



Semnan University



Research Article

## Designing a Dynamic and Sustainable Cellular Manufacturing System by Considering the Amount of Energy Consumption and Manpower in Production Planning

Nader Ghanei <sup>a</sup>, Gholam Reza Esmailian <sup>a,\*</sup>, Amir Saman Kheirkhah <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Industrial Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 2024-04-19

Revised: 2024-09-15

Accepted: 2024-09-22

#### Keywords:

Dynamic cellular manufacturing system;  
Energy scaling;  
Production planning;  
Epsilon-constraint method;  
NSGA-II algorithm.

### ABSTRACT

The design and planning of cellular Manufacturing systems in most classical models is based on minimizing production costs or increasing producers' profits. With the expansion of production systems and the increase in demand for products, concerns about environmental issues and excessive consumption of non-renewable resources have increased. On the other hand, paying attention to workers and the safety of the work environment has been introduced as a vital issue in creating a sustainable Manufacturing system. In this article, a new multi-objective mathematical model for creating a sustainable cellular Manufacturing system is presented according to the mentioned items in order to minimize the production costs in the system in addition to optimizing the environmental effects of the Manufacturing system. In the following, the model was solved using the epsilon constraint method and various solutions were presented in the form of a Pareto front for decision making. Due to the NP-hardness of the proposed model and the inability of the GAMS software to find optimal solutions for large-scale problems, a non-dominant sorting genetic algorithm (NSGA-II) is presented to solve it. The results showed that the meta-heuristic method has reduced the solution time by at least three times compared to the epsilon constraint method; Also, reducing the level of environmental risks has led to an increase in production costs. Finally, the applicability of the proposed model in an agricultural equipment production workshop has been investigated as a case study.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33839.2655>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [gre@pnu.ac.ir](mailto:gre@pnu.ac.ir)

#### How to cite this article:

Ghanei, N., Esmailian, G. R., & Kheirkhah, A. (2024). Designing a dynamic and sustainable cellular Manufacturing system by considering the amount of energy consumption and manpower in production planning. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(79), 175-209. doi: 10.22075/jme.2024.33839.2655

# طراحی یک سیستم تولید سلولی پویا و پایدار با در نظر گرفتن میزان مصرف انرژی و نیروی انسانی در برنامه‌ریزی تولید

نادر قانعی<sup>۱</sup>، غلامرضا اسماعیلیان<sup>۱\*</sup>، امیرسامان خیرخواه<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱	طراحی و برنامه‌ریزی سیستم‌های تولید سلولی در اکثر مدل‌های کلاسیک بر مبنای به حداقل رساندن هزینه‌های تولید یا افزایش سود تولیدکنندگان انجام شده است. در صورتی که با گسترش سیستم‌های تولیدی و افزایش تقاضا برای محصولات، نگرانی‌ها در خصوص مسائل زیست‌محیطی و مصرف بی‌رویه منابع تجدیدناپذیر افزایش یافته است. از طرفی، توجه به کارگران و ایمنی محیط کار در ایجاد یک سیستم تولید پایدار، بعنوان امری حیاتی معرفی شده است. در این مقاله یک مدل ریاضی چندهدفه جدید برای ایجاد سیستم تولید سلولی پایدار با توجه به موارد ذکر شده ارائه شده تا علاوه بر بهینه‌سازی اثرات زیست محیطی سیستم تولید، هزینه‌های تولید را نیز به حداقل برساند. در واقع مدل پیشنهادی به عنوان یک سیستم تولید سلولی پایدار به دنبال راه‌حلی برای ایجاد یک سیستم تولیدی است که در آن برای تولیدکنندگان، محیط زیست و کارگران ارزش‌افزوده ایجاد شود. در ادامه، مدل با استفاده از روش اپسیلون محدودیت حل شده و جواب‌های متنوعی به صورت جبهه پارتو برای تصمیم‌گیری ارائه گردید. با توجه به NP-hard بودن مدل پیشنهادی و عدم توانایی نرم‌افزار گمز در یافتن جواب‌های بهینه برای مسائل در مقیاس بزرگ، یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمغلوب (NSGA-II) برای حل آن ارائه شده است. نتایج نشان داد، روش فراابتکاری زمان حل را حداقل به میزان سه برابر نسبت به روش اپسیلون محدودیت، کاهش داده است؛ همچنین کاهش سطح خطرات محیطی منجر به افزایش هزینه‌های تولید شده است. در نهایت، کاربردپذیری مدل پیشنهادی در یک کارگاه تولید تجهیزات کشاورزی به صورت مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱	
<b>واژگان کلیدی:</b> سیستم تولید سلولی پویا، انرژی، برنامه‌ریزی تولید، روش اپسیلون - محدودیت، الگوریتم NSGA-II.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33839.2655>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه  
داده است تا محصولات خود را با هزینه کم، کیفیت بالا و در سریع‌ترین زمان ممکن برای تحویل به موقع به مشتریان تولید کنند. این سیستم‌ها همچنین باید به سرعت با تغییرات در تقاضا و طراحی محصول سازگار شوند بدون اینکه نیازی به صرف هزینه برای تنظیم مجدد داشته باشند. سیستم تولید سلولی<sup>۲</sup> به عنوان یکی از جدیدترین و

افزایش رقابت بین تولیدکنندگان، کوتاه شدن عمر مفید محصولات، افزایش تنوع در تقاضای مشتریان، سفارشی‌سازی محصولات و در نتیجه تنوع در بسیاری از پارامترها مانند تقاضای محصول و دسترسی به منابع تولید، تولیدکنندگان را به سمت اصلاح سیستم‌های تولیدی سوق

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: gre@pnu.ac.ir

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

استناد به این مقاله:

<sup>2</sup> Cellular Manufacturing System (CMS)

پاسخگویی یا دستیابی به مشتریان جدید و افزایش مزیت رقابتی، پاسخ به محدودیت‌ها و فرصت‌های نظارتی اشاره کرد [۵]. در کشورمان نیز علیرغم توجه به این موضوع در سند چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴ و همچنین در اصل پنجاه قانون اساسی که بیان می‌کند «در جمهوری اسلامی، حفاظت محیط زیست که نسل امروز و نسل‌های بعد باید در آن حیات اجتماعی رو به رشدی داشته باشند، وظیفه عمومی تلقی می‌گردد؛ از این رو فعالیت‌های اقتصادی و غیر آن که با آلودگی محیط زیست یا تخریب غیرقابل جبران آن ملازمه پیدا کند، ممنوع است» که پیاده سازی این مهم به درستی انجام نشده است. لذا در این مقاله، یک مدل ریاضی جدید برای طراحی سیستم تولید سلولی ارائه شده است که نه تنها می‌تواند به بعد اقتصادی متمرکز شود و هزینه‌های تولید را کاهش دهد؛ بلکه در محافظت از محیط زیست و توجه به بعد اجتماعی نیز نقش مؤثری ایفا نماید.

ساختار این مقاله در ادامه به شرح ذیل سازمان‌دهی شده است؛ در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه پژوهش ارائه می‌شود. روش‌شناسی پژوهش در بخش سوم ارائه می‌گردد. تحلیل داده‌ها و یافته‌های حاصل از پژوهش در بخش چهارم بیان شده و بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های بعدی، اختصاص یافته است.

## ۲- مرور بر ادبیات پژوهش

سیستم تولید سلولی یکی از سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر است که به ایجاد یک خط تولید اثربخش و کارا کمک می‌کند. این سیستم تولیدی برگرفته از اصول تکنولوژی گروهی است که توسط فلاندرز<sup>۸</sup> در سال ۱۹۲۵ پیشنهاد و در روسیه توسط میتروفانوف<sup>۹</sup> در سال ۱۹۳۳ پذیرفته شد. ظاهراً شرکت‌های ژاپنی در دهه ۱۹۷۰ شروع به اجرای تولید سلولی کردند و در دهه ۱۹۸۰ سلول‌ها به عنوان عنصری از تولید به‌هنگام<sup>۱۰</sup> به ایالات متحده مهاجرت کردند [۵]. در سیستم تولید سلولی ماشین‌های مختلفی برای پردازش مواد اولیه و تولید محصولات مورد نظر در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. وظیفه اصلی سیستم تولید سلولی شناسایی قطعات مشابهی است که به ماشین‌کاری نیاز دارند؛ سپس ماشین‌ها با توجه به ترتیب عملیاتی که قرار

پیشرفته‌ترین مفاهیم تولیدی که از فلسفه فناوری گروهی<sup>۳</sup> برای طبقه‌بندی خانواده قطعات در تولید و تخصیص گروه‌های ماشین به آن‌ها استفاده می‌کند، توانسته است علاوه بر برطرف کردن ضعف‌های تولید کارگاهی و خطوط جریان، شرکت‌های تولیدی را مجبور به استفاده از این سیستم کارآمد، نماید [۲ و ۱]. این سیستم تولیدی به طور هم‌زمان مزایای روش تولید کارگاهی و خطوط جریان را دارا است. این مزایا شامل کاهش زمان و هزینه راه‌اندازی، ابزارهای مورد نیاز، زمان‌های انتظار<sup>۴</sup> و موجودی‌های در جریان کار است. علاوه بر این، CMS انعطاف‌پذیری را افزایش می‌دهد، زمان تحویل را با قابلیت اطمینان بیشتر بهبود و جریان قطعات و ابزارها را تسهیل می‌بخشد [۳].

در مدل‌های کلاسیک (پایه)، برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های تولید سلولی، تنها از طریق افزایش سود تولید و یا به طور متناوب به حداقل رساندن هزینه‌های تولید برای تولیدکنندگان در نظر گرفته شده است و صرفاً ایجاد ارزش‌افزوده برای تولیدکننده بصورت تک بعدی (جنبه اقتصادی)، ملاک عمل قرار گرفته؛ درحالی‌که با گسترش سیستم‌های تولیدی و افزایش تقاضا برای تولید، علاوه بر جنبه اقتصادی، جنبه‌های اجتماعی و زیست محیطی نیز بیشتر مشهود شده و مورد توجه دولت‌ها قرار گرفته است. رفع این نگرانی‌ها با اجرای پایداری در تولید و ارائه راه‌حل‌های مؤثر توسط آن، امکان‌پذیر خواهد بود. با ورود مباحث پایداری در تولید به‌عنوان یک حوزه نوظهور که مورد توجه پژوهشگران مختلف نیز قرار گرفته است، سمت‌وسوی بهینگی تولید علاوه بر موارد قبلی (کاهش هزینه‌ها و بعد اقتصادی) به سمت توجه به موضوعات اجتماعی و زیست محیطی جلب شده است. به عبارت دیگر با ورود پایداری به تولید، بر محصولات و فرآیندهایی تمرکز می‌شود تا از نظر اقتصادی مناسب باشند، اثرات منفی زیست‌محیطی را به حداقل برساند و به منافع کارکنان و جامعه، توجه شود. تاثیر موفق پیاده‌سازی پایداری در شرکت‌های بزرگی مانند بی‌ام‌دبلیو<sup>۵</sup>، دالمر<sup>۶</sup>، کوکاکولا<sup>۷</sup> و بسیاری دیگر، گزارش شده است [۴]. مزایای متعددی از ورود پایداری به تولید معرفی شده است در این بین می‌توان به افزایش کارایی عملیاتی با کاهش هزینه‌ها و ضایعات،

<sup>7</sup> Coca-Cola

<sup>8</sup> Flanders

<sup>9</sup> Mitrofanov

<sup>10</sup> just-in-time (JIT) production

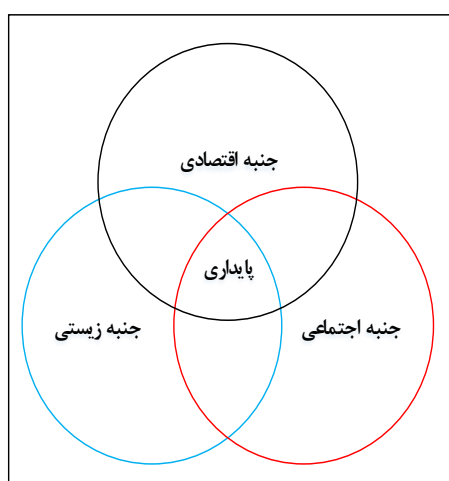
<sup>3</sup> Group Technology

<sup>4</sup> Lead times

<sup>5</sup> BMW

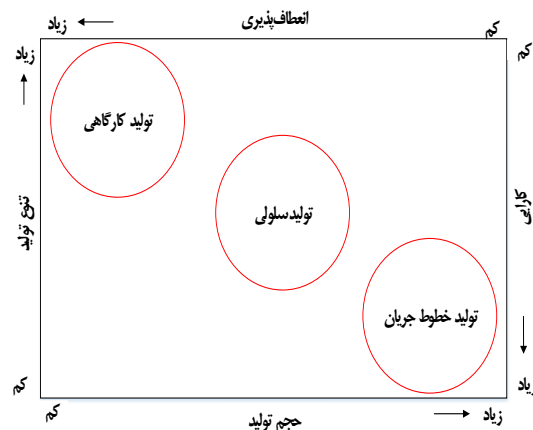
<sup>6</sup> Dalmer

نیز به دنبال تخصیص تجهیزات و منابع انسانی به ماشین آلات به منظور متحمل شدن کمترین هزینه تجهیز سلول است [۹]. هنگامی که سیستم تولیدی با نوسانات تقاضا و ترکیب محصول مواجه باشد در هر دوره ترکیب و تقاضای محصول متفاوت خواهد بود. در نتیجه، سلول‌های تشکیل شده ممکن است برای دوره بعدی بهینه و کارآمد نباشند. برای غلبه بر این موضوع، مفهوم سیستم تولید سلولی پویا معرفی شده است [۱۰]. به دلیل پیامدهای ناخواسته اجتماعی و زیست‌محیطی فعالیت‌های تولیدی، صنایع مسئولیت‌های بیشتری را در مورد نحوه تصمیم‌گیری در تولیدی ایجاد کرده است. برای این منظور، مدیران کسب‌وکار به دنبال دستیابی به پایداری در تولید هستند. تولید پایدار از مفهوم توسعه پایدار که برای رسیدگی به نگرانی‌های مربوط به اثرات زیست‌محیطی، توسعه اقتصادی، جهانی‌سازی، نابرابری‌ها و عوامل دیگر ابداع شد، شکل گرفت. تعاریف متعددی برای تولید پایدار وجود دارد. برای مثال، تعریفی که برای تولید پایدار توسط وزارت بازرگانی ایالات متحده<sup>۱۵</sup> تعریف می‌شود، عبارت است از: «ایجاد محصولات تولیدی که از فرآیندهایی استفاده می‌کنند که اثرات منفی زیست‌محیطی را به حداقل می‌رسانند، انرژی و منابع طبیعی را حفظ می‌کنند، برای کارکنان، جوامع و مصرف‌کنندگان ایمن هستند و از نظر اقتصادی سالم هستند». طبق تعریفی که در [۱۱] ارائه شده است، جنبه‌های پایداری به صورت شکل (۲) کنار یکدیگر قرار می‌گیرند.



شکل ۲- جنبه‌های پایداری [۱۱]

است انجام دهند، گروه‌بندی می‌شوند. در نتیجه، سیستم تولیدی یک سیستم تولیدی است که می‌تواند انواع قطعات با حجم متوسط/متنوع را به‌صرفه‌تر از سایر سیستم‌های تولیدی، تولید نماید. اگر حجم تولید بسیار زیاد باشد، خطوط جریان برای تولید کالا ترجیح داده می‌شود. اگر حجم‌ها کم باشند و قطعات تا حدی تفاوت داشته باشند به‌نحوی که شباهت‌های جزئی بین اقدام‌ها وجود داشته باشد، تولید سلولی بهتر است. شکل (۱) ویژگی‌های اصلی سیستم‌های تولید سلولی در مقایسه با سیستم‌های کارگاهی و خطوط جریان نشان می‌دهد. این شکل، چهار موضوع اصلی انعطاف‌پذیری، کارایی تولید، حجم تولید و تنوع تولید را در نظر می‌گیرد. CMS ها تعادلی بین ویژگی‌های دو سیستم کارگاهی و خطوط جریان هستند [۶].



شکل ۱- جایگاه سیستم تولید سلولی [۶]

نمایش جامعی از تعاریف، طبقه‌بندی‌ها و رویکردهایی که برای طراحی یک سیستم تولید سلولی کارآمد و مؤثر مورد نیاز است در [۷ و ۸] ارائه شده است. تشکیل، چیدمان گروهی، زمان‌بندی گروهی سلول‌ها و تخصیص منابع، چهار مرحله ضروری است که باید در طراحی یک CMS در نظر گرفته شوند [۹]. تشکیل سلول<sup>۱۱</sup> (CF) شامل شناسایی سلول‌های ماشین و خانواده‌های قطعات است تا هزینه کل حرکت بین سلولی قطعات را به حداقل برساند. چیدمان گروهی<sup>۱۲</sup> (GL) به مسائل مربوط به تعیین چیدمان سلول در کف کارگاه و چیدمان ماشین در هر سلول می‌پردازد. زمان‌بندی گروهی<sup>۱۳</sup> (GS) قطعات و خانواده‌های قطعات را در هر سلول زمان‌بندی می‌کند. تخصیص منابع<sup>۱۴</sup> (RA)

<sup>14</sup> resource allocation (RA)

<sup>15</sup> U.S. Department of Commerce

<sup>11</sup> cell formation (CF)

<sup>12</sup> group layout (GL)

<sup>13</sup> group scheduling (GS)

تبرید) حل کردند. در [۱۹]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای مسئله تشکیل سلول برای تخصیص بهینه ماشین‌ها، قطعات و نیروی کار با ویژگی‌های مانند در نظر گرفتن هم‌زمان برنامه‌ریزی تولید، مسیرهای فرآیند جایگزین، تقسیم دسته‌ای، تعادل بار کاری بین سلول‌ها ارائه کردند.

تعدادی از پژوهشگران نیز مسئله تخصیص اپراتور را بر اساس موضوعاتی مانند علاقه کارگران به همکاری کنار یکدیگر [۲۰]، شاخص کیفیت [۲۱] را مورد بررسی قرار دادند. در [۲۲]، یک مدل ریاضی چندهدفه غیرخطی برای ایجاد سیستم تولید سلولی پایدار ارائه کرده است که در آن مسئله رفاه اجتماعی کارگران (رضایت از شرایط کار کارگران، آلودگی صوتی) در کنار به حداقل رساندن هزینه‌های تولید در نظر گرفته شده است. مدل آن‌ها به عنوان یک سیستم تولید سلولی پایدار معرفی شده و از روش اسپیلون محدودیت و روش معیار جامع<sup>۱۶</sup> برای حل مدل چندهدفه مسئله استفاده کرده است.

