



## A Mathematical Model for Dynamic Cell Formation Problem Based on Scheduling, Worker Allocation, and Financial Resources Constraint

**Mohammad Bagher Fakhrzad** 

\*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. E-mail: mfakhrzad@yazd.ac.ir

**Farzad Barkhordary**

MSc., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. E-mail: barkhordary@stu.yazd.ac.ir

**Abbasali Jafari Nodoushan**

Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Meybod University, Meybod, Iran. E-mail: a.jafari@meybod.ac.ir

### Abstract

**Objective:** Cellular production is one of the important applications of group technology in production. With the development of modern industrial technology, many manufacturers use it as a solution to implement complex and realistic scenarios that increase the productivity and flexibility of a production system. Cellular production includes cell formation, cellular and intracellular arrangement, operation scheduling, and resource allocation. The process of formation and grouping of machines to produce families of parts to minimize the cost of moving materials among cells is called cell formation. In other words, cell formation in cell production systems and assignment of machine groups and family of parts to these cells is done to minimize the total cost and increase flexibility and productivity in production. The layout design is also related to the position of the cells relative to each other and the position of the machines in each cell relative to each other. In some production units, the placement of cells in relation to each other and even the placement of devices in each cell is not done properly, which increases the movement of materials, semi-finished parts, and consequently, production costs. On the other hand, with changes in customer needs and demand and competitive market conditions, the combination of existing cells and their arrangement in one period may not be appropriate for another period, and it is necessary to make changes to reply to customer needs and remain competitive. The possibility of making changes in cells combination, placement inside and between cells is called dynamic cell formation. In other words, dynamic cell formation involves changing the position of the cells relative to each other and the proper placement of the machines in one cell so that it is possible to move the machines to a new position or another cell and increase or decrease them.

**Methods:** Operation scheduling and assigning human resources incurring a notable proportion of expenses in the cell formation. These issues seem more important when financial resources are limited. In this research, dynamic cell formation problems based on scheduling, allocation of workers, and constraints of financial resources on machines and workers are simultaneously investigated. Accordingly, the present study seeks to minimize the total costs, including the costs of machines, workers, and transportation of parts. At first, a mathematical model was presented. The model was then linearized and validated. After that, a genetic algorithm was proposed to solve the problem where the parameters were adjusted and selected by using the Taguchi method. Sensitivity analysis was also performed based on the related parameters in constraints of financial resources of machines and workers.

**Results:** The results showed the accuracy of the model and its validation. It was also shown that the proposed algorithm is highly efficient and can be used for medium and large-sized problems where it is not impossible to find the optimal solution.

**Conclusion:** Sensitivity analysis showed that the constraints of financial resources for purchasing machines have a greater impact on the objective function than workers' financial constraints, which is of high importance.

**Keywords:** Dynamic cell formation, Scheduling, Worker allocation, Financial resources, Genetic algorithm

**Citation:** Fakhrzad, Mohammad Bagher, Barkhordary, Farzad and Jafari Nodoushan, Abbasali (2021). A Mathematical Model for Dynamic Cell Formation Problem Based on Scheduling, Worker Allocation, and Financial Resources Constraint. *Industrial Management Journal*, 13(3), 435-463. (in Persian)

---

Industrial Management Journal, 2021, Vol. 13, No.3, pp. 435-463

doi: <https://doi.org/10.22059/IMJ.2021.323160.1007843>

© Authors

Published by University of Tehran, Faculty of Management

Article Type: Research Paper

Received: April 18, 2021

Accepted: August 11, 2021





## ارائه مدل ریاضی برای مسئله چیدمان سلولی پویا بر اساس زمان بندی، تخصیص کارگر و محدودیت منابع مالی

محمدباقر فخرزاد

\* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: mfakhrzad@yazd.ac.ir

فرزاد برخوردار

کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: barkhordary@stu.yazd.ac.ir

عباسعلی جعفری ندوشن

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. رایانامه: a.jafari@meybod.ac.ir

### چکیده

**هدف:** زمان بندی عملیات و تخصیص کارگران موضوعی است که در مسئله چیدمان سلولی، بخش شایان توجهی از هزینه را به خود اختصاص می دهد. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری می یابد که منابع مالی با محدودیت روبه رو باشد. در این پژوهش، مسئله چیدمان پویای سلولی بر اساس زمان بندی، تخصیص کارگر و محدودیت های منابع مالی روی ماشین ها و کارگران به طور هم زمان بررسی شده است؛ به گونه ای که هدف حداقل کردن هزینه کل، شامل هزینه ماشین ها، کارگران و حمل و نقل قطعات است.

**روش:** در ابتدا یک مدل ریاضی برای مسئله مدنظر ارائه شد، سپس خطی سازی و اعتبارسنجی آن انجام گرفت. در ادامه، یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله پیشنهاد شد که پارامترهای آن با استفاده از روش تاگوچی تنظیم و انتخاب گردید. همچنین بر اساس پارامترهای مرتبط با محدودیت های منابع مالی ماشین ها و کارگران تحلیل حساسیت انجام گرفت.

**یافته ها:** نتایج نشان دهنده صحت مدل و اعتبارسنجی آن است. همچنین، نشان داده شد که الگوریتم پیشنهادی کارایی مطلوبی دارد و برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ که امکان یافتن جواب بهینه وجود ندارد، قابلیت استفاده دارد.

**نتیجه گیری:** تحلیل حساسیت نشان داد که محدودیت های منابع مالی برای خرید ماشین ها نسبت به محدودیت های مالی کارگران تأثیر بیشتری روی تابع هدف دارد که اهمیت آن را نشان می دهد.

**کلیدواژه ها:** الگوریتم ژنتیک، تخصیص کارگر، چیدمان سلولی پویا، زمان بندی، منابع مالی

**استناد:** فخرزاد، محمدباقر، برخوردار، فرزاد و جعفری ندوشن، عباسعلی (۱۴۰۰). ارائه مدل ریاضی برای مسئله چیدمان سلولی پویا بر اساس زمان بندی، تخصیص کارگر و محدودیت منابع مالی. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۳)، ۴۳۵-۴۶۳.

## مقدمه

تکنولوژی گروهی به منظور تولید قطعاتی است که از نظر شکل هندسی و فرایند ساخت با یکدیگر مشابه هستند و استفاده از آن نه تنها به کاهش جریان مواد، موجودی در جریان ساخت و زمان تدارک منجر می‌شود بلکه موجب افزایش انعطاف‌پذیری در تولید نیز می‌گردد (راجش، ابیدعلی، چالاپاتی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸). تولید سلولی یکی از کاربردهای مهم تکنولوژی گروهی در تولید است که با توسعه فناوری مدرن صنعتی، بسیاری از تولیدکنندگان آن را به عنوان راه حلی برای پیاده‌سازی سناریوهای پیچیده و واقعی استفاده نمودند که موجب افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری یک سیستم تولیدی می‌گردد (چو، گاو، چنگ، وو، چن، شی و کین<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹). تولید سلولی علاوه بر مزایای حجم تولید و کارایی جریان کارگاهی، دربرگیرنده تنوع محصولات و انعطاف‌پذیری تولید کارگاهی نیز می‌باشد و شامل مراحل تشکیل سلول، چیدمان سلولی و درون سلولی، زمان بندی عملیات و تخصیص منابع است (زهره‌وند، رفیعی، زهره‌وند، ۲۰۱۶). مسئله تشکیل سلول، در واقع تشکیل و گروه بندی ماشین‌ها به منظور تولید خانواده‌های قطعات می‌باشد که باعث حداقل کردن هزینه‌های جابجایی مواد بین سلول‌ها و هزینه نگهداری آن‌ها می‌شود (محمدی و فرقانی، ۱۳۹۷). به عبارت دیگر تشکیل سلول در سیستم‌های تولید سلولی و تخصیص گروه‌های ماشین و خانواده قطعات به این سلول‌ها با هدف حداقل کردن هزینه کل و افزایش انعطاف‌پذیری و بهره‌وری در تولید می‌باشد. طراحی چیدمان نیز مربوط به استقرار سلول‌ها نسبت به یکدیگر و همچنین موقعیت ماشین‌ها در هر سلول نسبت به هم می‌باشد (چینی فروشان، پورقناد، شهرکی<sup>۳</sup>، ۱۳۹۰). در برخی از واحدهای تولیدی استقرار سلول‌ها نسبت به یکدیگر و حتی استقرار ماشین‌های موجود در هر سلول نیز به درستی انجام نشده است که این موجب افزایش جابجایی جریان مواد، قطعات نیم‌ساخته و به تبع آن هزینه‌های تولید می‌گردد. از طرفی ممکن است با تغییرات در نیازها و تقاضای مشتریان و همچنین شرایط رقابتی بازار، ترکیب سلول‌های موجود و چیدمان آن‌ها در یک دوره برای دوره دیگر مناسب نباشد و جهت پاسخ‌گویی به نیاز مشتریان و باقی ماندن در عرصه رقابت لازم است که در آن تغییراتی ایجاد گردد. امکان ایجاد تغییرات در ترکیب سلول‌ها، جانمایی داخل و بین سلول‌ها چیدمان پویا نامیده می‌شود. به عبارت دیگر چیدمان پویا شامل تغییر در جایابی سلول‌ها نسبت به یکدیگر و استقرار مناسب ماشین‌ها در یک سلول می‌باشد به گونه‌ای که امکان جابجایی و انتقال ماشین‌ها به موقعیت جدید یا سلول دیگر و همچنین افزایش یا کاهش آن‌ها وجود دارد.

