



## Optimization of a Dynamic Cellular Manufacturing System Considering Machine Breakdowns along with Sequence Monitoring of Operation Periods

**Fatemeh Shahabi**

MSc. Student, Department of Industrial Management, Faculty of Business and Economics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. E-mail: f.shahabi@mehr.pgu.ac.ir

**Hamid Shahbandarzadeh \***

\*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Business and Economics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. E-mail: shahbandarzadeh@pgu.ac.ir

**Hadi Balouei Jam Khaneh**

Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Business and Economics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. E-mail: hadibalouei@pgu.ac.ir

### Abstract

#### Objective

Short product life cycles, unpredictable demand patterns, and ever-decreasing time-to-market have put manufacturing companies under pressure. To face all complex production scenarios, these companies tend to the implementation of Cellular Manufacturing Systems (CMS) to reduce production costs, increase flexibility, and respond quickly to market demands. The cellular manufacturing system facilitates the control and management of the production system by dividing a large system into several small subsystems. The design of a cellular manufacturing system includes cell formation, group layout, group scheduling, and resource allocation. The first issue in designing a cellular system is the grouping of machines to produce a family of parts in production cells referred to as cell formation. The creation of efficient cells aims to achieve maximum performance of intracellular machines (intra-cellular processes) and minimize the transfer of parts from one cell to another (inter-cellular processes). The second problem is the problem of group layout, which includes the placement of cells in the workshop relative to each other (intercellular layout) and the layout of machines within the cells (intracellular layout). The optimal grouping of machines in cells, the efficient placement of cells relative to each other, as well as the machines inside cells affect the cost of intracellular movements and intercellular movements of parts. Considering that in a static cellular manufacturing system, the demand is considered constant in all periods, however, due to the advancement of technology, the environment of an industry is faced with turbulence in the types of products and demand. To overcome these problems, a dynamic cellular manufacturing system was introduced, which forms optimal cells in

each period according to the demand conditions and changes in product composition. This study addresses the simultaneous challenges of a dynamic cellular manufacturing system (DCMS) with unreliable machines and production planning and intercellular layout problems. The proposed model seeks to minimize the costs of Inter and intra-cellular movement, reconfiguration, machine breakdown, part production, keeping parts in the warehouse, and back-ordering parts in production cycles.

### Methods

At first, a mixed integer nonlinear programming mathematical model for the considered problem was presented, Next, linearized and validated with a case study in GAMS software with a GUROBI solver. In the following, the impact of moving machines between periods and the sensitivity analysis of the MTBF parameter were discussed.

### Results

Flexibility in routing, optimal location of cells, and optimal grouping of machines reduced production costs, and also by moving two machines m1 and m3, production costs improved by 353,870 Tomans.

### Conclusion

The reconfiguration of machine cells in the new period improves the cost of production and also the model is flexible in routing part production. In this study, MTBF sensitivity analysis showed that the number of failures affects the system's performance.

**Keywords:** Dynamic cellular manufacturing system, Machines breakdown, Operation sequence monitoring, Production system flexibility.

**Citation:** Shahabi, Fatemeh; Shahbandarzadeh, Hamid & Balouei Jam Khaneh, Hadi (2023). Optimization of a Dynamic Cellular Manufacturing System Considering Machine Breakdowns along with Sequence Monitoring of Operation Periods. *Industrial Management Journal*, 15(3), 508-533. (in Persian)

---

Industrial Management Journal, 2023, Vol. 15, No 3, pp. 508-533

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.356073.1008035>

Article Type: Research Paper

© Authors

Received: March 13, 2023

Received in revised form: June 02, 2023

Accepted: June 07, 2023

Published online: October 21, 2023





## بهینه‌سازی یک سیستم تولید سلولی پویا با در نظر گرفتن خرابی ماشین آلات، همراه با پایش توالی دوره‌های عملیات

فاطمه شهابی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب‌وکار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. رایانامه: f.shahabi@mehr.pgu.ac.ir

حمید شاهبندرزاده\*

\* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب‌وکار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. رایانامه: shahbandarzadeh@pgu.ac.ir

هادی بالویی جام خانه

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب‌وکار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. رایانامه: hadibalouei@pgu.ac.ir

### چکیده

**هدف:** چرخه کوتاه عمر محصول، الگوهای پیش‌بینی‌ناپذیر تقاضا و کاهش روزافزون زمان عرضه به بازار، باعث شده است که شرکت‌های تولیدی تحت فشار قرار گیرند. به همین منظور، شرکت‌های تولیدی برای رویارویی با سناریوهای پیچیده تولید، به پیاده‌سازی سیستم‌های تولید سلولی (CMS) روی آورده‌اند که کاهش هزینه‌های تولید، افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخ سریع به تقاضای بازار را به همراه دارد. سیستم تولید سلولی، یکی از فلسفه‌های فناوری گروهی است که با تقسیم یک سیستم بزرگ به چندین زیرسیستم کوچک، کنترل و مدیریت سیستم تولید را تسهیل می‌کند. اولین موضوع در طراحی یک سیستم سلولی، گروه‌بندی ماشین‌ها برای تولید خانواده‌ای از قطعات در سلول‌های تولیدی است که از آن با عنوان تشکیل سلول یاد می‌شود. در واقع با ایجاد سلول‌های کارآمد، کارایی ماشین‌های درون سلولی (فرایند درون سلولی) به حداکثر و انتقال قطعات از یک سلول به سلول دیگر (فرایند بین سلولی) به حداقل می‌رسد. مسئله دوم، مسئله چیدمان گروهی، یعنی فاصله سلول‌ها در کارگاه از یکدیگر (چیدمان بین سلولی) و چیدمان ماشین‌ها در داخل سلول‌ها (چیدمان درون سلولی) است. گروه‌بندی بهینه ماشین‌ها در سلول‌ها، قرارگیری کارآمد سلول‌ها در کنار یکدیگر و همچنین، ماشین‌های داخل سلول‌ها، بر هزینه‌های حرکات درون سلولی و حرکات بین سلولی قطعات تأثیر می‌گذارد. در یک سیستم تولید سلولی استاتیک، تقاضا در تمام دوره‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ ولی با پیشرفت تکنولوژی، محیط یک صنعت با تلاطم در انواع محصولات و تقاضا مواجه است. برای غلبه بر این مسائل، در پژوهش حاضر یک سیستم تولید سلولی پویا معرفی شده است که سلول‌های بهینه را در هر دوره با توجه به شرایط تقاضا جایابی می‌کند. با توجه به اهمیت آنچه بیان شد، این مطالعه به‌طور هم‌زمان به حل مسئله یک سیستم تولید سلولی پویا (DCMS) با ماشین‌های غیرقابل اعتماد و مسئله برنامه‌ریزی تولید و چیدمان بین سلولی می‌پردازد. تابع هدف مدل پیشنهادی، به‌دنبال حداقل کردن هزینه‌های جابه‌جایی درون و بین سلولی، پیکربندی مجدد، خرابی ماشین‌آلات، تولید قطعه، نگهداری قطعه در انبار و سفارش معوق قطعه در دوره‌های تولیدی است.

**روش:** در ابتدا، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط، برای مسئله مدنظر ارائه و سپس خطی‌سازی شد. مدل ریاضی پیشنهادی با یک مطالعه موردی در نرم‌افزار GAMS با سالور GUROBI اعتبارسنجی شد و در ادامه، به تأثیر جابه‌جایی ماشین‌آلات بین دوره‌ها و تحلیل حساسیت پارامتر میانگین زمان بین دو خرابی پرداخته شد.

**یافته‌ها:** انعطاف‌پذیری در مسیریابی، مکان‌یابی بهینه سلول‌ها و گروه‌بندی بهینه ماشین‌آلات، به کاهش هزینه‌های تولید منجر شد. همچنین با جابه‌جایی دو ماشین  $m_1$  و  $m_3$  هزینه تولید به میزان ۳۵۳,۸۷۰ تومان بهبود پیدا کرد.

**نتیجه‌گیری:** بیکربندی مجدد سلول‌های ماشین در دوره جدید، هزینه تولید را بهبود می‌دهد. مدل پیشنهادی، مدل انعطاف‌پذیر در مسیریابی تولید قطعه است. تحلیل حساسیت MTBF نشان داد که تعداد خرابی‌ها بر عملکرد سیستم تأثیر دارد.

**کلیدواژه‌ها:** انعطاف‌پذیری سیستم تولید، پایش توالی عملیات، خرابی ماشین‌آلات، سیستم تولید سلولی پویا.

**استناد:** شهابی، فاطمه؛ شاهبندرزاده، حمید و بالویی جام‌خانه، هادی (۱۴۰۲). بهینه‌سازی یک سیستم تولید سلولی پویا با در نظر گرفتن خرابی ماشین‌آلات، همراه با پایش توالی دوره‌های عملیات. مدیریت صنعتی، ۱۵(۳)، ۵۰۸-۵۳۳.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹

doi: <https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.356073.1008035>

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۵، شماره ۳، صص. ۵۰۸-۵۳۳

ناشر: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان

## مقدمه

با افزایش رقابت جهانی، شرکت‌های تولیدی سعی می‌کنند زمان ورود به بازار را کاهش دهند و در عین حال، با بهبود بخشیدن کیفیت محصول، مقرون به صرفه شوند. به همین منظور، بسیاری از شرکت‌های تولیدی به تولید سلولی روی آورده‌اند که یکی از پارادایم‌های تولید مدرن است که مزیت‌های تولید کارگاهی و تولید محصولی را در برمی‌گیرد (سلیم‌پور، پوروزیری و آزاب<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). سیستم تولید سلولی (CMS)<sup>۲</sup> یک مفهوم تولیدی مبتنی بر فلسفه فناوری گروهی (GT)<sup>۳</sup> است (مهدی‌زاده، شامرادی و نیاکی<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰). این تولید با مرتب کردن کل سیستم تولید در سلول‌ها اجرا می‌شود، جایی که قطعات دارای نیازهای پردازشی مشابه در داخل یک سلول واحد پردازش می‌شوند. این ترتیب خاص (شناسایی خانواده‌های قطعات و گروه‌های ماشینی مربوطه) از سیستم، جریان تولید را ساده‌تر و کوتاه‌تر می‌کند و به‌طور چشمگیری زمان تولید و هزینه‌های جابه‌جایی مواد را کاهش می‌دهد (معروف، طارق و نور<sup>۵</sup>، ۲۰۲۱). شناسایی خانواده‌های قطعات و فرمول‌بندی سلول‌های ماشینی مربوطه، مسئله اساسی یک سیستم تولید سلولی است و به‌طور کلی به‌عنوان یک مسئله تشکیل سلول (CFP)<sup>۶</sup> شناخته می‌شود (موکتاش، تهبوب و ادیل<sup>۷</sup>، ۲۰۱۸).