با افزایش نگرانی‌ها در مورد مسائل زیست‌محیطی این جنبه پایداری نیز توسط پژوهشگران به مدلسازی‌های سیستم تولید سلولی اضافه شده است. عمده موضوعات مدل شده در این حوزه مربوط به انرژی و آلودگی محیط زیست است که از مهم‌ترین چالش‌های صنایع تولیدی بشمار می‌روند. موضوع انرژی به عنوان یکی از موضوعات مهم زیست محیطی در پژوهش [۲۳]، مورد توجه قرار گرفته است. آن‌ها یک برنامه عدد صحیح مختلط را برای طراحی سیستم‌های تولید سلولی با در نظر گرفتن مصرف انرژی توسعه دادند. فرض بر این بوده که ماشین‌ها قادر به پردازش با نرخ‌های مصرف انرژی و زمان‌های پردازش متفاوت هستند. آن‌ها برای حل مسئله ریاضی، از یک الگوریتم ترکیبی حاصل از ادغام الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده را پیشنهاد کردند. در [۲۴]، مسئله زمان‌بندی در سیستم‌های تولید سلولی برای به حداکثر رساندن سود، با در نظر گرفتن درآمدهای حاصل از فروش و همچنین هزینه‌های مصرف انرژی و جریمه‌های تأخیر سفارش مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل ریاضی توسعه‌یافته شامل وابستگی زمانی قیمت‌های انرژی، کشش قیمت تقاضا و مصرف توان مبتنی بر سرعت ماشین‌ها است. در پژوهش [۲۵]، یک سیستم تولید سلولی مجازی را که با سطوح مصرف انرژی یکپارچه شده بود مورد مطالعه قرار

امروزه تولیدکنندگان و سیاست‌گذاران سعی دارند تا علاوه بر اهداف اقتصادی، به اهداف اجتماعی و زیست‌محیطی نیز دست یابند. لذا، پژوهشگران سعی در دستیابی به یک مفهوم برد-برد-برد بین جنبه‌های پایداری هستند ولی در پژوهش‌های انجام شده در تولید سلولی غالباً جنبه اقتصادی مد نظر قرار گرفته یا ترکیبی دو تایی با محوریت جنبه اقتصادی مدل شده است. در ادامه مطالعات انجام شده در این حوزه ارائه شده است.

در [۱۲]، پژوهشگران بر جنبه اقتصادی پایداری متمرکز شده و با هدف کاهش هزینه‌های تولید، مسائل تشکیل سلول، برنامه‌ریزی اپراتور و طراحی چیدمان تسهیلات در طراحی و اجرای سیستم تولید سلولی را به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار دادند. در [۱۳]، پژوهشگران مسئله چیدمان سلولی پویا را با تشکیل سلول، زمان‌بندی، تخصیص اپراتور و محدودیت‌های منابع مالی روی ماشین‌ها و کارگران به طور هم‌زمان بررسی کردند؛ آن‌ها جنبه اقتصادی را در مدل خود در نظر گرفتند و حداقل کردن هزینه کل، شامل هزینه ماشین‌ها، کارگران و جابجایی قطعات در چیدمان را مدلسازی کردند. پرداختن به جنبه اقتصادی موضوعی غالب در مدلسازی سیستم‌های تولید سلولی بشمار می‌آید؛ لذا پژوهش‌های بسیاری در این حوزه ارائه شده است [۱۴ و ۱۵ و ۱۶].

برخی از پژوهشگران، عملکرد سیستم تولیدی سلولی را تا حد زیادی تحت تأثیر جنبه اجتماعی پایداری و توجه به نیروی کار می‌دانند به همین منظور تلاش کرده‌اند، برنامه‌ریزی نیروی کار را در کنار مسئله تشکیل سلول مدل کنند. از جمله پژوهش‌هایی که در آن جنبه اجتماعی به مدلسازی سیستم تولید سلولی اضافه شده است، می‌توان به پژوهش [۱۷]، اشاره کرد که در آن تخصیص اپراتور با در نظر گرفتن تأثیرات یادگیری و فراموشی هم‌زمان اپراتور بررسی شده است. طبق مدل آن‌ها، سطح مهارت یک اپراتور را می‌توان بر اساس زمان صرف شده در یک دستگاه افزایش یا کاهش داد. آن‌ها مسائلی که مربوط به برنامه‌ریزی اپراتورها است مانند استخدام، اخراج و حقوق را در مدل خود در نظر گرفته‌اند. در [۱۸]، یک مدل ریاضی برای مسئله تشکیل سلول و تخصیص نیروی کار در نظر گرفتن محیط تولید پویا ارائه کردند و مدل را با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری (الگوریتم ژنتیک مبتنی بر شبیه‌سازی

<sup>16</sup>. LP-metric method

برای به حداقل رساندن هزینه‌ها، به حداقل رساندن انتشار CO<sub>2</sub> و به حداقل رساندن کمبود محصول (افزایش رضایت مشتری) پیشنهاد کردند. اعتبار سنجی مدل در نرم‌افزار گمز به‌وسیله حل‌کننده سی‌پلکس و با روش اپسیلون محدودیت بهبود یافته، انجام شده و در نهایت با دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II حل شده که نتایج نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم NSGA-II در رویکرد پیشنهادی است. خلاصه‌ای از پژوهش‌های ارائه‌شده در بخش پیشینه پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

### شکاف پژوهش

با بررسی مقالات ارائه‌شده در ادبیات موضوع، موارد ذیل را می‌توان به‌عنوان شکاف‌های موجود بیان کرد که ما در قالب نوآوری‌های مدل پیشنهادی به دنبال پوشش آن‌ها هستیم:

**الف.** یکی از اصلی‌ترین شکاف‌های شناسایی‌شده در طراحی سیستم تولید سلولی پویا، عدم توجه به موضوعات زیست‌محیطی بخصوص موضوع انرژی است که در این پژوهش سعی شده است با ارائه یک مدل ریاضی جدید، اهمیت موضوع بیان و شکاف احصاء شده، پوشش یابد؛ همچنین تلاش شده است تا موضوع زیست‌محیطی به نحوی تعریف و مدل‌سازی شود که کارگشای مشکلات کنونی کشور باشد، به همین منظور میزان مصرف انرژی الکتریسته که در اکثر کارگاه‌ها و کارخانه‌ها به عنوان موضوعی گلوگاهی به شمار می‌رود انتخاب شده است.

**ب.** یکی دیگر از موضوعاتی که اکثر مواقع در طراحی سیستم‌های سلولی مغفول مانده، توجه به مسائل اجتماعی (به عنوان یکی از جنبه‌های پایداری) است. در مدل‌های پایه‌ای که برای طراحی سیستم تولید سلولی ارائه شده است، پژوهشگران عمدتاً به دنبال کاهش جابجایی‌ها و هزینه‌های مربوط به آن هستند (توجه به جنبه اقتصادی). در این پژوهش سعی شده است تا با در نظر گرفتن این موارد و توجه به نیروی کار، ایمنی چیدمان به عنوان موضوعی جدید، مدنظر قرار گیرد و به عنوان یک نوآوری، طراحان را در طراحی و ارائه چیدمان بر اساس استانداردها یاری رساند.

**پ.** با دسته‌بندی مدل‌های ارائه شده در طراحی سیستم‌های تولید سلولی مشخص گردید که به دلیل وجود پیچیدگی در مدل‌سازی ریاضی، اغلب پژوهشگران مقدار تولید را با میزان تقاضا در هر دوره برنامه‌ریزی برابر فرض

دادند. مدل پیشنهادی به مدیران این امکان را می‌دهد تا سطح انرژی مصرفی را با در نظر گرفتن سفارشات ازدست‌رفته در تولید انتخاب کنند و بین هزینه انرژی و سفارش ازدست‌رفته توازن برقرار کردند. مدل پیشنهادی با استفاده از یک روش ابتکاری مبتنی بر قانون اولویت<sup>۱۷</sup> حل شده است. در [۲۶]، با ارائه یک مدل ریاضی که آلودگی ناشی از فعالیت‌های تولید و حمل‌ونقل را مد نظر قرار داده، به مسائل پایداری در چیدمان سلولی پرداخته شده است. آن‌ها برای حل مدل از الگوریتم تجزیه پندر استفاده کردند. در [۲۷]، ترکیبی از مسائل تشکیل سلول و چیدمان تسهیلات را با در نظر گرفتن میزان انرژی که در جابجایی قطعات توسط وسایل نقلیه هدایت شونده خودران (AGVها) مصرف می‌شود، در نظر گرفتند. تابع انرژی که آن‌ها تعریف کردند شامل جریان مواد، سرعت و وزن AGV و شتاب ناشی از گرانش است. در [۲۸]، با اضافه کردن هزینه‌های جابجایی ماشین‌ها در چیدمان مجدد، مدل پیشنهادی در پژوهش [۲۷] بازنویسی و اجرا شده است. در [۲۹]، هزینه‌های جابجایی مواد و هزینه‌های الکتریکی ماشین به عنوان هزینه ارزش‌افزوده کار در حال انجام، در نظر گرفته شده است. تشکیل سلول به‌منظور به حداقل رساندن هزینه ارزش‌افزوده کار در حال انجام، با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی رویداد گسسته<sup>۱۸</sup> به دست آمده است.

در این میان اخیراً، تعداد بسیار محدودی از پژوهشگران نیز با توجه به اهمیت ایجاد تعادل بین تمامی جنبه‌های پایداری، سعی کرده‌اند تا در مدل‌های پیشنهادی خود این مهم را پیاده کنند. در [۳۰]، سه جنبه پایداری یعنی عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در طراحی سلول‌های تولیدی انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده است. پژوهشگران یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه را به نحوی ارائه کردند که هزینه‌های مربوط به انتشار کربن، حرکات بین سلولی، پردازش ماشین، جایگزینی ماشین، آموزش کارگران و حقوق اضافی (پاداش) حداقل شود. مدل توسعه‌یافته توسط یک روش محدودیت اپسیلون و یک روش محدودیت اپسیلون تقویت شده در نرم‌افزار لینگو حل شده است. در پژوهش [۵]، پژوهشگران، سیستم تولید سلولی را از نقطه‌نظر پایداری و از نظر جنبه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک تابع مدل ریاضی

<sup>18</sup> Discrete Event Simulation

<sup>17</sup> Priority Rule Based Heuristic

اپراتورها ۱۰۰٪ فرض شده است. در این پژوهش سعی شده تا با فرض عملکرد متغیر هر اپراتور، توازن را در مدلسازی بهتر ارائه شود.

ث. عدم توجه به قابلیت اطمینان ماشین‌ها به عنوان یکی از عوامل مهم در طراحی CMS. این عامل می‌تواند به شدت بر بازده کل سیستم تأثیر بگذارد. خرابی ماشین‌ها منجر به افزایش هزینه‌ها، طولانی‌تر شدن چرخه تولید و سایر مشکلات در تولید می‌شود. مدل پیشنهادی در این پژوهش به نحوی توسعه یافته است که بر این چالش غلبه کند.

می‌کنند؛ در حالی که با توجه به سیاست‌هایی مانند نگهداری موجودی که شرکت‌های تولیدی برای پاسخگویی به میزان تقاضا در محیط صنعتی واقعی اتخاذ می‌کنند، این فرض صحیح نیست. در این پژوهش به منظور پوشش این شکاف، سیاست نگهداری موجودی و فروش ازدست‌رفته به مدل اضافه شده است.

ت. مسائل مربوط به نیروی انسانی در ادبیات سیستم تولید سلولی به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است؛ همچنین در مدل‌هایی هم که به این مهم توجه شده، عملکرد

جدول ۱- مقایسه مقالات حوزه طراحی سیستم تولید سلولی

روش حل	۸								۷ ۶ ۵ ۴				۳ ۲ ۱			نویسنده (سال)
	۸۶	۸۵	۸۴	۸۳	۸۲	۸۱	۳۲	۳۱	۲۲	۲۱	۱۲	۱۱				
-constraint, NSGA-IIε	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	پژوهش حاضر		
AUGMECON (LINGO)				*				*	*	*		*		[۳۰] بُزْکَلار و ایلماز (۲۰۲۴)		
مدل ریاضی (GAMS)			*	*	*	*		*	*			*		[۱۲] بخشی و فاطمی قمی (۲۰۲۳)		
-constraint, NSGA-IIε			*	*				*	*	*	*	*		[۴۵] مطهری و همکاران (۲۰۲۳)		
AUGMECON (GAMS); NSGA-II; MOPSO			*		*	*	*	*	*			*		[۵] جعفرزاده و همکاران (۲۰۲۲)		
GA			*	*				*	*	*	*	*		[۱۳] فخرزاد و همکاران (۲۰۲۲)		
GA, KA, RDA			*					*	*	*	*	*		[۱۴] گل محمدی و همکاران (۲۰۲۲)		
مدل ریاضی (GAMS)					*			*	*			*		[۱۷] رفیعی و همکاران (۲۰۲۲)		
Exact (GAMS); GA; SA; PSA								*	*	*	*	*		[۲۳] فرقانی و همکاران (۲۰۲۲)		
Exact (GAMS); SA				*	*	*	*	*	*	*	*	*		[۲۳] لشکری و همکاران (۲۰۲۱)		
SA, GA, MA			*	*	*			*	*	*	*	*		[۱۵] فرقانی و فاطمی قمی (۲۰۲۰)		
SAGA		*	*	*	*	*		*	*			*		[۱۸] دیپ (۲۰۲۰)		
RMCGP			*		*							*		[۲۰] باقری و همکاران (۲۰۱۹)		
BDA (GAMS)			*		*			*	*			*		[۲۶] رئوف پناه و همکاران (۲۰۱۹)		
PRBH								*	*			*		[۲۵] وانگ و لیو (۲۰۱۸)		
مدل ریاضی (GAMS)		*	*	*	*	*						*		[۱۹] فنگ و همکاران (۲۰۱۷)		
مدل ریاضی (GAMS)		*	*	*	*	*		*	*	*		*		[۱۶] سخایی و همکاران (۲۰۱۶)		
LP metric		*		*	*	*	*	*	*	*		*		[۲۲] قدسی و همکاران (۲۰۱۵)		

۱: تابع هدف، ۱۱: تک هدفه، ۱۲: چندهدفه، ۲: چیدمان تسهیلات، ۲۱: چیدمان درون سلولی، ۲۲: چیدمان بین سلولی، ۳: هزینه چیدمان، ۳۱: هزینه چیدمان درون سلولی، ۳۲: هزینه چیدمان بین سلولی، ۴: مباحث زیست محیطی، ۵: مباحث اجتماعی، ۶: تخصیص اپراتور، ۷: برنامه ریزی تولید (نگهداری موجودی، فروش ازدست رفته)، ۸: سایر ویژگی‌ها در طراحی سیستم تولید سلولی، ۸۱: مسیر جایگزین، ۸۲: توالی عملیات، ۸۳: محدودیت ظرفیت سلول، ۸۴: قابلیت اطمینان ماشین‌ها، ۸۵: تعادل بارکاری، ۸۶: قابلیت اطمینان کارکنان.

### ۳- مدل ریاضی

در این بخش ابتدا مدل پیشنهادی تبیین و سپس فرضیات، پارامترها، توابع هدف و محدودیت‌ها معرفی می‌گردد.

#### تبیین مدل ریاضی توسعه یافته

با بررسی ادبیات موضوع و به منظور پوشش شکاف‌های احصاء شده، یک مدل ریاضی جدید چندهدفه برای سیستم تولید سلولی پویا و پایدار شامل میزان مصرف انرژی (به عنوان جنبه زیست‌محیطی)، هزینه‌ها (به عنوان جنبه اقتصادی) و ایمنی (به عنوان جنبه اجتماعی پایداری) با در نظر گرفتن سایر ویژگی‌های تولید مانند تعادل بار کاری، مسیرهای جایگزین تولید، توالی عملیات، خرابی و قابلیت اطمینان ماشین و مسائل مربوط به اپراتور پیشنهاد شده است.

جنبه اقتصادی مدل. در این پژوهش به منظور بررسی جنبه اقتصادی پایداری از شاخص هزینه‌های تولید استفاده شده است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های مربوط به ماشین (شامل هزینه‌های جابجایی، نصب، جداسازی و خرابی)؛ هزینه‌های مربوط به قطعه (شامل هزینه‌های جابجایی بین سلولی و درون سلولی، هزینه تولید، سفارش مجدد و نگهداری موجودی)؛ هزینه‌های مربوط به اپراتور (شامل هزینه‌های اخراج، استخدام، آموزش و دستمزد) است. برای اینکه به واقعیت نزدیک‌تر باشیم، فرض شده است که تمامی هزینه‌ها از یک دوره به دوره دیگر می‌تواند متفاوت باشد. در مدل پیشنهادی فضای کف کارگاه به مکان‌های هم‌اندازه تقسیم می‌شود به نحوی که فاصله آن‌ها از یکدیگر مشخص است. از بین مکان‌های کاندید، با توجه به هزینه، مقدار جابجایی بین سلولی/درون سلولی هر قطعه و توالی عملیات آن‌ها، سلول‌ها تشکیل و ماشین‌ها به آن‌ها تخصیص می‌یابند. به ازای هر قطعه، حداقل یک مسیر تعریف شده که هر یک شامل مجموعه‌ای از عملیات با توالی مشخص است. هر عملیات روی یک ماشین و با زمان انجام مشخص پردازش می‌شود.

جنبه اجتماعی مدل. در این پژوهش به منظور لحاظ کردن جنبه اجتماعی از موضوع ایمنی محیط کار کارکنان استفاده شده است. استفاده از موضوعات ایمنی در طراحی سیستم‌های تولیدی و چیدمان تسهیلات در سنوات اخیر مورد توجه پژوهشگران بوده اما در حوزه سیستم تولید سلولی مطالعات بسیار اندکی انجام شده است. برای افزایش

ایمنی در محیط کار کارکنان (کاهش خطرات محیطی) دو راهکار بکارگیری می‌شود.

راهکار اول مربوط به توصیه‌ها و دستورالعمل‌های ایمنی محیط کار است که تضمین می‌کند، هر جفت ماشین انتخابی در یک سلول، کنار یکدیگر باشند یا خیر. برای این امر دو مجموعه از ماشین‌ها تعریف و بکارگیری شده است یک مجموعه برای ماشین‌های مجاور و دیگری برای ماشین‌های غیر مجاور و به ازای هر جفت ماشین در هر مجموعه، محدودیتی به مسئله اضافه می‌شود و در صورت عدم وجود تاکید برای همجواری یا عدم مجاورت، محدودیتی لحاظ نمی‌گردد. با درج نظر خبرگان/کارشناسان تولید یا دستورالعمل‌های ایمنی و تکمیل مجموعه‌ها، نتایج به صورت محدودیت به مدل اضافه شده است.

