، ازدحام تلاش می‌کند تا جواب‌هایی که در نقاط مختلف فضای جواب پراکنده شده‌اند را حفظ کرده و تنوع جواب‌ها را تضمین کند. اگر  $f_j^i$ ،  $f_j^{i+1}$ ،  $f_j^i$ ،  $f_j^{i-1}$ ،  $f_j^{max}$  و  $f_j^{min}$  بیشینه و کمینه مقدار  $f_j^{min}$  تابع هدف در میان افراد باشد. فاصله تراکم  $f_j^{i+1}$  فرد با فرض اینکه  $k$  تعداد توابع هدف است، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$cd(i) = \sum_{i=1}^k \frac{f_j^{i+1} - f_j^{i-1}}{f_j^{max} - f_j^{min}} \quad \text{رابطه (۷۵)}$$

**استراتژی انتخاب والدین.** انتخاب والدین در تنظیم سوگیری فرآیند تولیدمثل مهم است. این استراتژی به این معنا است که چگونه کروموزوم‌هایی در جمعیت فعلی انتخاب شود که فرزندان برای نسل بعدی ایجاد کنند. به‌طور کلی بهتر است در نسل فعلی فرصت بیشتری به بهترین جواب‌ها داده شود تا به عنوان والدین انتخاب شوند و فرزندان (جمعیت) جدیدی را به وجود آورند. استراتژی‌های مختلفی برای این موضوع معرفی شده است که برجسته‌ترین آن‌ها عبارتند از: روش تصادفی؛ چرخ رولت؛ مسابقه‌ای<sup>۳</sup> و رتبه‌بندی<sup>۴</sup>. در این پژوهش برای انتخاب والدین از روش تصادفی استفاده شده است.

- 
1. Random
  2. Roulette Wheel
  3. Tournament
  4. Ranking

**عملگر تقاطع.** عملگر متقاطع، فضای حل جدیدی را بررسی می‌کند و امکان تولید جواب‌های جدید به نام «فرزندان» را از طریق ترکیب کروموزوم‌ها فراهم می‌سازد. در این عملگر فرزندان برخی ویژگی‌ها را از والد خود به ارث می‌برند. در این پژوهش از عملگر تقاطع دونقطه‌ای استفاده شده است. به این ترتیب برای تولید فضای حل جدید (جمعیت جدید) ابتدا در هر والد دو نقطه به تصادف انتخاب می‌شود؛ به نحوی که هر والد به سه بخش تقسیم شود. در ادامه برای تولید هر فرزند جدید این سه قسمت در والدها با یکدیگر ترکیب می‌شوند. نمایش گرافیکی این موضوع در شکل ۲، ارائه شده است.



شکل ۱. ایجاد جمعیت جدید (فرزند) بر اساس عملگر تقاطع دونقطه‌ای

**عملگر جهش.** مهم‌ترین وظیفه عملگر جهش، حفظ اکتشاف جمعیت در نسل‌های متوالی و افزایش فضای حل است. با استفاده از عملگر جهش، چند ژن از یک کروموزوم کاندید به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند تا مقادیر آن‌ها بر اساس احتمال جهش از پیش تعیین شده  $p_m$  تغییر یابد. عملگرهای جهش مختلفی برای این منظور معرفی شده است. در این پژوهش به‌منظور تولید جمعیت جدید از انتخاب تصادفی یکی از سه روش جانشینی<sup>۱</sup> بازگشتی<sup>۲</sup> و الحاقی<sup>۳</sup> که به‌صورت مجزا تعریف شده‌اند، استفاده شده است. نحوه عملکرد این عملگرها در شکل‌های ۳ تا ۵، نشان داده شده است.

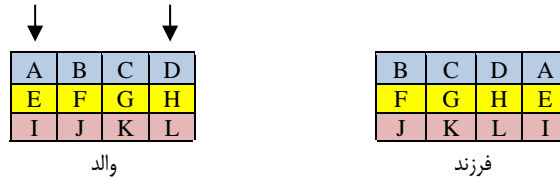


شکل ۲. تولید جمعیت جدید (فرزند) بر اساس روش Swap

1. Swap
2. Reversion
3. Insertion



شکل ۳. تولید جمعیت جدید (فرزند) بر اساس روش Reversion



شکل ۴. تولید جمعیت جدید (فرزند) بر اساس روش Insertion

**شرط توقف الگوریتم.** بسیاری از پژوهشگران نشان دادند که همگرایی به یک جواب بهینه مطلق، ویژگی ذاتی یک الگوریتم تکاملی چندهدفه (MOEA) مانند الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمغلوب (NSGA-II) نیست؛ اما با توجه به شرایط خاص امکان پذیر است. از آنجاکه هیچ تضمینی برای بهبود جواب‌های به‌دست‌آمده در نسل‌های جدید با استفاده از عملگرهای جهش و متقاطع وجود ندارد، می‌توان فرض کرد که یک MOEA به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو در زمانی که یک معیار توقف برآورده می‌شود، همگرا می‌گردد. در این پژوهش، حداکثر تعداد تکرار از پیش تعیین شده (N) برای توقف الگوریتم در نظر گرفته شده است.

**معیارهای مقایسه کارایی روش‌های چندهدفه.** در این بخش، عملکرد روش‌های پیشنهادی (یعنی NSGA-II و lp-metric) ارزیابی خواهد شد. پنج شاخص متداول مختلف برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی استفاده می‌شود. در این پژوهش از معیارهای عملکردی زیر برای این مقایسه استفاده شده است:

**الف) میانگین فاصله ایده‌آل<sup>۱</sup> (MID).** 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:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad \text{رابطه (۷۶)}$$

$$C_i = \sqrt{(f_{1i} - f_1^*)^2 + (f_{2i} - f_2^*)^2 + \dots + (f_{li} - f_l^*)^2} \quad \text{رابطه (۷۷)}$$

1. Mean ideal distance (MID)

در این رابطه  $C_i$  فاصله هر جواب/ نقطه از مجموعه پارتو از نقطه ایده‌آل است که به صورت اقلیدسی محاسبه شده است؛ همچنین  $f_{ii}$  مقدار تابع هدف  $f_{ii}$  در جواب  $\lambda$  را نشان می‌دهد.

**ب) شاخص پراکندگی<sup>۱</sup> (DM).** در این معیار، طول قطر فضای مکعبی با استفاده از دورترین مقادیر جواب‌های غیرمغلوب 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:

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^L (\max_{i=1:|Q|} f_{ii}^i - \min_{i=1:|Q|} f_{ii}^i)^2} \quad \text{رابطه (۷۸)}$$

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

**پ) شاخص یکنواختی فضا<sup>۲</sup> (SM).** متریک فاصله این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان یکنواختی نقطه پخش شده در مجموعه جواب را تعیین کرد. جواب‌های با مقدار فاصله کمتر اولویت بیشتری خواهند داشت و نشان‌دهنده فاصله کمتر جواب‌های مجموعه پارتو از یکدیگر و یکنواختی بیشتر جواب‌ها است. تعریف این متریک در رابطه زیر آمده است.

$$Spacing = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})}{|Q|}} \quad \text{رابطه (۷۹)}$$

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

**ت) زمان پردازش<sup>۳</sup>.** مدت زمانی است که توسط واحد پردازش مرکزی (CPU) برای پردازش ساختار یک برنامه رایانه‌ای یا سیستم‌عامل استفاده شده است. زمان CPU برحسب ساعت یا ثانیه اندازه‌گیری می‌شود و تنها زمانی را شامل می‌شود که در طی آن برنامه واقعاً از CPU برای انجام کارهایی مانند انجام عملیات حسابی و منطقی استفاده می‌کند. برای مثال، انتظار برای عملیات ورودی/ خروجی (I/O) یا واردشدن به حالت کم‌مصرف (بیکار) زمان CPU نیست.

- 
1. Diversification Metric (DM)
  2. Spacing metric (SM)
  3. CPU time (or processing time)

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

**اعتبارسنجی مدل.** در این بخش به منظور تأیید و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، نمونه‌هایی الهام‌گرفته شده از داده‌های موجود در مبانی نظری موضوع در ابعاد کوچک طراحی شده است [۵۲]. برای این امر، مدل ریاضی مسئله در نرم‌افزار گمز<sup>۱</sup> نسخه ۲۵/۰۲ کدگذاری و از حل‌کننده سی‌پلکس<sup>۲</sup> به‌عنوان حل‌کننده پیش‌فرض استفاده شده است. محاسبات روی رایانه شخصی با سیستم عامل ماکروسافت ویندوز ۱۰ با پردازنده اینتل به مشخصه ۷ هسته و ۳/۴ گیگاهرتز و ۸ گیگابایت رم انجام شده است. به‌منظور استفاده از تمام هسته‌های پردازنده موجود، «threads = 0» در تنظیمات گمز فعال شد (این عمل می‌تواند به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در زمان پردازش منجر شود)؛ همچنین با استفاده از این مثال‌ها، تحلیل حساسیت برای بررسی رفتار جواب‌ها از نظر تغییرات در اهمیت توابع هدف، میزان تقاضا و زمان پردازش انجام پذیرفته است. جدول ۸، حاوی مشخصات و ابعاد مسائل تعریف‌شده است. مقادیر وزن ( $W_u$ ) برای مشخص کردن درجه اهمیت توابع هدف، مطابق نظر خبرگان به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۸. نمونه‌های مختلف برگرفته از مبانی نظری موضوع

| منبع      | ابعاد مسئله | شماره نمونه | تعداد قطعه | تعداد ماشین | تعداد عملیات | تعداد مسیر | تعداد سلول | تعداد اپراتور | تعداد دوره | تعداد مکان |
|-----------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|---------------|------------|------------|
| [۵۲]      |             | ۱           | ۴          | ۴           | ۳            | ۳          | ۲          | ۵             | ۲          | ۳          |
| طراحی‌شده | کوچک        | ۲           | ۴          | ۴           | ۴            | ۳          | ۲          | ۵             | ۲          | ۳          |
| طراحی‌شده |             | ۳           | ۵          | ۴           | ۳            | ۳          | ۲          | ۵             | ۲          | ۳          |
| طراحی‌شده |             | ۴           | ۵          | ۵           | ۳            | ۳          | ۲          | ۶             | ۲          | ۳          |
| طراحی‌شده |             | ۵           | ۵          | ۵           | ۴            | ۳          | ۲          | ۶             | ۲          | ۳          |

**تحلیل نمونه ۱:** این نمونه شامل دو سلول، چهار ماشین، پنج اپراتور در دسترس، دو دوره تولید، سه عملیات متوالی (توالی عملیات)، سه مسیر فرایند جایگزین و چهار قطعه است که باید توسط ماشین‌ها با توجه به توالی عملیات آن‌ها در هر دوره پردازش شود و تقاضای هر دوره را محقق سازد. جدول ۹، اطلاعات مربوط به قطعه/مسیر/ماشین را در نمونه اول گزارش می‌کند. داده‌های ورودی مربوط به اپراتور - ماشین شامل قابلیت اپراتورها در کار با ماشین‌های مختلف، آموزش، حقوق، هزینه‌های استخدام و اخراج در جدول‌های ۱۰ و ۱۱، گزارش شده است. برای

1. GAMS  
2. CPLEX

مثال، همان‌طور که در جدول ۱۰، نشان داده شده است، اپراتور ۱ می‌تواند با ماشین‌های ۳ و ۴ کار کند. حداقل و حداکثر اپراتور موردنیاز هر ماشین ۱ است و هر اپراتور حداکثر می‌تواند به ۲ ماشین تخصیص یابد. جدول ۱۰، فاصله بین مکان‌های کاندید برای سلول‌ها را نشان می‌دهد؛ همچنین فرض می‌شود که حداقل و حداکثر ظرفیت هر سلول برای ماشین‌ها به ترتیب برابر ۱ و ۲ است؛ علاوه برای این، فرض شده است که هر دستگاه می‌تواند تحت سه حالت سرعت پردازش عمل کند. به این ترتیب در حالت اول، مقدار  $NTD_{m,1}$  و  $NECI_{m,1}$  برابر ۱، در حالت دوم مقدار  $NTD_{m,2}$  برابر  $0/75$  و مقدار  $NECI_{m,2}$  برابر  $1/5$  و در حالت سوم مقدار  $NTD_{m,3}$  برابر  $0/5$  و مقدار  $NECI_{m,3}$  برابر ۳ در نظر گرفته شده است. ضریب مقدار بار کاری ( $q$ ) برابر  $0/9$  تنظیم شده است؛ از این‌رو برای دو سلول تولیدشده، حداقل بار کاری مجاز برابر ۴۵ درصد از کل حجم کار در زمان پردازش خواهد بود. داده‌های مربوط به ماشین و داده‌های تکمیلی مسئله جدول‌های ۱۳ و ۱۴، مشخص شده است.