در یک پیکربندی ایدئال، سلول‌های ماشین باید کاملاً مستقل باشند؛ به این معنا که هر سلول به‌طور کامل به یک خانواده از قطعات اختصاص داده شود (سوت، کرافورد، اولیواریس و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۲۰). با این حال، در عمل، به‌دلیل محدودیت‌های مدیریتی و محدودیت‌های منابع، دستیابی به چنین پیکربندی بسیار نادر است. این بدان معناست که ممکن است برخی از قطعات، به تولید در بیش از یک سلول نیاز داشته باشند. در ادبیات مرتبط، این نوع قطعه را عنصر استثنایی (EE)<sup>۹</sup> نامیده می‌شود (فرقانی، قمی و کیا<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۰). عناصر استثنایی به عناصری اطلاق می‌شوند که باید در بیش از یک سلول ساخته شوند که به افزایش جابه‌جایی بین سلولی و در نتیجه افزایش چشمگیر هزینه‌های حمل‌ونقل منجر می‌شود. بنابراین کاهش عناصر استثنایی یکی از مهم‌ترین اهداف در طراحی سیستم‌های تولید سلولی است (گل‌محمدی، اسدی، امیری و بهزاد<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۸). بنابراین داشتن یک سیستم جابه‌جایی مواد کارآمد، بسیار مهم است. تصمیم استراتژیک مرتبط با این موضوع معمولاً با حل مسئله چیدمان گروهی (GL)<sup>۱۲</sup> گرفته می‌شود که شامل یافتن چیدمان ماشین‌ها در سلول‌ها (چیدمان درون سلولی) و چیدمان سلول‌ها (چیدمان بین سلولی) در کارگاه است (فرقانی و قمی<sup>۱۳</sup>، ۲۰۲۰). مسئله تشکیل سلول و چیدمان سلولی به‌شدت به یکدیگر وابسته‌اند. از یک طرف، نحوه طبقه‌بندی

1. Salimpour, Pourvaziri & Azab
2. Cellular Manufacturing System
3. Group Technology
4. Mehdizadeh, Shamradifar & Niaki
5. Maroof, Tariq & Noor
6. Cell Formation Problem
7. Mukattash, Tahboub & Adil
8. Soto, Crawford, Olivares & et.al
9. Exceptional Element
10. Forghani, Ghomi & Kia
11. Golmohammadi, Asadi, Amiri & Behzad
12. Group Layout
13. Forghani & Ghomi

ماشین‌ها و تعداد ماشین‌های موجود در هر سلول روی چیدمان بین‌سلولی و درون‌سلولی مؤثر است و از سوی دیگر، یک چیدمان سلولی مناسب می‌تواند فواصل حرکات بین/ درون سلولی را به میزان چشمگیری کاهش دهد.

امروزه چرخه کوتاه عمر محصول یکی دیگر از مسائل مهم در حوزه سیستم‌های تولیدی می‌باشد. در واقع غفلت از محصولات جدید که در آینده ظهور می‌کنند، تغییرات برنامه‌ریزی نشده بعدی را در طراحی CMS تحمیل می‌کنند و باعث اختلال در تولید و هزینه‌های غیرمنتظره می‌شوند. بنابراین، این تغییرات باید در فرایند طراحی گنجانده شوند. با ارائه راه‌حلی برای مدیریت این تغییرات، سیستم تولید سلولی پویا (DCMS)<sup>۱</sup> معرفی شد که در آن فرض می‌شود ترکیب محصول یا تغییرات حجم تقاضا را می‌توان در یک افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای پیش‌بینی کرد (وفایی‌نژاد، کیا و شاه‌رضایی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۶). در نتیجه با توجه به لزوم انعطاف‌پذیری و چابکی بالا برای مقابله با تغییرات در واحدهای تولیدی، تولید سلولی پویا و ویژگی‌های آن می‌تواند برای هر یک از این واحدها مناسب باشد و نقش کلیدی در ادامه حیات آن‌ها ایفا نماید (دانیلوویچ و ایلچ<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹).

یکی دیگر از عوامل مهم در طراحی سیستم‌های تولید سلولی، قابلیت اطمینان سیستم است. این عامل می‌تواند به شدت بر بازده کل سیستم تأثیر بگذارد (سخایی، توکلی‌مقدم، باقری و وطنی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۶). خرابی ماشین یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد سیستم در سطح عملیاتی به دلیل ایجاد تاخیرهای احتمالی در برنامه‌ریزی تولید سیستم تولید است. با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ماشین و اثرات خرابی ماشین‌ها در سطح عملیاتی، راه‌حل‌های مربوط به انتخاب مسیریابی فرایند با خرابی ماشین کمتر منجر به کاهش هزینه کلی سیستم‌های تولید سلولی می‌شود (هوشیارتلگرافی و بولکاک<sup>۵</sup>، ۲۰۲۱). به همین منظور در این پژوهش به تأثیر خرابی ماشین‌آلات در یک سیستم تولید سلولی پویا که تأثیر مستقیمی در عملکرد آن دارد، می‌پردازیم. همچنین به‌طور هم‌زمان ۳ مسئله اساسی در تولید سلولی از جمله تشکیل سلول پویا (شامل جابه‌جایی درون و بین سلولی و پیکربندی مجدد سلول)، چیدمان بین سلولی و برنامه‌ریزی تولید (شامل تولید، انبارداری و سفارش معوق قطعه) در نظر گرفته شده است. در ادامه به بررسی ادبیات، شرح مسئله و مدل ریاضی می‌پردازیم و پس از آن تجزیه و تحلیل نتایج و در نهایت نتیجه‌گیری و زمینه‌های تحقیقات آینده بیان می‌شود.

## پیشینه پژوهش

### سیستم تولید سلولی پویا

در طراحی CMS کلاسیک، انواع محصول و تقاضا در بازار در طول دوره برنامه‌ریزی ثابت در نظر گرفته می‌شوند (مانند فنگ، شی، چیا و پن<sup>۶</sup>، ۲۰۱۸؛ درودیان و خوش‌قلب<sup>۷</sup>، ۲۰۲۱). ولی با توسعه مکرر طراحی و فناوری در سال‌های اخیر، این احتمال وجود دارد که یک صنعت با تلاطم در انواع محصول و تقاضا مواجه شود (اجمل‌شریف، جایاکومار، احمد و

1. Dynamic Cellular Manufacturing System
2. Vafaeinezhad, Kia & Shahnazari-Shahrezaei
3. Danilovic & Ilic
4. Sakhaei, Tavakkoli-Moghaddam, Bagheri & Vatani
5. Hooshyar Telegraphi & Bulgak
6. Feng, Xi, Xia & Pan
7. Doroudyan & Khoshghalb

سازی کومار<sup>۱</sup>، ۲۰۲۰). پس زمانی که ترکیب محصول یا تقاضای قطعه برای دوره‌های مختلف یک افق برنامه‌ریزی تغییر می‌کند، راه‌حل‌های بهینه برای CFP در یک دوره جاری، ممکن است برای دوره بعد کارآمد و بهینه نباشند. به عبارت دیگر، گروه‌های ماشینی بهینه و خانواده قطعات نمی‌توانند از ابتدای دوره اول تغییرناپذیر باشند. در نتیجه، پیکربندی مجدد سیستم تولید، مانند جابه‌جایی ماشین‌های موجود در یک سیستم سلولی، اضافه کردن ماشین‌های جدید به سلول‌ها و حذف ماشین‌های موجود از سلول‌ها، مورد نیاز است (دهنوی‌آرانی، صادقیه، زارع‌مهرجردی و هنرور<sup>۲</sup>، ۲۰۲۰). در ادبیات به سیستم تولید سلولی پویا (DCMS) معروف است که اولین بار توسط راثول و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۵) معرفی شد. از جمله مطالعات صورت گرفته در این حوزه، قضاوتی<sup>۴</sup> (۲۰۱۵) از یک رویکرد تصادفی در طراحی یک سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی تولید که در آن هزینه‌های نگهداری موجودی و سفارش معوق از ساختار احتمالی پیروی می‌کنند، استفاده کرد. هدف این مدل انتخاب و بهینه‌سازی تخصیص قطعات و ماشین‌آلات به سلول‌های مختلف و همچنین تعداد هر قطعه تولید شده در هر دوره بود.

دیپ و سینگ<sup>۵</sup> (۲۰۱۵) یک مدل ریاضی یکپارچه برای طراحی یک سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن تولید پویا و برنامه‌ریزی تولید چند دوره‌ای ارائه کردند. با استفاده از رویکرد اکتشافی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به حل مدل برای به حداقل رساندن هزینه‌های تولید با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف تولید مانند حجم تولید، مسیرهای فرایند جایگزین، ظرفیت ماشین، جابه‌جایی مواد و برونسپاری قطعه پرداختند. بایرام و ساهن<sup>۶</sup> (۲۰۱۶) یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط برای حل مسئله طراحی یک سیستم تولید سلولی پویا چند دوره‌ای (DCMS) پیشنهاد کردند. تابع هدف مدل ریاضی به حداقل کردن هزینه‌های جریان مواد بین و درون سلول، خرید ماشین، پیکربندی مجدد و هزینه‌های ثابت و عملیاتی ماشین می‌پردازد.

کومار و سینگ<sup>۷</sup> (۲۰۱۷) یک رویکرد اکتشافی دو فازی مبتنی بر امتیاز شباهت برای حل یکپارچه تشکیل سلول و چیدمان درون/بین سلولی پیشنهاد کردند. در فاز اول اکتشافی، یک خوشه ماشین - سلول بر اساس نمرات شباهت بین ماشین‌ها ایجاد می‌شود. این به‌عنوان ورودی فاز دوم برای به حداقل رساندن هزینه‌های جابه‌جایی مواد بین/درون سلولی و هزینه‌های بازاریابی در کل دوره برنامه‌ریزی ارائه می‌شود. خیرخواه و قجری<sup>۸</sup> (۲۰۱۸) یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی CMS‌های پویا ارائه کردند که تشکیل سلول و برنامه‌ریزی تولید را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. از آنجایی که این مسئله متعلق به کلاس NP-hard است، از یک رویکرد سه فازی که فاز ۱ راه‌حل عملی را پیدا می‌کند، فاز ۲ راه‌حل‌های همسایه را پیدا می‌کند و فاز ۳ راه‌حل عملی را بهبود می‌بخشد، برای حل مدل استفاده شده است.

1. Ajmal Sheriff, Jayakumar, Ahmed & Sasi Kumar
2. Dehnavi-Arani, Sadegheih, Zare Mehrjerdi & Honarvar
3. Rheault
4. Ghezavati
5. Deep & Singh
6. Bayram & Şahin
7. Kumar & Singh
8. Kheirkhah & Ghajari

پررا و راتنایکه<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی تشکیل سلول‌های پویا برای به حداقل رساندن هزینه‌های جابه‌جایی و راه‌اندازی ماشین‌آلات و جابه‌جایی بین سلولی قطعات در صنعت تولید پوشاک ارائه کردند.

رحیمی، آرکات و فاروقی<sup>۲</sup> (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط که به‌طور هم‌زمان به تشکیل سلول، زمانبندی و چیدمان بین سلولی می‌پردازد، ارائه دادند. مدل ارائه شده قابلیت تخصیص ماشین‌ها به سلول‌ها، انتخاب مسیرهای پردازش برای قطعات، تعیین توالی عملیات برای پردازش روی ماشین‌ها و تخصیص سلول‌ها به مکان‌های کاندید را دارد، به طوری که زمان تکمیل کل قطعات به‌عنوان تابع هدف به حداقل برسد.