سیستم‌های تولیدی باید قادر به تطبیق یا پاسخ سریع به نیازهای بازار مانند تغییر طرح و تقاضای محصولات بدون نیاز به سرمایه‌گذاری خاصی باشند. تولید سلولی پویا که یکی از کاربردهای مهم تکنولوژی گروهی می‌باشد به عنوان یک سیستم تولیدی چاره‌ساز ایجاد شده است. با توجه به لزوم انعطاف‌پذیری 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. در شرایط بازار رقابت که با تغییرات در نیازها و سلیقه‌های مشتریان همراه هست یک سیستم تولیدی باید از انعطاف‌پذیری لازم برای پاسخ‌گویی مناسب به این تغییرات برخوردار باشد که تولید سلولی پویا یکی از سیستم‌های تولید شناخته شده در این

1. Rajesh, Abid Ali & Chalapathi

2. Chu, Gao, Cheng, Wu, Chen, Shi & Qin

3. Chiniforooshan, Pourghannad & Shahraki

زمینه می‌باشد (دانیلویک و ایلیک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹). از طرف دیگر در محیط پویای واقعی، افق برنامه‌ریزی به دوره‌های کوچک‌تر تقسیم می‌گردد که هر دوره دارای تقاضا و نیازمندی‌های مختلفی می‌باشد به طوری که سلول‌های موجود در یک دوره ممکن است برای دوره بعدی بهینه نباشد بنابراین از تولید سلولی پویا برای غلبه بر معایب و مشکلات تولید سلولی سنتی استفاده می‌گردد (آریانزاد، دلجو، میرزاپور آل هاشم<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹). اهمیت و ضرورت تولید سلولی پویا زمانی بیشتر هویدا می‌گردد که واحدهای تولیدی با محدودیت منابع به ویژه منابع انسانی و مالی مواجه باشند. بنابراین تشکیل سلول‌ها با ترکیب ماشین‌های مناسب و چیدمان صحیح آن‌ها و امکان تغییر در آن‌ها می‌تواند باعث کاهش در هزینه‌های جریان مواد، جابجایی آن‌ها، خرید ماشین‌ها و هزینه کل تولید گردد. تولید سلولی پویا بر موضوع پیکربندی مجدد سلول‌ها، تغییر ماشین‌های موجود در آن‌ها و افزایش و کاهش ماشین‌ها تاکید دارد که در این حالت لازم است مدیریت به منظور بهینه‌سازی هزینه‌ها، تصمیم صحیحی در مورد افزایش ماشین‌ها، جابجایی و چیدمان مجدد آن‌ها در بین سلول‌ها، استخدام و اخراج کارکنان و عقد قرارداد برون‌سپاری برای برخی قطعات اخذ نماید (مهدی‌زاده، دایی نیایی، رحیمی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶).

با توجه به افزایش هزینه‌های نیروی کار، تخصیص کارگران با توجه به مهارت و دانش آن‌ها به‌طور فزاینده‌ای بر کارایی و انعطاف‌پذیری در سیستم‌های تولید سلولی تأثیرگذار است (چو و همکاران، ۲۰۱۹). در مسئله چیدمان سلولی زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران به عملیات بر اساس توانایی آن‌ها دو موضوعی است که بخش قابل توجهی از هزینه را به خود اختصاص می‌دهد. این دو زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که منابع مالی محدود بوده و تولیدکننده را با مشکلاتی روبه‌رو می‌سازد. برخی از مراکز تولیدی به دلیل چیدمان نادرست و صرف هزینه‌های غیرضروری برای استخدام کارگران، خرید و استقرار دستگاه‌های جدید نمی‌توانند محدودیت منابع را پوشش دهند که باعث از دست رفتن بخشی از سهم بازار و زیان‌های زیاد می‌گردد. بنابراین با چیدمان پویا در سلول‌ها و ماشین‌های داخل هر سلول و تخصیص مناسب کارگران می‌توان از ایجاد هزینه‌های گزاف جلوگیری کرد و با بهبود جریان مواد و افزایش کارایی کارگران و ماشین‌ها محدودیت منابع را پوشش داد. در این تحقیق مسئله تولید سلولی با چیدمان پویا و زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران با در نظر گرفتن محدودیت منابع مالی و بودجه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه ادبیات موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس معرفی مسئله به همراه مدل‌سازی و روش حل مسئله ارائه می‌شود. پس از آن تجزیه و تحلیل نتایج و در نهایت نتیجه‌گیری و زمینه‌های تحقیقات آینده بیان می‌گردد.

## ادبیات پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه چیدمان سلولی، زمان‌بندی و تخصیص کارگران به صورت مجزا انجام شده است. دلجو، میرزاپور آل هاشم، دلجو و آریانزاد (۲۰۱۰) مسئله تولید سلولی پویا را در شرایطی که امکان اضافه شدن ماشین جدید و یا جابجایی ماشین بین سلول‌ها وجود دارد بررسی نمودند و برای حل آن یک الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. کانگ، سئونگ،

1. Danilovic & Ilic

2. Aryanezhad, Deljoo & Mirzapour Al-e-hashem

3. Mehdizadeh, Daei Niaki & Rahimi

سانگ و لی<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) مسئله تشکیل سلول در تولید سلولی را بررسی و برای حل آن یک روش خوشه بندی دو حالت ارائه کردند. توکلی مقدم، جوادیان، جوادی و صفایی<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) یک مدل ریاضی را جهت حل مسئله چیدمان بین سلولی و داخل سلولی همراه با تقاضای تصادفی ارائه نمودند که هدف حداقل کردن هزینه حمل و نقل و رفع مسائل مربوط به طرح بندی سلولی می باشد. نیاکان، بابلی، مویاکس و بوتاجنولاز<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) یک مدل ریاضی برای مسئله تولید سلولی پویا با در نظر گرفتن تخصیص کارگران و معیارهای زیست محیطی ارائه و برای حل آن از الگوریتم های ژنتیک و شبیه سازی تبرید استفاده نمودند. وو، چو، یانگ و وو<sup>۴</sup> (۲۰۰۷) مسئله چیدمان سلولی، زمان بندی گروهی و طرح بندی گروهی را به طور هم زمان بررسی و برای حل آن یک الگوریتم ژنتیک و دو الگوریتم ابتکاری ارائه کردند. بوآزیز، برقیدا و لمواری<sup>۵</sup> (۲۰۲۰) مسئله تشکیل سلول در تولید سلولی را مطالعه کردند که علاوه بر حداقل کردن هزینه، کیفیت قطعات تولید شده نیز در نظر گرفته شده است. آن ها برای حل مسئله یک مدل ریاضی و یک الگوریتم شبیه سازی تبرید ارائه نمودند. آریانزاد و همکاران (۲۰۰۹) برای رسیدن به یک چیدمان سلولی پویا و تخصیص مناسب کارگران مدل جدیدی را پیشنهاد دادند که هدف حداقل کردن هزینه می باشد. محمدی و فرقانی<sup>۶</sup> (۲۰۱۷) مسئله تولید سلولی را با فرض تکرار ماشین و مسیریابی فرایند جایگزین بررسی و برای حل آن یک رویکرد ترکیبی از برنامه ریزی پویا و الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. ستوگلو و سورش<sup>۷</sup> (۲۰۰۹) در تحقیق خود یک مدل برنامه ریزی آرمانی برای سیستم تولید سلولی ترکیبی در نظر گرفتند که شامل آنالیز نوسانات تقاضا، گروه بندی ماشین ها در داخل سلول های تولیدی و تخصیص قسمت های مختلف سلول ها می باشد. دانیلویک و ایلیک (۲۰۱۹) مسئله تشکیل سلول در تولید سلولی را بررسی نموده و برای حل آن یک الگوریتم فراالبتکاری ترکیبی ارائه نمودند. مهدوی، علوی، پایدار و سلیمانپور<sup>۸</sup> (۲۰۱۰) یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح را برای سیستم های تولید سلولی در محیط پویا ارائه نمودند که در آن پیکربندی مجدد، ماشین های تکراری، ظرفیت ماشین و تخصیص کارگران لحاظ شده است. جولای، توکلی مقدم، گلمحمدی و جوادی<sup>۹</sup> (۲۰۱۲) در تحقیق خود مدلی را ارائه نمودند که به بررسی و رفع موانع تولید سلولی، چیدمان سلولی و طرح بندی سلولی پرداخته است. برای حل مدل از روش های ابتکاری و الگوریتم شاخه و کران استفاده شده است. آرکات، حسین آبادی فراهانی و حسینی<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۲) در تحقیق خود دو مدل عدد صحیح مختلط را برای طراحی سیستم یکپارچه تولید سلولی ارائه نمودند که برای حل آن ها از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. سلیم پور، پوروزیری و آزاب<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۱) مسئله تشکیل سلول و چیدمان سلولی را در شرایط پویا بررسی نموده و جهت حل آن از الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده نمودند. نتایج نشان می دهد که کارایی الگوریتم های پیشنهادی بالا می باشد.