جدول ۹. اطلاعات مربوط به هر دوره / قطعه / مسیر / توالی / زمان پردازش / عملیات در مثال عددی ۱

| دوره   | قطعه   | مسیر | توالی عملیات | زمان پردازش       | تقاضا       |     |
|--------|--------|------|--------------|-------------------|-------------|-----|
| دوره ۱ | ۱      | ۱    | ۱-۴-۳        | $0/2 - 0/1 - 0/5$ | ۱۰۰         |     |
|        |        | ۲    | ۲-۳          | $0/4 - 0/5$       |             |     |
|        | ۲      | ۱    | ۱-۳          | $0/2 - 0/5$       | ۶۰          |     |
|        |        | ۲    | ۱-۲          | $0/2 - 0/3$       |             |     |
|        | ۳      | ۱    | ۴-۲-۱        | $0/4 - 0/1 - 0/5$ | ۸۰          |     |
|        |        | ۲    | ۴-۳-۱        | $0/4 - 0/2 - 0/5$ |             |     |
|        | ۴      | ۳    | ۳-۱          | $0/2 - 0/5$       | ۹۰          |     |
|        |        | ۱    | ۲-۱-۳        | $0/1 - 0/8 - 0/5$ |             |     |
|        | دوره ۲ | ۱    | ۱            | ۴-۲               | $0/2 - 0/7$ | ۲۰۰ |
|        |        |      | ۲            | ۱-۳               | $0/1 - 0/7$ |     |
|        |        | ۲    | ۱            | ۳-۱               | $0/2 - 0/1$ | ۱۶۰ |
|        |        |      | ۲            | ۲-۴               | $0/8 - 0/2$ |     |
| ۳      |        | ۱    | ۴-۲-۳        | $0/7 - 0/1 - 0/5$ | ۱۸۰         |     |
|        |        | ۲    | ۱-۳-۴        | $0/5 - 0/5 - 0/7$ |             |     |
| ۴      |        | ۱    | ۳-۱          | $0/5 - 0/1$       | ۲۰          |     |
|        |        | ۲    | ۲-۴          | $0/8 - 0/5$       |             |     |

جدول ۱۰. توانایی انجام کار اپراتور با ماشین، هزینه آموزش اپراتورها و سایر اطلاعات تکمیلی در مثال عددی ۱

| $L_k$ | $U_k$ | هزینه<br>استخدام<br>(دلار) | هزینه<br>اخراج<br>(دلار) | توانایی (هزینه آموزش/دلار) |         |         |         | اپراتور |
|-------|-------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
|       |       |                            |                          | ماشین ۴                    | ماشین ۳ | ماشین ۲ | ماشین ۱ |         |
| ۱     | ۲     | ۱۵                         | ۲۰                       | (۱۰)۰                      | (۱۰)۰   | (۶۰)۰   | (۷۰)۰   | ۱       |
| ۱     | ۲     | ۱۵                         | ۱۷                       | (۶۰)۰                      | (۴۰)۰   | (۱۰)۱   | (۵۰)۰   | ۲       |
| ۱     | ۲     | ۱۰                         | ۲۰                       | (۵۰)۰                      | (۱۰)۱   | (۳۰)۰   | (۳۰)۰   | ۳       |
| ۱     | ۲     | ۱۵                         | ۱۸                       | (۴۰)۰                      | (۳۰)۰   | (۱۰)۰   | (۵۰)۰   | ۴       |
| ۱     | ۲     | ۱۲                         | ۱۵                       | (۵۰)۰                      | (۱۰)۰   | (۵۰)۰   | ۰(۱۰)۰  | ۵       |

جدول ۱۱. اطلاعات دستمزد هر اپراتور برای کار با ماشین در مثال عددی ۱

| اپراتور | ماشین ۱ | ماشین ۲ | ماشین ۳ | ماشین ۴ | ظرفیت زمانی (ساعت) |
|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| ۱       | ۱۰/۵    | ۱۰      | ۱۰/۵    | ۱۰      | ۲۰۰                |
| ۲       | ۱۰      | ۱۲      | ۱۰      | ۱۰/۵    | ۱۵۰                |
| ۳       | ۱۰      | ۱۲      | ۱۰      | ۱۰/۵    | ۲۷۰                |
| ۴       | ۱۱/۵    | ۱۰      | ۱۱/۵    | ۱۵      | ۲۳۰                |
| ۵       | ۱۲      | ۱۰      | ۱۲/۵    | ۱۳      | ۲۱۰                |

جدول ۱۲. جدول فاصله بین مکان‌ها برای مثال عددی ۱

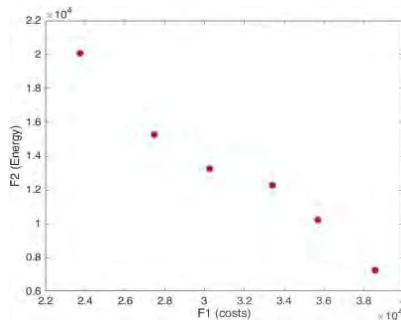
| مکان‌ها | ۱ | ۲ | ۳ |
|---------|---|---|---|
| ۱       | ۰ | ۱ | ۲ |
| ۲       | ۱ | ۰ | ۱ |
| ۳       | ۲ | ۱ | ۰ |

جدول ۱۳. داده‌های مربوط به ماشین‌ها در مثال عددی ۱

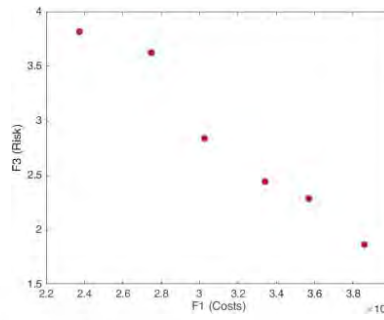
| ماشین‌ها |         |         |         | داده‌های ورودی ماشین         |
|----------|---------|---------|---------|------------------------------|
| ماشین ۴  | ماشین ۳ | ماشین ۲ | ماشین ۱ |                              |
| ۵۰۰      | ۵۰۰     | ۵۰۰     | ۵۰۰     | ظرفیت زمانی (ساعت)           |
| ۳۵۵      | ۳۷۰     | ۳۴۰     | ۳۵۰     | مدت زمان بین دو خرابی (ساعت) |
| ۹۰       | ۸۵      | ۵۰      | ۷۰      | مدت زمان تعمیر (ساعت)        |
| ۲۵۰      | ۳۰۰     | ۳۵۰     | ۲۵۰     | هزینه تعمیر (دلار)           |

جدول ۱۴. سایر داده‌های تکمیلی در مثال عددی ۱

| هزینه جابه‌جایی ماشین                             | هزینه نصب ماشین | هزینه جابه‌جایی بین سلولی ماشین | هزینه جابه‌جایی درون سلولی قطعه                    | هزینه جابه‌جایی بین سلولی قطعه |
|---|-----------------|---------------------------------|--|--------------------------------|
| (دلار)  | (دلار)          | (دلار)                          | (دلار)   | (دلار)                         |
| ۵۰  | ۵۰              | ۵۰                              | ۱۰   | ۳۰                             |
| خط‌های بالقوه ماشین‌آلات (درصد)<br>(مقدار تصادفی) |                 |                                 | مقدار مصرف انرژی (کیلو وات ساعت)<br>(مقدار تصادفی) |                                |
| U(۰/۱، ۰/۹)                                       |                 |                                 | U(۰/۳، ۰/۹)  |                                |



شکل ۶. ارتباط تابع هزینه و تابع مصرف انرژی

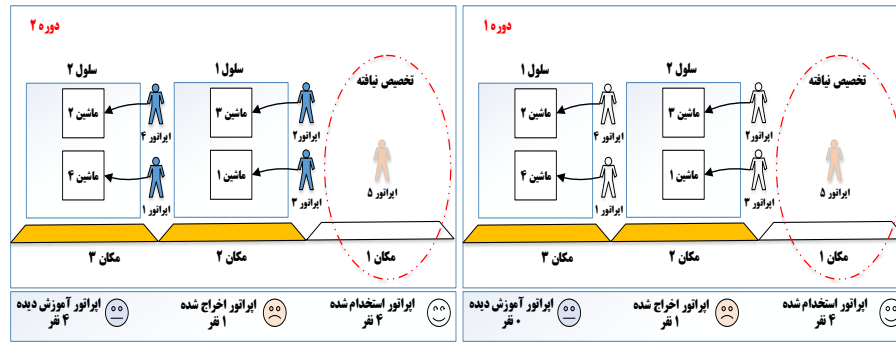


شکل ۵. ارتباط تابع هزینه و تابع خطرات محیطی

شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب تضاد بین توابع هزینه‌ها، میزان مصرف انرژی و میزان خطرهای بالقوه را در مثال ارائه‌شده نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱۵ و شکل ۸، مشاهده می‌شود که چیدمان در هر دوره یکسان است و تغییری در آن ایجاد نشده است. این موضوع در پژوهشی که توسط سخایی و همکاران (۲۰۱۶) با همین داده‌ها انجام دادند نیز مشهود است. با توجه به ثابت ماندن چیدمان، جابه‌جایی ماشین‌ها اتفاق نخواهد افتاد [۵۲]. به همین دلیل هزینه پیکربندی مجدد (شامل جابه‌جایی ماشین‌ها و نصب و جداسازی آن‌ها) در این مسئله مقدار صفر به خود گرفته است. با توجه به جدول ۱۰، اپراتورهایی که به ماشین‌آلات تخصیص یافته‌اند، هیچ‌کدام توانایی کارکردن با آن‌ها را ندارند؛ بنابراین مقدار هزینه آموزش برابر جمع هزینه آموزش اپراتورهای ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برای کارکردن با ماشین‌های ۴، ۳، ۱ و ۲ برابر ۹۰ دلار شده است. با توجه به به‌کارگیری اپراتورهای ۱، ۲، ۳ و ۴ و اخراج اپراتور ۵، مقدار هزینه استخدام و اخراج برابر مجموع (۲۰، ۱۷، ۲۰ و ۱۸) دلار برای استخدام و مجموع ۱۲ دلار برای اخراج است که در مجموع برابر ۸۷ دلار برای دوره اول و برای دو دوره ۱۷۴ دلار به‌دست آمده است







شکل ۷. نمایشی از چیدمان نهایی تسهیلات با در نظر گرفتن تمام ابعاد پایداری

در ادامه به دو سؤال پژوهش پاسخ داده می‌شود:

**سؤال اول:** چیدمان سلولی بهینه با در نظر گرفتن اهداف پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) به چه صورت است؟ برای پاسخ به این سؤال کافی است مدل پیشنهادی به همراه تمام اهداف و محدودیت‌های آن با استفاده از مراحل ارائه شده در قسمت روش کار با روش معیار جامع حل شود. نتایج حل در جدول ۱۶، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، مقادیر حاصل از مدل چندهدفه که با روش معیار جامع حل شده است، نسبت به جواب‌های بهینه تک‌هدفه، بیشتر است. در تعریف توابع چندهدفه، بهتر شدن یک هدف به بدتر شدن سایر توابع می‌انجامد. به همین دلیل است که توصیه می‌شود عوامل تأثیرگذار در چیدمان به صورت چندهدفه بررسی شود؛ چون جواب تک‌بعدی، جواب مسئله در واقعیت نیست. در جدول ۱۶ و برای نمونه ۱ داریم:

– مسئله با استفاده از داده‌های ارائه شده در قسمت قبل حل شده است. طبق مراحل روش معیار جامع تمامی توابع هدف باید به صورت جداگانه حل شوند. مقدار بهینه (تک‌بعدی) تابع هزینه برابر ۲۳۴۶۵/۵۲۰ است. این مقدار کمترین مقدار ممکن برای این تابع هدف است. با در نظر گرفتن کمینه تابع هدف اول، مقدار سایر توابع در سطر مربوطه ارائه شده است.