ژو و آفادیل<sup>۳</sup> (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه کردند که تشکیل سلول پویا (DCF) و برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی (HPP) را با هم ادغام می‌کند. مدل پیشنهادی را با داده‌های تجربی یک کارخانه تولید قالب از روش شاخه و کران اعتبارسنجی کردند. خاملچی، اوفاسکا، زوادی و دیکیواک<sup>۴</sup> (۲۰۲۰) با ارائه یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط به ادغام مسئله تشکیل و چیدمان سلول همراه با برنامه ریزی تولید پرداختند. تابع هدف مدل ریاضی به حداقل کردن هزینه‌های حرکات بین و درون سلولی، هزینه جابه‌جایی ماشین‌آلات، هزینه عملیاتی ماشین‌آلات، هزینه راه‌اندازی و نگهداری موجودی می‌پردازد. الزهری، کتن و ولاچوس<sup>۵</sup> (۲۰۲۲) به طراحی یک سیستم تولید سلولی پویایی پرداختند که با مرتب کردن مجدد ماشین‌ها، امکان به حداقل رساندن حرکات بین/ درون سلولی و همچنین هزینه جابه‌جایی مواد بین ماشین‌ها را فراهم می‌کند.

### خرابی ماشین‌آلات

از جمله عوامل مؤثر بر عملکرد CMS، قابلیت اطمینان ماشین‌ها در سلول‌های تولیدی است. به‌طور سنتی، تشکیل سلول و تخصیص کار با فرض اطمینان ۱۰۰ درصد ماشین‌ها انجام می‌شود. در عمل، ماشین‌ها در حین عملیات خراب می‌شوند. خرابی ماشین بیشترین تأثیر را بر سررسیدها و سایر معیارهای عملکردی دارد، حتی اگر مسیر و ایستگاه‌های کاری جایگزین وجود داشته باشد (ساکسنا و جین<sup>۶</sup>، ۲۰۱۱). کروم و بوآزالبنانی<sup>۷</sup> (۲۰۱۷) به حل مسئله تشکیل سلول تعمیر یافته با حضور توالی عملیات، قابلیت اطمینان ماشین و مسیریابی فرایند جایگزین پرداختند و نتایج حاصل از روش شاخه و کران را با نتایج الگوریتم انتخاب کلونال مقایسه کردند و در سال (۲۰۱۹) با ایجاد هزینه‌های حرکت درون سلولی و راه‌اندازی، مدل پیشین خود را توسعه دادند و با الگوریتم جست‌وجو فاخته هیربیدی به حل آن پرداختند.

رضازاده و خلیلی‌میاب<sup>۸</sup> (۲۰۱۷) یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای طراحی یک سیستم تولید سلولی به‌منظور کاهش هزینه‌های تولید، افزایش کیفیت محصول و افزایش قابلیت اطمینان سیستم پیشنهاد کردند و مدل پیشنهادی را با الگوریتم ژنتیک دولایه اعتبارسنجی کردند.

1. Perera & Ratnayake
2. Rahimi, Arkat & Farughi
3. Xue & Offodile
4. Khamlichi, Oufaska, Zouadi & Dkiouak
5. Al-Zuheri, Ketan & Vlachos
6. Saxena & Jain
7. Karoum & Elbenani
8. Rezazadeh & Khiali-Miab



فاروقی، مصطفوی و افراسیابی<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی عددصحيح مختلط دوهدهفه برای پیکربندی مجدد سیستم‌های تولید سلولی با مسیرهای فرایند جایگزین بر اساس قابلیت اطمینان ماشین‌ها ارائه کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن تغییرات دینامیکی و عدم قطعیت در تقاضا و قابلیت اطمینان ماشین به کمینه کردن هزینه کل و خرابی ماشین‌آلات پرداختند.

ربانی، فروغی اصل و روانبخش<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی چنددهفه برای سیستم تولید سلولی پویا با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ماشین‌آلات و مسیرهای فرایند جایگزین ارائه کردند. آن‌ها به حل مسائل تشکیل سلول‌های قطعه - ماشین و تخصیص اپراتورها به سلول‌ها پرداختند.

نصیری و ناصری<sup>۳</sup> (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی برنامه‌نویسی عددصحيح مختلط برای حل مسئله تشکیل سلول تعمیر یافته با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ماشین ارائه دادند. هدف آن‌ها، انتخاب بهترین مسیر فرایند برای هر قطعه و تخصیص ماشین‌ها به سلول‌های تولیدی به منظور به حداقل رساندن هزینه حرکت درون سلولی، هزینه حرکت بین سلولی و هزینه خرابی ماشین‌هاست.

گل‌محمدی، هنرور، توکلی‌مقدم و حسینی‌نسب<sup>۴</sup> (۲۰۲۱) یک مدل غیرخطی عددصحيح مختلط برای حل تشکیل سلول یکپارچه و چیدمان درون/ بین سلولی در فضای پیوسته ارائه کردند. سپس مدل پیشنهادی را خطی‌سازی و با یک حل‌کننده دقیق با استفاده از نرم افزار GAMS حل نمودند. به منظور بررسی بهتر تفاوت مطالعه حاضر با مقالات پیشین، در جدول ۱ به مقایسه عوامل پوشش داده شده در مدل ریاضی و در جدول ۲ به تفاوت در توابع هدف می‌پردازیم. با توجه به اینکه در دنیای واقعی ماشین‌آلات دارای ظرفیت زمانی محدود می‌باشند و همچنین به صورت ۱۰۰ درصد قابل اعتماد نیستند و در طول فرایند خراب می‌شوند، می‌توان با ایجاد مسیرهای عملیات چندگانه، قطعه مسیری را انتخاب کند که دارای قابلیت اطمینان بالا و ظرفیت زمانی کافی ماشین‌آلات برای تولید باشد؛ که در این مطالعه به بررسی هم‌زمان این سه مسئله پرداخته شده است.

در ادامه، توالی عملیات در محاسبه هزینه‌های جابه‌جایی مواد مهم است، زیرا می‌تواند بر تعداد دفعاتی که قطعه باید بین ماشین‌های سلول‌های مختلف یا بین ماشین‌های داخل یک سلول حرکت کند، تأثیر بگذارد. همچنین چیدمان صحیح سلول‌ها هم بر تعداد دفعات جابه‌جایی تأثیر گذار است؛ در نتیجه مسیرهای پردازشی قطعات تحت تأثیر خرابی و ظرفیت ماشین می‌باشند، هزینه‌های جابه‌جایی و فواصل بین مکان‌های نامزد سلول به‌عنوان ورودیهایی هستند که بر تشکیل سلول‌های ماشین و بر انتخاب مکان احداث این سلول‌ها تأثیر می‌گذارند؛ زیرا چیدمان درست سلول‌ها باعث کاهش هزینه مسافت طی شده قطعات بین سلول‌ها می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در جدول ۱، هیچ مطالعه‌ای به‌طور هم‌زمان به بررسی تمام عوامل ذکر شده در یک سیستم تولید آشفته همراه با برنامه‌ریزی تولید نپرداخته است.

1. Farughi, Mostafayi & Afrasiabi

2. Rabbani, Farrokhi-Asl & Ravanbakhsh

3. Nasiri & Naseri

4. Golmohammadi, Honarvar, Tavakkoli Moghaddam & Hosseini-Nasab

جدول ۱. بررسی مقالات پیشین از نظر ویژگی پوشش داده شده در مدل ریاضی

نویسنده	سال	جابه‌جایی قطعه		چیدمان سلول‌ها	پی‌کرندگی مجدد سلول‌ها	برنامه‌ریزی تولید	خرابی ماشین‌آلات	توالی عملیات	مسیریابی-جایگزین	ظرفیت زمانی ماشین‌آلات
		بین سلولی	درون سلولی							
قضاوتی	۲۰۱۵	*	*		*	*				
دیپ و سینگ	۲۰۱۵	*	*			*		*	*	*
بایرام و ساهن	۲۰۱۶	*	*	*	*				*	*
رضازاده و خلیلی میاب	۲۰۱۷	*					*	*	*	*
کروم و بوآزالبنانی	۲۰۱۷	*					*	*	*	
خیرخواه و فجری	۲۰۱۸	*	*		*	*			*	*
فنگ و همکاران	۲۰۱۸	*	*	*	*			*	*	*
خوراسگانی و قفاری	۲۰۱۸	*	*				*	*	*	
پررا و راتنایکه	۲۰۱۹	*	*		*			*	*	*
نصیری و ناصری	۲۰۱۹	*	*					*	*	*
کروم و بوآزالبنانی	۲۰۱۹	*	*				*	*	*	*
ژو و آفادایل	۲۰۲۰	*	*		*	*		*	*	*
خاملچی و همکاران	۲۰۲۰	*	*	*	*			*	*	*
اجمل شریف و همکاران	۲۰۲۰	*	*		*			*	*	*
درودیان و خوش‌قلب	۲۰۲۱	*	*	*	*			*	*	*
گل محمدی و همکاران	۲۰۲۱	*	*	*	*		*	*	*	*
سعیدی و نیک اختر	۲۰۲۲	*	*	*	*	*	*	*	*	*
پژوهش حاضر		*	*	*	*	*	*	*	*	*

جدول ۲. هزینه‌های بررسی شده در توابع هدف مطالعات پیشین

نویسنده	سال	هزینه جابه‌جایی درون سلولی	هزینه جابه‌جایی بین سلولی	هزینه جابه‌جایی ماشین‌آلات	هزینه جابه‌جایی ماشین‌آلات	هزینه قطعه تولید	هزینه انبارداری	هزینه سفارش معوق
پررا و راتنایکه	۲۰۱۹		*	*				
نصیری و ناصری	۲۰۱۹	*	*					
کروم و بوآزالبنانی	۲۰۱۹	*	*	*				
ژو و آفادایل	۲۰۲۰	*	*	*	*		*	*
خاملچی و همکاران	۲۰۲۰	*	*	*			*	
اجمل شریف و همکاران	۲۰۲۰	*	*	*				
درودیان و خوش‌قلب	۲۰۲۱	*	*	*				
گل محمدی و همکاران	۲۰۲۱	*	*	*	*			
سعیدی و نیک اختر	۲۰۲۱	*	*	*	*	*	*	*
مقاله حاضر		*	*	*	*	*	*	*

## روشناسی پژوهش

پس از بررسی جامع ادبیات موضوع، به طراحی یک سیستم تولید سلولی پویا در جهت کاهش هزینه‌های تولید شرکت مورد مطالعه پرداخته می‌شود. شرکت مذکور یک شرکت درب و پنجره‌سازی UPVC می‌باشد که با ۲۵ نیروی فعال و ۹ دستگاه صنعتی به تولید انواع درب و پنجره دوجداره در ابعاد، طرحها و رنگهای متنوع می‌پردازد. در این طراحی از تکنیک مدل‌سازی ریاضی که از فنون پژوهش عملیاتی به شمار می‌رود، استفاده می‌شود. مدل ریاضی طراحی شده یک مدل برنامه‌نویسی غیرخطی عددصحیح مختلط می‌باشد که گام‌های اجرائی در جهت پیاده‌سازی مدل در شرکت مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- گام اول: تعیین مفروضات مدل ریاضی؛
- گام دوم: تعریف پارامترها، متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مسئله؛
- گام سوم: خطی‌سازی مدل ریاضی جهت کاهش پیچیدگی مدل؛
- گام چهارم: جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای اعتبار سنجی مدل براساس تحلیل حساسیت با استفاده از تکنیک بازدید میدانی؛
- گام پنجم: پیاده‌سازی در نرم‌افزار گمز و حل با سالور GORUBI که یک حل‌کننده پیشرفته برای مسائل برنامه‌ریزی خطی (LP)، برنامه‌نویسی عددصحیح مختلط (MIP) و برنامه‌نویسی درجه دوم (QP/QCP/MIQP/MIQCP) است؛
- گام ششم: تحلیل و بررسی جواب.