راهکار دوم ایمنی محیط کار به صورت کمینه‌سازی خطرات بالقوه قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های کاندید است. برای این امر بسته به نوع ماشین‌ها و محل‌های کاندید، کم‌خطرترین نوع چیدمان برای کارکنان پیشنهاد می‌شود. برای تعیین سطح خطر در قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های کاندید، از طیف لیکرت با مقیاس بندی ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برای چیدمان بدون خطر (معمول)، چیدمان با احتیاط، چیدمان منجر به آسیب جزئی، چیدمان منجر به آسیب شدید و چیدمان تهدیدکننده زندگی (مرگ) استفاده شده است. ماتریسی از ماشین‌ها و مکان‌های کاندید تشکیل می‌گردد و نظرات خبرگان/کارشناسان تولید یا دستورالعمل‌های ایمنی برای استقرار در آن درج می‌گردد. اگر نظرات به ازای هر استقرار متفاوت باشد، میانگین امتیازها به ازای هر استقرار ثبت می‌گردد و در نهایت کم‌خطرترین محیط برای کارکنان پیشنهاد می‌گردد.

جنبه زیست‌محیطی مدل. با توجه به اهمیت میزان مصرف انرژی در بین معیارهای زیست‌محیطی، شاخصی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، موضوع انرژی است. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که بدانیم تقریباً ۹۰۷ گرم دی‌اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت برق مصرفی در اتمسفر آزاد می‌شود [۲۴]. مشخص شده است که هر عملیات ممکن است با سطوح مصرف انرژی در ماشین‌های مختلف مرتبط باشد، به‌ویژه زمانی که از ماشین‌های چند سرعت استفاده می‌شود. بر این اساس، در نظر گرفتن مصرف انرژی هنگام برنامه‌ریزی تولید بسیار



استاندارد هر اپراتور برای تولید هر قطعه در تعداد قطعات تولید شده بر زمان در دسترس بودن ماشین برای هر دوره محاسبه می‌شود.

### مفروضات مسئله

۱- پیکربندی چیدمان به صورت ردیفی (تک ردیفه یا چند ردیفه) است و مکان‌های کاندید و فواصل آن‌ها از قبل مشخص است.

۲- جابجایی قطعات و ماشین‌آلات و آموزش کارکنان بین دوره‌ها انجام می‌پذیرد لذا زمان آن‌ها در محاسبات منظور نشده است.

۳- هر ماشین می‌تواند تنها یک عملیات را در هر زمان پردازش کند.

۴- هر قطعه دارای چند مسیر فرآیند جایگزین است که تنها یک مسیر تولید می‌بایست برای آن انتخاب شود.

۵- تقاضا برای هر نوع قطعه در هر دوره مشخص و متنوع فرض شده است.

۶- فاصله سلول‌ها از یکدیگر به عنوان عامل محاسبه جابجایی‌های بین سلولی قطعه‌ها فرض شده است ولی برای محاسبه میزان جابجایی درون سلولی فاصله ملاک نیست.

۷- برای ظرفیت سلول‌ها حد بالا و پایین در نظر گرفته شده است.

۸- اگر اپراتور بتواند با ماشین خاصی کار کند یا برای کار با آن آموزش دیده باشد این اثر یادگیری در دوره‌های بعدی لحاظ خواهد شد.

۹- هر اپراتور می‌تواند بر اساس توانایی‌اش به بیش از یک ماشین تخصیص یابد.

۱۰- هر اپراتور می‌بایست تنها به یک سلول تخصیص یابد.

۱۱- حداقل و حداکثر تعداد تخصیص اپراتورها به ماشین‌آلات و حداقل و حداکثر ظرفیت ماشین‌آلات برای دریافت اپراتور از قبل مشخص شده است.

۱۲- دستمزد اپراتورها به صورت تابعی از مدت زمان فعالیت آن‌ها روی ماشین‌ها فرض شده است.

۱۳- تمامی ماشین‌ها توانایی پردازش عملیات با چند سرعت متفاوت را دارند.

۱۴- ماشین‌ها متنوع هستند و از هر نوع ماشین تنها یکی موجود است (ماشین‌های همسان در چیدمان مجاز نیستند).

مهم است. در محیط صنعتی، برنامه‌ریزی کارآمد انرژی معمولاً به معنای تخصیص کارها به ماشین‌ها و همچنین توالی و زمان‌بندی آن‌ها به گونه‌ای است که مصرف انرژی به حداقل برسد. از طرفی معمولاً در خطوط تولید، همه قابلیت‌های ماشین‌ها برای تولید یک قطعه در نظر گرفته نمی‌شود و یک محصول ممکن است توسط چند ماشین مختلف از طریق چند مسیر تولید متفاوت تولید شود و بسته به نوع ماشین زمان پردازش و توالی ماشین‌ها متفاوت فرض شود. در مدل پیشنهادی فرض بر این است که زمان در دسترس هر دستگاه از قبل مشخص است. هر دستگاه می‌تواند تحت حالت‌های مختلف پردازش (سرعت‌های مختلف) عمل کند. برای هر حالت پردازش، نرخ افزایش در مصرف انرژی الکتریکی و نرخ کاهش در زمان پردازش داده شده است. زمان فرآیند و میزان مصرف انرژی الکتریکی یک ماشین بر اساس حالت پردازش انتخابی (سرعت پردازش) تعیین می‌شود.

در مدل پیشنهادی مقدار مصرف انرژی توسط پارامتر  $EEC_{m,j,o}$  به ازای هر ماشین در هر توالی، در هر مسیر تولید و در هر دوره بر اساس رابطه  $Power = E/t$  مشخص شده است. در این رابطه  $Power$  توان (یعنی مصرف انرژی) ارائه شده توسط سازنده دستگاه است.  $E$  مقدار انرژی مصرف شده برای انجام کار و  $t$  زمان صرف شده برای آن است.

توجه به نیروی انسانی. در مدل پیشنهادی نگاه ویژه‌ای به نیروی انسانی و مدل‌سازی مسائل مربوط به آن انجام شده است. برای این امر استخدام، اخراج، آموزش و دستمزد مد نظر قرار گرفته است. با توجه به فرض متغیر بودن هزینه‌های مربوط به نیروی کار در هر دوره، این مدل بهترین دوره را برای آموزش کارگران تعیین کرده و امکان انعطاف‌پذیری بیشتر و ارتقای مهارت‌ها را فراهم می‌کند. این نوع سنجش می‌تواند در بهینه‌سازی هزینه و انگیزه کارکنان بسیار مهم باشد. همچنین تلاش شده است با متغیر فرض کردن عملکرد هر اپراتور در هر دوره، مسئله را به شرایط واقعی نزدیک کرد. در واقع، عملکرد هر فرد ممکن است تحت تأثیر عواملی از جمله سلامت، سن، استعداد فکری، احساسات، تمایل به برخی اشتباهات رایج، تعصبات شناختی و غیره قرار گیرد. عملکرد هر اپراتور به صورت پارامتر ورودی بوده و از تقسیم، حاصل ضرب زمان کاری

۳-۱- مدل ریاضی غیرخطی

$Min OF_1 =$

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

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

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{o,p}^h-1} V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h \cdot X_{m',c'}^h \cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot U_{o,p,(j+1),m'}^h \cdot PR_p^h \cdot C_p^{IA} \quad (2-1)$$

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

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

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K (Q_k^h \cdot C_k^{HI} + (1 - Q_k^h) \cdot C_k^{FI}) \quad (5-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C Q_k^h \cdot R_{k,m}^h \cdot X_{m,c}^h \cdot Y_{k,c}^h \cdot Z_{k,m}^h \cdot C_{k,m}^{TR} \quad (6-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{o,p}^h} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot R_{k,m}^h \cdot \beta_{m,f} \cdot C_{k,m}^{SA} \quad (7-1)$$

$$+ \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \frac{U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot \beta_{m,f} \cdot V_{o,p}^h}{MTBF_m} \cdot CBR_m \quad (8-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P INV_h^p * C_{p,h}^{INV} \quad (9-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P BA_h^p * C_{p,h}^{BA} \quad (10-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P PR_h^p * C_{p,h}^{PR} \quad (11-1)$$

$Min OF_2 =$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{o,p}^h} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F V_{o,p}^h \cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot B_{m,f}^h \cdot \alpha_{m,f} \cdot EEC_{m,j,o} \quad (12-1)$$

S.T:

$$\sum_{c=1}^C X_{m,c}^h = 1 \quad \forall m, h; \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \leq U_c \quad \forall c, h; \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \geq L_c \quad \forall c, h; \quad (4)$$

$$\sum_{c=1}^C S_{c,g}^h \leq 1 \quad \forall g, h; \quad (5)$$

$$\sum_{g=1}^G S_{c,g}^h = 1 \quad \forall c, h; \quad (6)$$

$$\sum_{c=1}^C Y_{k,c}^h = Q_k^h \quad \forall k, h; \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K Q_k^h \geq \min QQ \quad \forall h; \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K R_{k,m}^h \geq L_m \quad \forall m, h; \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K R_{k,m}^h \leq U_m \quad \forall m, h \quad (10)$$

$$R_{k,m}^h \leq Q_k^h \quad \forall k, m, h; \quad (11)$$

$$Y_{k,c}^h \leq Q_k^h \quad \forall k, c, h; \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M R_{k,m}^h \leq Q_k^h \cdot U_k \quad \forall k, h; \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^M R_{k,m}^h \geq Q_k^h \cdot L_k \quad \forall k, h; \quad (14)$$

$$R_{k,m}^h \leq \sum_{c=1}^C X_{m,c}^h \cdot Y_{k,c}^h \quad \forall k, m, h; \quad (15)$$

$$Z_{k,m}^{h+1} = (1 - R_{k,m}^h) \cdot Z_{km}^h \quad \forall k, m, h = 1, \dots, H - 1; \quad (16)$$

$$\sum_{o=1}^{SR_p^h} V_{o,p}^h = PI_p^h \quad \forall p, h; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot V_{o,p}^h \cdot \beta_{m,f} \geq \\ \frac{q}{c} \cdot \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M X_{m,c}^h \cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot V_{o,p}^h \cdot \beta_{m,f} \quad \forall c, h; \end{aligned} \quad (18)$$

$$X_{m^a,c}^h + X_{m^b,c}^h \leq 1 \quad (m^a, m^b) \in \theta, \forall c, h; \quad (19)$$

$$X_{m^c,c}^h + X_{m^d,c}^h = 0 \quad (m^c, m^d) \in \Omega, \forall c, h; \quad (20)$$

$$\sum_{f=1}^F B_{o,p,j,f}^h = 1 \quad \forall p, o, j, h; \quad (21)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot V_{o,p}^h \cdot \beta_{m,f} \cdot \left(1 + \frac{MTTR_m}{MTBF_M}\right) \leq TM_m \quad (22)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot V_{o,p}^h \cdot \beta_{m,f} \leq \sum_{k=1}^K TW_k \quad (23)$$

$$PR_p^h = D_p^h - INV_p^{h-1} + BA_p^{h-1} + INV_p^h - BA_p^h \quad \forall p, h; \quad (24)$$

$$PR_p^h \leq A_{\infty} \cdot PI_p^h \quad \forall p, h; \quad (25)$$

$$\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G X_{m,c}^h \cdot S_{c,g}^h \cdot INJ_{m,g}}{\sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G X_{m,c}^h \cdot S_{c,g}^h \cdot INJ_{m,g}} \leq Max_{INJ} \quad \forall c, h; \quad (26)$$

$$KBT^h = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot \beta_{m,f} \cdot V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{c=1}^C TW_k \cdot Y_{k,c}^h / EF_{k,m}} \quad \forall h; \quad (27)$$

$$KBC_c^h = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M U_{o,p,j,m}^h \cdot PR_p^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot \beta_{m,f} \cdot V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K TW_k \cdot Y_{k,c}^h / EF_{k,m}} \quad \forall c, h; \quad (28)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{h=1}^H |KBC_c^h - KBT^h| \leq \Delta \quad (29)$$

$$Q, V, R, S, X, Y, Z, B, PI \in \{0,1\}; \quad PR, INV, BA \geq 0 \text{ and integer} \quad (30)$$

## توابع هدف

مدل پیشنهادی دو تابع هدف را ارائه کرده است. این توابع شامل (۱) تابع هدف هزینه (۲) تابع هدف انرژی است که تابع هزینه از ۱۱ رابطه تشکیل شده است که به ترتیب عبارت‌اند از: روابط (۱-۱) و (۲-۱) هزینه جابجایی بین سلولی و درون سلول قطعه در چیدمان را کمینه می‌کند. برای توضیح این دو بخش، ابتدا مشخص می‌کنیم که در چه مواقعی حرکت درون سلولی یا بین سلولی قطع‌اتفاق می‌افتد و منجر به هزینه جابجایی درون سلولی یا بین سلولی می‌شود. اگر دو عملیات متوالی یک محصول/قطعه بر روی یک ماشین انجام شود، بدیهی است که هیچ هزینه‌ای برای جابجایی وجود نخواهد داشت زیرا هیچ حرکتی در داخل یا بین سلول‌ها وجود نخواهد داشت. باین حال، هنگامی که دو عملیات متوالی یک محصول/قطعه بر روی ماشین‌های مختلف انجام می‌شود، هزینه جابجایی مواد مربوط به حرکت درون سلولی یا بین سلولی خواهد بود. بنابراین، عبارت  $U_{o,p,j,m}^h$  و  $U_{o,p,(j+1),m'}^h$  در معادلات این دو بخش برای تشخیص این است که در قطعه  $P$  دو عملیات متوالی  $j$  و  $j+1$  بر روی یک نوع ماشین  $m$  اجرا شده‌اند یا در ماشین‌های متمایز  $m$  و  $m'$ . اگر فرض کنیم که  $m$  و  $m'$  برابر باشند، به این معنی است که مکان آن‌ها یکی است و فاصله جابجایی قطعه از ماشین  $m$  به  $m'$  صفر است و هزینه این جابجایی نیز صفر خواهد بود. حال اگر فرض کنیم که  $m$  و  $m'$  برابر نباشند، به این معنی است که مکان قرارگیری آن‌ها یکی نیست به عبارت دیگر  $g' \neq g$  است و در نتیجه، هزینه جابجایی برای جابجایی بین سلولی ایجاد می‌شود. اما در جابجایی درون سلولی چون  $m' \neq m$  و  $g' = g$  و  $c' = c$  و جابجایی رابطه‌ای با فاصله ندارد، در صورت حرکت قطعه از ماشین  $m$  به  $m'$  فقط هزینه جابجایی ملاک است نه فاصله جابجایی. روابط (۱-۳) و (۴-۱) مربوط به هزینه پیکربندی مجدد ماشین‌ها هستند که به ترتیب شامل جابجایی بین سلولی و نصب/حذف ماشین‌آلات است. هزینه‌های استخدام و اخراج، آموزش و حقوق دریافتی اپراتورها به ترتیب از طریق روابط (۱-۵) تا (۷-۱) محاسبه می‌شود. در رابطه (۸-۱) نحوه محاسبه هزینه خرابی ماشین‌ها ارائه شده است. فرض بر این است که هزینه خرابی ماشین‌ها مشخص و بر اساس هزینه‌های تعمیر محاسبه می‌شود. قابلیت اطمینان ماشین‌آلات از یک توزیع نمایی با نرخ خرابی مشخص

پیروی می‌کند که می‌توان آن را به صورت حاصل ضرب نرخ خرابی در زمان پردازش ( $exp(-\lambda.t)$ ) تعریف نمود. نرخ خرابی  $\lambda$  در طول افق تولید مشخص است؛ لذا میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) را می‌توان به صورت  $(MTBF = \frac{1}{\lambda})$  محاسبه کرد. بر اساس این تعاریف، کل خرابی‌های یک ماشین در طول دوره‌های تولید آن را می‌توان از طریق تقسیم زمان تولید بر MTBF و سپس ضرب این مقدار در هزینه خرابی ماشین به دست آورد. هزینه‌های مربوط به برنامه‌ریزی تولید در روابط (۹-۱) تا (۱۱-۱) ارائه شده است. رابطه (۹-۱) نشان‌دهنده هزینه نگهداری موجودی است که به دلیل نگهداری موجودی در انبارها رخ می‌دهد. تأخیر در برآورده کردن تقاضای مشتری منجر به هزینه سفارش برگشتی معادله می‌شود. این هزینه در رابطه (۱۰-۱) و هزینه‌های مربوط به تولید قطعه/محصول در رابطه (۱۱-۱) محاسبه شده است.

تابع هدف دوم که با رابطه (۱۲-۱) مشخص شده، میزان مصرف انرژی الکتریکی در ماشین‌آلات را در طی فرایند تولید هر قطعه نشان می‌دهد. با توجه به این که دو راهبرد برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در این پژوهش تعریف شده با استفاده از متغیر  $V_{o,p}^h$  بهترین مسیر تولید برای قطعه که کمترین میزان مصرف انرژی را دارد انتخاب می‌شود و با استفاده از متغیر  $B_{m,f}^h$  بهترین سرعت را برای ماشین  $m$  در هر دوره انتخاب می‌گردد.

## محدودیت‌ها

رابطه (۲) تضمین می‌کند که در هر دوره، هر ماشین فقط به یک سلول تخصیص یابد. روابط (۳) و (۴) به ترتیب حداقل و حداکثر ظرفیت هر سلول در هر دوره را مشخص می‌کند. رابطه (۵) و (۶) مربوط به نحوه تخصیص سلول‌ها به مکان‌های کاندید است و به ترتیب تضمین می‌کنند که هر مکان، برای یک سلول است و هر سلول می‌بایست به یک مکان کاندید تخصیص یابد. رابطه (۷) تا (۱۶) محدودیت‌های مربوط به تخصیص اپراتور می‌باشند. رابطه (۷) تضمین می‌کند هر اپراتوری که در هر دوره استخدام می‌شود ( $Q_{i,t}^h$ ) به یک سلول تخصیص یابد. طبق رابطه (۸) مشخص می‌شود برای هر دوره حداقل چه تعداد اپراتور باید استخدام گردد. طبق روابط (۹) و (۱۰) حداقل و حداکثر تعداد اپراتورهای مورد نیاز برای هر ماشین تضمین می‌شود. روابط (۱۱) و (۱۲) اپراتور استخدام شده را به ماشین و سلول تخصیص می‌دهد. روابط (۱۳) و (۱۴) حداکثر و

چیدمان منجر به آسیب جزئی، چیدمان منجر به آسیب شدید و چیدمان تهدیدکننده زندگی (مرگ) استفاده شده است. رابطه (۲۷) درصد به کارگیری اپراتورها را در هر دوره محاسبه می‌کند و رابطه (۲۸) درصد به کارگیری اپراتورها را در هر دوره در هر سلول محاسبه می‌کند. رابطه (۲۹) اختلاف کل بین درصد استفاده از تمام اپراتورها در CMS و درصد استفاده از اپراتورها در هر سلول را به حداقل می‌رساند. در واقع، این رابطه، همگنی بار کاری اپراتورها را در سلول‌های مختلف به حداکثر می‌رساند. در محدودیت (۳۰) نوع متغیرها تعریف می‌شود.

### ۳-۲- خطی‌سازی مدل ریاضی

از آنجایی که مدل پیشنهادی یک مدل عدد صحیح مختلط غیرخطی است، در این بخش برای تبدیل آن به یک مدل MIP خطی با استفاده از سه تکنیک خطی‌سازی تلاش می‌شود. مدل ریاضی پیشنهادی به دلیل وجود توابع (۱-۱) تا (۱-۴)، (۱-۶) تا (۱-۸) و (۱-۱۲) و محدودیت‌های (۱۵)، (۱۶)، (۱۸)، (۲۲)، (۲۳) و (۲۶) تا (۲۹) غیرخطی است، لذا برای تبدیل آن به یک مسئله خطی از تکنیک‌های خطی‌سازی استفاده می‌شود.