جدول ۱۶. نتایج حاصل از حل نمونه ۱ با روش معیار جامع

| شماره نمونه | توابع هدف                   | هزینه (دلار) | انرژی (کیلو وات ساعت) | ایمنی (ضریب خطر) |
|-------------|-----------------------------|--------------|-----------------------|------------------|
| ۱           | کمینه‌سازی تابع هزینه       | ۲۳۴۶۵/۵۲۰    | ۲۱۶۳۰/۹۹۱             | ۴/۵۱۴            |
|             | کمینه‌سازی تابع انرژی       | ۴۰۱۳۸/۵۴۰    | ۷۲۱۰/۳۳۰              | ۲/۹۸۷            |
|             | افزایش ایمنی (کاهش خطر)     | ۳۰۷۸۴/۳۴۴    | ۱۴۰۳۸/۲۰۳             | ۱/۷۶۴            |
|             | مقدار ضدایده‌آل توابع       | ۸۸۹۸/۲۴۷     | ۲۴۹۱۷/۸۸۴             | ۴/۵۴۲            |
|             | کمینه‌سازی توابع با $L_p=1$ | ۲۷۶۶۷/۰۴۰    | ۷۲۱۰/۳۳۰              | ۱/۷۶۴            |

- در سطر دوم، مقدار تابع هدف دوم که مربوط به مصرف انرژی است کمیته می‌شود. این مقدار برابر  $۷۲۱۰/۳۳۰$  است و متناسب با آن مابقی توابع هدف مقدار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تابع هزینه در سطر ۲ بسیار بیشتر از سطر ۱ است. این مسئله نشان می‌دهد اگرچه یک تابع هدف بهتر می‌شود (مصرف انرژی) ولی لزومی به بهتر شدن سایر توابع نیست (مقدار هزینه).

- سطر چهارم، مقدار ضرایب آل توابع را نشان می‌دهد. این مقدار بدترین مقداری است که این توابع می‌توانند حاصل کنند.

- در سطر پنجم، مقادیر به‌دست‌آمده در سطرهای بالای جدول در رابطه ۷۱، قرار می‌گیرند. این رابطه با در نظر گرفتن اهمیت هر یک از توابع هدف به دنبال حداقل سازی اختلاف بین کمترین مقدار و بیشترین مقدار هر یک از آن‌ها است. در نهایت با کمیته شدن مقدار  $L$ ، مقدار نهایی هر یک از توابع در این سطر مشخص شده است.

**سؤال دوم:** تأثیر ایمنی و مصرف انرژی بر هزینه‌ها به چه صورت است؟ برای پاسخ به سؤال دوم باید هر یک از توابع اجتماعی و زیست‌محیطی را به صورت جداگانه از مدل حذف و میزان تغییرات در هزینه‌ها را بررسی کرد. نتایج می‌تواند به تصمیم‌گیران کمک کند تا تأثیر استفاده از شاخص‌های پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) به صورت یکجا و جداگانه درک کنند. نتایج مدل با حذف جنبه اجتماعی (ایمنی محیط) در جدول ۱۴، ارائه شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده برای نتایج جدول ۱۷، با حذف یک تابع هدف مابقی توابع لزوماً وضعیت بهتری پیدا نمی‌کنند و ممکن است به تبع آن بهتر یا بدتر شوند. نتایج این جدول نشان می‌دهد که با حذف تصمیمات اجتماعی، هزینه‌های چیدمان به میزان ۳۲ درصد افزایش می‌یابد، میزان مصرف انرژی بدون تغییر می‌ماند و میزان خطرهای بالقوه در محیط ۸۹ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۱۷. نتایج مسئله بدون در نظر گرفتن تصمیمات اجتماعی

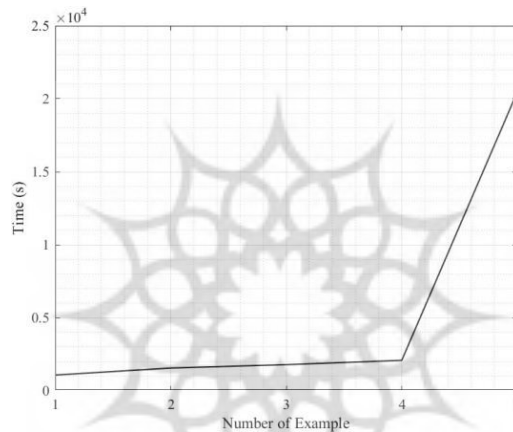
| تابع هدف                   | مقدار مطلوب | مقدار توابع هدف با حذف تصمیمات اجتماعی | مقدار تغییرات | درصد تغییرات |
|----------------------------|-------------|--|---------------|--------------|
| هزینه‌ها (دلار)            | ۲۷۶۶۷/۰۴۰   | ۳۶۵۴۷/۱۴۵                              | +۸۸۰/۱۰۵      | +۳۲٪         |
| مصرف انرژی (کیلو وات ساعت) | ۷۲۱۰/۳۳۰    | ۷۲۱۰/۳۳۰                               | ۰             | ۰            |
| میزان خطر (ضریب)           | ۱/۷۶۴       | ۳/۳۳۲                                  | +۱/۵۷         | +۸۹٪         |

در ادامه نتایج حاصل از حذف تصمیمات زیست‌محیطی در جدول ۱۸، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، با حذف جنبه زیست‌محیطی (میزان مصرف انرژی)، هزینه‌ها به میزان ۱۵ درصد کاهش و میزان خطرهای چیدمان ۲۰۰ درصد افزایش خواهد یافت.

جدول ۱۸. نتایج مسئله بدون در نظر گرفتن تصمیمات زیست‌محیطی

| تابع هدف                   | مقدار مطلوب | مقدار توابع هدف با حذف تصمیمات زیست‌محیطی | مقدار تغییرات | درصد تغییرات |
|----------------------------|-------------|---|---------------|--------------|
| هزینه‌ها (دلار)            | ۲۷۶۶۷/۰۴۰   | ۲۳۴۶۵/۵۲۰                                 | -۴۲۰۱/۵۲      | -۱۵٪         |
| مصرف انرژی (کیلو وات ساعت) | ۷۲۱۰/۳۳۰    | ۲۱۶۳۰/۹۹                                  | +۱۴۴۲۰/۶۶     | +۲۰۰٪        |
| میزان خطر (ضریب)           | ۱/۷۶۴       | ۱/۷۶۴                                     | ۰             | ۰            |

نرم‌افزار گمز می‌تواند مسائل نمونه ۱ تا ۵ در جدول ۸ را حل کند؛ ولی حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ با این روش به دلیل افزایش قابل توجه زمان محاسبه توجیه‌پذیر نیست (شکل ۹). این موضوع و همچنین بیان پیچیدگی مسئله چیدمان تسهیلات توسط سایر پژوهشگران (مانند سلیم‌پور و همکاران، ۲۰۲۱) دلیلی بر ماهیت NP-hard بودن مسئله است.



شکل ۸. رشد نمایی زمان حل با افزایش ابعاد مسئله

**حل مدل.** در این بخش، ابتدا مسائل نمونه ارائه شده در قسمت قبل که با روش دقیق (معیار جامع) حل شده است با الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل شده و نتایج این دو با هم مقایسه می‌شود تا اعتبار و صلاحیت الگوریتم NSGA-II برای حل مسائل نمونه با ابعاد متوسط و بزرگ که روش حل دقیق قادر به محاسبه آن‌ها در زمان قابل توجیه نیست، ارزیابی شود. به این منظور مسئله در نرم‌افزار متلب نسخه R2020b کدنویسی و حل شده است. پارامترهای الگوریتم NSGA-II برای مدل پیشنهادی مطابق جدول ۱۹، انجام شده است.

جدول ۱۹. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم NSGA-II

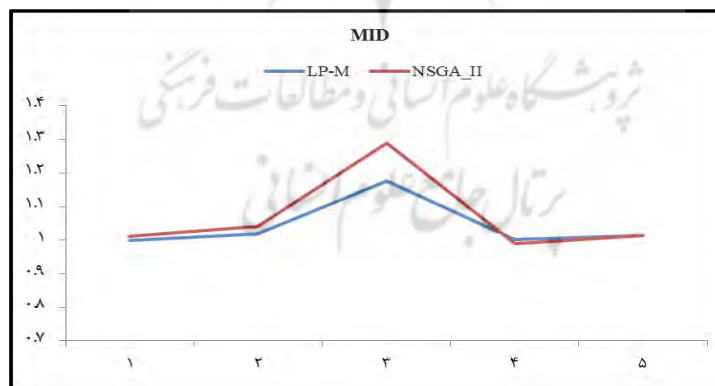
| مقدار | پارامتر                                       | الگوریتم |
|-------|---|----------|
| ۱۰۰   | اندازه جمعیت در الگوریتم پیشنهادی (Pop)       | NSGA-II  |
| ۱۰۰   | تعداد نسل‌ها در الگوریتم پیشنهادی (Iter)      |          |
| ۰/۳   | احتمال انتخاب کروموزوم‌ها برای عمل تقاطع (Pc) |          |
| ۰/۷   | احتمال انتخاب کروموزوم‌ها برای عمل جهش (Pm)   |          |

در ادامه نتایج حاصل از حل نمونه‌های ارائه شده توسط هر دو روش بر اساس شاخص‌های عملکردی در جدول ۲۰، بررسی شده است.