1. Kong, Seong, Song & Lee
2. Tavakkoli-Moghaddam, Javadian, Javadi & Safaei
3. Niakan, Baboli, Moyaux & Botta-Genoulaz
4. Wu, Chu, Wang & Yue
5. Bouaziz, Berghida & Lemouari
6. Mohammadi & Forghani
7. Satuglu & Suresh
8. Mahdavi, Aalaei, Paydar & Solimanpur
9. Jolai, Tavakkoli-Moghaddam, Golmohammadi & Javadi
10. Arkat, Hosseinabadi Farahani & Hosseini
11. Salimpour, Pourvaziri & Azab

کریشنان، میرزایی، ونکاتاسامی و پیلائی<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) در تحقیقی برای حداقل کردن میزان حمل و نقل قطعات از دو روش اکتشافی برای گروه‌بندی قطعات در سلول‌ها و از الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین چیدمان داخلی و بین سلولی استفاده نمودند. کیا و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای طراحی چیدمان سلول‌ها در سیستم تولید سلولی پویا ارائه کردند. در این مدل تقاضا در طول افق زمانی متفاوت بوده و سه مرحله چیدمان سلولی، زمان‌بندی و طرح‌بندی گروهی در نظر گرفته شده است. باقری و بشیری<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) برای حل مسئله تشکیل سلولی، تخصیص کارگر و چیدمان سلولی یک مدل ریاضی جدید ارائه نمودند که هدف آن حداقل کردن مسافت حمل و نقل و هزینه می‌باشد. علیمیان، قضاوتی و توکلی‌مقدم<sup>۳</sup> (۲۰۲۰) مسئله تشکیل سلول، زمان‌بندی گروه و تولید را با در نظر گرفتن نتایج پیشگیرانه در سیستم تولید سلولی پویا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک مدل ریاضی برای حل مسئله پیشنهاد نمودند که نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای آن می‌باشد. مهدوی، تیموریان، تهامی باهر و کیوانفر<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) با توجه به اهمیت تشکیل سلول و مسئله چیدمان سلول‌ها یک مدل ریاضی ادغامی را برای بررسی این دو موضوع به‌صورت هم‌زمان ارائه نمودند که برای ارزیابی مدل از دو مثال نمونه استفاده کردند. کیا، شیرازی، جوادیان و توکلی‌مقدم<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط و چندهدفه را برای طراحی چیدمان گروهی در سیستم تولید سلولی پویا ارائه نمودند. در این مدل تعداد سلول‌هایی که تشکیل می‌شود متغیر بوده و تشکیل سلولی و چیدمان گروهی به‌صورت هم‌زمان در آن صورت گرفته است. ژو و آفودیل<sup>۶</sup> (۲۰۲۰) مسئله تشکیل سلول‌های پویا و برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی را بررسی نموده و برای حل آن یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی و یک رویکرد شاخه و کران ارائه نمودند که نتایج کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. رفیعی و قدسی<sup>۷</sup> (۲۰۱۳) یک مسئله تولید سلولی پویا با هدف حداقل کردن هزینه‌ها و بیشینه کردن بهره‌وری کارگران را مورد بررسی قرار دادند و برای حل آن دو الگوریتم مورچگان و ژنتیک ارائه نمودند. چانگ، وو و وو<sup>۸</sup> (۲۰۱۳) یک مدل ریاضی دو مرحله‌ای را برای ادغام تشکیل سلولی، چیدمان سلولی، توالی ماشین‌ها و حجم تولید پیشنهاد نمودند و برای حل آن نیز از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع استفاده کردند. مهدی‌زاده و رحیمی<sup>۹</sup> (۲۰۱۶) مسئله تولید سلولی پویا را با در نظر گرفتن تخصیص کارگران، جایابی سلول‌ها و تکرار ماشین‌ها مورد بررسی قرار داده و برای آن یک مدل ریاضی ارائه نمودند. هدف حداقل کردن حمل و نقل‌های داخلی و بین سلولی قطعات، حداقل کردن هزینه‌های مربوط به کارگران و ماشین‌ها و بیشینه کردن نرخ جریان رو به جلوی قطعات می‌باشد که برای حل آن از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده نمودند.

همان‌طور که از جدول ۱ مشاهده می‌گردد، تحقیقات انجام شده با محوریت تشکیل سلول‌ها و جایابی آن‌ها با فرضیات مختلف می‌باشد که دو مسئله زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران نیز به‌صورت مجزا در برخی از آن‌ها انجام

1. Krishnan, Mirzaei, Venkatasamy & Pillai
2. Bagheri & Bashiri
3. Alimian, Ghezavati & Tavakkoli-Moghaddam
4. Mahdavi, Teymourian, Tahami Baher & Kayvanfar
5. Kia, Shirazi, Javadian & Tavakkoli-Moghaddam
6. Xue & Offodile
7. Raffiei & Ghodsi
8. Chang, wu & Wu
9. Mehdizadeh & Rahimi

شده است ولی هر دو به صورت هم زمان در ادبیات موضوع مشاهده نگردید. از آن جا که در مسائل تولیدی، بودجه و منابع مالی نقش مهمی ایفا می کند در این تحقیق مسئله تولید سلولی با چیدمان پویا و محدودیت منابع مالی و بودجه با زمان بندی عملیات و تخصیص کارگران به صورت هم زمان بررسی می گردد. در این مسئله امکان انتقال ماشین ها به مکان جدید، افزایش یا کاهش آن، استخدام و اخراج نیروی انسانی و آموزش آن ها وجود دارد به طوری که با در نظر گرفتن محدودیت بودجه، هزینه کل ماشین و نیروی انسانی حداقل گردد و با تعیین استقرار مناسبی از ماشین ها تقاضای مدنظر تأمین گردد. مقایسه بین تحقیق حاضر با تحقیقات گذشته در جدول ۱ نشان می دهد که در این تحقیق خلأ عدم بررسی دو مسئله زمان بندی و تخصیص کارگران به طور هم زمان پوشش داده می شود و محدودیت بودجه نیز به مسئله اضافه شده است. بنابراین ابعاد نوآوری پژوهش حاضر به شرح زیر می باشد.

- در این تحقیق زمان بندی عملیات و تخصیص کارگران به صورت هم زمان مورد بررسی قرار گرفته شده است.
- محدودیت بودجه برای کارگران و ماشین آلات فرض شده است.
- در این تحقیق امکان انتقال ماشین ها به مکان جدید، افزایش یا کاهش آن، استخدام و اخراج نیروی انسانی و آموزش آن ها وجود دارد

جدول ۱. مقایسه میان پژوهش های گذشته و کار انجام شده در این تحقیق

نویسندگان	سال انتشار	چیدمان پویا	تشریح سلول	چینش بین سلولی	چینش داخل سلول	زمان بندی عملیات	تخصیص کارگران	محدودیت بودجه	روش حل
دلجو و همکاران	۲۰۱۰	•	•	•	•				الگوریتم ژنتیک
کانگ و همکاران	۲۰۱۸		•	•	•				الگوریتم ابتکاری
توکلی مقدم و همکاران	۲۰۰۷		•	•	•				مدل ریاضی
نیاکان و همکاران	۲۰۱۶		•		•	•	•		الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی تبرید
وو و همکاران	۲۰۰۷		•	•	•	•			الگوریتم ژنتیک
بوازیز و همکاران	۲۰۲۰		•	•	•		•		مدل ریاضی، الگوریتم شبیه سازی تبرید
آریانزاد و همکاران	۲۰۰۹	•	•				•		مدل ریاضی
محمدی و فرقانی	۲۰۱۷		•	•	•				الگوریتم ژنتیک و برنامه ریزی پویا
ستگلو و سورش	۲۰۰۹		•				•		مدل ریاضی
دانیلوویک و ایلپیک	۲۰۱۹		•	•	•				الگوریتم فراابتکاری
مهدوی و همکاران	۲۰۱۰	•	•				•		مدل ریاضی
جولای و همکاران	۲۰۱۲		•		•				الگوریتم ابتکاری و شاخه و کران
آرکات و همکاران	۲۰۱۱		•	•	•	•			الگوریتم ژنتیک
سلیم پور و همکاران	۲۰۲۱	•	•						الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات
کریشان و همکاران	۲۰۱۲		•	•	•				الگوریتم ژنتیک