### اولین تکنیک خطی‌سازی

عبارت  $Z = X_1 \cdot X_1 \cdot \dots \cdot X_n$  را نظر بگیرید. در اینجا، فرض می‌شود که متغیر  $X_i$  به ازای 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 [۲۶].

$$Z \leq X_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (31)$$

$$Z \geq \sum_{i=1}^n X_i - (n-1) \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (32)$$

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:

$$VXSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h = V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h \cdot S_{c,g}^h \cdot X_{m',c'}^h \cdot S_{c',g'}^h$$

$$VXA_{p,o,m,m',c}^h = V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h \cdot X_{m',c}^h$$

حداقل تعداد ماشین‌هایی که هر اپراتور می‌تواند در هر دوره به آن تخصیص یابد را مشخص می‌نماید. رابطه (۱۵) تضمین می‌کند برای تخصیص اپراتور به ماشین، شرط حضور هم‌زمان ماشین و اپراتور در سلول مشابه رعایت گردد. طبق رابطه (۱۶) شرط آموزش اپراتور در دوره جدید، عدم توانایی آن‌ها برای کار کردن با ماشین و عدم تخصیص به ماشین در دوره قبل است. رابطه (۱۷) تضمین می‌کند که برای هر قطعه در هر دوره فقط یک مسیر تولید انتخاب شود. رابطه (۱۸) تضمین می‌کند در هر دوره، بار کاری ( $q$ ) بین سلول‌ها به صورت متعادل توزیع شود و از ایجاد گلوگاه در یک سلول جلوگیری می‌کند. روابط (۱۹) و (۲۰) مربوط به ایمنی در چیدمان تسهیلات است و بر اساس توصیه‌ها و دستورالعمل‌های ایمنی محیط کار پیشنهاد می‌شود. این روابط به ترتیب تضمین می‌کنند که جفت ماشین‌های موجود در مجموعه  $\theta$  در یک سلول قرار نگیرند و جفت ماشین‌های موجود در مجموعه  $\Omega$  در یک سلول قرار گیرند. رابطه (۲۱) مربوط به انتخاب سرعت  $f$  پردازش عملیات  $J$  در ماشین  $m$  برای قطعه  $p$  در هر دوره است و تضمین می‌کند که هر عملیات می‌بایست با یک سرعت خاص انجام پذیرد. رابطه (۲۲) تضمین می‌کند که زمان در دسترس هر ماشین از زمان کل موجود تجاوز نکند. رابطه (۲۳) تضمین می‌کند مجموع ظرفیت زمانی مفید اپراتورها که از حاصل ضرب بهره‌وری هر کدام در زمان دسترس بودنشان حاصل می‌شود، از مدت زمان فعالیت آن‌ها در هر عملیات بزرگ‌تر باشد. مقدار تولید در هر دوره بر اساس میزان موجودی/سفرش از دست‌رفته دوره قبل و میزان تقاضا در آن دوره در رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود. محدودیت (۲۵) یک محدودیت منطقی است که تضمین می‌کند که حجمی از یک قطعه که باید در یک دوره خاص تولید شود، تنها زمانی می‌تواند یک مقدار مثبت باشد که متغیر باینری متناظر آن برابر با ۱ باشد. رابطه (۲۶) مربوط به ایمنی محیط کار است و به دنبال کمینه‌سازی خطرات بالقوه قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های کاندید است. این خطرات بر اساس دستورالعمل‌های نظارتی، شرایط محیطی کار، هنجارهای آلودگی و نوع محصول احصاء شده است. لذا به منظور تعیین سطح خطر در قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های کاندید، از مقیاس‌بندی ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ (نرمال) شده آن به صورت ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ (است) به ترتیب برای چیدمان بدون خطر (معمول)، چیدمان با احتیاط،

$$XY_{m,k,c}^h \leq Y_{k,c}^h \quad (۴۹)$$

$$XY_{m,k,c}^h \geq X_{m,c}^h + Y_{k,c}^h - 1 \quad (۵۰)$$

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

$$RZ_{k,m}^h \leq Z_{k,m}^h \quad (۵۲)$$

$$RZ_{k,m}^h \geq R_{k,m}^h + Z_{k,m}^h - 1 \quad (۵۳)$$

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

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

$$XYRZQ_{m,k,c}^h \leq Q_k^h \quad (۵۶)$$

$$XYRZQ_{m,k,c}^h \geq RZ_{k,m}^h + XY_{m,k,c}^h + Q_k^h - 2 \quad (۵۷)$$

$$VX_{o,p,m,c}^h \leq V_{o,p}^h \quad (۵۸)$$

$$VX_{o,p,m,c}^h \leq X_{m,c}^h \quad (۵۹)$$

$$VX_{o,p,m,c}^h \geq X_{m,c}^h + V_{o,p}^h - 1 \quad (۶۰)$$

### دومین تکنیک خطی سازی

عبارت  $Z = X \cdot Y$  را نظر بگیرید. در اینجا، فرض می‌شود که متغیر  $X$  یک متغیر باینری و  $Y$  متغیری نامنفی است. متغیر  $Z$  را می‌توان به شکل ذیل خطی کرد [۱۶]:

$$Z \leq Y + A_{\infty} \cdot (1 - X) \quad (۶۱)$$

$$Z \geq Y - A_{\infty} \cdot (1 - X) \quad (۶۲)$$

با توجه به وجود متغیر نامنفی  $PR_p^h$  در توابع هدف، مدل به شکل غیرخطی در آمده است که می‌توان با استفاده از این نوع خطی‌سازی، خطی کرد. برای این کار باید متغیرهای زیر تعریف شوند:

$$PRE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h = PR_p^h \cdot VXSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h$$

$$PRA_{p,o,m,m',c}^h = VXA_{p,o,m,m',c}^h \cdot PR_p^h$$

$$PRV_{p,o}^h = V_{o,p}^h \cdot PR_p^h$$

$$PRR_{p,k,m}^h = R_{k,m}^h \cdot PR_p^h$$

$$PRVB_{p,o,m,f}^h = PRV_{p,o}^h \cdot B_{m,f}^h$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h = X_{m,c}^h \cdot S_{c,g}^h \cdot X_{m,c'}^{h+1} \cdot S_{c',g'}^{h+1}$$

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

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

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

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

$$VX_{o,p,m,c}^h = V_{o,p}^h \cdot X_{m,c}^h$$

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

$$VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h \leq X_{m,c}^h \quad (۳۳)$$

$$VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h \leq S_{c,g}^h \quad (۳۴)$$

$$VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h \leq X_{m',c'}^h \quad (۳۵)$$

$$VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h \leq S_{c',g'}^h \quad (۳۶)$$

$$VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h \leq V_{o,p}^h \quad (۳۷)$$

$$VXSE_{o,p,m,m',c,c',g,g'}^h \geq V_{o,p}^h + X_{m,c}^h + S_{c,g}^h + X_{m',c'}^h + S_{c',g'}^h - 4 \quad (۳۸)$$

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

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

$$VXA_{p,o,m,m',c}^h \leq V_{o,p}^h \quad (۴۱)$$

$$VXA_{p,o,m,m',c}^h \geq V_{o,p}^h + X_{m,c}^h + X_{m',c}^h - 2 \quad (۴۲)$$

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

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

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

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h \leq S_{c',g'}^{h+1} \quad (۴۶)$$

$$XSR_{m,c,c',g,g'}^h \geq X_{m,c}^h + S_{c,g}^h + X_{m,c'}^{h+1} + S_{c',g'}^{h+1} - 3 \quad (۴۷)$$

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

$$PRVX_{o,p,m,c}^h \geq PR_p^h - A_{\infty} \cdot (1 - VX_{o,p,m,c}^h) \quad (74)$$

### سومین تکنیک خطی سازی

عبارت  $Z = |X_1 - X_2|$  را در نظر بگیرید. در اینجا، فرض می‌شود 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 آن‌ها را با  $Z = X'_1 + X'_2$  در تابع هدف اصلی جایگزین کرد. در این حالت محدودیت  $X_1 - X_2 = X'_1 - X'_2$  به مدل اضافه می‌شود [۲۶].

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

$$\begin{aligned} |\sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^h - \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^{h+1}| &= BA_{m,g}^h + BB_{m,g}^h \\ \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^h - \sum_{c=1}^C XS_{m,g,c}^{h+1} &= BA_{m,g}^h - BB_{m,g}^h \\ \forall m, g, h, \quad h &\in (1, 2, \dots, H-1) \quad (75) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |KBC_c^h - KBT^h| &= BC_c^h + BT^h \\ KBC_c^h - KBT^h &= BC_c^h - BT^h \quad \forall c, h \quad (76) \end{aligned}$$

### ۳-۳-۳ مدل ریاضی خطی شده

مدل نهایی خطی شده به صورت ذیل است:

$$\text{Min } OF_1 =$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h-1} U_{o,p,j,m}^h \cdot U_{o,p,(j+1),m'}^h \cdot dis_{g,g'} \cdot PRE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \cdot C_p^{IE} \quad (13-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h-1} PRA_{p,o,m,m',c}^h \cdot U_{o,p,j,m}^h \cdot U_{o,p,(j+1),m'}^h \cdot C_p^{IA} \quad (14-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G \sum_{g' \neq g}^G XSR_{m,c,c',g,g'}^h \cdot dis_{g,g'} \cdot C_m^{MO} \quad (15-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^G (BA_{m,g}^h + BB_{m,g}^h) \cdot C_m^{IU} \quad (16-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K (Q_k^h \cdot C_k^{HI} + (1 - Q_k^h) \cdot C_k^{FI}) \quad (17-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C XYRZQ_{mkc}^h \cdot C_{k,m}^{TR} \quad (18-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h-1} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M U_{o,p,j,m}^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot PRR_{p,k,m}^h \cdot \beta_{m,f} \cdot C_{k,m}^{SA} \quad (19-1)$$

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

$$PRE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \leq PR_p^h + A_{\infty} \cdot (1 - VXSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h) \quad (63)$$

$$PRE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h \geq PR_p^h - A_{\infty} \cdot (1 - VXSE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h) \quad (64)$$

$$PRA_{p,o,m,m',c}^h \leq PR_p^h + A_{\infty} \cdot (1 - VXA_{p,o,m,m',c}^h) \quad (65)$$

$$PRA_{p,o,m,m',c}^h \geq PR_p^h - A_{\infty} \cdot (1 - VXA_{p,o,m,m',c}^h) \quad (66)$$

$$PRV_{p,o}^h \leq PR_p^h + A_{\infty} \cdot (1 - V_{o,p}^h) \quad (67)$$

$$PRV_{p,o}^h \geq PR_p^h - A_{\infty} \cdot (1 - V_{o,p}^h) \quad (68)$$

$$PRR_{p,k,m}^h \leq PR_p^h + A_{\infty} \cdot (1 - R_{k,m}^h) \quad (69)$$

$$PRR_{p,k,m}^h \geq PR_p^h - A_{\infty} \cdot (1 - R_{k,m}^h) \quad (70)$$

$$PRVB_{p,o,m,f}^h \leq PRV_{p,o}^h + A_{\infty} \cdot (1 - B_{m,f}^h) \quad (71)$$

$$PRVB_{p,o,m,f}^h \geq PRV_{p,o}^h - A_{\infty} \cdot (1 - B_{m,f}^h) \quad (72)$$

$$PRVX_{o,p,m,c}^h \leq PR_p^h + A_{\infty} \cdot (1 - VX_{o,p,m,c}^h) \quad (73)$$

$$+ \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{SE_{p,o}^h} \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{f=1}^F \frac{U_{o,p,j,m}^h \cdot PRV_{o,p}^h \cdot T_{o,p,j,m}^h \cdot \beta_{m,f}}{MTBF_m} \cdot CBR_m \quad (20-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P INV_h^p * C_{p,h}^{INV} \quad (21-1)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P BA_h^p * C_{p,h}^{BA} \quad (1-22)$$

$$+ \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P PR_h^p * C_{p,h}^{PR} \quad (1-23)$$

$$Min OF_2 = \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^{SR_p^h} \sum_{j=1}^{SE_{o,p}^h} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F U_{o,p,j,m}^h \cdot PRVB_{p,o,m,f}^h \cdot \alpha_{m,f} \cdot EEC_{m,j,o} \quad (1-24)$$

بهینگی هستند، به دست می‌آید [۳۱]. این مجموعه جواب‌های کاندید مجموعه‌ای را تشکیل می‌دهند که به عنوان «جبهه پارتو» شناخته می‌شود. در واقع، به جوابی بهینه پارتو گفته می‌شود که هیچ جواب دیگری در فضای حل بر آن غالب نباشد [۳۲]. یک جواب بهینه پارتو را نمی‌توان بدون توجه به مابقی اهداف و بدون بدتر کردن حداقل یک هدف دیگر بهبود بخشید [۳۳]. روش‌ها و الگوریتم‌های حل در مسائل چندهدفه به دو دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهانی (دقیق) و فراابتکاری تقسیم می‌شوند [۳۴]. در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری یک جواب بهینه جهانی را برای مسائل تضمین نمی‌کند. فراابتکاری‌ها اغلب می‌تواند جواب‌های عالی را با تلاش محاسباتی کمتر نسبت به الگوریتم‌های بهینه‌سازی، با جستجوی مجموعه‌ای از جواب‌های امکان‌پذیر پیدا کند. بنابراین، فراابتکاری روش‌های کاربردی برای مسائل بهینه‌سازی هستند. در این خصوص چندین کتاب و مقاله نظرسنجی منتشر شده است. دو روش اپسیلون محدودیت و NSGA-II از جمله روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری معروف و پرتکرار برای بهینه‌سازی چند هدفه در حوزه تولید به شمار می‌روند که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است.

#### الف- روش اپسیلون محدودیت

در میان روش‌های مختلف، روش محدودیت اپسیلون بر بهینه‌سازی تنها یک تابع هدف تمرکز می‌کند و هم‌زمان اهداف دیگر به عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شوند [۳۶، ۳۵]. اولین بار در پژوهش [۳۷] پیشنهاد شد. روش محدودیت اپسیلون به عنوان روشی بسیار مؤثر شناخته می‌شود که می‌تواند مجموعه بهینه پارتو را دقیقاً تولید

محدودیت‌های مدل خطی شامل محدودیت‌های بدون تغییر (۲) تا (۱۴)، (۱۷)، (۱۹) تا (۲۱)، (۲۴) تا (۲۶) محدودیت‌های جدید (۳۳) تا (۶۰)، (۶۳) تا (۷۶) و (۷۹) است؛ همچنین محدودیت (۱۵) با (۷۷) و (۱۶) با (۷۸) جایگزین می‌شوند.

$$R_{km}^h \leq \sum_{c=1}^C XY_{k,m,c}^h \quad (77) \\ \forall k, m, h;$$

$$Z_{km}^{h+1} = (Z_{km}^h - RZ_{km}^h) \quad (78)$$

$$\forall k, m, h = 1, \dots, H - 1;$$

$$XY_{kmc}^h, Z_{km}^h, X_{mgc}^h, VXSE_{o,p,m,m',c,c'}^h, \quad (79)$$

$$R_{km}^h, XYRZ_{mkc}^h, VXA_{o,p,m,m',c}^h, BA_{mg}^h$$

$$BB_{mg}^h, XSR_{mcc'gg'}^h, VX_{o,p,m,c}^h \\ \in \{0,1\}$$

$$PRE_{p,o,m,m',c,c',g,g'}^h, PRA_{p,o,m,m',c}^h$$

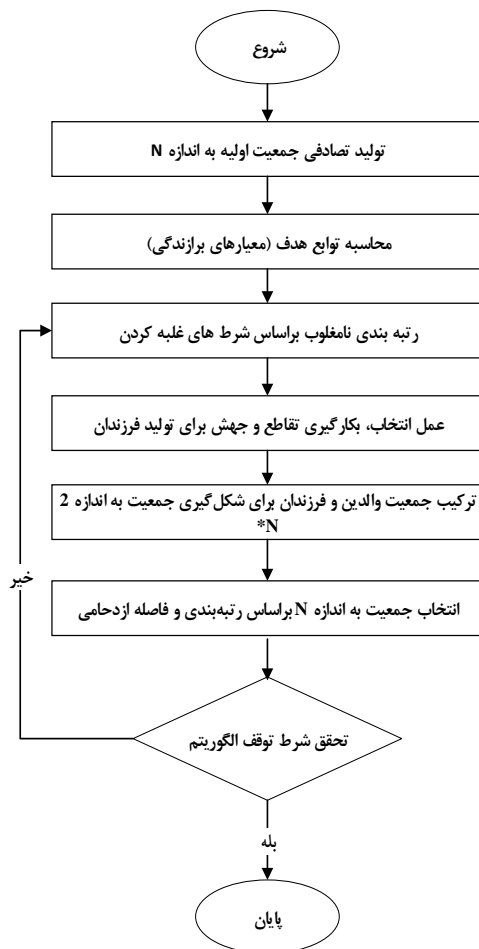
$$PRR_{p,k,m}^h, PRVB_{p,o,m,f}^h \geq 0 \text{ and integer}$$

#### ۴-۳- بهینه‌سازی چندهدفه

یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه دارای چند تابع هدف است که باید کمینه/بیشینه شود. هدف از بهینه‌سازی چندهدفه یافتن مجموعه‌ای از جواب‌های قابل قبول و ارائه آن‌ها به تصمیم‌گیران است تا از بین آن‌ها انتخاب نماید. هنگامی که اهداف مورد بررسی با یکدیگر تعارض دارند؛ بهینه‌سازی یک هدف، بدون توجه به اهداف دیگر، اغلب نتایج غیرقابل قبولی را به همراه دارد. بنابراین، یک جواب چندهدفه کامل که به طور هم‌زمان هر تابع هدف را بهینه کند تقریباً غیرممکن است. به این ترتیب، به جای داشتن یک جواب بهینه واحد، مجموعه‌ای از جواب‌ها که نامزد



جدید به وجود می‌آید. در ادامه سایر مراحل این الگوریتم ارائه شده و در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۳- مراحل الگوریتم NSGA-II

### نحوه نمایش جواب

مهم‌ترین مرحله در حل مسائل با استفاده از روش‌های فرا ابتکاری، انتخاب نمایش جواب است [۴۳]. 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 ماتریسی حاوی تعدادی سطر و ستون مشخص در نظر گرفته شده است. به طور دقیق‌تر، یک کروموزوم در این تحقیق از هفت بخش تشکیل شده است. بخش اول با توجه به ماشین‌هایی که به هر سلول و در هر دوره تخصیص می‌یابد  $([X]_{m \times c}^h)$ ، سازمان‌دهی شده است. بخش دوم تا هفتم به ترتیب مربوط به سلول‌هایی که به هر مکان در هر

نماید [۳۸]. از جمله ویژگی‌های اصلی این روش، کاربرد گسترده آن در مسائل مختلف بهینه‌سازی چندهدفه است. در ادامه برای نشان دادن این روش، یک مسئله چندهدفه کمینه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\text{Min } f_1(x_1) \quad (80)$$

s. t:

$$g(x) \geq 0$$

$$f_2(x) \geq \varepsilon_2$$

$$f_3(x) \geq \varepsilon_3$$

.