## بیان مسئله و مدل ریاضی

در این بخش یک مدل ریاضی غیرخطی عددصحیح مختلط به شکل قطعی تلفیقی از تشکیل سلول، چیدمان بین سلولی، برنامه‌ریزی تولید و قابلیت اطمینان ماشین با هدف به حداقل رساندن هفت هزینه اصلی، از جمله: جابه‌جایی قطعه بین سلولی و درون سلولی، تولید قطعه، نگهداری موجودی، سفارش معوق، خرابی و جابه‌جایی ماشین‌آلات ارائه شده است. سیستم تولید سلولی پیشنهادی به تولید چند نوع قطعه که هر کدام از آن‌ها دارای چند مسیر پردازش با توالی عملیات مشخص بر روی ماشین‌های مختلف با ظرفیت محدود زمانی در سلول‌هایی با ابعاد برابر می‌پردازد. مسئله بر اساس مفروضات زیر فرمول‌بندی می‌شود:

- یک یا چند مسیر پردازش برای هر نوع قطعه (یعنی مسیریابی فرایند جایگزین) وجود دارد و براساس هزینه‌های تولید، یک مسیر بهینه برای تولید قطعه انتخاب می‌شود.
- هر قطعه برای پردازش نیاز به چندین عملیات دارد و هر عملیات باید بر اساس ترتیب مربوطه انجام شود.
- تقاضا برای هر نوع قطعه در هر دوره مشخص و قطعی است.
- هزینه تولید، نگهداری موجودی و سفارش معوق هر نوع قطعه در هر دوره مشخص است.
- زمان پردازش هر عملیات برای هر نوع قطعه در هر ماشین در هر دوره مشخص و قطعی است.
- ظرفیت زمانی هر نوع ماشین مشخص و در هر دوره ثابت است.

- هزینه جابه‌جایی هر نوع ماشین از یک سلول به سلول دیگر بین دوره‌ها مشخص است.
- هزینه حرکت بین سلولی به مسافت طی شده بستگی دارد، در حالی که هزینه جابه‌جایی درون سلولی بدون توجه به مسافت است.
- حداکثر و حداقل ظرفیت سلول برای جای‌گیری ماشین تعیین شده است.
- فواصل بین مکان‌های نامزد سلول مشخص شده است.
- فرض می‌شود که هزینه خرابی ماشین مشخص و بر اساس هزینه تعمیر است و قابلیت اطمینان ماشین‌آلات از یک توزیع نمایی با نرخ خرابی مشخص شده پیروی می‌کنند. قابلیت اطمینان ماشین با معادله  $R = \exp(-\lambda t)$  تعریف می‌شود که در آن  $\lambda$  و  $t$  به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خرابی و زمان کارکرد ماشین هستند.

### اندیس‌ها

$M$ : تعداد ماشین‌آلات

$P$ : تعداد قطعات

$C$ : تعداد سلول‌های ماشینی

$L$ : تعداد مکان‌های نامزد برای احداث سلول ( $L \geq C$ )

$T$ : تعداد دوره‌های تولیدی

$R_p^t$ : تعداد مسیریابی‌های موجود برای قطعه نوع  $p$  در دوره  $t$

$m$ : مجموعه‌ای از ماشین‌آلات ( $m = 1, 2, \dots, M$ )

$p$ : مجموعه‌ای از قطعات ( $p = 1, 2, \dots, P$ )

$c, c'$ : مجموعه‌ای از سلول‌ها ( $c = 1, 2, \dots, C$ )

$l, l'$ : مجموعه‌ای از مکان‌های نامزد ( $l = 1, 2, \dots, L$ )

$t, t'$ : مجموعه‌ای از دوره‌های تولید ( $t = 1, 2, \dots, T$ )

$r$ : مسیره‌های موجود قطعه نوع  $p$  در دوره  $t$  ( $r = 1, 2, \dots, R_p^t$ )

### پارامترها

$D_p^t$ : مقدار تقاضا برای قطعه نوع  $p$  در دوره  $t$

$Diss_{l,l'}$ : فاصله بین دو مکان نامزد  $l$  و  $l'$

$time_{p,m}^t$ : زمان پردازش قطعه نوع  $p$  روی ماشین نوع  $m$

$K_{rp}^t$ : تعداد ماشین‌ها در مسیریابی  $r$  قطعه نوع  $p$  در دوره  $t$

$T'_{m,t}$ : ظرفیت زمانی ماشین نوع  $m$  در دوره  $t$

$\tilde{A}_1$ : هزینه جابه‌جایی هر قطعه بین سلول‌ها

- $\tilde{A}_2$  هزینه جابه‌جایی هر قطعه درون سلول
- $\tilde{A}_3$  هزینه جابه‌جایی هر ماشین بین دوره‌های تولید
- $\tilde{I}_p^t$  هزینه نگهداری هر واحد قطعه نوع p در انبار در دوره‌ی تولید t
- $\lambda_p^t$  هزینه سفارش معوق هر واحد قطعه نوع p در دوره‌ی تولید t
- $\gamma_p^t$  هزینه تولید هر واحد قطعه نوع p در دوره‌ی تولید t
- $MTBF_m$  میانگین زمان بین دو خرابی متوالی برای ماشین نوع m
- $BR_m$  هزینه خرابی برای ماشین نوع m
- LC حداقل ظرفیت سلول c برای جای‌گیری ماشین
- UC حداکثر ظرفیت سلول c برای جای‌گیری ماشین
- $\{U_{rp}^1, U_{rp}^2, U_{rp}^3, \dots, U_{rp}^{k_{rp}}\}$  شاخص ماشین در مسیریابی r قطعه نوع p
- $A_\infty$  یک مقدار مثبت بزرگ

**متغیر تصمیم‌گیری**

- $X_{m,c}^t$  اگر ماشین نوع m در دوره‌ی تولیدی t به سلول c تخصیص داده شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌گیرد.
- $Y_{c,l}^t$  اگر سلول c در دوره‌ی تولیدی t در مکان کاندید l احداث شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌گیرد.
- $S_{r,p}^t$  اگر مسیر پردازش tام قطعه‌ی نوع p در دوره‌ی t انتخاب شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌گیرد.
- $IP_t^t$  تعداد موجودی قطعه نوع p در دوره‌ی تولیدی t
- $BP_p^t$  تعداد سفارش معوق قطعه نوع p در دوره‌ی تولیدی t
- $QP_p^t$  حجم تولید قطعه نوع p در دوره‌ی t
- $QB_p^t$  اگر  $0 < QB_p^t$  باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌گیرد.

**مدل ریاضی**

$$\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} \sum_{m=1}^{K_{rp-1}^t} \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L \tilde{A}_1 Diss_{l,l'} S_{r,p}^t QP_p^t X_{U_{rp}^m,c}^t Y_{c,l}^t X_{U_{rp}^{m+1},c'}^t Y_{c',l'}^t \tag{۱}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} \sum_{m=1}^{K_{rp-1}^t} \sum_{c=1}^C \tilde{A}_2 S_{r,p}^t QP_p^t X_{U_{rp}^m,c}^t X_{U_{rp}^{m+1},c}^t \tag{۲}$$

$$+ \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L \tilde{A}_3 X_{m,c}^t X_{m,c'}^{t+1} Y_{c,l}^t Y_{c',l'}^{t+1} Diss_{l,l'} \tag{۳}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} \sum_{m=1}^{K_{rp}^t} \frac{S_{r.p}^t QP_p^t BR_{U_{rp}}^m}{MTBF_{U_{rp}}^m} time_{p.U_{rp}}^t \quad \text{رابطه ۴}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \bar{I}_p^t IP_p^t \quad \text{رابطه ۵}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \lambda_p^t BP_p^t \quad \text{رابطه ۶}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \gamma_p^t QP_p^t \quad \text{رابطه ۷}$$

S.T:

$$\sum_{m=1}^M X_{m.c}^t \geq LC \quad \forall t.c \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_{m=1}^M X_{m.c}^t \leq UC \quad \forall t.c \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_{c=1}^C X_{m.c}^t = 1 \quad \forall t.m \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_{r=1}^{R_p^t} S_{r.p}^t = QB_p^t \quad \forall t.p \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\sum_{l=1}^L Y_{c.l}^t = 1 \quad \forall t.c \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\sum_{c=1}^C Y_{c.l}^t \leq 1 \quad \forall t.l \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} S_{r.p}^t QP_p^t time_{p.U_{rp}}^t \leq T'_{m.t} \quad \forall m.t \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$QP_p^t = D_p^t - IP_p^{t-1} + BP_p^{t-1} + IP_p^t - BP_p^t$	$\forall t.p$	رابطه ۱۵
$QP_p^t \leq A_{\infty} QB_p^t$	$\forall t.p$	رابطه ۱۶
$X_{m.c}^t \in (0.1)$	$\forall t.m.c$	رابطه ۱۷
$Y_{c.l}^t \in (0.1)$	$\forall t.c.l$	رابطه ۱۸
$QB_p^t \in (0.1)$	$\forall t.p$	رابطه ۱۹
$S_{r.p}^t \in (0.1)$	$\forall t.r.p$	رابطه ۲۰
$QP_p^t \cdot IP_p^t \cdot BP_p^t \geq 0$ and int	$\forall t.p$	رابطه ۲۱