ادامه جدول ۱

نویسندگان	سال انتشار	چیدمان پویا	تشکیل سلول	چینش بین سلولی	چینش داخل سلول	زمان بندی عملیات	تخصیص کارگران	محدودیت بودجه	روش حل
کیا و همکاران	۲۰۱۲	•	•	•	•				الگوریتم شبیه سازی تبرید
باقری و بشیری	۲۰۱۳	•	•	•			•		مدل ریاضی
علیمیان و همکاران	۲۰۲۰	•	•	•					مدل ریاضی
مهدوی و همکاران	۲۰۱۳		•	•	•				مدل ریاضی
کیا و همکاران	۲۰۱۳	•	•	•	•				مدل ریاضی
ژو و آفودیل	۲۰۲۰	•	•	•	•				مدل ریاضی، الگوریتم شاخه و کران
رفیعی و قدسی	۲۰۱۳	•	•				•		الگوریتم ژنتیک
چانگ و همکاران	۲۰۱۳		•	•	•				الگوریتم جست و جوی ممنوع
مهدی زاده و رحیمی	۲۰۱۶	•	•	•	•		•		مدل ریاضی، فرابتنکاری
تحقیق حاضر		•	•	•	•	•	•	•	گمز-ژنتیک

### معرفی مسئله

با توجه به اهمیت و ضرورت تولید سلولی با تشکیل سلول و چیدمان پویا در این تحقیق مسئله تولید سلولی با چیدمان پویا، زمان بندی عملیات و تخصیص کارگران را با محدودیت بودجه مربوط به ماشین ها و نیروی انسانی بررسی می نماید به طوری که امکان انتقال ماشین به مکان جدید، افزایش یا کاهش آن، استخدام، اخراج و آموزش نیروی انسانی وجود دارد. ترتیب قرار گرفتن قطعات روی دستگاهها مشخص است. مدیریت قصد دارد برای شروع کار، تعداد مشخصی دستگاه را خریداری کند به طوری که بعضی از دستگاهها انواع مختلفی داشته و هر کدام دارای هزینه های متفاوتی می باشد. از طرفی این واحد تولیدی در نظر دارد تا از میان تعدادی کارگر که سطح مهارت و هزینه های دستمزد، استخدام و آموزش متفاوتی دارند کارگرانی را انتخاب نماید. مدیریت در زمینه به کارگیری کارگران و خرید دستگاهها با محدودیت منابع مالی و بودجه مواجه است. هدف حداقل کردن هزینه شامل هزینه های ماشین مانند هزینه های ثابت و متغیر، خرید، انتقال، استهلاک و اضافه کاری، هزینه حمل قطعات و استخدام و اخراج، آموزش و حقوق کارگران می باشد به گونه ای که تحت محدودیت های بودجه بتوان با خرید ماشین و استخدام کارگران مناسب و تعیین چیدمان مطلوب ماشین ها، پاسخگوی حجم تقاضای مدنظر بود. در ادامه مفروضات مسئله، اندیس ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم و مدل ریاضی آن به تفکیک ارائه می گردد.

### مفروضات مسئله

۱. ابعاد تمام دستگاهها یکسان (۲×۲) و واحد است.
۲. هر دستگاه تنها یک نوع عملیات را انجام می دهد.

۳. بعضی از دستگاه‌ها  $n$  نوع می‌باشد که هزینه‌ها و زمان‌های عملیات در آن‌ها متفاوت است.
۴. هر دستگاه ابتدا تعداد مورد نیاز از قطعه  $z$  را تولید و سپس قطعه  $z+1$  را پردازش می‌نماید.
۵. ماشین‌های انتخابی یکبار و قبل از شروع شیفت اول خریداری می‌شوند.
۶. کارگران انتخابی یکبار و قبل از شروع شیفت اول استخدام می‌شوند. هزینه آموزش در صورت لزوم فقط در ابتدای شیفت اول برای آن‌ها پرداخت می‌شود اما حقوق آن‌ها در شیفت‌های گوناگون متفاوت است.
۷. هر دستگاه به یک اپراتور نیاز دارد و هر اپراتور هم تنها می‌تواند با یک دستگاه کار کند.
۸. دستگاه‌ها باید در محوطه تولیدی حداقل یک واحد از هم فاصله داشته باشند.

### اندیس‌ها

$k$ : اندیس کارگر ( $k = 1, 2, \dots, K$ )	$P$ : اندیس شیفت ( $P = 1, 2, \dots, P_s$ )
$d$ : اندیس عملیات ( $d = 1, 2, \dots, N_j$ )	$i$ : اندیس ماشین ( $i = 1, 2, \dots, m$ )
$c$ : اندیس سلول ( $c = 1, 2, \dots, C$ )	$t$ : اندیس نوع ماشین ( $t = 1, 2, \dots, Tm_t$ )
	$j$ : اندیس قطعه ( $j = 1, 2, \dots, n$ )

### پارامترها

$H$ : ابعاد افقی محوطه تولید
$V$ : ابعاد عمودی محوطه تولید
$m$ : تعداد ماشین
$n$ : تعداد قطعه
$K$ : تعداد کارگر
$C$ : تعداد سلول‌های موجود
$Tm_t$ : تعداد ماشین موجود از نوع $t$
$P_s$ : تعداد شیفت‌های موجود
$N_j$ : تعداد عملیات لازم برای تولید قطعه $j$
$R$ : حداکثر تعداد ماشین در یک سلول
$C_{it}$ : هزینه خرید $i^{th}$ ماشین از نوع $t$
$hs_{it}$ : مجموع هزینه ثابت و استهلاک $i^{th}$ ماشین از نوع $t$
$R_{it}$ : درآمد فروش $i^{th}$ ماشین از نوع $t$ در انتهای کار
$\beta_{it}$ : هزینه متغیر $i^{th}$ ماشین از نوع $t$
$\theta_{it}$ : هزینه اضافه کاری $i^{th}$ ماشین از نوع $t$
$q$ : هزینه انتقال ماشین‌ها به مکانی دیگر به ازای هر واحد $x$ و $y$

- $D_j^P$ : میزان تقاضای قطعه  $j$  در شیفت  $P$
- $sa_{kit}^P$ : حقوق کارگر  $k$  برای کار با ماشین  $i^{th}$  از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $a_{kit}$ : هزینه آموزش کارگر  $k$  برای کار با ماشین  $i^{th}$  از نوع  $t$
- $H_k$ : مجموع هزینه استخدام و اخراج کارگر  $k$
- $T_{it}^P$ : مدت زمان در دسترس بودن ماشین  $i^{th}$  از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $W_{jdit}^P$ : مدت زمان عملیات  $d$  مربوط به قطعه  $j$  روی ماشین  $i^{th}$  از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $t_{it}$ : بیشترین درصد اضافه کاری  $i^{th}$  ماشین از نوع  $t$
- $A_j$ : واحد زمان حمل قطعه  $j$  در داخل سلول
- $E_j$ : واحد زمان حمل قطعه  $j$  در خارج سلول
- $tf$ : هزینه هر واحد زمانی از حمل و نقل
- $BKHM$ : منابع مالی در دسترس برای ماشین‌ها
- $BMK$ : منابع مالی در دسترس برای حقوق و آموزش کارگران
- $M$ : عدد بسیار بزرگ

#### متغیرهای تصمیم

- $x_i^P$ : فاصله افقی بین مرکز ماشین  $i^{th}$  و خط مبنا در شیفت  $P$
- $y_i^P$ : فاصله عمودی بین مرکز ماشین  $i^{th}$  و خط مبنا در شیفت  $P$
- $Tb_{it}^P$ : میزان اضافه کاری  $i^{th}$  ماشین از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $g_j^P$ : زمان اتمام تولید قطعه  $j$  در شیفت  $P$
- $g_{jd}^P$ : زمان اتمام عملیات  $d$  مربوط به قطعه  $j$  در شیفت  $P$
- $st_{jdit}^P$ : زمان شروع عملیات  $d$  قطعه  $j$  روی ماشین  $i^{th}$  از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $STT_{it}^P$ : زمان شروع فعالیت  $i^{th}$  ماشین از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $FTT_{it}^P$ : زمان پایان فعالیت  $i^{th}$  ماشین از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $T_{j'd}^P$ : زمان حمل قطعه  $j$  بین عملیات  $d'$  و  $d$  در شیفت  $P$
- $O_{it}^P$ : مدت زمان استفاده از ماشین  $i^{th}$  از نوع  $t$  در شیفت  $P$
- $u_{jdi}^P$ : اگر عملیات  $d$  برای قطعه  $j$  روی ماشین  $i^{th}$  در شیفت  $P$  انجام شود ۱ در غیر این صورت صفر است
- $A_{kit}$ : اگر کارگر  $k$  در ابتدای شیفت اول نیاز به آموزش برای کار با ماشین  $i^{th}$  از نوع  $t$  داشته باشد ۱ در غیر این صورت صفر است
- $f_{jad''i}^P$ : اگر عملیات  $d''$  از قطعه  $j$  زودتر از عملیات  $d$  از قطعه  $j$  روی ماشین  $i^{th}$  در شیفت  $P$  انجام شود ۱ در غیر این صورت صفر است
- $Z_{ic}^P$ : اگر  $i^{th}$  ماشین در شیفت  $P$  در سلول  $c$  باشد ۱ در غیر این صورت صفر است

$RS_{kit}$ : اگر کارگر  $k$  در ابتدای شیفت اول به  $i^{th}$  ماشین نوع  $t$  تخصیص داده شود ۱ در غیر این صورت صفر است