.

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

مراحل انجام این روش به شرح ذیل است:

۱- ابتدا از بین توابع هدف یکی را انتخاب کرده که تابع هدف جدید نامیده می‌شود و مابقی به‌عنوان محدودیت به مدل اضافه می‌شود. مسئله با این تابع هدف حل شده و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۲- مرحله ۱ برای تمامی توابع هدف تکرار می‌شود و مقدار بهینه تابع هدف به دست می‌آید.

۳- بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را به تعداد از قبل مشخص تقسیم‌بندی کرده و مقادیر  $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  به دست می‌آید.

۴- هر بار مسئله با تابع هدف اصلی و با مقادیر  $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  حل می‌شود.

۵- جواب‌های پارتوی یافته شده گزارش می‌شود.

### ب- الگوریتم NSGA-II

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مغلوب (NSGA-II) یک الگوریتم فراابتکاری است که متعلق به الگوریتم‌های تکاملی است و زمانی که مسئله‌ای با بیش از یک هدف وجود دارد، روشی است که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵، ۳۹، ۴۰، ۴۱]. این روش، اولین بار توسط دب و همکاران برای یافتن یک مجموعه پارتو تقریباً بهینه ارائه شد [۴۲]. در واقع، یک جمعیت اولیه به طور تصادفی تولید می‌شود و سپس، برای تعداد معینی از تکرارها، جواب‌های جدید از جواب‌های موجود، در هر تکرار، از طریق تقاطع و جهش به دست می‌آیند. با استفاده از یک عملگر تقاطع، دو والد انتخاب می‌شوند و با ترکیب ویژگی‌های آن‌ها دو فرزند

	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

	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

شکل ۴- نمایش مراحل انتخاب جواب برای متغیر S

به منظور تخصیص سلول ۱ به هر مکان در دوره ۱، بالاترین مقدار را در این ستون انتخاب و سلول مورد نظر را به آن مکان تخصیص می‌دهیم. در این صورت خواهیم داشت: در دوره اول، مکان G2 با مقدار ۰/۸۰ به سلول ۱ تخصیص می‌یابد. در ادامه سطر مربوط به G2 حذف می‌گردد 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 می‌گردد. در نهایت درایه‌های انتخاب شده مقدار ۱ و مابقی مقدار ۰ می‌گیرند.

دوره اختصاص می‌یابد  $([S]_{g \times c}^h)$ ، اپراتورهایی که به هر ماشین در هر دوره اختصاص می‌یابد  $([R]_{k \times m}^h)$ ، مسیرهایی که به هر قطعه در هر دوره اختصاص می‌یابد  $([V]_{p \times o}^h)$ ، سرعت‌هایی که هر ماشین در هر دوره با آن پردازش می‌کند  $([B]_{m \times f}^h)$ ، میزان موجودی نگهداری شده از تقاضای قطعه  $p$  در پایان دوره  $h$   $([INV]_p^h)$  و میزان فروش از دست‌رفته از تقاضای قطعه  $p$  در پایان دوره  $h$   $([BA]_p^h)$  اختصاص یافته است.

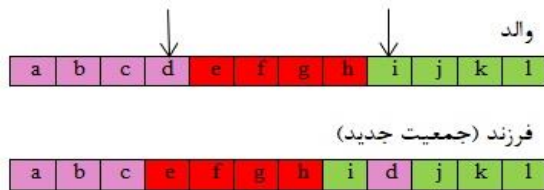
جدول ۲- نمایش اندازه درایه‌ها

نام متغیر	X	S	R	V	B	INV	BA
تعداد درایه	۲۰	۱۲	۵۰	۲۴	۳۰	۸	۸

اندازه بردار ریاضی (کروموزوم) نهایی جواب برابر  $(|BA|+|INV|+|B|+|V|+|R|+|S|+|X|)$  است. هر متغیر متناسب با ابعاد آن یک ماتریس (کروموزوم) است که درایه (ژن)‌های آن می‌تواند مقادیر اعشاری بین ۰ 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 ۲ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲، تعداد کل درایه‌های بردار ریاضی برای جمعیت اولیه برابر ۱۵۲ است  $(20+12+50+24+30+8+8=152)$ . این درایه مقادیر تصادفی و اعشاری بین ۰ و ۱ را دریافت می‌کند. در ادامه برای متغیر S تعداد ۱۲ درایه از ۱۵۲ درایه اولیه به تصادف انتخاب و آن ۱۲ درایه به یک ماتریس با ابعاد متغیر S (سه بعدی  $(G, C, H)$ ) 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



شکل ۸- ایجاد کروموزوم‌های جدید (فرزند) بر اساس روش

## Insertion

شرط توقف الگوریتم در این پژوهش، حداکثر تعداد تکرار در نظر گرفته شده که از پیش تعیین شده است.

## ۳-۵- معیارهای مقایسه کارایی روش‌های حل

الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر پارتو به دنبال تقریبی از جبهه غیر مغلوب هستند. در این راستا، معیارهای عملکرد این روش‌ها با روش‌های تک هدفی متفاوت است. بنابراین یک رویکرد جدید برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها مورد نیاز است. در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد الگوریتم NSGA-II و روش اسپیلون محدودیت، چهار شاخص ارزیابی عملکرد پیشنهاد شده که توسط جعفرنژاد و همکاران [۵] ارائه شده است.

## شاخص پراکندگی

این شاخص طول قطر فضای مکعبی حاصل شده را با استفاده از دورترین مقادیر جواب‌های غیر مغلوب بر اساس فاصله اقلیدسی بین دو جواب محاسبه می‌کند. هرچه این شاخص مقدار بالاتری را نشان دهد، کیفیت جواب بهتر خواهد بود. نحوه محاسبه این شاخص به صورت ذیل است:

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^L (\max_{i=1:|Q|} f_i^i - \min_{i=1:|Q|} f_i^i)^2} \quad (81)$$

## شاخص یکنواختی فضا

این شاخص این امکان را برای ما ایجاد می‌کند که یکنواختی نقاط غیر مغلوب را در مجموعه جواب حاصل از جبهه پارتو تعیین کنیم. هرچه این مقدار کمتر باشد عملکرد جواب بهتر و اویت بالاتری دارد. در واقع نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر جواب‌ها است. این شاخص به صورت ذیل تعریف شده است:

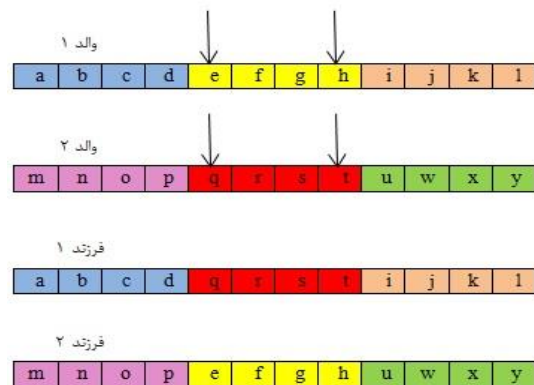
$$SM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})}{|Q|}} \quad (82)$$

## شاخص میانگین فاصله از ایده‌آل

معیارهای عملکردی مختلفی برای ارزیابی الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه توسعه یافته‌اند. از جمله معیارهای

## عملگر تقاطع

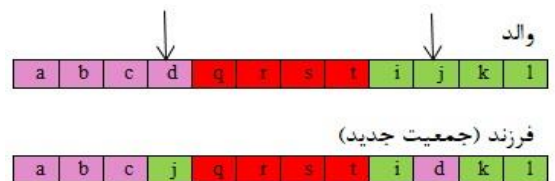
عملگر تقاطع ویژگی‌های والدین را به فرزندان منتقل می‌کند. هر عضو در جمعیت فرزندان برخی از ویژگی‌های خود را از والدین به ارث می‌برد. برای این منظور از عملگر تقاطع دو نقطه‌ای استفاده شده است. روش کار به این صورت است که در هر بردار ریاضی (کروموزوم) والد دو نقطه به تصادف انتخاب می‌شود. به این ترتیب هر والد به سه قسمت تقسیم می‌شود. برای تولید جمعیت جدید (فرزند)، این سه قسمت در والدها مطابق شکل (۵) با یکدیگر ترکیب می‌شوند.



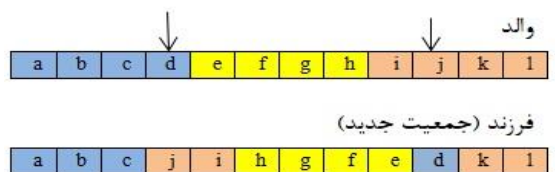
شکل ۵- ایجاد جمعیت جدید (فرزند) بر اساس عملگر تقاطع دو نقطه‌ای

## عملگر جهش

در این عملگر به منظور تولید جمعیت جدید، سه روش swap، Reversion و Insertion (الحاقی) که به صورت مجزا تعریف شده‌اند استفاده شده است. انتخاب این سه روش به صورت تصادفی و با احتمال مساوی انجام می‌شود. روش تولید جمعیت توسط این روش‌ها در شکل‌های (۶) تا (۸) ارائه شده است.



شکل ۶- ایجاد کروموزوم‌های جدید (فرزند) بر اساس روش Swap



شکل ۷- ایجاد کروموزوم‌های جدید (فرزند) بر اساس روش Reversion

با توجه به نوع پاسخ، محاسبه تغییرات در روش تاگوچی به سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شود که شامل: (۱) کوچکتر-بهرتر<sup>۱</sup>، (۲) میانگین-بهرترین<sup>۲</sup> و (۳) بزرگتر-بهرتر<sup>۳</sup> است. با توجه به تعریف تابع مطلوبیت که در ادامه بیان می‌شود، از نوع پاسخ «بزرگتر-بهرتر» استفاده شده است. رابطه (۸۵) این نوع پاسخ را فرموله می‌کند، این رابطه برابر  $(S/N) = 10 \log\left(\frac{S(Y^2)}{n}\right)$  است که در آن  $Y$  نشان دهنده پاسخ و  $n$  تعداد آرایه‌های متعامد<sup>۴</sup> است. قبل از بررسی عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده، آزمایش‌های اولیه را برای یافتن سطوح مناسب پارامترها انجام می‌دهیم. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر و همچنین پایدارتر، چهار پارامتر اندازه جمعیت ( $Pop$ )، حداکثر تکرار ( $Max - Itr$ )، احتمال انتخاب کروموزوم در عملگر تقاطع ( $P_c$ ) و احتمال انتخاب کروموزوم در عملگر جهش ( $P_m$ ) برای الگوریتم NSGA-II پیکربندی می‌شوند. این پارامترها و سطوح آن‌ها که متعلق به هر دو الگوریتم است در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II

پارامترها	سطوح پارامتر		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
$Pop$	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
$Max - Itr$	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
$P_c$	۰/۷	۰/۸	۰/۹
$P_m$	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲

در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Minitab برای الگوریتم NSGA-II به تعداد  $L^9$  آزمایش طراحی شده است. پس از محاسبه تمام مسائل تست ترکیبی بر اساس روش تاگوچی، تابعی تعریف شده است که ترکیبی از همه شاخص‌ها را نشان داده، زیرا تابع تاگوچی باید با یک معیار ارزیابی شود؛ لذا به جای هر بار آزمون شاخص‌های عملکردی، تابع مطلوبیتی تشکیل و با استفاده از مقادیر به دست آمده از آن، محاسبه‌ها و ارزیابی‌ها انجام شده است. برای این امر از تابع مطلوبیت ارائه شده توسط جولایی و همکاران [۴۳]، استفاده می‌گردد (رابطه ۸۲). تابع مطلوبیت پیشنهادی از دو معیار کاهش (منفی) و یک

متریک سنجش عملکرد، شاخص میانگین فاصله از ایده‌آل است که به عنوان یک شاخص رایج در این حوزه معرفی شده است [۵]. این شاخص با محاسبه فاصله جواب‌های پارتو از یک جواب ایده‌آل به ما کمک می‌کند. هرچه این مقدار کمتر باشد، جواب از کیفیت بهتری برخوردار است. این شاخص به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (83)$$

$$C_i = \sqrt{(f_{1i} - f_1^*)^2 + \dots + (f_{li} - f_l^*)^2} \quad (84)$$

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

### زمان پردازش

مدت زمانی است که الگوریتم برای حل مدل پیشنهادی از واحد پردازش مرکزی (CPU) استفاده می‌کند.

### ۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش نتایج مربوط به حل مدل در ابعاد مختلف ارائه می‌شود. برای این امر، از داده‌های موجود در ادبیات موضوع [۲۹] الهام گرفته شده است. به منظور نمایش کارایی الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II، نتایج حاصل از حل مسائل با ابعاد کوچک توسط این الگوریتم با نتایج حاصل از روش اسپیلون محدودیت مقایسه می‌شود. برای این منظور می‌بایست ابتدا مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA-II تنظیم گردد.

#### تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II

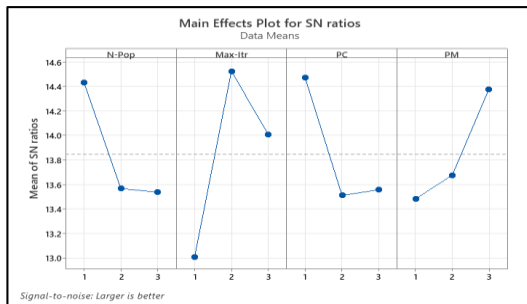
پارامترهای موجود در الگوریتم‌های فرا ابتکاری تأثیر بسیار زیادی بر کارایی آن دارد به نحوی که مقادیر مختلف آن می‌تواند منجر به تولید جواب‌های متفاوت شود که کیفیت آن نیز متفاوت است؛ لذا عدم تنظیم صحیح پارامترهای آن، مانع دستیابی به جواب‌های مطلوب و با کیفیت می‌شود. در این پژوهش از روش تاگوچی برای تنظیم دقیق پارامترها استفاده شده است. سادگی و کاربر پسند بودن این روش، استفاده از آن را در صنایع تولیدی افزایش داده و آن را به عنوان ابزاری قدرتمند و درعین حال ساده برای صنایع تبدیل کرده است.

<sup>3</sup> Larger-the-better type.

<sup>4</sup> Orthogonal Arrays

<sup>1</sup> Smaller-The-Better

<sup>2</sup> Nominal-is-best type



شکل ۹- اثر میانگین ضریب SN برای نمونه‌های طراحی شده

جدول ۴- مقادیر تنظیم شده پارامترهای الگوریتم NSGA-II

<i>NPop</i>	<i>MaxIter</i>	<i>P<sub>c</sub></i>	<i>P<sub>m</sub></i>
۱۰۰	۱۰۰	۰/۷	۰/۲

جدول ۵- ابعاد نمونه‌های طراحی شده

مرجع	ابعاد مسئله	شماره نمونه	تعداد قطعه	تعداد ماشین	تعداد عملیات	تعداد مسیر	تعداد سلول	تعداد اپراتور	تعداد دوره	تعداد مکان	تعداد سرعت
طراحی شده		۱	۴	۳	۲	۱	۲	۴	۲	۳	۳
طراحی شده		۲	۴	۳	۳	۱	۲	۴	۲	۳	۳
طراحی شده		۳	۴	۳	۳	۱	۲	۵	۲	۳	۳
طراحی شده	کوچک	۴	۴	۴	۳	۱	۲	۵	۲	۳	۳
سختی و همکاران [۱۶]		۵	۴	۴	۳	۳	۲	۵	۲	۳	۳
طراحی شده		۶	۴	۴	۳	۳	۲	۵	۲	۴	۳

قید تعیین شده است. اطلاعات مربوط به ابعاد هر مسئله در جدول ۵ نمایش داده شده است. به عنوان مثال، در نمونه ۱، برای طراحی چیدمان تسهیلات، تعداد سه مکان کاندید به صورت ردیفی، دو سلول، چهار ماشین، پنج اپراتور با مهارت‌های متنوع و همچنین چهار نوع قطعه/محصول در سه مسیر تولید و سه عملیات در دو دوره زمانی و سه حالت برای سرعت پردازش در نظر گرفته شده است. مقادیر سایر پارامترهای مورد استفاده در این مسئله در جدول ۶ ارائه شده است.

معیار افزایشی (مثبت) تشکیل شده است. وزن ۱ به معیارهای افزایشی و وزن ۲ به معیارهای کاهش‌ی اختصاص دارد.

$$U = \sqrt[5]{(MID)^2 + (DM)^1 + (SM)^2} \quad (82)$$

محاسبه تمام نتایج آزمون با استفاده از روش تاگوچی، میانگین نرخ S/N و تابع مطلوبیت برای مسائل مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب در شکل (۹) برای الگوریتم NSGA-II به دست آمده است. تابع مطلوبیت براساس معیارهای عملکردی به نحوی تعریف شده که مقدار آن هرچه «بزرگ‌تر-بهرتر» است. پیکربندی نهایی پارامترها در جدول ۴ ارائه شده است.