جدول ۲۰. مقایسه شاخص‌های عملکردی حاصل از محاسبات مسائل نمونه

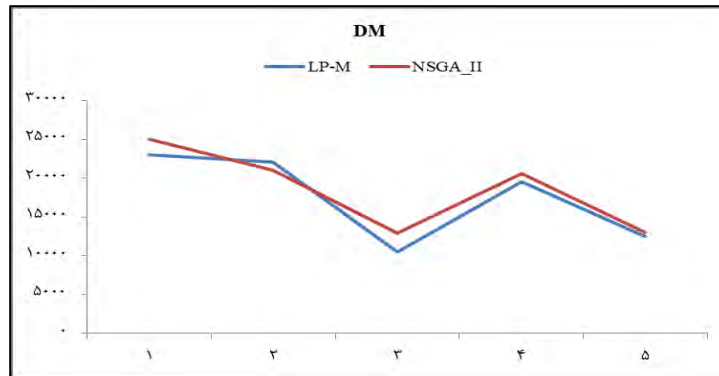
| شماره مسئله | الگوریتم NSGA-II |       |          |        | روش معیار جامع (LP-M) |       |          |       |
|-------------|------------------|-------|----------|--------|-----------------------|-------|----------|-------|
|             | Time             | SM    | DM       | MID    | Time                  | SM    | DM       | MID   |
| ۱           | ۵۲۵/۵۲           | ۱/۳۹۳ | ۲۵-۸۳    | ۱/۰۱۱۵ | ۱۰۷۴                  | ۱/۴۲  | ۲۳۰۷۸    | ۱/۰۰۱ |
| ۲           | ۵۴۹/۴۱           | ۱/۱۳۲ | ۲۱-۷۱/۳۴ | ۱/۰۴۱  | ۱۵۵۴                  | ۱/۱۳۲ | ۲۲۰۴۲/۵  | ۱/۰۲۱ |
| ۳           | ۵۶۲/۲۵           | ۰/۹۹  | ۱۲۹۲۰/۲۵ | ۱/۲۹   | ۱۷۸۵                  | ۰/۹۵  | ۱۰۵۵۳/۲۰ | ۱/۱۷۵ |
| ۴           | ۸۱۴/۷۷           | ۱/۲۴  | ۲۰۵۱۳/۳۲ | ۰/۹۹   | ۲۰۷۸                  | ۱/۲   | ۱۹۶۰۴/۵  | ۱/۰۰۳ |
| ۵           | ۳۵۷۸/۰۷          | ۱/۳۴۹ | ۱۳۰۷۱    | ۱/۰۱۴  | ۲۱۴۵۲                 | ۱/۳۱  | ۱۲۴۷۵    | ۱/۰۱۳ |
| میانگین     | ۱۲۰۶             | ۱/۲۲۱ | ۱۸۵۴۸/۵۷ | ۱/۰۶۹  | ۵۵۸۸/۶                | ۱/۱۲۱ | ۱۷۵۵۰/۶۴ | ۱/۰۴۲ |

نتایج حاکی از آن است که مقادیر شاخص‌های CPU Time و DM در الگوریتم NSGA-II بهتر از الگوریتم LP-M است و در شاخص SM عملکرد دو الگوریتم به هم نزدیک است. شاخص MID در الگوریتم LP-M مقادیر بهتری را نشان می‌دهد. این مقایسه با استفاده از شکل ۱۰، قابل بررسی است.



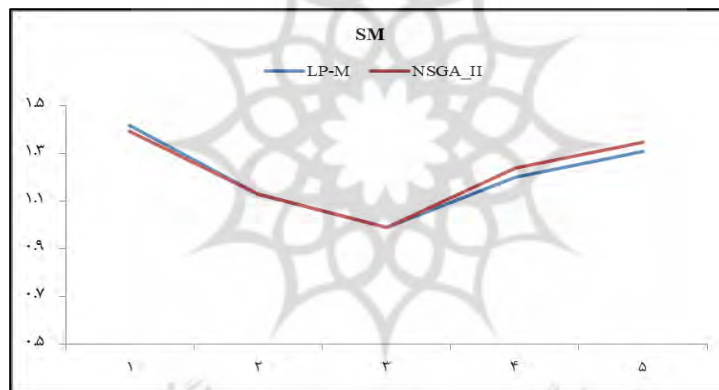
شکل ۹. مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص میانگین فاصله از ایده‌آل

با توجه به شکل ۱۰، مقدار شاخص MID در نمونه‌های ارائه‌شده در روش LP-M از الگوریتم فراابتکاری کمتر است.



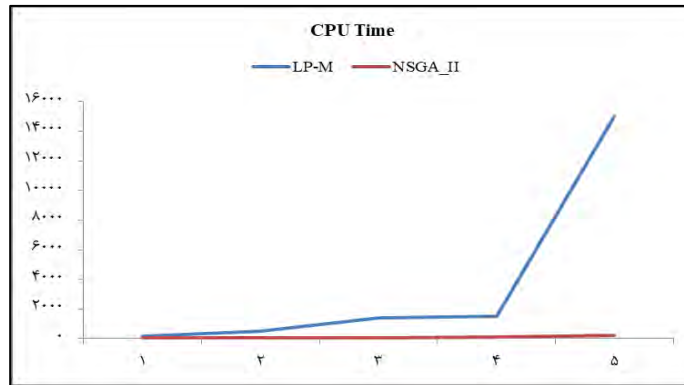
شکل ۱۰. مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص پراکندگی

شکل ۱۱، نشان می‌دهد که مقدار شاخص DM در الگوریتم NSGA-II برای نمونه‌های ارائه‌شده بهتر است.



شکل ۱۱. مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص یکنواختی فضا

از شکل ۱۲، می‌توان دریافت که مقدار شاخص SM برای نمونه‌های ارائه‌شده در دو الگوریتم به یکدیگر نزدیک است.



شکل ۱۲. مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص زمان پردازش

شکل ۱۳، نشان می‌دهد که زمان پردازش سیستم برای روش‌های حل، رابطه مستقیمی با ابعاد مسئله دارد و هرچه ابعاد مسئله افزایش می‌یابد، زمان پردازش نیز افزایش می‌یابد؛ اما این افزایش در روش LP-M روند صعودی بسیار شدیدی دارد و حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ را غیرقابل توجیه می‌کند.

#### تحلیل حساسیت و یافته‌های مدیریتی

**تحلیل حساسیت وزن توابع هدف.** در این قسمت تلاش شده است تا با بررسی تأثیر پارامترها در مدل پیشنهادی یک دید مدیریتی و عملیاتی جامع ایجاد شود. این امر می‌تواند برای صنایعی که به دنبال افزایش سود از طریق کاهش هزینه‌ها هستند، بسیار جذاب باشد. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، تأثیر توابع زیستی و اجتماعی بر هزینه‌ها امری غیرقابل انکار است؛ اما ایجاد توازن بین این اهداف امری است که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های هر سازمان با توجه به استراتژی‌های آن‌ها متفاوت باشد؛ بنابراین در این قسمت به سازمان‌ها کمک می‌شود تا بهترین تصمیم را متناسب با استراتژی سازمان خود اتخاذ کنند. اهداف کاهش هزینه‌ها، کاهش مصرف انرژی و ایمنی محیط کارکنان با چه درجه اهمیتی باید در سازمان لحاظ شوند؟ نتایج تغییرات در وزن اهداف مدل ( $W_i$ )، در توابع هدف در جدول ۲۱ و شکل‌های ۱۴ تا ۱۶، ارائه شده است.

با توجه به مدل ارائه شده، افزایش اهمیت (وزن) تابع هدف هزینه، مقدار هزینه را کاهش و میزان مصرف انرژی را افزایش می‌دهد و باعث افزایش خطرهای بالقوه چیدمان در مدل می‌شود. (جدول ۲۱، حالت اول و شکل ۱۴). افزایش اهمیت (وزن) تابع هدف زیست‌محیطی (مصرف انرژی) به افزایش ارزش هزینه و خطرات بالقوه چیدمان منجر می‌شود و میزان مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. (جدول ۲۱، حالت دوم و شکل ۱۵). در نهایت اهمیت تابع هدف رفاه اجتماعی

(خطرهای بالقوه محیط) رابطه مستقیمی با مقادیر هزینه و مصرف انرژی دارد (جدول ۲۱، حالت دوم و شکل ۱۶).

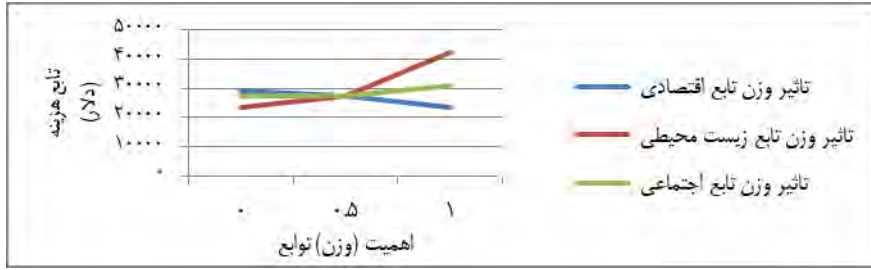
طبق نتایج، افزایش وزن تابع هدف مصرف انرژی (افزایش از ۰/۵ به ۱) بیشترین تأثیر را بر هزینه‌ها دارد؛ بنابراین مدیریت باید تمرکز بیشتری روی این تغییر داشته باشد؛ همچنین بالاترین میزان مصرف انرژی زمانی به وقوع می‌پیوندد که وزن تابع ایمنی کاهش (از ۰/۵ به صفر) می‌یابد. با توجه به ضریب خطرهایی که برای ماشین‌آلات در چیدمان در نظر گرفته شده است، حداقل میزان خطرها معادل ۱/۷۶۴ به‌دست آمده است که افزایش وزن تابع اجتماعی (از صفر به ۱) و افزایش وزن تابع زیستی (از صفر به ۰/۵) این مهم را محقق می‌سازد؛ بنابراین برای داشتن محیطی امن برای کارکنان، تصمیم‌گیران می‌توانند با توجه به سیاست‌های سازمانی یکی از این دو پیشنهاد را در سازمان خود اجرا کنند. تحلیل انجام‌شده در خصوص تأثیر تغییرات وزن توابع بر مقدار آن‌ها، پاسخ سؤال سوم پژوهش حاضر است و به‌منظور پاسخگویی به سؤال چهارم، تغییرات تقاضا و زمان پردازش بر توابع هدف بررسی و تحلیل خواهد شد.

تأثیر ناشی از تغییرات میزان تقاضا بر توابع هدف در شکل ۱۷، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تقاضا، توابع هزینه و میزان مصرف انرژی افزایش زیادی می‌یابند؛ ولی در تابع رفاه اجتماعی تغییری ایجاد نمی‌شود. با توجه به اهمیت و تأثیرگذاری توابع هزینه و مصرف انرژی، مدیریت باید رویکرد مناسبی را برای کنترل آن اتخاذ کند. تأثیر تغییرات زمان پردازش عملیات بر توابع هدف در شکل ۱۸، بررسی شده است. مطابق نتایج، افزایش درصدی این عامل، مقدار توابع اقتصادی و زیست‌محیطی را افزایش می‌دهد. این در حالی است که افزایش تابع زیست‌محیطی بسیار چشمگیر است. یادآوری این نکته لازم است که تابع ایمنی با زمان پردازش رابطه‌ای ندارد.