رابطه ۱ هزینه جابه‌جایی مواد بین سلولی را نشان می‌دهد، این هزینه زمانی اتفاق می‌افتد که قطعات نیاز به پردازش در بیش از یک سلول داشته باشند. همچنین این رابطه سعی می‌کند سلول‌ها را به روشی کارآمد مکان‌یابی کند. رابطه ۲ هزینه جابه‌جایی درون سلولی را نشان می‌دهد و زمانی این جابه‌جایی اتفاق می‌افتد که دو عملیات متوالی در یک مسیریابی به یک سلول اما به ماشین‌های مختلف اختصاص داده شود. هزینه جابه‌جایی ماشین‌ها بین دوره‌ها با استفاده از رابطه ۳ به حداقل می‌رسد. فرض بر این است که این جابه‌جایی به مسافت بین دو سلولی که ماشین جابه‌جا می‌شود، بستگی دارد. رابطه ۴ هزینه خرابی ماشین‌آلات را کمینه می‌کند. رابطه ۵ نشان‌دهنده هزینه انبارداری است که به دلیل نگهداری موجودی در انبارها رخ می‌دهد و معادله ۶ هزینه سفارش معوق را نشان می‌دهد و زمانی رخ می‌دهد که سیستم تولیدی قادر به تکمیل سفارش نباشد و باید بعداً آن را تکمیل کند و رابطه ۷ بیانگر هزینه مواد اولیه برای تولید قطعه می‌باشد. محدودیت‌های ۸ و ۹ تضمین می‌کنند که تعداد ماشین‌ها برای یک سلول از حد پایین و بالای آن تجاوز نمی‌کند. محدودیت ۱۰ نشان می‌دهد که هر نوع ماشین را می‌توان به یک سلول اختصاص داد. محدودیت ۱۱ بیان می‌کند که فقط یک مسیریابی فرایند به‌عنوان مسیر بهینه برای هر قطعه انتخاب می‌شود؛ این مسیریابی تنها در صورتی انتخاب می‌شود که آن نوع قطعه در دوره مربوطه تولید شود. رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ تضمین می‌کنند که هر سلول، تنها به یک مکان و هر مکان، به ترتیب به یک سلول اختصاص داده می‌شود. رابطه ۱۴ تضمین می‌کند که فعالیت زمانی ماشین از کل ظرفیت زمانی ماشین تجاوز نمی‌کند. رابطه ۱۵ تعادل در تولید قطعه را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۶ یک معادله منطقی است و تضمین می‌کند که مقدار یک نوع قطعه تولید شده در یک دوره خاص فقط زمانی می‌تواند یک کمیت مثبت باشد که دودویی متناظر آن برابر با ۱ باشد. در نهایت، محدودیت‌های ۱۷ تا ۲۱ برای تعریف انواع متغیرهای تصمیم هستند.

### خطی سازی

از آنجایی که حل مدل‌های غیرخطی معمولاً برای بهینه‌سازی از پیچیدگی بیشتری برخوردار هستند، مدل پیشنهادی با

روش خطی سازی به عنوان یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط با معرفی مجموعه های جدیدی از متغیرها و محدودیت ها مجدداً فرموله می شود. غیر خطی بودن مدل به دلیل روابط (۱)، (۲)، (۳)، (۴) و محدودیت (۱۴) می باشد. بنابراین برای خطی کردن مدل باید چند متغیر جدید به صورت زیر تعریف شود:

$$SQP_{r,p}^t = S_{r,p}^t QP_p^t \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\psi_{U_{r,p}^m . c . l . U_{r,p}^{m+1} . c' . l'}^t = SQP_{r,p}^t X_{U_{r,p}^m . c}^t Y_{c . l}^t X_{U_{r,p}^{m+1} . c'}^t Y_{c' . l'}^t \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$F_{U_{r,p}^m . U_{r,p}^{m+1} . c}^t = SQP_{r,p}^t X_{U_{r,p}^m . c}^t X_{U_{r,p}^{m+1} . c}^t \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\dot{Z}_{m . c . c' . l . l'}^t = X_{m . c}^t X_{m . c'}^{t+1} Y_{c . l}^t Y_{c' . l'}^{t+1} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

معادلات زیر در رابطه با متغیرهای جدید به مدل اصلی اضافه می شوند:

$$SQP_{r,p}^t \leq QP_p^t + A_\infty (1 - S_{r,p}^t) \quad \forall t . r . p \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$SQP_{r,p}^t \geq QP_p^t - A_\infty (1 - S_{r,p}^t) \quad \forall t . r . p \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$SQP_{r,p}^t \geq 0 \text{ and int} \quad \forall t . r . p \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\psi_{U_{r,p}^m . c . l . U_{r,p}^{m+1} . c' . l'}^t \leq SQP_{r,p}^t + A_\infty (4 - X_{U_{r,p}^m . c}^t - X_{U_{r,p}^{m+1} . c'}^t - Y_{c . l}^t - Y_{c' . l'}^t) \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\forall t . r . p . m . c . c' . l . l'$$

$$\psi_{U_{r,p}^m . c . l . U_{r,p}^{m+1} . c' . l'}^t \geq SQP_{r,p}^t - A_\infty (4 - X_{U_{r,p}^m . c}^t - X_{U_{r,p}^{m+1} . c'}^t - Y_{c . l}^t - Y_{c' . l'}^t) \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$\forall t . r . p . m . c . c' . l . l'$$

$$\psi_{U_{r,p}^m . c . l . U_{r,p}^{m+1} . c' . l'}^t \geq 0 \text{ and int} \quad \forall t . r . p . m . c . c' . l . l' \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$F_{U_{r,p}^m . U_{r,p}^{m+1} . c}^t \leq SQP_{r,p}^t + A_\infty (2 - X_{U_{r,p}^m . c}^t - X_{U_{r,p}^{m+1} . c}^t) \quad \forall t . r . p . m . c \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$F_{U_{r,p}^m . U_{r,p}^{m+1} . c}^t \geq SQP_{r,p}^t - A_\infty (2 - X_{U_{r,p}^m . c}^t - X_{U_{r,p}^{m+1} . c}^t) \quad \forall t . r . p . m . c \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$F_{U_{r,p}^m . U_{r,p}^{m+1} . c}^t \geq 0 \text{ and int} \quad \forall t . r . p . m . c \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$4 \dot{Z}_{m . c . c' . l . l'}^t \leq X_{m . c}^t + X_{m . c'}^{t+1} + Y_{c . l}^t + Y_{c' . l'}^{t+1} \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$\forall t = 1, \dots, T - 1 . m . c . c' . l . l'$$



$$\dot{Z}_{m.c.c'.l.l'}^t \geq X_{m.c}^t + X_{m.c'}^{t+1} + Y_{c.l}^t + Y_{c'.l'}^{t+1} - 3 \quad \text{رابطه ۳۶}$$

$$\forall t = 1, \dots, T - 1. m. c. c'. l. l'$$

$$\dot{Z}_{m.c.c'.l.l'}^t \in (0,1) \quad \text{رابطه ۳۷}$$

در نهایت با جای گذاری متغیرهای جدید و اضافه نمودن محدودیت‌های جدید، شکل خطی مدل به صورت زیر می‌شود:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} \sum_{m=1}^{K_{rp-1}^t} \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L \tilde{A}_1 \text{Diss}_{l,l'} \psi_{U_{r,p}^m.c.l.U_{r,p}^{m+1}.c'.l'}^t \quad \text{رابطه ۳۸}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} \sum_{m=1}^{K_{rp-1}^t} \sum_{c=1}^C \tilde{A}_2 F_{U_{r,p}^m.U_{r,p}^{m+1}.c}^t \quad \text{رابطه ۳۹}$$

$$+ \sum_t^{T-1} \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{c'=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L \tilde{A}_3 \dot{Z}_{m.c.c'.l.l'}^t \text{Diss}_{l,l'} \quad \text{رابطه ۴۰}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} \sum_{m=1}^{K_{rp}^t} \frac{SQP_{r,p}^t BR_{U_{rp}^m}}{MTBF_{U_{rp}^m}} \text{time}_{p.U_{rp}^m}^t \quad \text{رابطه ۴۱}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \tilde{I}_p^t IP_p^t \quad \text{رابطه ۴۲}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \lambda_p^t BP_p^t \quad \text{رابطه ۴۳}$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \gamma_p^t QP_p^t \quad \text{رابطه ۴۴}$$

S.T:

محدودیت‌های ۸ تا ۱۳، ۱۵ تا ۲۱ و ۲۶ تا ۳۷

$$\sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^{R_p^t} SQP_{r,p}^t \text{time}_{p.U_{rp}^m}^t \leq T'_{m,t} \quad \forall m. t \quad \text{رابطه ۴۵}$$

## مطالعه موردی

در این بخش، برای نشان دادن عملکرد مدل از داده‌های یک شرکت درب و پنجره‌سازی UPVC استفاده شده است. شرکت مذکور از ۹ ماشین صنعتی که در ۳ سلول ماشینی چیدمان شده‌اند، برای تولید ۱۵ قطعه از یک نمونه درب استفاده می‌کند. هر یک از این سلول‌های تولیدی دارای حداکثر ۳ و حداقل ۲ ظرفیت ماشین می‌باشند. برنامه‌ریزی تولید برای دو دوره کاری ۷ روزه با ۸ ساعت کار در روز همراه با اضافه‌کاری ارزیابی شده است. از آنجایی که بعضی از ماشین‌آلات چندکاره هستند، هر قطعه تولیدی دارای ۱ تا ۳ مسیر پردازش است که انتخاب یک مسیر بهینه بستگی به ظرفیت و خرابی ماشین‌آلات دارد. اطلاعات مربوط به قطعات و ماشین‌آلات در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است. جدول ۳ به ترتیب اطلاعات مربوط به هزینه خرابی ماشین، میانگین زمان بین دو خرابی و ظرفیت ماشین‌آلات را نشان می‌دهد و همه ماشین‌آلات ظرفیت ۸ ساعت کار و بعضی از آن‌ها هم ظرفیت بیشتر از ۸ ساعت کار را دارند. برای مثال، ماشین نوع ۲ در دوره تولیدی اول ۳۵۰۰ دقیقه ظرفیت زمانی دارد که بعد از هر ۳۳۶۰ دقیقه پردازش از کار می‌افتد و هزینه تعمیر آن ۱۳۰۰ هزار تومان است.

جدول ۳. اطلاعات مربوط ماشین‌آلات

اطلاعات									ماشین
M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
۱۲۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۶۰۰	۱۱۰۰	۲۳۰۰	۱۸۰۰	۱۳۰۰	۱۰۰۰	هزینه خرابی (هزار تومان)
۳۹۰۰	۳۲۰۰	۳۵۰۰	۳۰۰۰	۳۴۰۰	۲۶۶۰	۲۹۰۰	۳۳۶۰	۴۰۰۰	میانگین زمانی بین دو خرابی (دقیقه)
۳۴۰۰	۳۵۰۰	۳۶۵۰	۳۸۸۰	۳۶۵۰	۳۷۲۰	۳۶۰۰	۳۵۰۰	۳۳۶۰	ظرفیت ماشین (دقیقه)
۳۵۰۰	۳۶۵۰	۳۳۶۰	۳۹۰۰	۳۵۰۰	۳۷۵۰	۳۸۰۰	۳۳۶۰	۳۶۲۰	

جدول ۴ اطلاعات مربوط به توالی عملیات، مسیرهای پردازش قطعه، زمان پردازش قطعه روی ماشین، تقاضای قطعه، هزینه نگهداری موجودی و سفارش معوق می‌باشد. هزینه نگهداری موجودی همان هزینه انبارداری قطعه و هزینه سفارش معوق شامل هزینه بیکاری کارگر و ماشین، جریمه مالی از سوی مشتری و خارج شدن ماشین‌آلات از تنظیمات در صورت عدم تولید می‌باشد. شایان ذکر است که هزینه جابه‌جایی یک قطعه درون و بین سلول تابعی از هزینه حقوق کارگر است.