مدل ریاضی پیشنهادی ارائه شده در قسمت قبل با استفاده از روش اپسیلون محدودیت در نرم‌افزار گمز نسخه ۲۵.۰.۲ کدنویسی و با استفاده از حل‌کننده CPLEX و الگوریتم NSGA-II در نرم‌افزار متلب نسخه R2020b روی رایانه ۶۴-بیت با مشخصات Intel® Core™ i7 – 7500 با فرکانس ۳.۴ گیگاهرتز با ۸ گیگابایت رم حل شده است. در این پژوهش تابع هدف اول که مربوط به هزینه‌های تولید است و نسبت به تابع انرژی دارای اولویت است به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و تابع انرژی به عنوان

جدول ۶- مقادیر پارامترهای مسئله

ردیف	پارامترها	علامت	مقادیر	واحد
۱	هزینه استخدام	$C_k^{HI}$	$(60, 80)U$	دلار
۲	هزینه اخراج	$C_k^{FI}$	$(40, 60)U$	دلار
۳	هزینه آموزش	$C_{k,m}^{TR}$	$(105, 125)U$	دلار
۴	هزینه دستمزد	$C_{k,m}^{SA}$	$(0/17, 0/30)U$	دلار
۵	هزینه جابجایی درون سلولی قطعه	$C_p^{IA}$	۲/۵	دلار
۶	هزینه جابجایی بین سلولی قطعه	$C_p^{IE}$	$(5, 10)U$	دلار
۷	هزینه جابجایی بین سلولی هر ماشین	$C_m^{Mo}$	۵۰	دلار
۸	هزینه نصب و جداسازی هر ماشین	$C_m^{IU}$	۵۰	دلار
۹	هزینه تعمیر هر ماشین	$CBR_m$	$(250, 350)U$	دلار
۱۰	هزینه نگهداری موجودی	$C_{p,h}^{INV}$	$(2, 4/5)U$	دلار
۱۱	هزینه فروش ازدست‌رفته	$C_{p,h}^{BA}$	$(30, 85)U$	دلار
۱۲	میزان مصرف انرژی توسط ماشین	$EEC_{m,j,o}$	$(10, 170)U$	کیلووات ساعت
۱۳	زمان در دسترس برای هر ماشین	$TM_m^h$	۵۰۰	ساعت
۱۴	زمان پردازش	$T_{o,p,j,m}^h$	$(0.1, 0.9)U$	ساعت
۱۵	میزان تقاضای محصول	$D_p^h$	$(60, 120)U$	واحد
۱۶	حد پایین ظرفیت سلول	$U_c$	۱	ماشین
۱۷	حد بالا ظرفیت سلول	$L_c$	۲	ماشین
۱۸	مدت زمان بین دو خرابی هر ماشین	$MTBF_m$	$(340, 370)U$	ساعت
۱۹	مدت زمان تعمیر هر ماشین	$MTTR_m$	$(50, 90)U$	ساعت

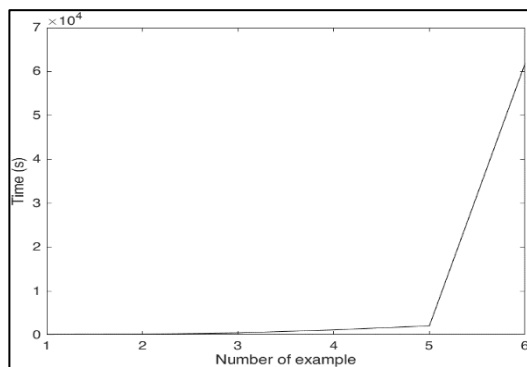
تعداد بار کاری در هر سلول ( $\frac{q}{c}$ ) به میزان ۰.۴۵٪ از حجم کار محاسبه شده است.

در این مسئله ضریب بار کاری ( $q$ ) ۰/۹ فرض شده است و با توجه به حداکثر تعداد سلول که ۲ لحاظ شده، مقدار

جدول ۷- نتایج حل جداگانه مدل با توابع هدف مختلف در روش اپسیلون محدودیت در نمونه اول

تابع هدف دوم (زیستی) کیلووات ساعت	تابع هدف اول (اقتصادی) دلار	توابع هدف
۱۲۴۶۴	۵۹۹۸۷/۱۲۸	حل مسئله با جواب بهینه تابع هدف اول
۴۷۱۹	۵۰۷۳۲۵/۲۲۷	حل مسئله با جواب بهینه تابع هدف دوم
۱۲۴۶۴	۵۰۷۳۲۵/۲۲۷	بدترین مقدار تابع هدف
۴۷۱۹	۵۹۹۸۷/۱۲۸	بهترین مقدار تابع هدف

طبق نتایج بدست آمده در جدول ۸، هرچه ابعاد مسئله افزایش می‌یابد، توانایی نرم‌افزار گمز برای حل مسائل در یک زمان معقول و به صرفه کاهش می‌یابد، به نحوی که حل مسئله با این روش، توجیه‌ناپذیر یا نشدنی خواهد بود. از بین نمونه‌های ارائه شده در این پژوهش که در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تعریف شده‌اند، نرم‌افزار گمز فقط قادر به حل مسائل با ابعاد کوچک در زمان قابل قبول است (شکل ۱۰).

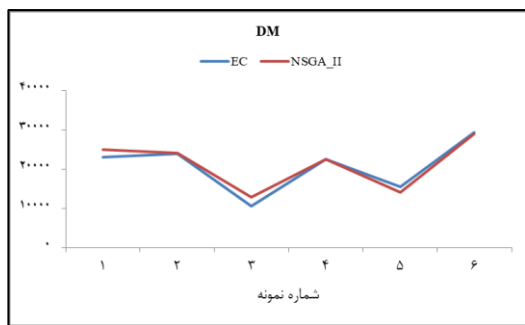


شکل ۱۰- تغییر زمان حل با افزایش ابعاد مسئله در نمونه‌های کوچک

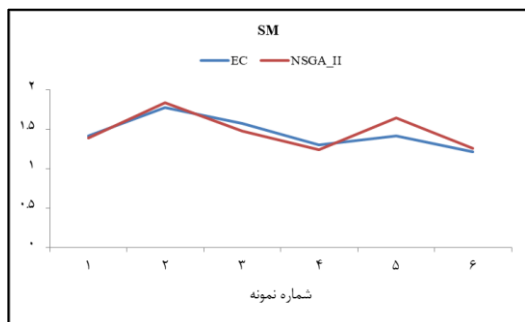
لازم به ذکر است برای هر ماشین سه سرعت به مقادیر  $\alpha_{m,1}$  برابر ۱،  $\alpha_{m,2}$  برابر ۱/۵،  $\alpha_{m,3}$  برابر ۳، لحاظ شده است. این افزایش در سرعت پردازش، منجر به کاهش زمان پردازش با ضرایب  $\beta_{m,1}$  برابر ۱،  $\beta_{m,2}$  برابر ۰/۷۵،  $\beta_{m,3}$  برابر ۰/۵ شده است. طبق تعریف روش محدودیت اپسیلون ابتدا مسئله به طور جداگانه برای هر یک از توابع حل می‌شود تا کمترین و بیشترین مقدار هر یک از توابع گزارش شود. مطابق جدول ۷ مقدار تابع هدف اول برای بهترین حالت هزینه‌ها برابر با ۵۹۹۸۷/۱۲۸ است. بهترین مقدار تابع هدف زیستی (میزان مصرف انرژی) در سطر دوم برابر ۴۷۱۹ است و مقدار تابع هدف هزینه در سطر اول از سطر دوم کمتر است و روندی افزایش دارد ولی مقدار تابع هدف دوم در این سطرها روندی کاهشی دارد و تابع هدف آن در سطر دوم کمترین مقدار خود را اخذ نموده است. این مسئله در درجه اول نشان دهنده تضاد توابع و تایید دو هدفه بودن مسئله است و از طرفی بر این موضوع تاکید دارد که در توابع چندهدفه، بهینه شدن یک تابع هدف، لزوماً منجر به بهینگی سایر توابع نخواهد شد.

جدول ۸- مقایسه شاخص‌های عملکردی حاصل از محاسبات مسائل

اپسیلون محدودیت				NSGA-II الگوریتم				شماره مسئله
Time	SM	DM	MID	Time	SM	DM	MID	
۱۸۶	۱/۴۲	۲۳۰۷۸	۱/۴۰۲۷	۵۵/۰۶۸	۱/۳۹۳	۲۵۲۶۷	۱/۰۱۱۵	۱
۲۴۰	۱/۷۸۲	۲۴۰۴۲/۵	۱/۳۰۱	۵۹/۶۷	۱/۸۴	۲۴۰۸۴/۴۱	۱/۲۸۷	۲
۵۳۶	۱/۵۸	۱۰۵۵۳/۲	۱/۱۰۴	۶۲/۱۷۳	۱/۴۸	۱۲۷۷۴/۳	۱/۰۹۱	۳
۱۲۱۳	۱/۳	۲۲۶۰۴/۵	۱/۱۰۵۲	۸۴/۱۳۲	۱/۲۴	۲۲۵۹۳/۲۶	۱/۱۴۹	۴
۲۱۳۴	۱/۴۲۱	۱۵۴۷۵	۱/۰۱۲۵	۱۰۲/۱۴۵	۱/۶۴۸	۱۴۰۷۵	۱/۰۱۲	۵
۶۱۸۴۲	۱/۲۱۶	۲۹۴۵۱	۱/۲۴۵	۲۲۸/۰۹۷	۱/۲۵۶	۲۹۰۰۱	۱/۲۰۶	۶



شکل ۱۳- مقایسه از نظر شاخص پراکندگی

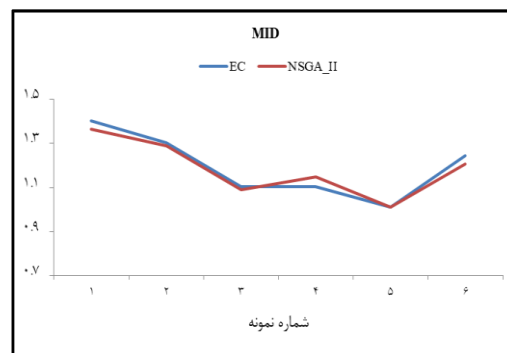


شکل ۱۴- مقایسه از نظر شاخص یکنواختی فضا

شکل (۱۳) و (۱۴) نشان می‌دهد که مقدار شاخص DM و SM در الگوریتم NSGA-II در بعضی نمونه‌ها مقداری بیشتر و در بعضی دیگر مقداری کمتر را نسبت به روش اپسیلون محدودیت اخذ کرده است. به منظور تحلیل نتایج احصاء شده در خصوص نحوه عملکرد دو الگوریتم NSGA-II و روش اپسیلون محدودیت از آزمون‌های استاندارد استفاده شده است. برای این امر، ابتدا نرمال بودن نتایج با آزمون کولموگروف اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفته است. فرض صفر در این آزمون، نرمال بودن توزیع داده‌ها در نظر گرفته شده است. در این آزمون اگر میزان معناداری، بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر تأیید می‌شود. یعنی توزیع داده‌ها نرمال است. با توجه به مقدار p-value که برای تمام شاخص‌های عملکردی مقداری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ را نمایش می‌دهد، فرض نرمال بودن برای تمام شاخص‌ها برقرار است. در ادامه به منظور مقایسه دو روش حل از آزمون T استفاده شده است که مقدار فاصله اطمینان در آن ۹۵ درصد فرض شده است.

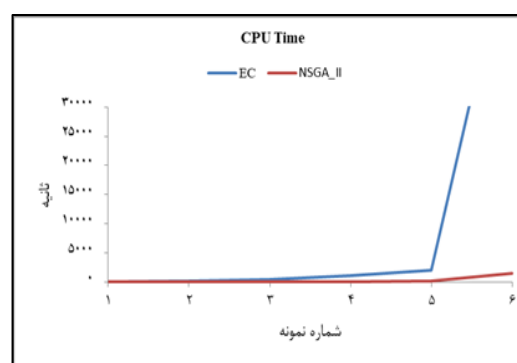
در این آزمون فرض صفر برای عملکرد یکسان دو روش حل و فرض یک برای تفاوت عملکرد دو روش مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد الگوریتم NSGA-II از نظر شاخص‌های MID و CPU Time عملکردی بهتر از روش اپسیلون محدودیت دارد و در سایر شاخص‌ها

این موضوع و همچنین بیان پیچیدگی مسئله طراحی سیستم تولید سلولی در ادبیات موضوع، دلیلی بر ماهیت NP-hard بودن مدل پیشنهادی است [۲۴]. با توجه به عدم توانایی روش اپسیلون محدودیت برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ و معرفی الگوریتم فراابتکاری NSGA-II برای حل این نوع مسائل، ابتدا هر ۶ مسئله نمونه قسمت قبل (ابعاد کوچک) توسط این الگوریتم در نرم‌افزار متلب نسخه R2020b کدنویسی و حل شده و کارایی آن با روش اپسیلون محدودیت بر اساس شاخص‌های عملکردی مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در جدول ۸ ارائه شده است. نمایش مقایسه شاخص‌های عملکردی به صورت گرافیکی در ادامه ارائه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه از نظر شاخص میانگین فاصله از ایده آل

همان‌طور که در شکل (۱۱) نمایان است، مقدار شاخص MID در نمونه‌های ارائه شده در الگوریتم فراابتکاری از روش اپسیلون محدودیت کمتر است.



شکل ۱۲- مقایسه از نظر زمان حل

مطابق شکل (۱۲)، هر چه ابعاد مسئله افزایش می‌یابد (از نمونه ۱ تا نمونه ۶)، زمان حل نیز زیاد می‌شود. نکته حائز اهمیت در این شکل رشد نمایی زمان حل با افزایش ابعاد مسئله در روش اپسیلون محدودیت است؛ به نحوی که حل مسئله با ابعاد بزرگ در زمان مطلوب نشدنی می‌شود.

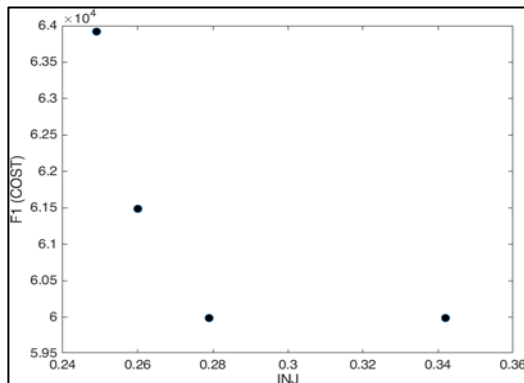


II در حل مسائل با ابعاد کوچک، می‌توان برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ نیز از آن استفاده نمود.

تفاوتی بین دو روش حل نیست. نتایج در جدول ۹ ارائه شده است. با توجه به توانایی الگوریتم فراابتکاری -NSGA

جدول ۹- نتایج آزمون T برای مقایسه الگوریتم NSGA-II و روش اپسیلون محدودیت

ردیف	شاخص عملکردی	نوع آزمون	الگوریتم‌ها	معناداری (P-Value)	نتیجه	الگوریتم برتر
۱	MID	T	NSGA-II اپسیلون محدودیت	۰/۳۴۲	فرض صفر رد می‌شود	NSGA-II
۲	DM	T	NSGA-II اپسیلون محدودیت	۰/۰۱۴	فرض صفر رد نمی‌شود	تفاوتی ندارند
۳	SM	T	NSGA-II اپسیلون محدودیت	۰/۰۴۲	فرض صفر رد نمی‌شود	تفاوتی ندارند
۴	CPU Time	T	NSGA-II اپسیلون محدودیت	۰/۱۷۶	فرض صفر رد می‌شود	NSGA-II



شکل ۱۵- رابطه افزایش سطح خطرات (ایمنی) و هزینه

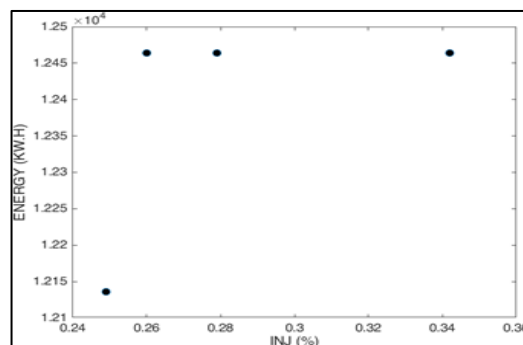
به این ترتیب و با حذف این محدودیت، بیشترین سطح خطرات به چیدمان تحمیل می‌شود. این مقدار با توجه به داده های تصادفی ورودی برابر ۰/۳۴۲ تعیین شده است. همان گونه که در شکل (۱۵) مشخص است، این محدودیت با تابع اول رابطه عکس دارد و هرچه میزان خطرات در چیدمان کمتر می‌شود، هزینه‌های بیشتری به مدل تحمیل خواهد شد. از طرفی حداقل میزان خطرات محیطی برابر ۰/۲۴۹ است و امکان صفر کردن خطرات محیطی میسر نمی‌باشد. با توجه به این نکته که میزان افزایش مصرف انرژی در این مدل بر اساس افزایش سرعت پردازش است، می‌توان نتیجه گرفته که هرچه سرعت پردازش افزایش یافته و مصرف انرژی زیاد شده، سطح خطرات در محیط نیز افزایش یافته است. زمانی که مدل به حداکثر مقدار مصرف

#### ۴-۱- تحلیل حساسیت و یافته‌های مدیریتی

در این قسمت تلاش شده است تا با بررسی تأثیر پارامترها در مدل پیشنهادی یک دید مدیریتی و عملیاتی جامع برای تصمیم‌گیران ایجاد گردد. این امر برای صنایعی که به دنبال کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌ها و ایجاد مزیت رقابتی هستند، می‌تواند بسیار جذاب باشد.

**تحلیل حساسیت درجه ایمنی محیط کار.** از جمله ویژگی‌هایی که در این مدل به آن اشاره شده است، در نظر گرفتن درصد خطرات حاصل از قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های کاندید است. برای این منظور خطرات را به ترتیب از ۰ تا ۱۰۰ در محیط بدون خطر (معمول) (برابر ۰)، محیط با احتیاط (بین ۰ تا ۰/۲۵)، محیط منجر به آسیب جزئی (بین ۰/۲۵ تا ۰/۵)، محیط منجر به آسیب شدید (۰/۵ تا ۰/۷۵) و محیط تهدیدکننده زندگی (مرگ) (بین ۰/۷۵ تا ۱۰) مقیاس بندی شده است. اهداف کاهش هزینه‌ها و کاهش مصرف انرژی بصورت توابع هدف در نظر گرفته شده است؛ اما هر یک از این توابع چه با چه سطح از ایمنی محیطی تحقق می‌یابند؟ در این قسمت مقادیر توابع هدف به ازای سطوح مختلف ایمنی بررسی شده است. به منظور بررسی اهمیت میزان ایمنی در مدل پیشنهادی در مرحله اول محدودیت مربوط به ایمنی حذف شده و مدل پیشنهادی بدون بررسی خطرات حاصل از چیدمان ایمن بررسی شده است.

انرژی رسیده، میزان خطرات چیدمان نیز به بیشترین حد خود دست یافته است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- رابطه افزایش سطح خطرات و مصرف انرژی

**۲-۴- کاربرد مدل در دنیای واقعی (مطالعه موردی)**

در این بخش از داده‌های یک کارگاه تولید تجهیزات صنعتی کشاورزی به عنوان مطالعه موردی استفاده شده تا کاربردپذیری مدل پیشنهادی در دنیای واقعی نمایش داده شود. در این مطالعه موردی نه نوع محصول وجود دارد که برای تولید آن‌ها از چهارده نوع دستگاه شامل دستگاه‌های

برش، پرس هیدرولیک، جوش، مونتاژ، اسپری، تراش معمولی، فرز، سنگ زنی، گرمادهی، فرز CNC و غیره استفاده شده است. جدول ۱۰ اطلاعات مربوط به محصولات را در این مطالعه موردی ارائه کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود حداقل زمان پردازش ۰/۱ ساعت و حداکثر ۰/۹ ساعت است. تعداد چهار مکان کاندید به صورت ردیفی در کارگاه برای چیدمان پیشنهادی در نظر گرفته شده است. حداکثر تعداد مسیرهای پردازش، دو و حداکثر توالی در پردازش، چهار عملیات است. فرایندها برای دو دوره کاری در نظر گرفته شده است. این کارگاه ۸ ساعت در روز، ۳۰ روز در ماه کار می‌کند که نتیجه آن ۲۴۰ ساعت در ماه به عنوان ظرفیت زمانی موجود است. هر اپراتور مجاز به تخصیص به یک ماشین و هر ماشین مجاز به دریافت یک اپراتور است. هزینه مربوط به دستمزد آن‌ها به صورت تقریبی و در محدوده (۳۰، ۴۰) U هزار تومان، هزینه آموزش در محدوده (۴، ۳۰) U میلیون تومان گزارش شده است.