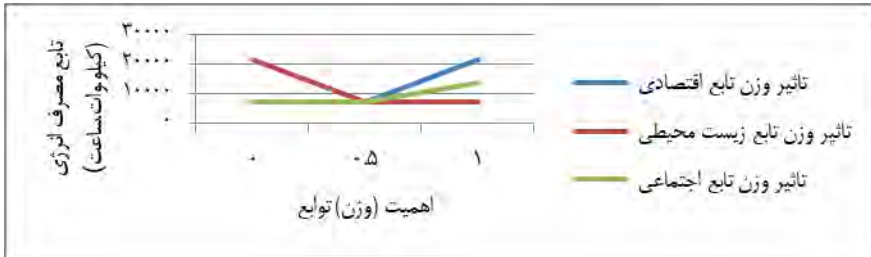
جدول ۲۱. تغییرات وزن در مقایسه با اهداف

|          | وزن توابع هدف |           |           | وزن توابع هدف |       |       |
|----------|---------------|-----------|-----------|---------------|-------|-------|
|          | ایمنی         | انرژی     | هزینه     | $W_3$         | $W_2$ | $W_1$ |
| حالت اول | ۱/۷۶۴         | ۷۲۱۰/۳۳۰  | ۲۹۱۴۵/۵۴۰ | ۰/۵           | ۰/۵   | ۰     |
|          | ۱/۷۶۴         | ۷۲۱۰/۳۳۰  | ۲۷۶۶۷/۰۴۰ | ۰/۲۵          | ۰/۲۵  | ۰/۵   |
|          | ۳/۰۹۸         | ۲۱۶۳۰/۹۹۱ | ۲۳۴۶۵/۵۲۰ | ۰             | ۰     | ۱     |
| حالت دوم | ۱/۷۶۴         | ۲۱۶۳۰/۹۹۱ | ۲۳۴۶۵/۵۲۰ | ۰/۵           | ۰     | ۰/۵   |
|          | ۱/۷۶۴         | ۷۲۱۰/۳۳۰  | ۲۷۶۶۷/۰۴۰ | ۰/۲۵          | ۰/۵   | ۰/۲۵  |
|          | ۳/۵۹۳         | ۷۲۱۰/۳۳۰  | ۴۲۵۸۵/۰۴۰ | ۰             | ۱     | ۰     |
| حالت سوم | ۳/۳۳۲         | ۷۲۱۰/۳۳۰  | ۲۷۶۶۷/۰۴۰ | ۰             | ۰/۵   | ۰/۵   |
|          | ۱/۷۶۴         | ۷۲۱۰/۳۳۰  | ۲۷۶۶۷/۰۴۰ | ۰/۵           | ۰/۲۵  | ۰/۲۵  |
|          | ۱/۷۶۴         | ۱۴۰۳۸/۲۰۳ | ۳۰۷۸۴/۳۴۴ | ۱             | ۰     | ۰     |

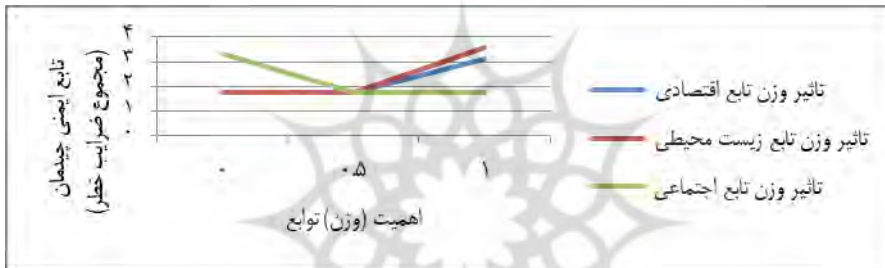




شکل ۱۳. تحلیل حساسیت - تأثیر وزن توابع بر تابع هزینه چیدمان (جنبه اقتصادی پایداری)



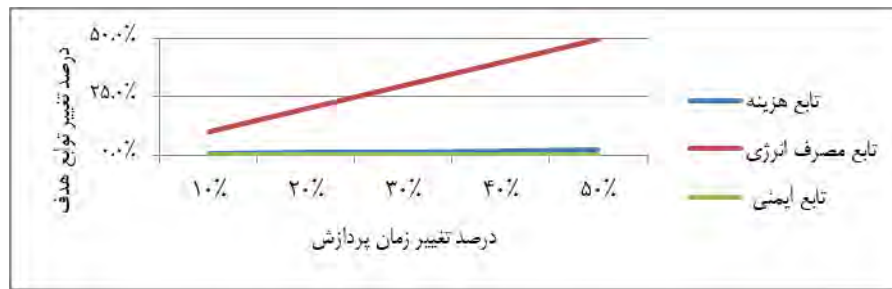
شکل ۱۴. تحلیل حساسیت - تأثیر وزن توابع بر تابع مصرف انرژی (جنبه زیست محیطی پایداری)



شکل ۱۵. تحلیل حساسیت - تأثیر وزن توابع بر تابع ایمنی چیدمان (جنبه اجتماعی پایداری)



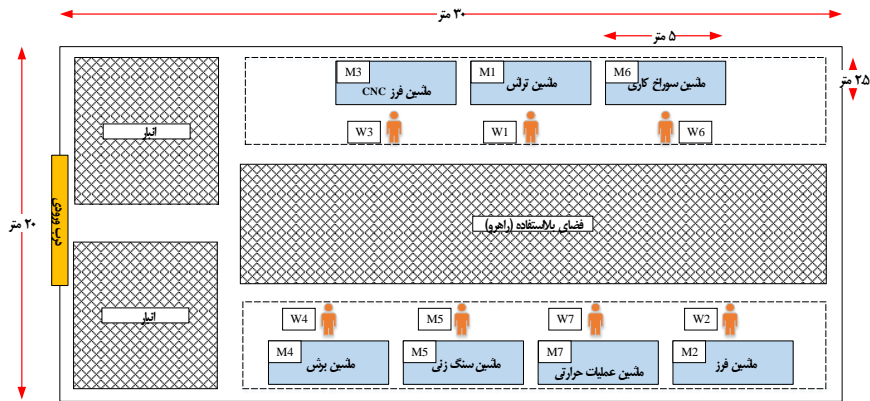
شکل ۱۶. تحلیل حساسیت - تأثیر تغییر تقاضا بر توابع هدف



شکل ۱۷. تحلیل حساسیت - تأثیر تغییر زمان پردازش بر توابع هدف

**مطالعه موردی و نتایج محاسبات.** در سنوات اخیر، کاربرد سیستم‌های تولید سلولی در زمینه‌ها و محیط‌های مختلف، به‌ویژه در صنایع تولیدی، به نمایش درآمده است. به‌منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی در محیط واقعی، یک کارگاه تولید اجاق‌های صنعتی و خانگی انتخاب شد که محصولات متنوعی مانند صفحات رویی اجاق‌گاز، اتاقلک فر، سینی‌های فر و غیره را از طریق فعالیت‌های مختلف بر عهده دارد. در این کارگاه هر محصول از طریق چند فرایند متوالی و توسط چندین دستگاه مانند دستگاه برش، دستگاه فرز، دستگاه سنگ‌زنی و فرز CNC و غیره تولید می‌شود. به‌منظور مدل‌سازی دقیق شرایط مطالعه موردی، مفروضات حاکم بر محیط تولید و مقادیر دقیق پارامترها از طریق مصاحبه با خبرگان و کارشناسان خط تولید به‌دست آمده است. بخش از مقادیر پارامترها نیز از مبانی نظری موضوع استخراج و به مدل اضافه شده است. در ادامه، ابتدا شرایط فعلی کارگاه و چیدمان تسهیلات و نیروها در مدل پیشنهادی بارگذاری و نتایج ثبت شد. در مرحله بعد چیدمان بهینه تسهیلات و تخصیص نیروها پیشنهاد شده است. در نهایت وضعیت فعلی و بهینه چیدمان در مطالعه موردی مقایسه شده است.

**چیدمان فعلی کارگاه.** یک نقشه شماتیک از نحوه چیدمان ماشین‌ها در شرایط فعلی کارگاه در شکل ۱۹، ارائه شده است. ابعاد ماشین‌ها بر اساس بزرگ‌ترین اندازه ماشین ثبت شده است که مربوط به ماشین حرارتی است. از این اندازه برای تعیین ظرفیت تعداد ماشین در هر سلول استفاده می‌شود. فضای مربوط به انبارها ثابت است و امکان تغییر در آن‌ها وجود ندارد. فضای مربوط به راهرو با حفظ فاصله تسهیلات، قابلیت تبدیل به چیدمان تسهیلات را دارا است.



شکل ۱۸. چیدمان فعلی کارگاه در مسئله مطالعه موردی

این کارگاه ۱ نوبت در روز، ۸ ساعت کار در هر نوبت و ۲۵ روز در ماه فعالیت می‌کند. زمان در دسترس در این کارگاه برای ماشین آلات و کارکنان در ماه برابر ۲۰۰ ساعت است (۲۰۰=۲۵\*۸\*۱). اطلاعات مربوط به فرایند تولید هر قطعه در جدول ۲۲، ارائه شده است.

جدول ۲۲. توالی عملیات - ماشین (زمان دقیقه)

| قطعه | عملیات ۱     | عملیات ۲    | عملیات ۳   | عملیات ۴   | عملیات ۵    | عملیات ۶   | عملیات ۷   | زمان |
|------|--------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------|
| P1   | ماشین ۴(۱)   | ماشین ۱(۶)  | ماشین ۷(۵) | ماشین ۵(۹) | ماشین ۱(۱۰) |            |            | ۴۰۰  |
| P2   | ماشین ۱(۰/۵) | ماشین ۳(۲۰) | ماشین ۱(۳) | ماشین ۷(۲) | ماشین ۶(۳)  |            |            | ۲۵۰  |
| P3   | ماشین ۴(۱/۵) | ماشین ۱(۷)  | ماشین ۲(۴) | ماشین ۶(۳) | ماشین ۷(۲)  | ماشین ۵(۵) |            | ۲۰۰  |
| P4   | ماشین ۴(۲)   | ماشین ۱(۵)  | ماشین ۲(۸) | ماشین ۶(۴) | ماشین ۷(۱)  |            |            | ۶۵۰  |
| P5   | ماشین ۴(۱)   | ماشین ۱(۷)  | ماشین ۷(۲) |            |             |            |            | ۹۵۰  |
| P6   | ماشین ۱(۱/۵) | ماشین ۲(۵)  | ماشین ۶(۳) | ماشین ۱(۱) | ماشین ۲(۷)  | ماشین ۳(۳) |            | ۷۴۰  |
| P7   | ماشین ۴(۰/۵) | ماشین ۱(۱۲) | ماشین ۲(۳) | ماشین ۷(۲) |             |            |            | ۴۰۰  |
| P8   | ماشین ۴(۱)   | ماشین ۱(۲)  | ماشین ۷(۳) | ماشین ۵(۴) |             |            |            | ۱۹۰۰ |
| P9   | ماشین ۴(۲)   | ماشین ۳(۳)  | ماشین ۱(۷) | ماشین ۷(۳) | ماشین ۵(۹)  | ماشین ۶(۳) | ماشین ۲(۷) | ۲۰۰  |
| P10  | ماشین ۱(۱)   | ماشین ۲(۳)  | ماشین ۱(۱) | ماشین ۷(۷) |             |            |            | ۱۲۰۰ |

هزینه بین سلولی جابه‌جایی مواد و هزینه جابه‌جایی ماشین‌ها بر اساس فواصل مرکز تا مرکز مکان‌های کاندید برآورد شده است. تخصیص کارگران متناسب با هزینه‌های آموزش و دستمزد آن‌ها برای کار با ماشین‌ها محاسبه شده و هزینه‌های استخدام و اخراج با مقدار برابر محاسبه شده است. تخصیص اپراتور در کارگاه بر اساس هزینه‌های آموزش و دستمزد انجام می‌شود. هزینه‌های مختلف مطالعه موردی در جدول ۲۳، نشان داده شده است.