$h_k$ : اگر کارگر  $k$  استخدام یا اخراج شود ۱ در غیر این صورت صفر است

$X_{it}$ : اگر  $i^{th}$  ماشین نوع  $t$  خریداری شود ۱ در غیر این صورت صفر است

$px_{iuv}^P$ : اگر رابطه  $x_u^P \leq x_v^P \leq x_i^P$  یا  $x_i^P \leq x_v^P \leq x_u^P$  برقرار باشد ۱ در غیر این صورت صفر است

$qy_{iuv}^P$ : اگر رابطه  $y_u^P \leq y_v^P \leq y_i^P$  یا  $y_i^P \leq y_v^P \leq y_u^P$  برقرار باشد ۱ در غیر این صورت صفر است

### مدل ریاضی

در این بخش مدل ریاضی مسئله مدنظر بر اساس پارامترها و متغیرهای تصمیم تعریف شده ارائه می گردد که به صورت زیر نوشته می شود.

$$MinZ = \sum_{P=2}^{P_s} \sum_{i=1}^m q(|x_i^P - x_i^{P-1}| + |y_i^P - y_i^{P-1}|) + \sum_{k=1}^K H_k h_k \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} ((C_{it} - R_{it})X_{it}) + \sum_{P=1}^{P_s} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^{N_j-1} (T_{jd(d+1)}^P t f) \\ & + P_s \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} (hs_{it}X_{it}) + \sum_{P=1}^{P_s} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} ((\theta_{it} T b_{it}^P) + (\beta_{it} O_{it}^P)) \\ & + \sum_{P=1}^{P_s} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} \sum_{k=1}^K (sa_{kit}^P RS_{kit} X_{it}) + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} \sum_{k=1}^K (a_{kit} A_{kit} RS_{kit} X_{it}) \end{aligned}$$

$$\sum_{t=1}^{Tm_t} X_{it} = 1 \quad \forall i \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} (C_{it} X_{it}) + P_s \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} (hs_{it} X_{it}) \leq BKHM \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$\sum_{P=1}^{P_s} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} \sum_{k=1}^K (RS_{kit} X_{it} sa_{kit}^P) + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} \sum_{k=1}^K (RS_{kit} X_{it} a_{kit} A_{kit}) \leq BMK \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$x_i^P \leq H - 1 \quad \forall i, P \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$y_i^P \leq V - 1 \quad \forall i, P \quad \text{(رابطه ۶)}$$

$$|x_i^P - x_u^P| + |y_i^P - y_u^P| \geq 3 \quad i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad u = i + 1, i + 2, \dots, m \quad \forall P \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$(x_v^P - x_i^P)(x_u^P - x_v^P) \leq Mpx_{iuv}^P \quad \forall i, u, v, P \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$-(x_v^P - x_i^P)(x_u^P - x_v^P) \leq M(1 - px_{iuv}^P) \quad \forall i, u, v, P \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$(y_v^P - y_i^P)(y_u^P - y_v^P) \leq Mqy_{iuv}^P \quad \forall i, u, v, P \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$-(y_v^P - y_i^P)(y_u^P - y_v^P) \leq M(1 - qy_{iuv}^P) \quad \forall i, u, v, P \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$Z_{ic}^P + Z_{uc}^P + px_{iuv}^P + qy_{iuv}^P - 3 \leq Z_{vc}^P \quad \forall i, u, v, P, c \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sum_{i=1}^m Z_{ic}^P \leq R \quad \forall P, c \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_{i=1}^m Z_{ic}^P \geq 1 \quad \forall P, c \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_{c=1}^C Z_{ic}^P = 1 \quad \forall P, i \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{Tm_t} RS_{kit} X_{it} \leq 1 \quad \forall k \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{t=1}^{Tm_t} \sum_{k=1}^K RS_{kit} X_{it} = 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$g_j^P \geq g_{jd}^P \quad P = 1, 2, \dots, P_s \quad \forall j, d \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$g_{jd}^P \geq D_j^P w_{jdit}^P X_{it} u_{jdi}^P \quad \forall P, j, d, i, t \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$g_{jd}^P \geq g_{jd'}^P + T_{jd'}^P + D_j^P w_{jdit}^P X_{it} u_{jdi}^P \quad d' = d - 1 \quad \forall P, j, d, i, t \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$g_{jd}^P u_{jdi}^P - g_{j'd''}^P u_{j'd''i}^P - M(f_{jdj'd''i}^P - 1) \geq D_j^P w_{jdit}^P X_{it} u_{jdi}^P \quad \forall P, j, j', d, d'', i, t \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$g_{j'd''}^P u_{j'd''i}^P - g_{jd}^P u_{jdi}^P + Mf_{jdj'd''i}^P \geq D_j^P w_{j'd''it}^P X_{it} u_{j'd''i}^P \quad \forall P, j, j', d, d'', i, t \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$T_{jd'a}^P = (|x_i^P - x_u^P| + |y_i^P - y_u^P|)A_j u_{jd'a}^P u_{jda}^P Z_{ic}^P Z_{uc}^P \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$+ (|x_i^P - x_u^P| + |y_i^P - y_u^P|)E_j u_{jd'a}^P u_{jda}^P Z_{ic}^P (1 - Z_{uc}^P) \quad \forall d', d, P, j, i, c \quad i \neq u$$

$$st_{jdat}^P = g_{jd}^P u_{jdi}^P X_{it} - D_j^P w_{jdit}^P X_{it} u_{jdi}^P + M(1 - u_{jdi}^P) \quad \forall P, j, i, d, t \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$STT_{it}^P \leq st_{jdat}^P \quad \forall P, j, i, d, t \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$FTT_{it}^P \geq g_{jd}^P u_{jdi}^P X_{it} \quad \forall P, j, i, d, t \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$O_{it}^P = FTT_{it}^P - STT_{it}^P \quad \forall P, i, t \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$Tb_{it}^P \geq FTT_{it}^P - (T_{it}^P X_{it}) \quad \forall P, i, t \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$Tb_{it}^P \leq T_{it}^P t_{it} \quad \forall P, i, t \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$FTT_{it}^P \leq (1 + t_{it})T_{it}^P \quad \forall P, i, t \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$x_i^P, y_i^P \geq 0 \text{ and integr } u_{jdi}^P, Z_{ic}^P, R_{skit}, h_k, A_{kit}, X_{it}, px_{iuv}^P, qv_{iuv}^P, f_{jdj'd''i}^P \in \{0,1\} \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$Tb_{it}^P, g_{jd}^P, g_j^P, T_{jd'a}^P, O_{it}^P, FTT_{it}^P, STT_{it}^P, st_{jdat}^P \geq 0$$

هدف در این مدل حداقل کردن هزینه می باشد که در رابطه ۱ بیان شده است. جمله اول در این رابطه مربوط به هزینه انتقال ماشین ها از مکانی به مکان دیگر است که برابر با مجموع حاصل ضرب جابجایی عمودی و افقی در هزینه هر واحد انتقال ماشین ها می باشد. مجموع هزینه های استخدام و اخراج کارگران از ضرب متغیر استخدام و اخراج در هزینه های مربوط به آن به دست می آید که در جمله دوم بیان شده است. جمله سوم هزینه مربوط به ماشین های جدید می باشد که برابر با مجموع اختلاف هزینه خرید و درآمد ناشی از فروش آن ها در پایان دوره است. هزینه حمل و نقل قطعات برای انجام عملیات مختلف داخل و خارج سلول در جمله چهارم مشاهده می شود که برابر با مجموع حاصل ضرب هزینه هر واحد زمانی از حمل و نقل در مدت زمان حمل و نقل قطعه در بین عملیات می باشد. هزینه ثابت و استهلاک ماشین در جمله پنجم نشان داده شده است که از حاصل ضرب تعداد شیفت ها در مجموع این هزینه برای هر ماشین محاسبه می گردد. جمله ششم در رابطه ۱ بیان کننده هزینه اضافه کاری و هزینه متغیر ماشین ها است که برابر با مجموع حاصل ضرب میزان اضافه کاری هر ماشین در هزینه هر واحد اضافه کاری و مدت زمان استفاده از ماشین در هزینه متغیر آن برای شیفت های مختلف کاری می باشد. جمله بعدی در تابع هدف مربوط به هزینه های حقوق کارگران می باشد که برابر با مجموع حاصل ضرب متغیر تخصیص هر کارگر به ماشین مربوطه در میزان حقوق آن کارگر در شیفت های