جدول ۱۰- داده‌های مربوط به تولید در مطالعه موردی

دوره ۱			دوره ۲			
قطعه	مسیر	ماشین (زمان پردازش/ساعت)	تقاضا(واحد)	مسیر	ماشین (زمان پردازش/ساعت)	تقاضا(واحد)
۱	۱	۷(۰/۴) - ۱(۰/۳)	۱۰۰	۱	۷(۰/۳) - ۵(۰/۲)	۶۰
۲	۱	۱۰(۰/۵) - ۴(۰/۴)	۹۵	۱	۸(۰/۴) - ۱(۰/۳)	۱۰۰
۲	۲	۷(۰/۵) - ۵(۰/۲)		۲	۲(۰/۲) - ۳(۰/۳)	
۳	۱	۱۳(۰/۴) - ۳(۰/۳)	۱۰۰	۱	۱۱(۰/۳) - ۲(۰/۴)	۷۰
۳	۲	۱۱(۰/۴) - ۲(۰/۵)		۲	۱۱(۰/۵) - ۲(۰/۲)	
۴	۱	۵(۰/۵) - ۳(۰/۴) - ۲(۰/۳)	۹۵	۱	۱۰(۰/۴) - ۶(۰/۳) - ۹(۰/۲)	۱۰۰
۴	۲	۱۴(۰/۶) - ۱۱(۰/۲) - ۱۲(۰/۴)		۲	۸(۰/۴) - ۴(۰/۲) - ۶(۰/۳)	
۵	۱	۱۴(۰/۶) - ۱۳(۰/۴) - ۱(۰/۵)	۸۵	۱	۸(۰/۴) - ۴(۰/۲) - ۶(۰/۳)	۶۵
۵	۲	۱۲(۰/۴) - ۱۱(۰/۲) - ۱۲(۰/۴)		۲	۱۲(۰/۴) - ۹(۰/۳) - ۶(۰/۲)	
۶	۱	۱۳(۰/۴) - ۱(۰/۵)	۹۰	۱	۹(۰/۳) - ۱۴(۰/۴) - ۵(۰/۲)	۸۰
۶	۲	۱۲(۰/۴) - ۵(۰/۵) - ۳(۰/۴)		۲	۱۲(۰/۵) - ۵(۰/۴) - ۳(۰/۱)	
۷	۱	۷(۰/۵) - ۴(۰/۳)	۱۰۰	۱	۷(۰/۴) - ۴(۰/۲)	۶۰
۷	۲	۸(۰/۶) - ۵(۰/۴)		۲	۹(۰/۳) - ۸(۰/۲)	
۸	۱	۶(۰/۴) - ۱۶(۰/۳) - ۱۲(۰/۶) - ۲(۰/۲)	۹۵	۱	۳(۰/۵) - ۱۰(۰/۴) - ۶(۰/۶)	۸۰
۸	۲	۱۴(۰/۲) - ۱۲(۰/۹) - ۲(۰/۳)		۲	۳(۰/۵) - ۱۰(۰/۴) - ۶(۰/۶)	

جدول ۱۱- جدول توانایی کارگر برای کار با انواع ماشین

کارگرها	ماشین‌ها													
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰
۲	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰
۳	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰
۴	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۵	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۶	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱
۷	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱
۹	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۱۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰
۱۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۱۲	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱
۱۳	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۱۴	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰

ماشین و نصب و باز کردن آن (۴۰۰، ۲۵۰) هزار تومان در نظر گرفته شده است. هزینه‌های نگهداری موجودی، فروش از دست‌رفته و تولید هر قطعه به ترتیب برابر، (۶۰، ۴۰) هزار تومان، (۵۰، ۴۰) هزار تومان و (۱۵، ۸) U هزار تومان فرض شده است. جدول ۱۲ اطلاعاتی در مورد میزان خطرات قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌ها منتخب را نشان می‌دهد که بر اساس نظرات مدیر خط تولید این کارگاه ارائه شده است. سایر اطلاعات تکمیلی نیز به صورت تصادفی و مطابق داده‌های قسمت قبل به مسئله اضافه شده است.

جدول ۱۱ ارتباط بین ماشین‌آلات و کارگران را نشان می‌دهد و هر کارگر بر اساس مهارت‌های خود توانایی کار با ماشین‌های خاص را دارد. از آنجایی که سایر اطلاعات دقیق مسائل مربوط به اپراتور در دسترس نبود، هزینه‌های استخدام و اخراج را مطابق مثال‌های نمونه در قسمت قبل در نظر گرفته‌ایم. هزینه هر واحد جابجایی درون‌سلولی کمتر از هزینه جابجایی بین‌سلولی است، زیرا حرکت درون‌سلولی مسافت کمتری را طی می‌کند. به این ترتیب هزینه‌های جابجایی بین‌سلولی (۱۱۰، ۹۰) U هزار تومان و درون‌سلولی (۲۵، ۱۵) U هزار تومان، هزینه جابجایی

جدول ۱۲- جدول میزان خطرات ناشی از قرارگیری ماشین‌ها در مکان‌های کاندید

مکان‌ها	ماشین‌ها													
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
۱	۰/۲	۰/۷	۰/۱	۰/۹	۰/۶	۰/۶	۱	۰/۸	۰/۶	۱	۰/۳	۰/۷	۰/۶	۰/۴
۲	۰/۸	۰/۴	۰	۰/۹	۱	۰/۴	۱	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۸	۰/۶	۰/۴
۳	۰/۸	۰/۱	۰/۶	۱	۰/۱	۰/۱	۰	۰	۰/۸	۰/۹	۰	۰/۹	۰/۶	۱
۴	۰/۸	۰/۷	۰	۰/۶	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۹	۰	۰	۰/۶	۰/۳	۰/۶	۰/۲

جدول ۱۴- مقادیر تنظیم شده پارامترهای الگوریتم NSGA-II

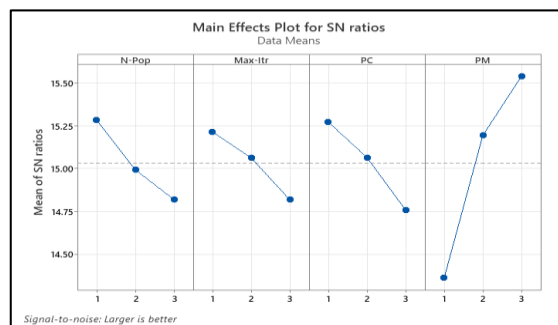
II			
$N_{Pop}$	$MaxItr$	$P_c$	$P_m$
۱۰۰	۵۰	۰/۷	۰/۲

اکثریت قریب به اتفاق مدل‌ها یک مسیریابی فرآیند واحد را فرض می‌کنند. با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری ارائه شده توسط مسیرهای فرآیندی (یا مسیریابی) چندگانه در مرحله طراحی، می‌توان به چندین مزیت از جمله اجازه دادن به تعداد کمتری از ماشین‌ها، استفاده بیشتر از ماشین، کاهش وابستگی متقابل بین سلول‌ها و بهبود توان عملیاتی دست یافت. با عنایت به این موضوع، مدل پیشنهادی در حل داده‌های حاصل از این مطالعه موردی بهترین مسیر را برای هر یک از قطعات پیشنهاد کرده است. لازم به ذکر است مسیرهای انتخابی در انتخاب بهترین مسیر برای کمترین مقدار هزینه (جابجایی قطعات، دستمزد پرداختی به کارکنان و خرابی ماشین‌ها) و کمترین میزان مصرف انرژی اثر گذار است. نتایج حاصل از انتخاب بهترین مسیر برای مطالعه موردی در جدول ۱۳ ارائه شده است. همچنین به ازای هر مسیر تولید سرعت مورد استفاده برای هر ماشین مشخص شده است. در جدول ۱۴ اپراتورهای تخصیص یافته در هر دوره و در هر ماشین مشخص شده است. همانطور که مشخص است در دوره اول اپراتور ۴ و در دوره دوم اپراتور ۸ تخصیص نیافته است. در تخصیص‌های انجام گرفته در دوره اول اپراتورهای ۲، ۷، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۵ و در دوره دوم اپراتورهای ۱، ۳، ۱۰، ۱۳ و ۱۴ برای کار با ماشین‌های تخصیص یافته نیاز به به آموزش دارند.

نتایج مربوط به مطالعه موردی. با توجه به ابعاد بزرگ مسئله و عدم توانایی روش اسپیلون محدودیت، برای حل این مسئله از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده شده است که در مرحله اول پارامترهای الگوریتم باید کالیبره شوند. برای این امر برای پارامترها سه سطح تعریف و براساس روش تاگوچی و ایجاد تابع مطلوبیت بهترین مقدار هر پارامتر احصاء و در جدول ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۱۳- مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II

پارامترها	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
$Pop$	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
$Max - Itr$	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
$P_c$	۰/۷	۰/۸	۰/۹
$P_m$	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲



شکل ۱۷- اثر میانگین ضریب SN برای مسئله مطالعه موردی مقادیر کالیبره شده پارامترهای الگوریتم NSGA-II در جدول ۱۴ بیان گردیده است.

جدول ۱۵- نتایج مربوط به مسیر و سرعت تولید در مطالعه موردی

قطعه	دوره ۱		دوره ۲	
	مسیر	ماشین (سرعت)	مسیر	ماشین (سرعت)
۱	۱	$۱(F_2) - ۷(F_2)$	۱	$۵(F_3) - ۷(F_2)$
۲	۱	$۴(F_1) - ۱۰(F_1)$	۱	$۱(F_2) - ۸(F_1)$
۳	۱	$۳(F_1) - ۱۳(F_2)$	۱	$۲(F_2) - ۱۱(F_3)$
۴	۱	$۲(F_2) - ۳(F_1) - ۵(F_3)$	۱	$۹(F_1) - ۶(F_3) - ۱۰(F_1)$
۵	۲	$۱۲(F_3) - ۱۱(F_3) - ۱۴(F_3)$	۱	$۶(F_3) - ۴(F_1) - ۸(F_1)$
۶	۱	$۱(F_2) - ۱۳(F_2)$	۱	$۹(F_1) - ۱۲(F_3)$
۷	۱	$۹(F_1) - ۸(F_1) - ۱۲(F_3) - ۳(F_1)$	۱	$۵(F_3) - ۱۴(F_3) - ۹(F_1)$
۸	۱	$۴(F_1) - ۷(F_2)$	۲	$۸(F_1) - ۹(F_1)$
۹	۲	$۲(F_2) - ۱۲(F_3) - ۱۴(F_3) - ۶(F_3)$	۱	$۶(F_3) - ۱۰(F_1) - ۳(F_1)$

دلیل بالا بودن ضریب خطرات ماشین‌های انتخاب شده، مکان‌های پیشنهادی به ۱، ۴ و ۲ تغییر یافته است. برای مدل پیشنهادی تعداد ۳ سلول تعریف شده که حداقل و حداکثر ظرفیت آن برابر ۴ و ۶ ماشین بوده است. نتایج حاصل از تخصیص ماشین‌ها به سلول‌ها در جدول ۱۵ ارائه شده است.

جدول ۱۷- نتایج مربوط به تخصیص سلول به مکان

مکان‌ها	سلول	دوره
۳ مکان	۱ سلول	دوره ۱
۲ مکان	۲ سلول	
۴ مکان	۳ سلول	
۱ مکان	۱ سلول	دوره ۲
۴ مکان	۲ سلول	
۲ مکان	۳ سلول	

جدول ۱۸- نتایج مربوط به تخصیص ماشین به سلول

ماشین‌ها	سلول	دوره
$m_5, m_6, m_8, m_9, m_{12}, m_{14}$	۱ سلول	دوره ۱
$m_1, m_4, m_7, m_{10}$	۲ سلول	
$m_2, m_3, m_{11}, m_{13}$	۳ سلول	
$m_1, m_4, m_5, m_7, m_8, m_{14}$	۱ سلول	دوره ۲
$m_3, m_6, m_{10}, m_{11}$	۲ سلول	
$m_2, m_9, m_{12}, m_{13}$	۳ سلول	

جدول ۱۹- نتایج مربوط به تخصیص ماشین به سلول

تولید	تقاضا	سفارش از دست‌رفته	موجودی	قطعه	دوره
۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	قطعه ۱	دوره ۱
۱۰۰	۹۵	۰	۵	قطعه ۲	
۸۵	۱۰۰	۱۵	۰	قطعه ۳	
۸۱	۹۵	۱۴	۰	قطعه ۴	
۷۳	۸۵	۱۲	۰	قطعه ۵	
۱۰۰	۸۵	۰	۱۵	قطعه ۶	
۷۷	۹۰	۱۳	۰	قطعه ۷	
۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	قطعه ۸	
۸۱	۹۵	۱۴	۰	قطعه ۹	
۵۱	۶۰	۹	۰	قطعه ۱	دوره ۲
۸۰	۱۰۰	۱۵	۰	قطعه ۲	
۷۵	۷۰	۱۰	۰	قطعه ۳	
۹۹	۱۰۰	۱۵	۰	قطعه ۴	
۶۸	۶۵	۹	۰	قطعه ۵	
۴۵	۷۰	۱۰	۰	قطعه ۶	
۸۱	۸۰	۱۲	۰	قطعه ۷	
۵۱	۶۰	۹	۰	قطعه ۸	
۸۲	۸۰	۱۲	۰	قطعه ۹	

جدول ۱۶- نتایج مربوط به تخصیص اپراتور به ماشین

اپراتورها	ماشین	اپراتورها	ماشین	دوره
$k_{12}$	ماشین ۸	$k_{14}$	ماشین ۱	دوره ۱
$k_1$	ماشین ۹	$k_{13}$	ماشین ۲	
$k_6$	ماشین ۱۰	$k_7$	ماشین ۳	
$k_{10}$	ماشین ۱۱	$k_8$	ماشین ۴	
$k_5$	ماشین ۱۲	$k_3$	ماشین ۵	
$k_9$	ماشین ۱۳	$k_{11}$	ماشین ۶	
$k_{15}$	ماشین ۱۴	$k_2$	ماشین ۷	
$k_{13}$	ماشین ۸	$k_7$	ماشین ۱	دوره ۲
$k_2$	ماشین ۹	$k_1$	ماشین ۲	
$k_{12}$	ماشین ۱۰	$k_{15}$	ماشین ۳	
$k_5$	ماشین ۱۱	$k_4$	ماشین ۴	
$k_{14}$	ماشین ۱۲	$k_9$	ماشین ۵	
$k_{10}$	ماشین ۱۳	$k_6$	ماشین ۶	
$k_3$	ماشین ۱۴	$k_{11}$	ماشین ۷	

سیستم تولید سلولی با تخصیص سلول‌ها در مکان‌های مجاور سعی در کاهش فاصله جابجایی و هزینه‌های مربوط به آن است. اما در مدل پیشنهادی مسئله ایمنی نیز به این موضوع اضافه شده و تعادل بین هزینه و ایمنی در چیدمان در نظر گرفته شده است. به همین دلیل در داده‌های ارائه شده در جدول ۱۵ در دوره اول مکان‌های ۲، ۳ و ۴ به عنوان مکان‌های مجاور انتخاب شده‌اند ولی در دوره دوم به

محدودیت مربوط به ایمنی محیط، میزان صدمات در مدل پیشنهادی به بیشترین مقدار خود خواهد رسید.

به منظور مقایسه نتایج مربوط به عملکرد الگوریتم‌ها و روش‌های حل در این پژوهش، می‌توان به پژوهش جعفرنژاد و همکاران [۵]، مطهری و همکاران [۴۵] مراجعه نمود. آن‌ها نیز بر عملکرد بهتر الگوریتم NSGA-II در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری و نزدیکی نتایج این الگوریتم به روش دقیق (اپسیلون محدودیت) دست یافته‌اند. به منظور بررسی و مقایسه رفتار جنبه‌های پایداری می‌توان به پژوهش ژانگ و همکاران [۴۶] توجه نمود. آن‌ها معتقد بودند هرچه سرعت پردازش پایین‌تر باشد، انرژی کمتری مصرف می‌شود اما این امر باعث افزایش زمان پردازش می‌شوند. انتخاب سرعت مناسب در هر پردازش بین مصرف انرژی و برنامه‌ریزی تولید، تعادل ایجاد می‌کند و باعث کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. در پژوهش حاضر نیز سرعت و زمان پردازش به نحوی بدست آمده که بین بیشترین سرعت و کمترین زمان پردازش تعادل برقرار شود؛ لذا نتایج حاصل با نتایج پژوهش ژانگ و همکاران [۴۶] مطابقت دارد.

تصمیم‌گیران می‌توانند از مدل ارائه‌شده در این پژوهش برای طراحی یک چیدمان تولیدی کارآمد استفاده نمایند، چیدمانی که به طور هم‌زمان به اهداف ترکیبی کاهش هزینه جابجایی مواد و مصرف انرژی و ایمنی محیط کار دست می‌یابد و خطرات طراحی یک چیدمان ضعیف توسط طراحان تسهیلات را کاهش خواهد داد. ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی هر کدام دارای چندین معیار سنجش هستند. لذا بررسی این معیارها به صورت تکی یا ترکیب چندتایی می‌تواند فضای گسترده‌ای را برای پژوهش‌های آتی فراهم نماید. پژوهشگران می‌توانند سایر مسائل برنامه‌ریزی تولید مانند محدودیت منابع، زمان بیکاری و ابعاد نامساوی تسهیلات، استفاده از روش‌های ابتکاری دیگر را برای حل مدل پیشنهادی بکار گیرند، نتایج آن را با نتایج این پژوهش مقایسه نمایند.