جدول ۲۳. هزینه آموزش، استخدام و اخراج اپراتورها برای کار با ماشین‌های مختلف (میلیون ریال)

| هزینه اخراج | هزینه استخدام | ماشین ۷ (حرارتی) | ماشین ۶ (سوراخ کاری) | ماشین ۵ (سنگ‌زنی) | ماشین ۴ (برش) | ماشین ۳ (CNC) | ماشین ۲ (فرز) | ماشین ۱ (تراش) | اپراتور |
|-------------|---------------|------------------|----------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------|
| ۱۵          | ۲۰            | ۱۵۰              | ۲۰۰                  | ۱۰۰               | ۲۰۰           | ۲۵۰           | ۱۵۰           | ۲۰۰            | W1      |
| ۱۵          | ۱۷            | ۱۰۰              | ۱۵۰                  | ۱۵۰               | ۲۱۰           | ۲۴۰           | ۲۰۰           | ۱۵۰            | W2      |
| ۱۰          | ۲۰            | ۱۵۰              | ۱۵۰                  | ۱۰۰               | ۲۰۰           | ۲۳۰           | ۲۵۰           | ۲۲۰            | W3      |
| ۱۵          | ۱۸            | ۱۰۰              | ۲۰۰                  | ۱۰۰               | ۱۵۰           | ۲۵۰           | ۲۰۰           | ۲۵۰            | W4      |
| ۱۲          | ۱۵            | ۱۰۰              | ۲۰۰                  | ۱۵۰               | ۲۰۰           | ۲۴۰           | ۱۵۰           | ۲۴۰            | W5      |
| ۱۰          | ۱۵            | ۱۰۰              | ۲۰۰                  | ۱۵۰               | ۱۵۰           | ۲۱۰           | ۲۰۰           | ۲۰۰            | W6      |
| ۱۵          | ۲۰            | ۱۵۰              | ۱۵۰                  | ۲۰۰               | ۲۰۰           | ۲۴۰           | ۱۵۰           | ۲۱۰            | W7      |

**نتایج مسئله مطالعه موردی.** ابتدا فضای کارگاه بر حسب شرایط موجود به ۳ مکان با قابلیت استقرار سلول‌ها تقسیم شد. به‌ترتیبی که مکان استقرار کنونی ماشین‌آلات ۱ و ۳ در نظر گرفته شده و فضای بلااستفاده که قبلاً مابین استقرار تسهیلات قرار داشت (شکل ۱۹) به‌عنوان مکان ۲ لحاظ شد. میزان فاصله بین مکان ۱ و ۲ برابر ۶/۵ متر و فاصله بین مکان ۱ و ۳، ۱۳ متر لحاظ شده است. حداکثر ظرفیت هر سلول ۴ تسهیل و حداقل تعداد آن ۳ در نظر گرفته شده است. میزان جابه‌جایی بین‌سلولی، درون‌سلولی قطعات، جابه‌جایی ماشین‌ها، نصب و جداسازی آن‌ها به‌صورت تعداد حرکات محاسبه شده است (هزینه‌ها به‌صورت واحد در نظر گرفته شده است). داده‌های ارائه‌شده برای تحلیل، مربوط به یک دوره کاری است و از آنجاکه جابه‌جایی ماشین‌ها و نصب و جداسازی آن‌ها بر اساس تغییر در دوره‌های مختلف است، هزینه جابه‌جایی ماشین‌ها، در تمامی مراحل حل صفر به‌دست آمده است و نصب و جداسازی آن‌ها فقط مربوط به نصب در دوره اول برای ماشین‌ها است؛ بنابراین متناسب با تعداد ماشین‌ها و هزینه واحد برای محاسبه، این مقدار معادل ۷ به‌دست آمده است. با توجه به تقاضای موجود برای هر قطعه، میزان جابه‌جایی‌های درون‌سلولی و برون‌سلولی برای چیدمان فعلی تسهیلات به‌ترتیب برابر ۱۵۸۶۰ و ۹۹۳۲۰ است.

جدول ۲۴. تعداد جابه‌جایی‌ها و نحوه تخصیص در وضعیت فعلی مسئله مطالعه موردی

| نتیجه تخصیص مکان / سلول / ماشین / اپراتور |    |    |    |    |    |    | نصب و حذف ماشین | جابه‌جایی ماشین | جابه‌جایی بین سلولی | جابه‌جایی درون سلولی |
|---|----|----|----|----|----|----|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| G3  | G3 | G1 | G3 | G1 | G3 | G1 |                 |                 |                     |                      |
| C1  | C1 | C2 | C1 | C2 | C1 | C2 | ۷               | ۰               | ۹۹۳۲۰               | ۱۵۸۶۰                |
| M1  | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 |                 |                 |                     |                      |
| W1  | W2 | W3 | W4 | W5 | W6 | W7 |                 |                 |                     |                      |

جدول ۲۵. تعداد جابه‌جایی‌ها و نحوه تخصیص در وضعیت بهینه مسئله مطالعه موردی

| نتیجه تخصیص مکان / سلول / ماشین / اپراتور (با تعادل بار ۰/۹) |    |    |    |    |    |    | نصب و حذف ماشین | جابه‌جایی ماشین | جابه‌جایی بین سلولی | جابه‌جایی درون سلولی |
|--|----|----|----|----|----|----|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| G3   | G2 | G3 | G3 | G2 | G3 | G2 |                 |                 |                     |                      |
| C2   | C1 | C2 | C2 | C1 | C2 | C1 | ۷               | ۰               | ۳۳۵۴۰               | ۹۹۸۰                 |
| M1   | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 |                 |                 |                     |                      |
| W2   | W7 | W6 | W4 | W1 | W3 | W5 |                 |                 |                     |                      |

در چیدمان فعلی کارگاه (جدول ۲۴)، تعداد جابه‌جایی‌های مواد ۱۱۵۱۸۰ در دوره است؛ اما در چیدمان پیشنهادی که در این پژوهش ارائه شده است (جدول ۲۵)، هزینه‌های درون و بین سلولی به ترتیب برابر ۹۹۸۰ و ۳۳۵۴۰ در دوره است؛ بنابراین مجموع هزینه‌های جابه‌جایی مواد از ۱۱۵۱۸۰ حرکت به ۴۳۵۲۰ حرکت و بر اساس رابطه ۸۰، بیش از ۶۲ درصد کاهش یافته است.

$$GAP = \frac{current - proposed}{current} \quad \text{رابطه (۸۰)}$$

**بررسی تعادل بار کاری در سلول‌ها.** جواب مورد بحث در بالا بر اساس ضریب متعادل‌سازی حجم کار  $q$  با مقدار ۰/۹ تنظیم شده است؛ از این رو برای دو سلول تولید شده، حداقل بار کاری مجاز  $(\frac{q}{c} \times 100)$  از کل حجم کار در زمان پردازش برابر ۴۵ درصد است و حداکثر مقدار آن از رابطه  $q + 1 - \frac{q}{c}$  محاسبه شده و برابر ۵۵ درصد است. به منظور مشاهده تأثیر محدودیتی که موازنه بار کاری در چیدمان پیشنهادی اعمال می‌کند، مسئله با دو ضریب تعادل صفر (بدون متعادل کردن بار کاری در سلول‌ها) و ۰/۹ اجرا شده و نتیجه توزیع بار کاری و تأثیر آن در هزینه‌های چیدمان بررسی شده است. همان‌طور که در جدول ۲۶، مشاهده می‌شود، برای  $q = 0$  (یا بدون محدودیتی که موازنه بار کاری را اعمال می‌کند)، تفاوت‌های بار کاری زیادی بین سلول‌ها وجود دارد. چنین حجم کاری نامتعادلی ممکن است به عملکرد ضعیف سیستم از نظر توان تولید و افزایش موجودی در جریان کار منجر شود. برای  $q = 0.9$ ، حجم کار به‌طور

مساوی بین سلول‌ها با افزایش مشخصی از مقدار تابع هدف توزیع می‌شود. نتایج حاصل از تخصیص تسهیلات و منابع، متناسب با حجم بار کاری در جدول‌های ۲۷ و ۲۸، ارائه شده است.

جدول ۲۶. تغییر حجم بار کاری در سلول‌ها متناسب با ضریب متعادل‌سازی

| مجموع جابه‌جایی‌ها | درصد بار در هر سلول | حجم بار در هر سلول | سلول | ضریب تعادل بارکاری (q) |
|--------------------|---------------------|--------------------|------|------------------------|
| ۳۱۷۵۰              | ۶۹٪                 | ۱۶۹۹۳۱/۲۵۰         | ۱    | ۰                      |
|                    | ۳۱٪                 | ۷۵۰۸۲/۵۰۰          | ۲    |                        |
| ۴۳۵۲۰              | ۴۶٪                 | ۱۳۱۰۶۲/۵۰۰         | ۱    | ۰/۹                    |
|                    | ۵۴٪                 | ۱۱۳۹۵۱/۲۵۰         | ۲    |                        |

جدول ۲۷. تعداد جابه‌جایی‌ها و نحوه تخصیص در وضعیت بهینه مسئله مطالعه موردی با  $q = 0.9$

| جابه‌جایی درون سلولی | جابه‌جایی بین سلولی | جابه‌جایی ماشین | نصب و حذف ماشین | نتیجه تخصیص مکان / سلول / ماشین / اپراتور (با تعادل بار ۰/۹)                                 |
|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------|--|
| ۹۹۸۰                 | ۳۳۵۴۰               | ۰               | ۷               | G3 G2 G3 G3 G2 G3 G2<br>C2 C1 C2 C1 C2 C1 C1<br>M1 M2 M3 M4 M5 M6 M7<br>W2 W7 W6 W4 W1 W3 W5 |

جدول ۲۸. تعداد جابه‌جایی‌ها و نحوه تخصیص در وضعیت بهینه مسئله مطالعه موردی با  $q = 0$

| جابه‌جایی درون سلولی | جابه‌جایی بین سلولی | جابه‌جایی ماشین | نصب و حذف ماشین | نتیجه تخصیص مکان / سلول / ماشین / اپراتور (با تعادل بار ۰)                                   |
|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------|--|
| ۱۵۸۶۰                | ۱۵۸۹۰               | ۰               | ۷               | G3 G3 G2 G3 G2 G3 G2<br>C1 C1 C2 C1 C2 C1 C2<br>M1 M2 M3 M4 M5 M6 M7<br>W2 W1 W6 W4 W3 W7 W5 |

**بررسی میزان ایمنی در سلول‌ها.** با توجه به مصاحبه انجام‌شده با کارکنان خط تولید، ایمنی در چیدمان تسهیلات کارگاه لحاظ نشده است؛ بنابراین با توجه به محدودیت‌ها و ریسک‌های موجود در قرارگیری ماشین‌آلات در محل‌های کاندید و جدول ۲۹ که مربوط به سطح ریسک و خطر است، از آن‌ها خواسته شد تا به محل قرارگیری هر تسهیل در هر مکان امتیاز دهند. نتایج حاصل نرمال شده و توسط جدول ۳۰ بازبندی مجدد شد. نتایج جدول ۳۱، میانگین امتیازدهی ۳ نفر از کارکنان خط تولید است.