مختلف می‌باشد. هزینه آموزش کارگران نیز از مجموع حاصل ضرب متغیرهای تخصیص کارگر به ماشین مربوطه و نیاز آن به آموزش در هزینه آموزش آن کارگر محاسبه می‌گردد که در آخرین جمله تابع هدف قید شده است. رابطه ۲ نشان می‌دهد که از هر ماشین چند نوع موجود می‌باشد که فقط باید یک نوع آن خریداری شود. رابطه ۳ محدودیت بودجه مربوط به ماشین‌ها را نشان می‌دهد که لازم است مجموع هزینه‌های خرید و ثابت و استهلاک در تمام شیفت‌ها برای کلیه ماشین‌ها از مقدار منابع مالی در دسترس برای ماشین‌ها کمتر باشد. رابطه ۴ نیز مربوط به بودجه آموزش و حقوق است به طوری که کمتر بودن مجموع هزینه‌های آموزش کارگران و حقوق آن‌ها در شیفت‌های مختلف از منابع مالی در دسترس برای کارگران را ضمانت می‌کند. استقرار ماشین‌ها و فاصله مناسب آن‌ها از یکدیگر توسط روابط ۵-۷ بررسی می‌شود. ماشین‌ها در هر شیفت باید در محدوده افقی و عمودی به گونه‌ای استقرار یابند که از ابعاد محوطه خارج نشوند که روابط ۵ و ۶ این موضوع را تضمین می‌کنند. همچنین مجموع فاصله افقی و عمودی ماشین‌ها نسبت به یکدیگر نیز توسط رابطه ۷ کنترل می‌شود. با روابط ۸-۱۲ می‌توان اطمینان حاصل کرد که سلول‌ها هیچ کدام با یکدیگر تداخل ندارند و استقرار آن‌ها به گونه‌ای است که از یکدیگر مجزا هستند. حداکثر و حداقل تعداد ماشین‌ها در هر سلول و شیفت توسط روابط ۱۳ و ۱۴ کنترل می‌شود به گونه‌ای که در هر سلول حداقل ۱ ماشین و حداکثر R ماشین موجود است. رابطه ۱۵ بیان می‌کند که در یک شیفت هر ماشین فقط در یک سلول می‌تواند وجود داشته باشد. هر کارگر فقط می‌تواند به یک ماشین تخصیص یابد و هر ماشین نیز فقط به یک کارگر اختصاص می‌یابد که این دو به ترتیب توسط روابط ۱۶ و ۱۷ کنترل می‌شود. زمان بندی تولید برای هر قطعه توسط روابط ۱۸-۲۲ انجام می‌گیرد. از رابطه ۱۹ اطمینان حاصل می‌شود که زمان اتمام هر قطعه از زمان اتمام آن بزرگ‌تر است. زمان اتمام هر عملیات از یک قطعه نیز حداقل برابر با مدت زمان مورد نیاز برای انجام آن عملیات و یا مجموع زمان اتمام عملیات قبلی با مدت زمان حمل و نقل بین دو عملیات می‌باشد که توسط روابط ۱۹ و ۲۰ تضمین می‌شود. اگر در بین انجام عملیات یک قطعه، عملیات قطعه دیگری انجام شود این باعث افزایش زمان اتمام قطعه می‌گردد که توسط روابط ۲۱ و ۲۲ محاسبه می‌شود. رابطه ۲۳ به منظور محاسبه مدت زمان حمل و نقل قطعات بین دو عملیات متوالی داخل یا خارج از سلول‌ها می‌باشد به گونه‌ای که مجموع جابجایی عمودی و افقی قطعات در نظر گرفته می‌شود. رابطه ۲۴ ایجاب می‌کند که زمان شروع عملیات یک قطعه روی هر ماشین در یک شیفت برابر با اختلاف بین زمان اتمام و زمان انجام عملیات مدنظر است. زمان شروع و پایان فعالیت هر ماشین به ترتیب از زمان شروع و پایان تمام عملیات انجام شده روی آن کوچک‌تر و بزرگ‌تر است که روابط ۲۵ و ۲۶ تضمین کننده این موضوع هستند. رابطه ۲۷ مدت زمان استفاده از ماشین را بیان می‌کند که از تفاوت بین زمان پایان و شروع فعالیت ماشین محاسبه می‌شود. از روابط ۲۸ و ۲۹ اطمینان حاصل می‌شود که حداقل زمان اضافه کاری برای هر ماشین برابر با تفاوت بین زمان پایان فعالیت با مدت زمان در دسترس ماشین موردنظر و حداکثر میزان اضافه کاری برای هر ماشین معادل با مدت زمان در دسترس آن ماشین می‌باشد. از طرفی زمان پایان فعالیت هر ماشین حداکثر برابر با مجموع زمان در دسترس و میزان اضافه کاری مجاز برای آن ماشین می‌باشد که رابطه ۳۰ آن را تضمین می‌نماید. رابطه ۳۱ نیز شرایط متغیرهای تصمیم را بیان می‌کند.

## خطی سازی مدل

مدل ارائه شده یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است و برای خطی کردن آن، تعدادی متغیر جدید و محدودیت کمکی ارائه می شود که در این ادامه تشریح می گردد.

در تابع هدف، جمله اول شامل عبارت قدرمطلق است که غیرخطی می باشد و لازم است خطی شود. این عبارت باید با متغیر  $gm_{iP(P-1)}$  جایگزین گردد و محدودیت های ۳۲ الی ۳۵ به مدل اضافه شود.

$$gm_{iP(P-1)} \geq (x_i^P - x_i^{P-1}) + (y_i^P - y_i^{P-1}) \quad \forall P, i \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$gm_{iP(P-1)} \geq -(x_i^P - x_i^{P-1}) + (y_i^P - y_i^{P-1}) \quad \forall P, i \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$gm_{iP(P-1)} \geq (x_i^P - x_i^{P-1}) - (y_i^P - y_i^{P-1}) \quad \forall P, i \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$gm_{iP(P-1)} \geq -(x_i^P - x_i^{P-1}) - (y_i^P - y_i^{P-1}) \quad \forall P, i \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

تابع هدف و محدودیت های ۴، ۱۶ و ۱۷ شامل عبارت  $RS_{kit}X_{it}$  می باشند که ضرب دو متغیر صفر و یک است و یک عبارت غیرخطی به حساب می آید. برای خطی کردن آن باید یک متغیر صفر و یک جدید  $RSX_{kit}$  و دو محدودیت ۳۶ و ۳۷ ایجاد گردد.

$$RS_{kit} + X_{it} \leq 1 + RSX_{kit} \quad \forall k, i, t \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$RS_{kit} + X_{it} \geq 2RSX_{kit} \quad \forall k, i, t \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

در محدودیت ۷ وجود عبارت قدرمطلق باعث غیرخطی شدن آن می گردد که برای خطی کردن آن، از دو متغیر صفر و یک  $r_{iu}^P$  و  $s_{iu}^P$  و محدودیت های ۳۸-۴۱ استفاده شده است.

$$x_i^P - x_u^P + Mr_{iu}^P + Ms_{iu}^P \geq 3 \quad \forall u \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

$$-(x_i^P - x_u^P) + M(1 - r_{iu}^P) + Ms_{iu}^P \geq 3 \quad \forall u \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

$$y_i^P - y_u^P + Mr_{iu}^P + M(1 - s_{iu}^P) \geq 3 \quad \forall u \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

$$-(y_i^P - y_u^P) + M(1 - r_{iu}^P) + M(1 - s_{iu}^P) \geq 3 \quad \forall u \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

ضرب دو متغیر در محدودیت های ۸-۱۱ باعث غیرخطی شدن آن ها شده است که با تعریف متغیرهای صفر و یک  $d_{vi}^P$  و  $d_{uv}^P$  و محدودیت های ۴۲ و ۴۹ خطی سازی محدودیت های ۸ و ۹ انجام می گیرد. برای خطی سازی معادلات ۱۰ و ۱۱ نیز دقیقاً به همین ترتیب عمل می شود.



$$x_v^P - x_i^P \leq M d_{vi}^P \quad \forall v, i, P \quad \text{رابطه (۴۲)}$$

$$-(x_v^P - x_i^P) \leq M(1 - d_{vi}^P) \quad \forall v, i, P \quad \text{رابطه (۴۳)}$$

$$x_u^P - x_v^P \leq M d_{uv}^P \quad \forall v, u, P \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

$$-(x_u^P - x_v^P) \leq M(1 - d_{uv}^P) \quad \forall v, u, P \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

$$d_{vi}^P + d_{uv}^P - 1 \leq p x_{iuv}^P \quad \forall i, v, u, P \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

$$-d_{vi}^P - d_{uv}^P + 1 \leq p x_{iuv}^P \quad \forall i, v, u, P \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

$$d_{vi}^P - d_{uv}^P + 1 \geq p x_{iuv}^P \quad \forall i, v, u, P \quad \text{رابطه (۴۸)}$$

$$-d_{vi}^P + d_{uv}^P + 1 \geq p x_{iuv}^P \quad \forall i, v, u, P \quad \text{رابطه (۴۹)}$$

خطی‌سازی محدودیت ۲۳ نیز با تعریف متغیر صفر و یک  $l_{iuc}^P$  و متغیرهای غیرمنفی  $F_{iuc}^P$  و  $F'_{iuc}^P$  بر اساس روابط ۵۰-۵۶ انجام می‌شود. همچنین لازم است که برای متغیر  $F'_{iuc}^P$  نیز چهار محدودیت مشابه ۵۳-۵۶ اضافه گردد.