#### اندیس‌ها

$p$  اندیس برای قطعات ( $p = 1, \dots, P$ )

$c$  اندیس برای سلول ( $c = c' = 1, \dots, C$ )

$m$  اندیس برای ماشین ( $m = m' = 1, \dots, M$ )

با توجه به سیاست نگهداری موجودی در کارگاه تولیدی و هزینه‌های ارائه شده از فروش از دست‌رفته و نگهداری موجودی، مقدار تولید نهایی به ازای هر قطعه در هر دوره در جدول ۱۷ ارائه شده است. هزینه مربوط به نگهداری موجودی، فروش از دست‌رفته و میزان تولید به ترتیب برابر ۱۰۴۳/۵۱۶، ۷۳۷۹/۰۹۶ و ۱۷۱۴۷/۳۳۶ است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

سیستم‌های تولید سلولی پویا در یک محیط رقابتی برای تولید کالاهای با کیفیت و متنوع ضروری هستند. با افزایش رقابت بین تولیدکنندگان و فشار انجمن‌های طرفدار محیط‌زیست، مدیران واحدهای تولیدی دریافته‌اند که علاوه بر سود و هزینه‌های تولید (ابعاد اقتصادی)، می‌بایست به مباحث زیست‌محیطی و اجتماعی نیز توجه کرده و آن‌ها را به‌عنوان سرفصل‌های حیاتی ادامه فعالیت‌های تولیدی خود لحاظ کنند. مطالعه حاضر با هدف بررسی این مفاهیم در سیستم تولید سلولی در شرایط پویا پایدار انجام شد. مدل پیشنهادی، تولید محصولات را از طریق فرآیندهای اقتصادی دنبال کرده و اثرات منفی زیست‌محیطی را به حداقل رسانده و درعین‌حال موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و منابع طبیعی، افزایش عملکرد کارکنان و ایمنی محیط کار آن‌ها شده است. برای این منظور، یک مدل ریاضی جدید پیشنهاد شد که با استفاده از مجموعه‌ای از مثال‌های عددی الهام گرفته شده از ادبیات موجود در نرم‌افزار گمز، کدنویسی و با روش اپسیلون محدودیت آزمایش و اعتبارسنجی شد. از آنجاکه مدل توسعه‌یافته NP-hard است و الگوریتم‌های دقیق نمی‌توانند جواب‌های بهینه جهانی را در زمان محاسباتی معقول برای ابعاد متوسط و بزرگ پیدا کنند، یک الگوریتم ژنتیک نامغلوب چند هدفه (NSGA-II) برای حل پیشنهاد شد.

آزمون‌های آماری برای مقایسه عملکرد الگوریتم فراابتکاری با روش اپسیلون محدودیت نشان داد که الگوریتم NSGA-II از نظر شاخص‌های MID و CPU Time عملکرد بهتری دارد و در شاخص DM و SM تفاوت معناداری بین دو روش حل نیست. همچنین، نتایج نشان داد که روش فراابتکاری زمان حل را حداقل به میزان سه برابر کاهش داده است. از دیگر نتایج این پژوهش می‌توان به نمایش تأثیر افزایش سرعت پردازش عملیات و زیاد شدن خطرات محیط تولید اشاره کرد. همچنین مشخص شد با حذف

هزینه فروش ازدست‌رفته قطعه $p$ در دوره $h$	$C_{p,h}^{BA}$	اندیس برای دوره زمانی ( $h = 1, \dots, H$ )	$h$
هزینه تولید قطعه $p$ در دوره $h$	$C_{p,h}^{PR}$	اندیس برای عملیات ( $j = 1, \dots, SE_p^h$ )	$j$
تقاضای قطعه $p$ در دوره $h$	$D_p^h$	اندیس برای مکان ( $g = g' = 1, \dots, G$ )	$g$
حد بالای ظرفیت سلول $c$ برای گنجاندن ماشین	$u_c$	اندیس برای اپراتور ( $k = 1, \dots, K$ )	$k$
حد پایین ظرفیت سلول $c$ برای گنجاندن ماشین	$l_c$	اندیس برای مسیر ( $o = 1, \dots, SR_p^h$ )	$o$
		اندیس برای سرعت ( $f = 1, \dots, F$ )	$f$
<b>پارامترهای ورودی</b>			
حداکثر تعداد اپراتور مورد نیاز در ماشین $m$	$u_m$	تعداد قطعات/محصول	$P$
حداقل تعداد اپراتور مورد نیاز در ماشین $m$	$l_m$	حداکثر تعداد سلول‌های مجاز در هر دوره	$C$
حداکثر تعداد ماشین که می‌تواند به اپراتور $k$ تخصیص یابد.	$u_k$	تعداد ماشین‌ها	$M$
حداقل تعداد ماشین که می‌تواند به اپراتور $k$ تخصیص یابد.	$l_k$	تعداد دوره‌های زمانی	$H$
درصد تغییرات بار سلولی.	$q$	تعداد مکان کاندید	$G$
درصد اختلاف در تعادل عملکرد کارکنان	$\Delta$	تعداد اپراتور	$K$
اگر اپراتور $k$ توانایی انجام عملیات با ماشین $m$ را در دوره اول داشته باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$Z_{k,m}^1$	تعداد مسیر	$O$
زمان پردازش مورد نیاز برای اجرای عملیات $j$ قطعه $p$ روی ماشین نوع $m$ در مسیر $o$	$T_{o,p,j,m}$	تعداد عملیات	$J$
مقدار انرژی مصرف‌شده توسط ماشین نوع $m$ در عملیات $j$ از مسیر $o$	$EEC_{m,j,o}$	تعداد حالت‌ها برای سرعت	$F$
فاصله بین دو مکان کاندید $g'$ و $g$	$dis_{g,g'}$	یک مقدار مثبت خیلی بزرگ	$A_{\infty}$
حداقل تعداد اپراتور که باید در هر دوره تولیدی استخدام شود.	$Min Q$	حداکثر سطح ایمنی طبق استاندارد	$Max_{IN_j}$
اگر عملیات $j$ قطعه $p$ در مسیر $o$ توسط ماشین $m$ در دوره $h$ انجام شود برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$U_{o,p,j,m}^h$	هزینه حرکت بین سلولی برای قطعه $p$	$C_p^{IE}$
نرخ افزایش در مصرف انرژی اگر عملیات اختصاص‌یافته به ماشین $m$ در سطح سرعت $f$ پردازش شود.	$\alpha_{m,f}$	هزینه حرکت درون سلولی برای قطعه $p$	$C_p^{IA}$
		هزینه جابجایی ماشین $m$ بر اساس هر واحد فاصله	$C_m^{Mo}$
		هزینه نصب و جداسازی ماشین $m$	$C_m^{IU}$
		هزینه آموزش برای اپراتور $k$ برای انجام عملیات با ماشین $m$	$C_{k,m}^{TR}$
		دستمزد اپراتور $k$ برای انجام عملیات با ماشین $m$ (هر ساعت)	$C_{k,m}^{SA}$
		هزینه استخدام اپراتور $k$	$C_k^{HI}$
		هزینه اخراج اپراتور $k$	$C_k^{FI}$
		هزینه نگهداری قطعه $p$ در دوره $h$	$C_{p,h}^{INV}$

اگر اپراتور $k$ در دوره $h$ استخدام شود برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$Q_k^h$	نرخ کاهش در زمان پردازش اگر عملیات اختصاص‌یافته به ماشین $m$ در سطح سرعت $f$ پردازش شود.	$\beta_{m,f}$
اگر اپراتور $k$ به ماشین $m$ در دوره $h$ تخصیص یابد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$R_{k,m}^h$	ظرفیت زمانی ماشین نوع $m$ .	$TM_m$
اگر اپراتور $k$ به سلول $c$ در دوره $h$ تخصیص یابد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$Y_{k,c}^h$	ظرفیت زمانی اپراتور $k$ .	$TW_K$
اگر اپراتور $k$ توانایی انجام عملیات با ماشین $m$ را در دوره $h$ نداشته باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است. ( $k \geq 2$ )	$Z_{k,m}^h$	میانگین زمان بین خرابی ماشین نوع $m$ و برابر $\frac{1}{\lambda_m}$ است.	$MTBF_m$
اگر مسیر $o$ به قطعه $p$ در دوره $h$ تخصیص یابد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$V_{o,p}^h$	میانگین زمانی تعمیر ماشین نوع $m$ .	$MTTR_m$
اگر ماشین $m$ با سرعت $f$ در دوره $h$ پردازش انجام دهد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.	$B_{m,f}^h$	هزینه خرابی ماشین نوع $m$ .	$CBR_m$
میزان موجودی قطعه $p$ در پایان دوره $h$ ( $I_p^0 = 0$ )	$INV_p^h$	مجموعه‌ای از جفت ماشین‌ها به صورت زیر که در آن $m^a$ و $m^b$ نمی‌توانند در یک سلول مشابه باشند به نحوی که:	$\theta$
میزان فروش از دست‌رفته برای قطعه $p$ در دوره $h$ ( $B_p^h = 0$ )	$BA_p^h$	مجموعه‌ای از جفت ماشین‌ها به صورت زیر که در آن $m^c$ و $m^d$ می‌بایست در یک سلول مشابه باشند به نحوی که:	$\Omega$
حجم تولید قطعه $p$ برای تولید در دوره $h$	$PR_p^h$	$\{(m^a, m^b)/m^a, m^b \in \{1, 2, \dots, M\}, m^a \neq m^b\}$	
اگر مقدار $PR_p^h > 0$ باشد، این مقدار برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.	$PI_p^h$	$\{(m^c, m^d)/m^c, m^d \in \{1, 2, \dots, M\}, m^c \neq m^d\}$	
میزان خطرات ناشی از استقرار تسهیل $m$ در مکان $g$	$INJ_{m,g}$		متغیرهای تصمیم
			$X_{m,c}^h$
			$S_{c,g}^h$

## مراجع

- [1] V. Sharma, and N. Dheeraj. "Cellular manufacturing system: a descriptive bibliometric analysis, framework, implementation steps and future research direction." *Benchmarking: An International Journal* 31, no. 6 (2024): 1976-2001.
- [2] E.R. Hosseinabad, and M.A.U. Zaman. "A brief review on cellular manufacturing and group technology." *Research Journal of Management Reviews* 5, no. 1 (2020): 1-20.
- [3] P. Asokan, G. Prabhakaran, and G.S. Kumar. "Machine-cell grouping in cellular manufacturing systems using non-traditional optimisation techniques-A comparative study." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18 (2001): 140-147.



- [4] S. Singh, E.U. Olugu, and S.N. Musa. "Development of sustainable manufacturing performance evaluation expert system for small and medium enterprises." *Procedia CIRP* 40 (2016): 608-613.
- [5] J. Jafarzadeh, H.A. Khalili, and N. Shoja. "A multiobjective optimization model for a dynamic and sustainable cellular manufacturing system under uncertainty." *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022, no. 1 (2022): 1334081. (in Persian)
- [6] P. Renna, S. Materi, and M. Ambrico. "Review of responsiveness and sustainable concepts in cellular manufacturing systems." *Applied Sciences* 13, no. 2 (2023): 1125.
- [7] R. YounesSinaki, A. Sadeghi, H. Mosadegh, N. Almasarwah, and G. Suer. "Cellular manufacturing design 1996–2021: A review and introduction to applications of Industry 4.0." *International Journal of Production Research* 61, no. 16 (2023): 5585-5636.
- [8] J.G. Nahr, M. Bathaee, A. Mazlounzadeh, and H. Nozari. "Cell production system design: a literature review." *International Journal of Innovation in Management, Economics and Social Sciences* 1, no. 1 (2021): 16-44.
- [9] M. Lashgari, R. Kia, and F. Jolai. "Robust optimisation to design a dynamic cellular manufacturing system integrating group layout and workers' assignment." *European Journal of Industrial Engineering* 15, no. 3 (2021): 319-351.
- [10] M. Rheault, J.R. Drolet, and G. Abdunnour. "Dynamic cellular manufacturing system (DCMS)." *Computers & Industrial Engineering* 31, no. 1-2 (1996): 143-146.
- [11] T.E. Graedel, and B.R. Allenby. "Industrial ecology and sustainable engineering." (*Prentice Hall*) (2010).
- [12] H. Bakhshi-Khaniki, and S.M.T. Fatemi-Ghomi. "Integrated Dynamic Cellular Manufacturing Systems and Hierarchical Production Planning with Worker Assignment and Stochastic Demand." *International Journal of Engineering* 36, no. 2 (2023): 348-359. (in Persian)
- [13] M.B. Fakhrazad, F. Barkhordary, and A.J. Afari-Nodoushan. "A mathematical model for dynamic cell formation problem based on scheduling, worker allocation, and financial resources constraint." *Industrial Management Journal* 13, no. 3 (2022): 435-463. (in Persian)
- [14] A.M. Golmohammadi, M.M. Gohareh, and M. Karbasian. "Proposing an efficient mathematical model for the continuous layout design in a cellular manufacturing system The real-case of BATA company." *Research in Production and Operations Management* 13, no. 1 (2022): 25-50. (in Persian)
- [15] K. Forghani, and S.M.T. Fatemi-Ghomi. "Joint cell formation, cell scheduling, and group layout problem in virtual and classical cellular manufacturing systems." *Applied Soft Computing* 97 (2020): 106719.
- [16] M. Sakhaii, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Bagheri, and B. Vatani. "A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines." *Applied Mathematical Modelling* 40, no. 1 (2016): 169-191.
- [17] M. Rafiee, V. Kayvanfar, A. Mohammadi, and F. Werner. "A robust optimization approach for a cellular manufacturing system considering skill-leveled operators and multi-functional machines." *Applied Mathematical Modelling* 107 (2022): 379-397.
- [18] K. Deep. "Machine cell formation for dynamic part population considering part operation trade-off and worker assignment using simulated annealing-based genetic algorithm." *European Journal of Industrial Engineering* 14, no. 2 (2020): 189-216.
- [19] H. Feng, W. Da, L. Xi, E. Pan, and T. Xia. "Solving the integrated cell formation and worker assignment problem using particle swarm optimization and linear programming." *Computers & Industrial Engineering* 110 (2017): 126-137.
- [20] F. Bagheri, A.S. Safaei, M. Kermanshahi, and M.M. Paydar. "Robust design of dynamic cell formation problem considering the workers interest." *International Journal of Engineering* 32, no. 12 (2019): 1790-1797.
- [21] H. Bouaziz, M. Berghida, and A. Lemouari, "Solving the generalized cubic cell formation problem using discrete flower pollination algorithm," *Expert Systems with Applications* 150 (2020): 113345.
- [22] R. Ghodsi, S. Mostafayi, Z. Mansouri, and M. Bakhtiari. "Designing a bi-objective integrating mathematical model for dynamic sustainable cellular manufacturing systems considering production planning." *J Appl Mech Eng* 4, no. 6 (2015): 7.
- [23] K. Forghani, S.M.T. Fatemi-Ghomi, and R. Kia. "Group layout design of manufacturing cells incorporating assembly and energy aspects." *Engineering Optimization* 54, no. 5 (2022): 770-785.

- [24] H.R. Ebrahimi, K. Kianfar, and M. Bijari. "Scheduling a cellular manufacturing system based on price elasticity of demand and time-dependent energy prices." *Computers & Industrial Engineering* 159 (2021): 107460.
- [25] J. Wang, and C. Liu. "A priority rule based heuristic for virtual cellular manufacturing system with energy consumption. In *IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)* p. 1-5. 2018.
- [26] H. Raoofpanah, V.R. Ghezavati, and R. Tavakkoli-Moghaddam. "Solving a new robust green cellular manufacturing problem with environmental issues under uncertainty using Benders decomposition." *Engineering Optimization* 51, no. 7 (2019): 1229-1250.
- [27] R. Kumar, and S. P. Singh. "Simulated annealing-based embedded meta-heuristic approach to solve bi-objective robust stochastic sustainable cellular layout." *Global Journal of Flexible Systems Management* 19 (2018): 69-93.
- [28] K. Lamba, R. Kumar, S. Mishra, and S. Rajput. "Sustainable dynamic cellular facility layout: A solution approach using simulated annealing-based meta-heuristic." *Annals of Operations Research* 290 (2020): 5-26.
- [29] M. Imran, C. Kang, Y. H. Lee, M. Jahanzaib, and H. Aziz. "Cell formation in a cellular manufacturing system using simulation integrated hybrid genetic algorithm." *Computers & Industrial Engineering* 105 (2017): 123-135.
- [30] E. Bozoklar, and E. Yılmaz. "Designing Sustainable Flexible Manufacturing Cells with Multi-Objective Optimization Models." *Applied Sciences* 14, no. 1 (2023): 203.
- [31] S. Khatibi, M.K. Bafraei, and M. Rahmani. "Multi objective Model of airport gate scheduling problem using NSGA-II algorithm and epsilon constraint." *Journal of Modeling in Engineering* 15, no. 51 (2017): 397-410. (in Persian)
- [32] O. Abedinia, and N. Amjadi. "Optimal Distribution of Reactive Power based on Shark Smell Optimization with Pareto Criterion in Power System." *Journal of Modeling in Engineering* 14, no. 45 (2016): 133-144. (in Persian)
- [33] M.S. Javadi, M. Lotfi, A. Ashraf, A. E. Nezhad, M. Gough, and J. PS. Catalao "A Multi-Objective Model for Home Energy Management System Self-Scheduling using the Epsilon-Constraint Method. " 2020 IEEE 14th Int. In Conf. Compat. Power Electron. Power Eng., Setubal, Portugal. 2020.
- [34] A. Abdi, and M. Hajiaghahi-Keshteli. "Multi-Objective Closed-loop Supply Chain Considering Vehicles and Solving by New Approaches in Metaheuristics." *Journal of Modeling in Engineering* 17, no. 59 (2019): 67-85. (in Persian)
- [35] Y. Esmaeelzadeh, and H. Sahebi. "A reverse logistics supply chain network design for municipal solid waste Case Study: Shiraz City." *Journal of Modeling in Engineering* 17, no. 56 (2019): 313-325. (in Persian)
- [36] S. Ghayebloo, F. Fathipour, and M. Alimohammadi. "Developing a multi-objective mathematical programming model for compost supply chain design regarding the produced compost quality and environmental sustainability." *Journal of Modeling in Engineering* 20, no. 71 (2022): 189-208. (in Persian)
- [37] Y. Haimes. "On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 3 (1971): 296-297.
- [38] J.F. Bérubé, M. Gendreau, and J.Y. Potvin. "An exact  $\epsilon$ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits." *European Journal of Operational Research* 194, no. 1 (2009): 39-50.
- [39] A. Liefooghe, S. Verel, and J.K. Hao. "A hybrid metaheuristic for multiobjective unconstrained binary quadratic programming." *Applied Soft Computing* 16 (2014): 10-19.
- [40] K. Devika, A. Jafarian, and V. Nourbakhsh. "Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques." *European Journal of Operational Research* 235, no. 3 (2014): 594-615.
- [41] M.B. Fakhrazad, and R. Lotfi. "Green vendor managed inventory with backorder in two echelon supply chain with epsilon-constraint and NSGA-II approach." *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems* 5, no. 11 (2018): 193-209. (in Persian)
- [42] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T.A.M.T. Meyarivan. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6, no. 2 (2002): 182-197.

- [43] A. Cheraghalipour, M. Hajiaghaei-Keshteli, and M.M. Paydar. "Tree Growth Algorithm (TGA): A novel approach for solving optimization problems." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 72 (2018): 393-414.
- [44] F. Jolai, H. Asefi, M. Rabiee, and P. Ramezani. "Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem." *Scientia Iranica* 20, no. 3 (2013): 861-872. (in Persian)
- [45] R. Motahari, Z. Alavifar, A. Zareh-Andaryan, Maxwell Chipulu, and Morteza Saberi. "A multi-objective linear programming model for scheduling part families and designing a group layout in cellular manufacturing systems." *Computers & Operations Research* 151 (2023): 106090.
- [46] H. Zhang, Y. Wu, R. Pan, and G. Xu. "Two-stage parallel speed-scaling machine scheduling under time-of-use tariffs." *Journal of Intelligent Manufacturing* 32 (2021): 91-112.