جدول ۴. اطلاعات مربوط قطعه

دوره تولیدی ۱						
قطعه	مسیر	توالی عملیات	زمان پردازش (دقیقه)	تقاضا	هزینه انبارداری (هزار تومان)	هزینه سفارش معوق (هزار تومان)
۱	R1	m3-m4-m6	۳-۵-۸	۱۲۰	۷/۵	۲۵۲
	R2	m1-m9-m6	۳-۵-۷			
۲	R1	m8-m2-m5	۵-۳-۴	۱۸۰	۱۵	۲۱۰
	R2	m1-m9-m5	۶-۴-۵			

دوره تولیدی ۱						
هزینه سفارش معوق (هزار تومان)	هزینه انبارداری (هزار تومان)	تقاضا	زمان پردازش (دقیقه)	توالی عملیات	مسیر	قطعه
۱۸۰	۴/۵	۱۲۰	۴-۶-۷	m3-m4-m6	R1	۳
			۴-۶-۷	m3-m9-m6	R2	
۱۵۰	۹	۱۳۵	۵-۶-۵	m5-m8-m7	R1	۴
۱۴۷	۱۲	۱۳۲	۶-۵-۳	m1-m2-m8	R1	۵
			۹-۵	m9-m3	R2	
۱۶۸	۷/۲	۱۱۸	۳-۴-۴	m3-m4-m6	R1	۶
۱۸۰	۱۵	۱۹۰	۲-۳-۶	m2-m8-m5	R1	۷
			۲-۴-۵	m9-m3-m5	R2	
۲۱۰	۴/۵	۱۰۰	۷-۸	m3-m6	R1	۸
			۷-۸	m3-m6	R2	
۱۸۹	۱۰/۵	۱۶۰	۸-۳-۲	m9-m3-m4	R1	۹
			۸-۳-۳	m2-m8-m4	R2	
۲۱۰	۱۳/۵	۱۲۵	۵-۷	m3-m5	R1	۱۰
			۴-۵-۳	m1-m5-m8	R2	
۲۷۳	۶	۱۰۰	۲-۷-۳-۵	m9-m4-m6-m1	R1	۱۱
۱۵۰	۹/۷	۱۵۰	۵-۴	m3-m4	R1	۱۲
			۶-۴	m3-m9	R2	
۱۵۰	۹	۱۱۰	۵-۵-۵	m1-m7-m6	R1	۱۳
			۵-۵-۴	m8-m7-m6	R2	
۲۹۱	۱۳/۵	۱۳۲	۷-۶-۶	m8-m5-m7	R1	۱۴
۲۴۰	۱۳	۱۳۰	۵-۴-۳	m3-m4-m6	R1	۱۵
			۵-۵-۴	m8-m9-m6	R2	

دوره تولیدی ۲						
هزینه سفارش معوق (هزار تومان)	هزینه انبارداری (هزار تومان)	تقاضا	زمان پردازش (دقیقه)	توالی عملیات	مسیر	قطعه
۲۶۸/۸	۹	۱۰۰	۳-۵-۷	m1-m4-m6	R1	۱
			۳-۵-۸	m8-m9-m6	R2	
۲۲۴	۱۸	۱۴۸	۶-۳-۴	m8-m2-m5	R1	۲
			۶-۴-۵	m3-m9-m5	R2	
۱۹۲	۵/۴	۱۱۷	۴-۶-۶	m1-m4-m6	R1	۳
۱۶۰	۱۰/۸	۱۲۲	۴-۷-۵	m5-m3-m7	R1	۴
			۴-۶-۵	m5-m8-m7	R2	
۱۵۶/۸	۱۴/۴	۱۲۰	۸-۴	m2-m8	R1	۵
			۹-۵	m9-m3	R2	
			۸-۴	m2-m1	R3	
۱۷۹/۲	۸/۶	۱۱۰	۳-۴-۴	m1-m4-m6	R1	۶
			۳-۵-۴	m3-m9-m6	R2	

دوره تولیدی ۲						
قطعه	مسیر	توالی عملیات	زمان پردازش (دقیقه)	تقاضا	هزینه انبارداری (هزار تومان)	هزینه سفارش معوق (هزار تومان)
۷	R1	m9-m3-m5	۲-۳-۵	۱۶۰	۱۸	۱۹۲
۸	R1	m1-m6	۷-۹	۱۱۸	۵/۴	۲۲۴
	R2	m3-m6	۷-۷			
	R3	m8-m6	۷-۸			
۹	R1	m2-m8-m4	۸-۴-۲	۱۱۸	۱۲/۶	۲۰۱/۶
۱۰	R1	m8-m5	۵-۸	۱۳۶	۱۶/۲	۲۲۴
	R2	m3-m5-m1	۴-۵-۵			
۱۱	R1	m9-m6-m1	۳-۷-۸	۱۲۵	۷/۲	۲۹۱/۲
	R2	m2-m4-m6-m1	۳-۷-۳-۵			
۱۲	R1	m3-m9	۶-۵	۱۲۰	۱۱/۷	۱۶۰
	R2	m1-m4	۵-۵			
۱۳	R1	m8-m7-m6	۵-۴-۴	۱۰۷	۱۰/۸	۱۶۰
	R2	m3-m7-m6	۵-۴-۵			
۱۴	R1	m3-m5-m7	۸-۶-۵	۱۴۲	۱۶/۲	۳۱۰/۰۴
۱۵	R1	m1-m4-m6	۶-۴-۴	۱۲۵	۱۵/۶	۲۵۶
	R2	m3-m4-m6	۶-۴-۳			
	R3	m1-m9-m6	۶-۵-۴			

همچنین ۴ مکان نامزد برای احداث این ۳ سلول تولیدی پیشنهاد شده است؛ که جدول ۵ فاصله بین مکان‌های نامزد را نشان می‌دهد و برای سهولت کار از یک دهم مقدار واقعی استفاده شده است.

جدول ۵. ماتریس فاصله بین مکان‌های نامزد

۴	۳	۲	۱	
۲	۳	۱		۱
۳	۲		۱	۲
۵		۲	۳	۳
	۵	۳	۲	۴

### یافته‌های پژوهش

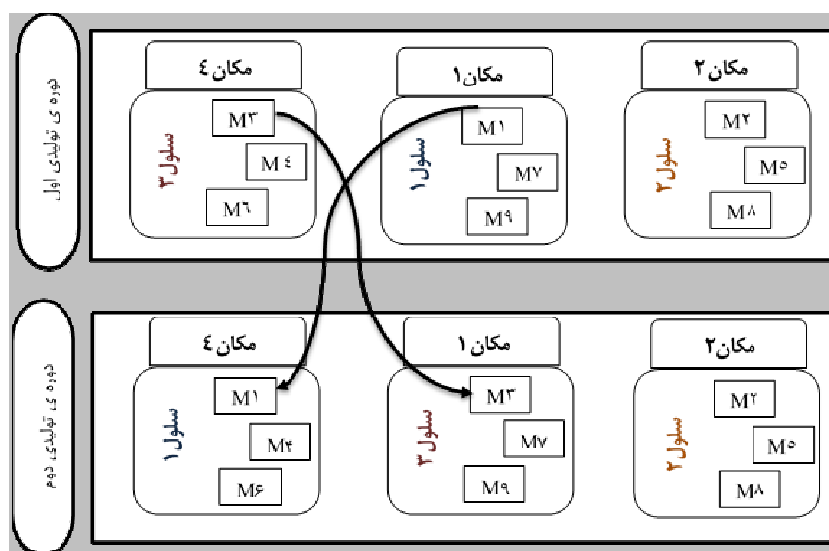
مطالعه موردی مذکور با استفاده از نرم‌افزار ۲۴.۸.۲ GAMS با سالور GUROBI که یک سالور پیشرفته برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌باشد، در رایانه شخصی با پردازنده ۲.۳ گیگاهرتز با ۴ گیگابایت رم حل شده است. مدل فرموله شده باعث کاهش هزینه‌های جابه‌جایی بین و درون سلولی، پیکربندی مجدد، خرابی ماشین‌آلات

و برنامه‌ریزی تولید از جمله: نگهداری و سفارش معوق قطعه شده است و جدول ۶، این مقادیر هزینه کمینه شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶. مقادیر هزینه تابع هدف (برحسب هزار تومان)

۴۰۰	هزینه پیکربندی	۳۱۶۸	هزینه سفارش معوق
۲۳۰۴/۵	هزینه جابه‌جایی درون سلولی	۳۹۷/۵	هزینه نگهداری
۳۶۹۳	هزینه جابه‌جایی بین سلولی	۵۷۳۳۵۵	هزینه تولید
۶۰۹۷۵۹/۰۲۸	هزینه کل	۲۶۴۴۱/۰۲۸	هزینه خرابی ماشین

در شکل ۱، راه‌حل بهینه مربوط به چیدمان بین سلولی و گروه‌بندی ماشین‌ها در دو دوره را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دوره تولید اول، سلول ۱ در مکان ۱، سلول ۲ در مکان ۴ و سلول ۳ در مکان ۲ و در دوره تولید دوم، سلول ۱ در مکان ۴، سلول ۲ در مکان ۲ و سلول ۳ در مکان ۱ ایجاد شده‌اند و در هر دو دوره از مکان نامزد ۳ برای احداث سلول استفاده نشده است. در ادامه، ماشین‌های  $m1$  و  $m7$  و  $m9$ ،  $m2$  و  $m5$  و  $m8$ ،  $m3$  و  $m4$  و  $m6$  به ترتیب در سلول‌های ۱ و ۳ و ۲ در دوره تولید اول جانمایی شده‌اند. در دوره تولید دوم، گروه‌بندی ماشین‌آلات در سلول ۲ و همچنین مکان احداث سلول تغییر نکرده است ولی در سلول ۱ و ۳ گروه‌بندی ماشین‌آلات و همچنین مکان احداثی سلول‌ها تغییر کرده است.



شکل ۱. پیکربندی سلول‌ها در دو دوره تولید

همچنین همان‌طور که قبلاً بیان شد، پیکربندی یک سلول در یک دوره ممکن است برای دوره بعد بهینه نباشد که در اینجا با جابه‌جایی ماشین‌های ۱ و ۳ پیکربندی جدیدی در دوره ۲ به وجود آمد. با توجه به جدول ۷ می‌توان گفت، این دو جابه‌جایی باعث بهبود ۳۵۳۸۷۰ تومانی تابع هدف شد که در واقع مسئله ترجیح داد با اعمال هزینه حذف، حمل و نصب ماشین بین دو دوره، هزینه کل تولید را کاهش دهد.