$$T_{ja'd}^P = A_j u_{ja'i}^P u_{jdu}^P F_{iuc}^P + E_j u_{ja'i}^P u_{jdu}^P F'_{iuc}^P \quad \text{رابطه (۵۰)}$$

$$d' = d - 1 \quad \forall d, P, j, i, c \quad i \neq u$$

$$Z_{ic}^P + Z_{uc}^P - 2 \geq M(l_{iuc}^P - 1) \quad \forall P, c, u, i \quad \text{رابطه (۵۱)}$$

$$Z_{ic}^P + Z_{uc}^P - 1 \geq M l_{iuc}^P \quad \forall P, c, u, i \quad \text{رابطه (۵۲)}$$

$$F_{iuc}^P \geq (x_i^P - x_u^P) + (y_i^P - y_u^P) + M(l_{iuc}^P - 1) \quad \forall P, c, u, i \quad \text{رابطه (۵۳)}$$

$$F_{iuc}^P \geq (x_i^P - x_u^P) - (y_i^P - y_u^P) + M(l_{iuc}^P - 1) \quad \forall P, c, u, i \quad \text{رابطه (۵۴)}$$

$$F_{iuc}^P \geq -(x_i^P - x_u^P) + (y_i^P - y_u^P) + M(l_{iuc}^P - 1) \quad \forall P, c, u, i \quad \text{رابطه (۵۵)}$$

$$F_{iuc}^P \geq -(x_i^P - x_u^P) - (y_i^P - y_u^P) + M(l_{iuc}^P - 1) \quad \forall P, c, u, i \quad \text{رابطه (۵۶)}$$

وجود عبارت  $g_{jd}^P X_{it}$  در روابط ۲۴ و ۲۶ باعث غیرخطی شدن این محدودیت‌ها شده است که برای خطی کردن

آن‌ها از متغیر غیر منفی  $g x_{jd}^P$  به جای عبارت  $g_{jd}^P X_{it}$  و محدودیت‌های ۵۷-۵۹ استفاده می‌گردد.

$$gx_{jait}^P \leq MX_{it} \quad \forall P, i, j, d, t \quad \text{رابطه (۵۷)}$$

$$gx_{jait}^P \leq g_{jd}^P \quad \forall P, i, j, d, t \quad \text{رابطه (۵۸)}$$

$$gx_{jait}^P \geq g_{jd}^P - M(1 - X_{it}) \quad \forall P, i, j, d, t \quad \text{رابطه (۵۹)}$$

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در رابطه با تولید سلولی و چیدمان پویا و با تکیه بر ادبیات موضوع، مسئله بررسی شده در این تحقیق از نوع مسائل Np-hard است، به طوری که با افزایش ابعاد مسئله زمان حل به صورت چشمگیری افزایش خواهد یافت. بدین لحاظ جهت حل آن در ابعاد بزرگتر از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده شده است.

### اعتبارسنجی مدل

در این بخش به منظور اعتبارسنجی مدل چند مثال عددی ارائه و حل شده که برخی از داده‌های آن بر اساس تحقیقات مرتبط در ادبیات موضوع استخراج گردیده است. مدل مربوطه در نرم افزار گمز کدنویسی و داده‌های ورودی بر اساس جداول ۲، ۳ و ۴ در نظر گرفته شده است که به ترتیب شامل داده‌های مربوط به ماشین‌ها، قطعات و کارگران می‌باشد.

جدول ۲. داده‌های مربوط به ماشین‌ها

شماره مسئله		۱		۲			۳		۴			۵		ماشین اطلاعات
۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۳		
۱۲۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۱۸۰۰	۲۱۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۳۰۰	۹۰۰	۱۱۰۰	۸۰۰	۹۵۰	۱۱۰۰	قیمت خرید	
۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۶۰۰	۱۴۰۰	۲۳۰۰	۱۸۰۰	۱۰۰۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۶۵۰	۹۰۰	درآمد فروش	
۹	۷	۱۲	۱۰	۱۰	۱۳	۶	۹	۱۱	۸	۱۰	۷	۱۰	هزینه متغیر	
۱۱	۹	۱۴	۱۱	۱۲	۱۵	۸	۱۰	۱۴	۱۰	۱۱	۸	۱۲	هزینه اضافه کاری	
۱۲۵	۱۳۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۳۰	۹۰	۱۲۰	۱۱۵	۱۲۰	۱۵۰	۹۵	۸۵	هزینه ثابت و استهلاک	
۹۰۰۰		۲۰۰۰۰			۱۲۰۰۰		۸۵۰۰			۷۴۰۰		محدودیت بودجه		

جدول ۳. داده‌های مربوط به قطعات

شماره مسئله		۱		۲			۳		۴		۵		قطعه اطلاعات
۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲		
۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۵	۷۰	۱۲۰	۱۲۰	۶۵	۸۰	۴۵	۷۰	تقاضا		
۳:۳۰	۶:۳۰	۲:۲۰	۱:۴۵	۳:۳۰	۱۲:۳۰	۱۶:۲۰	۳:۴۵	۴:۳۰	۱:۳۰	۲:۱۵	زمان عملیات ۱ (دقیقه:ثانیه)		
۴:۳۰	۷:۳۰	---	۴:۲۰	۶:۰۰	۱۸:۱۰	۱۰:۴۵	۶:۲۰	۱:۲۵	۴:۰۰	۸:۳۰	زمان عملیات ۲ (دقیقه:ثانیه)		
---	---	---	---	۷:۳۰	۵:۲۰	---	---	---	۳:۲۵	---	زمان عملیات ۳ (دقیقه:ثانیه)		
۲-۱	۱-۲	۲	۳-۲	۳-۴-۱	۱-۲-۱	۲-۱	۲-۱	۱-۳	۳-۲-۱	۳-۱	ترتیب ماشین‌ها برای انجام عملیات		

جدول ۴. داده‌های مربوط به کارگران

شماره مسئله		۱			۲			۳			۴			۵						
اطلاعات	کارگر	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳				
		هزینه استخدام و اخراج	۳۵	۳۲	۳۰	۳۳	۲۷	۳۱	۴۰	۳۴	۳۸	۵۰	۵۵	۶۰	۷۰	۹۰	۹۵	۸۷	۹۲	۵۰
حقوق کار با ماشین ۱	۱۲	۱۲	۹	۱۱	۱۲	۱۴	۱۰	۱۰	۱۳	۱۵	۱۷	۱۲	۱۶	۲۰	۲۴	۲۳	۲۵	۲۰	۲۰	۱۸
حقوق کار با ماشین ۲	۱۱	۹	۱۰	۱۳	۱۲	۱۴	۹	۱۱	۱۴	۱۸	۱۲	۱۶	۱۷	۲۴	۲۶	۳۰	۲۴	۱۸	۱۶	۱۶
حقوق کار با ماشین ۳	---	---	---	---	۱۴	۹	۱۳	۱۲	۱۵	---	---	---	---	---	---	---	---	۱۶	۱۶	۲۰
حقوق کار با ماشین ۴	---	---	---	---	۱۲	۱۰	۱۴	۱۱	۱۱	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
هزینه آموزش ماشین ۱	۷	۵	۳	۶	۸	۱۰	۱۱	۹	۱۵	۸	۹	۶	۱۰	۱۵	۱۸	۲۰	۱۹	۱۲	۱۳	۱۰
هزینه آموزش ماشین ۲	۶	۰	۳	۸	۶	۱۲	۹	۱۱	۱۴	۹	۱۰	۹	۱۷	۱۲	۱۶	۱۶	۱۶	۹	۱۱	۱۱
هزینه آموزش ماشین ۳	---	---	---	---	۱۰	۹	۱۲	۸	۱۱	---	---	---	---	---	---	---	---	۱۴	۱۴	۱۳
هزینه آموزش ماشین ۴	---	---	---	---	۱۴	۱۳	۱۲	۱۳	۱۲	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
محدودیت بودجه	۷۰	---			۱۱۰	---			۸۴	---			۱۲۰	---			۱۵۰			

نتایج مربوط به حل مدل در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است که نشان‌دهنده معتبر بودن مدل می‌باشد. این نتایج شامل هزینه‌های نهایی ماشین‌ها و کارگران به تفکیک مولفه‌های آنها می‌باشد. همچنین در جدول ۶ استخدام کارگران و تخصیص آن‌ها به ماشین‌های مطلوب نیز مشخص گردیده است.