جدول ۲۹. تعیین سطح خطر بین تسهیل و مکان کاندید

| بدون خطر (معمول) | احتیاط | هشدار (آسیب جزئی) | هشدار (آسیب شدید) | خطر (تهدیدکننده زندگی) |
|------------------|--------|-------------------|-------------------|------------------------|
| ۰                | ۱      | ۲                 | ۳                 | ۴                      |

جدول ۳۰. تعیین سطح خطر بین تسهیل و مکان کاندید (نرمال شده)

| بدون خطر (معمول) | احتیاط     | هشدار (آسیب جزئی) | هشدار (آسیب شدید) | خطر (تهدیدکننده زندگی) |
|------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| ۰ تا ۰/۲         | ۰/۲ تا ۰/۴ | ۰/۴ تا ۰/۶        | ۰/۶ تا ۰/۸        | ۰/۸ تا ۱               |

جدول ۳۱. تعیین سطح خطر بین تسهیلات و مکان کاندید توسط کارکنان خط تولید

|    | M1    | M2    | M3    | M4    | M5    | M6    | M7    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| G1 | ۰/۱۹۱ | ۰/۵۱۰ | ۰/۴۱۰ | ۰/۱۲۶ | ۰/۷۰۳ | ۰/۷۱۲ | ۰/۴۸۵ |
| G2 | ۰/۶۴۴ | ۰/۱۳۵ | ۰/۵۶۵ | ۰/۱۶۹ | ۰/۱۰۳ | ۰/۱۳۷ | ۰/۵۵۷ |
| G3 | ۰/۰۲۳ | ۰/۳۴۶ | ۰/۱۸۱ | ۰/۲۹۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۳۴۱ | ۰/۴۳۵ |

به‌منظور مشاهده تأثیر تابع ایمنی در چیدمان پیشنهادی، مسئله با مقادیر مختلف ضریب خطر/ریسک، اجرا شده است. نتایج حاصل از این تغییرات در جدول‌های ۳۲ و ۳۳، مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۳۲، حداقل مقدار خطر در محیط ۰/۲۳۳ به دست آمده است (چیدمان در وضعیت احتیاط است). با توجه به این میزان خطر در محیط، تعداد جابه‌جایی‌ها برابر ۴۳۵۲۰ واحد به دست آمده است. با قبول افزایش مقدار ریسک به ۰/۲۴۱ مقدار جابه‌جایی در چیدمان به ۴۹۷۹۰ واحد افزایش می‌یابد. به بیان ساده با کاهش سطح ایمنی، میزان هزینه‌ها افزایش یافته است. در تمامی این تحلیل‌ها تعادل بارکاری با فرض ۹۰ درصد پراکندگی بار در بازه ۴۵ و ۵۵ درصد برای هر سلول برقرار بوده و از ایجاد گلوگاه در چیدمان جلوگیری شده است.

جدول ۳۲. نتایج تخصیص و تعادل بار کاری در سطح ایمنی ۰/۲۳۳

| نتیجه تخصیص مکان/سلول/ماشین/اپراتور با تعادل بار ۰/۹ و سطح خطر ۰/۲۳۳ |    |      |                    |                     |                    |    | جابجایی بین-سلولی  | جابه‌جایی درون سلولی |
|--|----|------|--------------------|---------------------|--------------------|----|--------------------|----------------------|
| نصب و حذف ماشین  |    |      |                    |                     |                    |    | جابجایی-جایی ماشین | جابجایی-جایی ماشین   |
| G3   | G2 | G3   | G3                 | G2                  | G3                 | G2 | ۳۳۵۴۰              | ۹۹۸۰                 |
| C2   | C1 | C2   | C2                 | C1                  | C2                 | C1 |                    |                      |
| M1   | M2 | M3   | M4                 | M5                  | M6                 | M7 |                    |                      |
| W2   | W7 | W6   | W4                 | W1                  | W3                 | W5 |                    |                      |
| ضریب تعادل بارکاری (q)   |    | سلول | حجم بار در هر سلول | درصد بار در هر سلول | مجموع جابه‌جایی‌ها |    |                    |                      |
| ۰/۹  |    | ۱    | ۱۳۱۰۶۲/۵۰۰         | ۵۳%/۵               | ۴۳۵۲۰              |    |                    |                      |
|  |    | ۲    | ۱۱۳۹۵۱/۲۵۰         | ۴۶%/۵               |                    |    |                    |                      |

جدول ۳۳. نتایج تخصیص تخصیص و تعادل بار کاری در سطح ایمنی ۰/۲۴۱

| نتیجه تخصیص مکان/ سلول/ ماشین/ اپراتور با تعادل بار ۰/۹ و سطح خطر ۰/۲۴۱ |    |      |                    |                     |    |                    | نصب و حذف ماشین | جابه‌جایی ماشین | جابه‌جایی بین سلولی | جابه‌جایی درون سلولی |
|---|----|------|--------------------|---------------------|----|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| G3  | G2 | G2   | G3                 | G2                  | G2 | G3                 |                 |                 |                     |                      |
| C2  | C1 | C1   | C2                 | C1                  | C1 | C2                 | ۷               | ۰               | ۳۹۶۰۰               | ۱۰۱۹۰                |
| M1  | M2 | M3   | M4                 | M5                  | M6 | M7                 |                 |                 |                     |                      |
| W2  | W1 | W6   | W4                 | W3                  | W7 | W5                 |                 |                 |                     |                      |
| ضریب تعادل بار کاری (q)   |    | سلول | حجم بار در هر سلول | درصد بار در هر سلول |    | مجموع جابه‌جایی‌ها |                 |                 |                     |                      |
| ۰/۹   |    | ۱    | ۱۲۵۶۶۲/۵۰۰         | ۵۱٪/۳               |    | ۴۹۷۹۰              |                 |                 |                     |                      |
|   |    | ۲    | ۱۱۹۳۵۱/۲۵۰         | ۴۸٪/۷               |    |                    |                 |                 |                     |                      |

بررسی میزان مصرف انرژی در سلول‌ها. مدل پیشنهادی میزان مصرف انرژی را از طریق دو راهبرد انتخاب بهترین مسیر تولید که حداقل مقدار انرژی را مصرف می‌کند و انتخاب بهترین سرعت برای پردازش قطعات (در هر ماشین) بهینه می‌کند. در مطالعه موردی برای قطعه، یک مسیر تولید ارائه شده است؛ بنابراین انتخاب مسیر برای تمامی قطعات مسیر ۱ است. نتایج مربوط به انتخاب سرعت برای هر ماشین در تولید هر قطعه در جدول ۳۴، ارائه شده است.

جدول ۳۴. نتایج انتخاب بهترین سرعت برای ماشین‌ها

| قطعه | عملیات ۱ | عملیات ۲ | عملیات ۳ | عملیات ۴ | عملیات ۵ | عملیات ۶ | عملیات ۷ |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| P1   | M4 (F3)  | M1 (F3)  | M7 (F3)  | M5 (F3)  | M1 (F3)  |          |          |
| P2   | M1 (F3)  | M3 (F3)  | M1 (F3)  | M7 (F3)  | M6 (F3)  |          |          |
| P3   | M4 (F3)  | M1 (F3)  | M2 (F3)  | M6 (F3)  | M7 (F3)  | M2 (F3)  |          |
| P4   | M4 (F3)  | M1 (F3)  | M2 (F3)  | M6 (F3)  | M7 (F3)  |          |          |
| P5   | M4 (F3)  | M1 (F3)  | M7 (F3)  |          |          |          |          |
| P6   | M1 (F3)  | M2 (F3)  | M6 (F3)  | M1 (F3)  | M2 (F3)  | M7 (F3)  |          |
| P7   | M4 (F3)  | M1 (F3)  | M2 (F3)  | M7 (F3)  |          |          |          |
| P8   | M4 (F3)  | M1 (F3)  | M7 (F3)  | M5 (F3)  |          |          |          |
| P9   | M4 (F3)  | M3 (F3)  | M1 (F3)  | M7 (F3)  | M5 (F3)  | M6 (F3)  | M2 (F3)  |
| P10  | M1 (F3)  | M2 (F3)  | M1 (F3)  | M2 (F3)  |          |          |          |



## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

چیدمان‌های سنتی تنها با در نظر گرفتن یک هدف مهم و اصلی (کمینه‌سازی هزینه/ مقدار جابه‌جایی قطعات/ محصول) طراحی شده‌اند. با این حال آگاهی صنایع و فشار جوامع غیردولتی برای به حداقل رساندن مصرف انرژی و توجه به رفاه اجتماعی، تصمیم‌گیران را به سمت ادغام موضوع پایداری در سیستم‌های تولیدی و طراحی چیدمان تسهیلات حرکت داده است. مدل چیدمان سلولی پیشنهادی در این پژوهش برگرفته از این نیاز صنایع تولیدی است و نه تنها هزینه جابه‌جایی قطعات بلکه میزان مصرف انرژی و ایمنی چیدمان را نیز در نظر گرفته است. برای این امر یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی توسعه داده شد که سه بُعد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیستی) را در یک محیط پویا به صورت چندهدفه مدنظر قرار داده است. مدل ارائه شده دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که آن را از سایر مدل‌ها مجزا می‌سازد. استفاده هم‌زمان از راهبرد مقیاس‌بندی سرعت پردازش در کنار مسیریابی فرایند و در نظر گرفتن قابلیت اعتماد ماشین در کنار تعادل بار کاری سلول‌ها و محدودیت مجاورت ماشین‌ها از جمله ویژگی‌های مهم این پژوهش محسوب می‌شود.

مدل پیشنهادی با ۵ مثال نمونه در ابعاد کوچک که از مبانی نظری موضوع الهام گرفته شده با استفاده از روش معیار جامع در نرم‌افزار گمز و حل‌کننده سی‌پلکس حل شده است. جداول حاصل از حل مثال‌ها، تفاوت بهینگی تک‌هدفه و چندهدفه را برای تصمیم‌گیران مشخص کرده و نشان داده است که بهینگی توابع هدف در شرایط تک‌هدفه، با بهینگی به دست آمده در شرایط چندهدفه بسیار متفاوت است و به واقعیت نزدیک نیست. در ادامه الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب برای حل نمونه‌های کوچک استفاده شد و عملکرد هر دو روش (معیار جامع و NSGA-II) با استفاده از شاخص‌های عملکردی (میانگین فاصله ایده‌آل، زمان پردازش، پراکندگی و یکنواختی فضا) بررسی شد. نتایج نشان داد عملکرد NSGA-II در برخی شاخص‌ها شبیه به الگوریتم معیار جامع و در برخی بهتر از آن است؛ بنابراین می‌توان برای مسائل متوسط و بزرگ از آن استفاده کرد؛ سپس با حذف توابع اجتماعی و زیستی، تأثیر هر یک بر تابع هدف اقتصادی مشخص شد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که تغییر چیدمان تسهیلات بدون در نظر گرفتن تصمیمات اجتماعی در قبال محیط کار کارکنان، موجب افزایش هزینه‌های چیدمان نسبت به حالت بهینه (حالتی که تمامی ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی لحاظ شده‌اند) می‌شود؛ اما نکته‌ای که بسیار نگران‌کننده به نظر می‌رسد، رشد چشم‌گیر خطرهای بالقوه چیدمان ماشین‌آلات در محیط کار کارکنان در این حالت است؛ همچنین با حذف مسائل زیستی از مدل پیشنهادی، هزینه‌ها کاهش می‌یابد؛ اما این کاهش هزینه باعث افزایش ۲۰۰ درصدی مصرف انرژی خواهد شد. به منظور ایجاد نگرش مدیریتی و دید کامل‌تری از مسئله، پارامترهای مهم مسئله (میزان اهمیت توابع هدف، میزان تقاضای هر قطعه و مدت زمان پردازش هر قطعه)

شناسایی و موردتحلیل حساسیت قرار گرفتند و پیشنهادهای مدیریتی و عملکردی متناسب با هر یک ارائه شده است. در انتها به‌منظور نمایش کاربرد مدل پیشنهادی در دنیای واقعی، مدل بر اساس داده‌های یک مطالعه موردی در ابعاد بزرگ حل شد که نتایج حاکی از کاهش ۶۲ درصدی هزینه‌ها و ارائه چیدمانی ایمن و دوست‌دار محیط زیست است؛ بنابراین به‌منظور ایجاد یک چیدمان پایدار باید بین اهداف اقتصادی، زیستی و اجتماعی تعادل و توازن برقرار شود. بدین منظور ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در پایداری باید شناسایی و به‌صورت توابع چندهدفه بررسی شوند؛ بنابراین بررسی این معیارها به‌صورت تکی یا ترکیب چندتایی می‌تواند فضای گسترده‌ای را برای پژوهش‌های آتی فراهم کند. پژوهشگران می‌توانند سایر مسائل برنامه‌ریزی تولید مانند مباحث نگهداری موجودی، محدودیت منابع مالی، انرژی مصرفی در مرحله جابه‌جایی، زمان بیکاری تسهیلات، ابعاد نامساوی تسهیلات و استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل پیشنهادی را به‌کار گیرند و نتایج حاصل را با نتایج این پژوهش مقایسه کنند.