جدول ۷. مزیت بالقوه بیکربندی مجدد در یک سیستم تولید سلولی پویا

بهبود (هزار تومان)	تابع هدف بدون بیکربندی مجدد (هزار تومان)	تابع هدف با بیکربندی مجدد (هزار تومان)
۳۵۳/۸۷	۶۱۰۱۱۲/۸۹۸	۶۰۹۷۵۹/۰۲۸

جدول ۸ و ۹، مسیر بهینه هر قطعه و تعداد جابه‌جایی قطعه بین و درون سلولی را به ترتیب در دوره‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. در دوره ۱، قطعات ۱، ۳، ۶، ۸ و ۱۵ که جز یک خانواده قطعه هستند در سلول ۳ و قطعه ۷ در سلول ۲ در درون یک سلول تولید می‌شوند و قطعات ۱۱، ۱۲، ۹، ۱۰ و ۱۳ برای پردازش بین سلول‌های ۱ و ۳ و قطعات ۱۴، ۴، ۵ و ۱۰ بین سلول‌های ۱ و ۲ که معروف به قطعات استثنایی هستند، جابه‌جا می‌شوند.

جدول ۸. مسیر بهینه قطعات در دوره تولید ۱

دوره تولید ۱																قطعه ماشین	
P15	P8	P3	P6	P10	P14	P5	P4	P2	P7	P13	P12	P11	P9	P1			
				۱		۱		۱		۱		۴		۱	M1	سلول ۱	
					۳		۳			۲					M7		
								۲			۲	۱	۱	۲	M9		
						۲			۱						M2	سلول ۲	
				۳	۱	۳	۲		۲						M8		
				۲	۲		۱	۳	۳						M5		
۱	۱	۱	۱								۱		۲		M3	سلول ۳	
۲		۲	۲									۲	۳		M4		
۳	۲	۳	۳							۳		۳		۳	M6		

و همچنین در جدول ۹، قطعات ۱، ۸، ۶، ۳ و ۱۵ در سلول ۱، قطعات ۲ و ۱۰ در سلول ۲ و قطعات ۱۲ و ۵ در سلول ۳ به صورت درون سلولی تولید می‌شوند و بقیه جزء قطعات استثنایی هستند.

جدول ۹. مسیر بهینه قطعات در دوره تولید ۲

دوره تولید ۲															قطعه ماشین	
P13	P5	P12	P14	P7	P4	P10	P2	P9	P15	P11	P8	P6	P3	P1		
									۱	۳	۱	۱	۱	۱	M1	سلول ۱
								۳	۲			۲	۲	۲	M4	
									۳	۲	۲	۳	۳	۳	M6	
							۲	۱							M2	سلول ۲
۱					۲	۱	۱	۲							M8	
			۲	۳	۱	۲	۳								M5	
	۲	۱	۱	۲											M3	سلول ۳
۲			۳		۳										M7	
	۱	۲		۱						۱					M9	

جدول ۱۰، برنامه بهینه توالی تولید عملیات را نشان می‌دهد. مقدار تقاضا برای هر نوع قطعه از طریق تولید و موجودی انبار برآورده می‌شود. به عنوان مثال، تقاضا برای قطعه نوع ۲ در دوره تولیدی اول ۱۸۰ عدد قطعه می‌باشد، در حالی که ۱۹۱ قطعه تولید می‌شود. بنابراین ۱۱ قطعه برای دوره بعد به عنوان موجودی در انبار نگهداری می‌شود که می‌تواند بخشی از تقاضای دوره بعد را تأمین کند. از طرفی در دوره دوم برای قطعه نوع ۸، تقاضا ۱۱۸ قطعه است که فقط ۱۰۶ قطعه از آن تولید شده است. در نتیجه، تقاضا به طور کامل تأمین نشده است و این ۱۲ واحد به عنوان سفارش معوق در نظر گرفته می‌شود و این سفارش تولید نشده را می‌توان در دوره سوم در صورت نداشتن محدودیت منابع، تأمین کرد.

جدول ۱۰. برنامه توالی تولید عملیات

قطعه	دوره ۱				دوره ۲			
	موجودی	سفارش معوق	تولید	تقاضا	موجودی	سفارش معوق	تولید	تقاضا
۱	۳		۱۲۳	۱۲۰			۹۷	۱۰۰
۲	۱۱		۱۹۱	۱۸۰			۱۳۷	۱۴۸
۳			۱۲۰	۱۲۰			۱۱۷	۱۱۷
۴			۱۳۵	۱۳۵			۱۲۲	۱۲۲
۵			۱۳۲	۱۳۲			۱۲۰	۱۲۰
۶			۱۱۸	۱۱۸			۱۱۰	۱۱۰
۷			۱۹۰	۱۹۰			۱۶۰	۱۶۰
۸			۱۰۰	۱۰۰		۱۲	۱۰۶	۱۱۸
۹	۶		۱۶۶	۱۶۰			۱۱۲	۱۱۸
۱۰			۱۲۵	۱۲۵			۱۳۶	۱۳۶
۱۱	۱۱		۱۱۱	۱۰۰			۱۱۴	۱۲۵
۱۲			۱۵۰	۱۵۰			۱۲۰	۱۲۰
۱۳			۱۱۰	۱۱۰		۳	۱۰۴	۱۰۷
۱۴	۶		۱۳۸	۱۳۲			۱۳۶	۱۴۲
۱۵			۱۳۰	۱۳۰			۱۲۵	۱۲۵

علاوه بر این، به عنوان یک تحلیل حساسیت، تأثیر MTBF بر تابع هدف و بخش‌های آن (برحسب هزار تومان) در جدول ۱۱ نشان داده شده است. طبق جدول، با افزایش  $MTBF \times 1$  به  $MTBF \times 1/5$ ، به عبارت دیگر با کاهش نرخ خرابی ماشین‌ها، مقدار کل تابع هدف و هزینه خرابی به ترتیب به میزان ۴۹۶۰۰۴۴ و ۵۶۲۱۰۱۶ تومان کاهش می‌یابد و بالعکس، با کاهش  $MTBF \times 1$  به  $MTBF \times 0.75$ ، مقدار کل تابع هدف و هزینه خرابی ماشین‌آلات به میزان ۸۸۰۹۷۳۱ و ۸۶۹۸۷۵۹ تومان افزایش پیدا می‌کند. می‌توانیم درک کنیم که این تغییرات در تابع هدف عمدتاً به تغییرات در هزینه خرابی ماشین‌آلات مربوط می‌شود. همچنین این تغییرات تأثیر بسزایی در مسیریابی قطعه با توجه به معادله ۴ دارد.

جدول ۱۱. تأثیر MTBF بر مقادیر تابع هدف (اعتبارسنجی براساس تحلیل حساسیت)

تغییر در میانگین زمان بین دو خرابی (MTBF)	هزینه							
	کل	جابه‌جایی بین سلولی	جابه‌جایی درون سلولی	پیکربندی	خرابی ماشین	تولید	نگهداری	سفارش معوق
$0.25 \times MTBF$	۶۳۵۹۲۷/۷۱۷	۴۴۲۶	۲۱۴۲	۴۰۰	۵۲۰۳۲/۲۱۷	۵۷۳۳۳۰	۳۹۷	۳۲۰۰
$0.75 \times MTBF$	۶۱۸۵۶۸/۷۵۹	۳۸۶۲	۲۲۵۵	۴۰۰	۳۵۱۳۹/۷۵۹	۵۷۳۳۷۱	۴۴۱	۳۲۰۰
$1 \times MTBF$	۶۰۹۷۵۹/۰۲۸	۳۶۹۳	۲۳۰۴/۵	۴۰۰	۲۶۴۴۱/۰۲۸	۵۷۳۳۵۵	۳۹۷/۵	۳۱۶۸
$1.25 \times MTBF$	۶۰۴۷۹۸/۹۸۴	۴۸۱۹	۲۰۲۵	۲۰۰	۲۰۸۱۹/۹۸۴	۵۷۳۳۰۵	۳۹۷	۳۲۳۲

### بررسی وضعیت موجود و مطلوب

با توجه به طراحی مدل ریاضی برای بهینه‌سازی سیستم تولید سلولی شرکت مورد مطالعه، شکل ۱ که استخراج شده از نتایج حل مدل است با پیاده‌سازی در واحدهای تولیدی شرکت، هزینه کل را به میزان ۲/۲۶ درصد و هزینه جابه‌جایی بین سلولی به میزان ۶۰/۹۴ درصد (مطابق جدول ۱۲) بهبود می‌دهد. از آنجایی که تولید قطعات به صورت درون سلولی نشان دهنده وضعیت مطلوب سلول‌های تولید است، حرکات درون سلولی در سیستم تولیدی یک روند افزایشی را خواهد داشت.

جدول ۱۲. بررسی وضعیت موجود و مطلوب

درصد بهبود	وضعیت مطلوب	وضعیت موجود	هزینه کل
۲/۲۶	۶۰۹۷۵۹۰۲۸	۶۲۳۸۷۳۶۰۷	هزینه کل
۶۰/۹۴	۳۶۹۳۰۰۰	۹۴۵۵۰۰۰	هزینه جابه‌جایی بین سلولی
۶۰/۹۴	۳۶۹۳	۹۴۵۵	تعداد جابه‌جایی بین سلولی
۶۳/۲	۲۳۰۴۵۰۰	۱۴۱۲۰۰۰	هزینه جابه‌جایی درون سلولی
۶۳/۲	۴۶۰۹	۲۸۲۴	تعداد جابه‌جایی درون سلولی

همچنین وضعیت موجود یک وضعیت ایستاست و در مقابل نوسان‌های تقاضا انعطاف‌پذیر نیست. بی‌توجهی به این مسئله به افزایش تعداد حرکات بین سلولی و کاهش فعالیت‌های درون سلولی منجر می‌شود و از آنجایی که خرید ماشین‌آلات نیازمند وجود فضای فیزیکی برای نصب دستگاه‌های جدید می‌باشد و برون سپاری قطعات هزینه‌های بسیار بالایی برای شرکت‌های کوچک دارد، شیوه سوم که جابه‌جایی ماشین‌آلات بین سلول‌ها می‌باشد، برای مقابله با این امر مهم ضرورت پیدا می‌کند که در وضعیت مطلوب این شیوه پیاده‌سازی شده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

سیستم تولید سلولی یکی از جذاب‌ترین جنبه‌های فلسفه معروف فناوری گروهی است که در مقایسه با سیستم‌های تولید کارگاهی یا تولید محصولی پاسخ سریع‌تری به تقاضای بازار می‌دهند، به همین دلیل به‌طور چشمگیری توسط



سیستم‌های تولیدی به شکل هوشمندانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مسائل مهم در CMS، ماهیت پویایی سیستم، به دلیل ترکیب محصول متفاوت یا تغییر در حجم تقاضاست که به معرفی مسئله تشکیل سلول پویا منجر شده است. از آنجایی که سلول‌های تولیدی یک سیستم در کل دوره‌های تولیدی (هفتگی / یا ماهانه / یا فصلی) می‌بایست بهینه و کارآمد باشند، می‌توان با جابه‌جایی ماشین‌آلات بین دوره‌های تولیدی این انعطاف‌پذیری را در تشکیل سلول‌های بهینه به وجود آورد. یافته‌های پژوهش اجمل شریف و همکاران (۲۰۲۰) که به مقایسه سیستم‌های تولید سلولی استاتیک و دینامیک پرداختند، نشان داد که CMS پویا در مقایسه با CMS کلاسیک مقرون به صرفه‌تر و مؤثرتر است و با استقرار پیکربندی مجدد سلول‌ها، هزینه کل تولید کاهش پیدا می‌کند که در این پژوهش به کاهش ۳۵۳۸۷۰ تومانی تابع هدف منجر شد. به همین منظور در این پژوهش یک مدل ریاضی غیرخطی عددصحیح مختلط (MINLP) پیشنهاد شد که علاوه بر مسئله تشکیل سلول در محیط پویا، به‌طور هم‌زمان به مسئله چیدمان سلول‌ها در مکان‌های کاندید و برنامه‌ریزی تولید می‌پردازد. بسیاری از عوامل تولید در دنیای واقعی، از جمله: تقاضای متفاوت در هر دوره، حجم تولید، توالی عملیات، مسیریابی فرایند جایگزین، زمان پردازش قطعه روی ماشین، ماشین‌آلات چندکاره، جابه‌جایی ماشین‌آلات بین دوره‌های تولیدی در مدل مدنظر قرار داده شد. در ادامه، برای کاهش پیچیدگی و زمان بر نبودن در حل، آن را خطی‌سازی و برای تأیید عملکرد و کارایی مدل، با استفاده از داده‌های یک شرکت صنعتی در نرم‌افزار GAMS با سالور GUROBI اعتبارسنجی کردیم.

مدل در عمل نشان داد، توانایی آن را دارد که بتواند نیازهای دوره بعد را شناسایی کند و در دوره قبل با در نظر گرفتن محدودیت منابع از جمله ظرفیت زمانی ماشین‌آلات در سلول‌های تولیدی آن‌ها را تأمین کند و برعکس، توانایی شناسایی نیازهای دوره قبل به دلیل کسری ظرفیت زمانی ماشین در سیستم و تولید سفارش‌های معوق در دوره بعد در صورت نداشتن محدودیت زمانی را دارد. جدول ۱۴ نشان‌دهنده این پایش توالی تولید می‌باشد و شرکت مورد مطالعه می‌تواند به‌منظور تأمین نیازهای مشتریان، کاهش هزینه‌های فرصت از دست‌رفته و مدیریت بهتر سفارش‌های دوره‌های آتی، ارتباط پیوسته و مؤثرتری را بین مدیر تولید و مدیر ثبت سفارش و فروش ایجاد کند. در ادامه، به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی به بررسی تأثیر MTBF در عملکرد سیستم پرداخته شد و مشاهدات نشان داد که کاهش میانگین زمان بین دو خرابی (MTBF) در مدل ریاضی باعث افزایش هزینه‌هایی از جمله هزینه خرابی ماشین‌آلات و هزینه کل تولید می‌شود و این افزایش نرخ خرابی باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود که جدول ۱۰ بیانگر این تأثیرات در مدل ریاضی است. به همین منظور برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه‌های تعمیرات، پیشنهاد می‌شود عملیات تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه، بر مبنای میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) در سیستم تولید پیاده‌سازی شود. در ادامه، مشاهدات همانند پژوهش خوراسگانی و غفاری (۲۰۱۸) نشان داد که هزینه خرابی ماشین‌آلات در طول زمان، نقش مهمی در انتخاب مسیر پردازش هر قطعه دارد. به دلیل محدودیت‌های پژوهش، پیشنهاد می‌شود ظرفیت زمان کاری نیروی انسانی که نقش مهمی در برنامه‌ریزی تولید دارد، به پیچیدگی مدل اضافه شود. از آنجایی که در پژوهش، جابه‌جایی بین سلولی تحت تأثیر مسافت طی شده بین سلول‌ها می‌باشد، می‌توان با در نظر گرفتن مسافت طی شده بین ماشین‌آلات مدل پیشنهادی را توسعه داد. همچنین محققان در آینده با در نظر گرفتن فرض غیر قطعی یا احتمالی بودن هزینه‌های برنامه‌ریزی تولید، می‌توانند واقعیت نوسان‌های اقتصادی را در مدل خود نشان بدهند.

## References

- Ajmal Sheriff, M., Jayakumar, V., Ahmed, T., & Kumar, P. S. (2020). A comparative study on design of static and dynamic cellular manufacturing system under deterministic production environment. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1468-1477.
- Al-Zuheri, A., Ketan, H. S., & Vlachos, I. (2022). Grouping technology and a hybrid genetic algorithm-desirability function approach for optimum design of cellular manufacturing systems. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 4(4), 267-285.
- Bayram, H. & Şahin, R. (2016). A comprehensive mathematical model for dynamic cellular manufacturing system design and Linear Programming embedded hybrid solution techniques. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 10-29.
- Danilovic, M., & Ilic, O. (2019). A novel hybrid algorithm for manufacturing cell formation problem. *Expert Systems with Applications*, 135, 327-350.
- Deep, K., & Singh, P. K. (2015). Design of robust cellular manufacturing system for dynamic part population considering multiple processing routes using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 155-163.
- Dehnavi-Arani, S., Sadegheih, A., Zare Mehrjerdi, Y., & Honarvar, M. (2020). A new bi-objective integrated dynamic cell formation and AGVs' dwell point location problem on the inter-cell unidirectional single loop. *Soft Computing*, 24, 16021-16042.
- Doroudyan, M. & Khoshghalb, A. (2021). Robust design for facility layout problem in cellular manufacturing systems with uncertain demand. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 13 (Special issue: 17th International Industrial Engineering Conference), 1-11.
- Farughi, H., Mostafayi, S. & Afrasiabi, A. (2019). Bi-objective robust optimization model for configuring cellular manufacturing system with variable machine reliability and parts demand: A real case study. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 6(2), 120-146.
- Feng, H., Xi, L., Xia, T., & Pan, E. (2018). Concurrent cell formation and layout design based on hybrid approaches. *Applied Soft Computing*, 66, 346-359.
- Forghani, K., & Ghomi, S. F. (2020). Joint cell formation, cell scheduling, and group layout problem in virtual and classical cellular manufacturing systems. *Applied Soft Computing*, 97, 106719.
- Forghani, K., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Kia, R. (2020). Solving an integrated cell formation and group layout problem using a simulated annealing enhanced by linear programming. *Soft Computing*, 24(15), 11621-11639.
- Ghezavati, V. R. (2015). Designing integrated cellular manufacturing systems with tactical decisions. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 38(3), 332-341.
- Golmohammadi, A. M., Honarvar, M., Tavakkoli\_Moghaddam, R., & Hosseini-Nasab, H. (2021). A Novel Cell Layout Problem with Reliability and Stochastic Failures. *International Journal of Supply and Operations Management*, 8(2), 165-175.

- Golmohammadi, A., Asadi, A., Amiri, Z., & Behzad, M. (2018). Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands. *Management Science Letters*, 8(11), 1133-1148.
- Hooshyar Telegraphi, A., & Bulgak, A. A. (2021). A mathematical model for designing a reliable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing system considering alternative and contingency process routings. *SN Applied Sciences*, 3, 1-22.
- Karoum, B., & Elbenani, Y. B. (2017). A clonal selection algorithm for the generalized cell formation problem considering machine reliability and alternative routings. *Production Engineering*, 11, 545-556.
- Karoum, B., & Elbenani, Y. B. (2019). Optimization of the material handling costs and the machine reliability in cellular manufacturing system using cuckoo search algorithm. *Neural Computing and Applications*, 31, 3743-3757.
- Khamlichi, H., Oufaska, K., Zouadi, T., & Dkiouak, R. (2020). A Hybrid GRASP algorithm for an integrated production planning and a group layout design in a dynamic cellular manufacturing system. *IEEE Access*, 8, 162809-162818.
- Kheirikhah, A., & Ghajari, A. (2018). A three-phase heuristic approach to solve an integrated cell formation and production planning problem. *Uncertain Supply Chain Management*, 6(2), 213-228.
- Kumar, R., & Singh, S. P. (2017). A similarity score-based two-phase heuristic approach to solve the dynamic cellular facility layout for manufacturing systems. *Engineering Optimization*, 49(11), 1848-1867.
- Maroof, A., Tariq, A., & Noor, S. (2021). An integrated approach for the operational design of a cellular manufacturing system. *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*, 40(2), 265-278.
- Mehdizadeh, E., Shamoradifar, M., & Niaki, S. T. A. (2020). An integrated mathematical programming model for a dynamic cellular manufacturing system with limited resources. *International Journal of Services and Operations Management*, 37(1), 1-26.
- Mukattash, A. M., Tahboub, K. K. & Adil, M. B. (2018). Interactive design of cellular manufacturing systems, optimality and flexibility. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12, 769-776.
- Nasiri, M. M., & Naseri, F. (2019). Metaheuristic algorithms for the generalised cell formation problem considering machine reliability. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 9(4), 469-484.
- Perera, G., & Ratnayake, V. (2019). Mathematical model for dynamic cell formation in fast fashion apparel manufacturing stage. *Journal of Industrial Engineering International*, 15, 1-16.
- Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H. & Ravanbakhsh, M. (2019). Dynamic cellular manufacturing system considering machine failure and workload balance. *Journal of Industrial Engineering International*, 15, 25-40.

- Rahimi, V., Arkat, J., & Farughi, H. (2020). A vibration damping optimization algorithm for the integrated problem of cell formation, cellular scheduling, and intercellular layout. *Computers & Industrial Engineering*, 143, 106439.
- Rezazadeh, H., & Khiali-Miab, A. (2017). A two-layer genetic algorithm for the design of reliable cellular manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(3), 315-332.
- Rheault, M., Drolet, J. R., & Abdounour, G. (1995). Physically reconfigurable virtual cells: a dynamic model for a highly dynamic environment. *Computers & Industrial Engineering*, 29(1-4), 221-225.
- Sadat Khorasgani, S. M., & Ghaffari, M. (2018). Developing a cellular manufacturing model considering the alternative routes, tool assignment, and machine reliability. *Journal of Industrial Engineering International*, 14(3), 627-636.
- Saeidi, S., & Nikakhtar, N. A revised model for solving the Cell formation problem and solving by gray wolf optimization algorithm. (2020). *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 9(7), 81-94.
- Sakhaii, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bagheri, M., & Vatani, B. (2016). A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 169-191.
- Salimpour, S., Pourvaziri, H., & Azab, A. (2021). Semi-robust layout design for cellular manufacturing in a dynamic environment. *Computers & Operations Research*, 133, 105367.
- Saxena, L., & Jain, P. (2011). Dynamic cellular manufacturing systems design-a comprehensive model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53 (1), 11-34.
- Soto, R., Crawford, B., Olivares, R., Carrasco, C., Rodriguez-Tello, E., Castro, C., ... & de la Fuente-Mella, H. (2020). A reactive population approach on the dolphin echolocation algorithm for solving cell manufacturing systems. *Mathematics*, 8(9), 1389.
- Vafaeinezhad, M., Kia, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2016). Robust optimization of a mathematical model to design a dynamic cell formation problem considering labor utilization. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(1), 45-60.
- Xue, G., & Offodile, O. F. (2020). Integrated optimization of dynamic cell formation and hierarchical production planning problems. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106155.