**تعارض منافع.** برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

## منابع

1. Aalaei, A. Hamid. D., (2017). A robust optimization model for cellular manufacturing system into supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 183, 667-679.
2. Aghajani-Delavar, N., Mehdizadeh, E., Tavakkoli Moghaddam, R., & Haleh, H. (2020). A multi-objective vibration damping optimization algorithm for solving a cellular manufacturing system with manpower and tool allocation. *Scientia Iranica*, 29(4), 2041-2068. (In Persian)
3. Aghazadeh, S. M., Hafeznezami, S., Najjar, L., & Huq, Z. (2011). The influence of work-cells and facility layout on the manufacturing efficiency. *Journal of facilities management*, 9(3), 213-224.
4. Akbari, M., Dorri Nokarani, B., & Zandieh, M. (2012). Scheduling Working Shifts for Multi-skilled Workforces with Genetic algorithm Approach. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 2(3), 87-102. (In Persian)
5. Ayough, A., Zandieh, M., Farsijani, H., & Dorri Nokarani, B. (2014). Job Rotation Scheduling in a New Arranged Lean Cell, a Genetic Algorithm Approach. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 4(3), 33-59. (In Persian)
6. 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. (In Persian)
7. 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.
8. Benjaafar, S. (2002). Modeling and analysis of congestion in the design of facility layouts. *Management science*, 48(5), 679-704.
9. Bougain, S., Gerhard, D., Nigischer, C., & Uğurlu, S. (2015). Towards energy management in production planning software based on energy consumption as a planning resource. *Procedia CIRP*, 26, 139-144.
10. 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.
11. de Lira-Flores, J. A., López-Molina, A., Gutiérrez-Antonio, C., & Vázquez-Román, R. (2019). Optimal plant layout considering the safety instrumented system design for hazardous equipment. *Process Safety and Environmental Protection*, 124, 97-120.
12. Delgoshaei, A., Ariffin, M. K. A., & Ali, A. (2017). A multi-period scheduling method for trading-off between skilled-workers allocation and outsource service usage in dynamic CMS. *International Journal of Production Research*, 55(4), 997-1039.
13. Doroudyan, M., & Khoshghalb, A. (2021). Robust design for facility layout problem in cellular manufacturing systems with uncertain demand. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 13(Special issue: 17th International Industrial Engineering Conference), 1-11. (In Persian)

14. Drake, D. F., & Spinler, S. (2013). Sustainable operations management: An enduring stream or a passing fancy? *Manufacturing & Service Operations Management, 15*(4), 689-700.
15. Fakhrazad, 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. (In Persian)
16. Feng, H., Xi, L., Xia, T., & Pan, E. (2018). Concurrent cell formation and layout design based on hybrid approaches. *Applied Soft Computing, 66*, 346-359.
17. Forghani, K., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Kia, R. (2022). Group layout design of manufacturing cells incorporating assembly and energy aspects. *Engineering Optimization, 54*(5), 770-785.
18. Ghiasvand Ghiasi, F., Yazdani, M., Vahdani, B., & Kazemi, A. (2022). Meta-Heuristic Algorithms for Multi-Objective Home Health Care Routing and Scheduling Problem Considering Time Windows and Workload Balance of Nurses. *The Journal of Industrial Management Perspective, 12*(1), 225-260. (In Persian)
19. Golmohammadi, A. M., Morady Gohareh, M., & Karbasian, M. (2022). Proposing an efficient mathematical model for the continuous layout design in a cellular manufacturing system The real-case of BATA company. *Production and Operations Management, 13*(1), 25-50. (In Persian)
20. Guo, L., Wang, Z., Guo, P., Wang, J., & Zhao, D. (2023). Mathematical programming model of process plant safety layout using the equipment vulnerability index. *Korean Journal of Chemical Engineering, 40*(4), 727-739.
21. Gupta, M., & Sharma, K. (1996). Environmental operations management: an opportunity for improvement. *Production and Inventory Management Journal, 37*, 40-46.
22. Hosseinabad, E. R., & Zaman, M. A. U. (2020). A brief review on cellular manufacturing and group technology. *Research Journal of Management Reviews, 5*(1), 1-20.
23. Iqbal, A. Al-Ghamdi, K. A. (2018). Energy-efficient cellular manufacturing system: Eco-friendly revamping of machine shop configuration. *Energy, 163*, 863-872.
24. Jafarzadeh, J., Amoozad Khalili, H., & Shoja, N. (2022). Multi-objective mathematical model for dynamic cellular manufacturing system design under uncertainty; a sustainable approach. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization, 7*(1), 98-120. (In Persian)
25. Kalantari, M., Pishvae, M. S., & Yaghoubi, S. (2015). A Multi Objective Model Integrating Financial and Material Flow in Supply Chain Master Planning. *The Journal of Industrial Management Perspective, 5*(3), 139-167. (In Persian)
26. Kang, S., Kim, M., & Chae, J. (2018). A closed loop based facility layout design using a cuckoo search algorithm. *Expert Systems with Applications, 93*, 322-335.
27. Kargar, B., Pishvae, M. S., & Barzinpour, F. (2017). A Multi-Objective Mathematical Model for Organ Allocation to Patients in Iran Organ Transplantation Network. *The Journal of Industrial Management Perspective, 7*(3), 151-177. (In Persian)
28. Khalafallah, A., & El-Rayes, K. (2004). Safety and cost considerations in site layout planning. *Housing and Building Research Centre Journal, 1*(1), 141-150.

29. Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., & Khorrani, 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.
30. Kia, R., Shirazi, H., Javadian, N., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2015). Designing group layout of unequal-area facilities in a dynamic cellular manufacturing system with variability in number and shape of cells. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3390-3418.
31. Kidam, K., & Hurme, M. (2012). Design as a contributor to chemical process accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(4), 655-666.
32. Kim, W. S., & Lim, D. E. (2019). On an automated material handling system design problem in cellular manufacturing systems. *European journal of industrial engineering*, 13(3), 400-419.
33. Ku, M. Y., Hu, M. H., & Wang, M. J. (2011). Simulated annealing based parallel genetic algorithm for facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 49(6), 1801-1812.
34. Kumar, R., Singh, S. P., & Lamba, K. (2018). Sustainable robust layout using Big Data approach: A key towards industry 4.0. *Journal of cleaner production*, 204, 643-659.
35. Langer, T., Schlegel, A., Stoldt, J., & Putz, M. (2014). A model-based approach to energy-saving manufacturing control strategies. *Procedia CIRP*, 15, 123-128.
36. Lotfi, R., Sheikhi, Z., Amra, M., AliBakhshi, M., & Weber, G.-W. (2021). Robust optimization of risk-aware, resilient and sustainable closed-loop supply chain network design with Lagrange relaxation and fix-and-optimize. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-41.
37. Mansour, H. A., Afefy, I. H., & Taha, S. M. (2021). Heuristic-based approach to solve layout design and workers' assignment problem in the cellular manufacturing system. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 1-17.
38. Mohammadi, M., & Forghani, K. (2016). Designing cellular manufacturing systems considering S-shaped layout. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 221-236.
39. Morinaga, E., Shintome, Y., Wakamatsu, H., & Arai, E. (2016). Facility layout planning with continuous representation considering temporal efficiency. *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, 29(9), 408-413.
40. 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.
41. Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016a). A bi-objective model in sustainable dynamic cell formation problem with skill-based worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 38, 46-62.
42. Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016b). A new multi-objective mathematical model for dynamic cell formation under demand and cost uncertainty considering social criteria. *Applied Mathematical Modelling*, 40(4), 2674-2691.

43. O'driscoll, E., & O'donnell, G. E. (2013). Industrial power and energy metering—a state-of-the-art review. *Journal of cleaner production*, 41, 53-64.
44. Paydar, M. M., Saidi-Mehrabad, M., & Teimoury, E. (2014). A robust optimisation model for generalised cell formation problem considering machine layout and supplier selection. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(8), 772-786.
45. Pourhassan, M. R., & Raissi, S. (2017). An integrated simulation-based optimization technique for multi-objective dynamic facility layout problem. *Journal of Industrial Information Integration*, 8, 49-58.
46. Quiroz-Perez, E., de Lira-Flores, J. A., Gutierrez-Antonio, C., & Vazquez-Roman, R. (2021). A new multiple-risk map approach to solve process plant layout considering safety and economic aspects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72, 104524.
47. Rafiee, M., & Mohamaditalab, A. (2020). Investigation into skill leveled operators in a multi-period cellular manufacturing system with the existence of multi-functional machines. *Scientia Iranica*, 27(6), 3219-3232. (In Persian)
48. Rafiei, H., & Ghodsi, R. (2013). A bi-objective mathematical model toward dynamic cell formation considering labor utilization. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), 2308-2316.
49. Rahimi, V., Akvat, 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.
50. Raoofpanah, H., Ghezavati, V., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Solving a new robust green cellular manufacturing problem with environmental issues under uncertainty using Benders decomposition. *Engineering Optimization*, 51(7), 1229-1250.
51. Roghanian, E., & Cheraghalipour, A. (2019). Addressing a set of meta-heuristics to solve a multi-objective model for closed-loop citrus supply chain considering CO2 emissions. *Journal of cleaner production*, 239, 118081.
52. 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.
53. Salimpour, S., Pourvaziri, H., & Azab, A. (2021). Semi-robust layout design for cellular manufacturing in a dynamic environment. *Computers & Operations Research*, 133, 105367.
54. Sarkis, J. (1998). Evaluating environmentally conscious business practices. *European Journal of Operational Research*, 107(1), 159-174.
55. Scalia, G., Micale, R., & Enea, M. (2019). Facility layout problem: Bibliometric and benchmarking analysis. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(4), 453-472.
56. Shafiqh, F., Defersha, F. M., & Moussa, S. E. (2017). A linear programming embedded simulated annealing in the design of distributed layout with production planning and systems reconfiguration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1-4), 1119-1140.
57. Singh, S. P., & Sharma, R. R. K. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5), 425-433.

58. Singh, S., & Singh, V. (2011). Three-level AHP-based heuristic approach for a multi-objective facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 49(4), 1105-1125.
59. Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Javadi, B., Safaei, N. (2007). Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands. *Applied Mathematics and Computation*, 184(2), 721-728.
60. Tayal, A., Gunasekaran, A., Singh, S. P., Dubey, R., & Papadopoulos, T. (2017). Formulating and solving sustainable stochastic dynamic facility layout problem: A key to sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 253(1), 621-655.
61. Tayal, A., & Singh, S. P. (2017). Designing Flexible Stochastic Dynamic Layout: An Integrated Firefly and Chaotic Simulated Annealing-Based Approach. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 18(2), 89-98.
62. Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning*. John Wiley & Sons.
63. Vikhorev, K., Greenough, R., & Brown, N. (2013). An advanced energy management framework to promote energy awareness. *Journal of cleaner production*, 43, 103-112.
64. Wang, J., & Liu, C. (2018). A priority rule based heuristic for virtual cellular manufacturing system with energy consumption. *15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 1-5.
65. 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.