جدول ۵. نتایج مربوط به ماشین‌ها

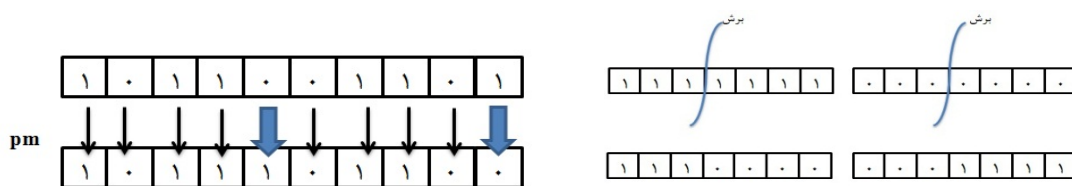
شماره مسئله	ماشین	قیمت خرید	درآمد فروش	هزینه ثابت	هزینه متغیر	هزینه اضافه کاری
۱	۱	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۱۲۵	۴۵۲	۰
	۲	۱۵۰۰	۱۱۰۰	۱۳۰	۳۵۳	۰
۲	۱	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۴۰	۴۸۶	۰
	۲	۱۸۰۰	۱۶۰۰	۱۰۰	۵۲۵	۰
	۳	۲۱۰۰	۱۴۰۰	۱۱۰	۴۷۶	۰
	۴	۲۵۰۰	۲۳۰۰	۱۳۰	۶۵۰	۰
۳	۱	۲۰۰۰	۱۸۰۰	۹۰	۳۷۲	۱۵۴۰
	۲	۱۳۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰	۵۴۷	۱۱۳۰
۴	۱	۹۰۰	۶۰۰	۱۱۵	۶۲۸	۰
	۲	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰	۴۸۱	۰
	۳	۸۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۷۰۳	۰
۵	۱	۹۵۰	۶۵۰	۹۵	۵۲۹	۰
	۲	۱۱۰۰	۹۰۰	۸۵	۶۱۴	۰
	۳	۷۵۰	۶۰۰	۱۱۰	۴۰۱	۰

جدول ۶. نتایج مربوط به هزینه‌های کارگر

شماره مسئله	کارگران استخدامی	دستگاه تخصیص یافته به کارگر	هزینه استخدام و اخراج	مجموع هزینه آموزش و حقوق
۱	۲	۲	۳۲	۹
	۳	۱	۳۰	۱۲
۲	۱	۱	۳۳	۱۷
	۲	۲	۲۷	۱۸
	۳	۳	۳۱	۱۷
	۶	۴	۲۸	۲۳
۳	۱	۱	۵۰	۲۳
	۲	۲	۵۵	۲۲
۴	۱	۱	۹۰	۳۸
	۳	۳	۸۷	۳۳
	۴	۲	۹۲	۴۰
۵	۱	۲	۵۰	۲۷
	۲	۳	۶۰	۳۰
	۳	۱	۵۸	۲۸
۶	۱	۱	۸۴	۳۱
	۲	۲	۸۰	۲۹

### روش حل

در این تحقیق برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک روشی است که به جست‌وجوی تطبیقی تصادفی اشاره می‌کند و در هر مرحله از حل، جوابی را به دست می‌آورد و در مرحله بعد آن جواب را در صورت امکان بهبود می‌دهد (امین پور، ایرج پور، یزدانی، محتشمی، ۱۳۹۹). برای اینکه بتوان مسئله را به وسیله الگوریتم ژنتیک حل کرد، لازم است آن را به فرم مورد نیاز این الگوریتم تبدیل کرد. از این رو باید راه حل مورد نیاز مسئله به گونه‌ای تعریف شود که قابل نمایش به وسیله یک کروموزوم باشد. در این تحقیق ژن‌های موجود در هر کروموزوم‌ها بر اساس اعداد ۰ و ۱ کدگذاری می‌شوند به طوری که متغیرهای مسئله بر اساس آن در نظر گرفته شده و مقادیر آن محاسبه می‌گردد. برای تشخیص بهتر موجودات درون جمعیت باید معیاری تعریف گردد که بر اساس آن موجودات شایسته‌تر انتخاب گردد. در این پژوهش تابع هدف مسئله به عنوان معیار انتخاب جواب بهتر در نظر گرفته می‌شود، به طوری که جواب‌های موجه ایجاد شده با مقادیر تابع هدف کمتر انتخاب می‌گردد. در الگوریتم ژنتیک برای بهبود دادن جواب و ایجاد فرزندان جدید، دو عمل تقاطع و جهش روی والدین صورت می‌گیرد که هر کدام از این دو عمل، با نرخ جهش و تقاطع در الگوریتم مشخص می‌شود (تیموری، امیری، الفت، زندیه، ۱۳۹۹). به طور کلی دو روش تقاطع تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای وجود دارد که در این تحقیق از روش تک‌نقطه‌ای استفاده می‌گردد و نحوه انجام آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص شده است، یک نقطه تصادفی از دو والد انتخاب و با انجام عمل تقاطع دو فرزند جدید ایجاد می‌گردد. سپس موجه بودن جواب‌ها بررسی می‌گردد به طوری که مقدار هر متغیر بر اساس کروموزوم‌های فرزندان محاسبه شده و با محدودیت‌های مربوط به آن متغیر مقایسه می‌گردد. در صورتی که جواب‌ها موجه باشد، جواب حفظ شده و مراحل بعد الگوریتم اجرا می‌شود، در غیر این صورت مجدداً عمل تقاطع برای ایجاد جواب موجه اجرا می‌گردد.

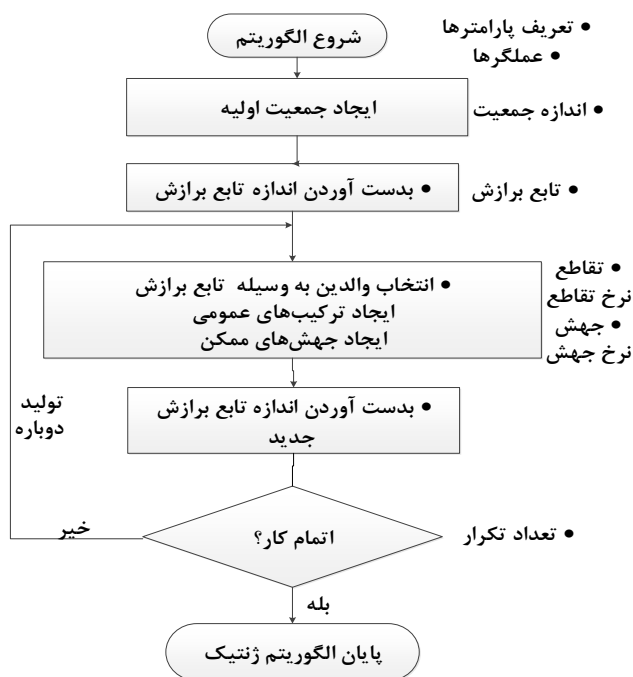


شکل ۱. نحوه انجام عملیات تقاطع تک نقطه‌ای

شکل ۲. نحوه انجام عملیات جهش

عملیات جهش امکان فرار از نقاط بهینه محلی را فراهم می‌آورد. بر این اساس به صورت تصادفی تعدادی از کروموزومها انتخاب و به طور تصادفی مقادیر یک یا چند ژن تغییر می‌یابد. در این تحقیق نیز به ازای هر کروموزوم یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود. اگر عدد تولید شده کوچکتر از نرخ جهش  $P_m$  بود، به ازای هر ژن عمل جهش انجام می‌شود، در غیر این صورت از جهش دادن صرف نظر می‌شود. در شکل ۲ نحوه انجام عملیات جهش نشان داده شده است به طوری که در ژن پنجم و دهم جهش صورت گرفته است. بدیهی است که در این مرحله نیز موجه بودن جوابها بررسی می‌گردد به طوری که مقدار هر متغیر بر اساس کروموزومهای ایجاد شده در مرحله جهش محاسبه شده و با محدودیت‌های مربوط به آن متغیر مقایسه می‌گردد.

برای شروع حل مسئله لازم است یک جواب اولیه موجه ایجاد شود تا الگوریتم بر مبنای آن و بر اساس عملیات تقاطع و جهش جواب‌های بهبود یافته را تولید نماید. در این تحقیق نیز جواب اولیه موجه به صورت تصادفی و با توجه به محدودیت‌های مسئله ایجاد می‌گردد. شکل ۳ فلوجارت مربوط به الگوریتم ژنتیک جهت مدل مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم ژنتیک برای مدل

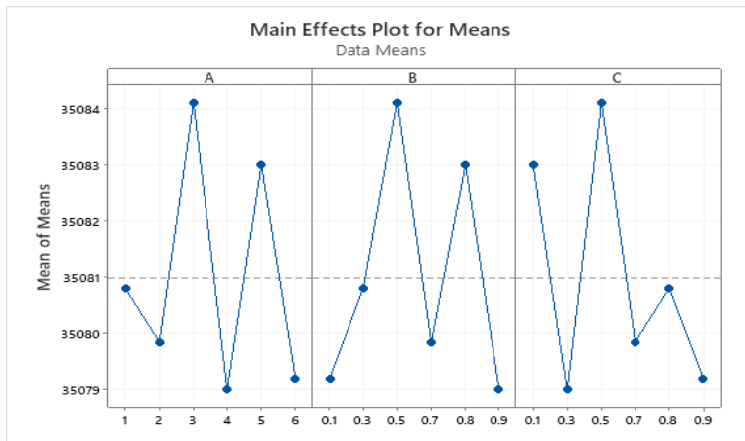
### تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک با روش تاگوچی

لازم است پارامترهای الگوریتم با توجه به مسئله اصلی تشخیص داده و در طول فرایند حل از آن‌ها استفاده گردد. در این تحقیق چهار پارامتر تعداد جمعیت، نرخ تقاطع، نرخ جهش و تعداد تکرار در الگوریتم ژنتیک مورد نیاز است. به منظور انتخاب و تعیین این پارامترها شش سطح فرض می‌گردد که تعداد جمعیت و تعداد تکرار به صورت یک زوج مرتب در نظر گرفته شده است به طوری که ضرب آن‌ها عددی ثابت است. این شش سطح در جدول ۷ مشخص شده و با روش تاگوچی بهترین سطح از آن‌ها انتخاب گردیده است.

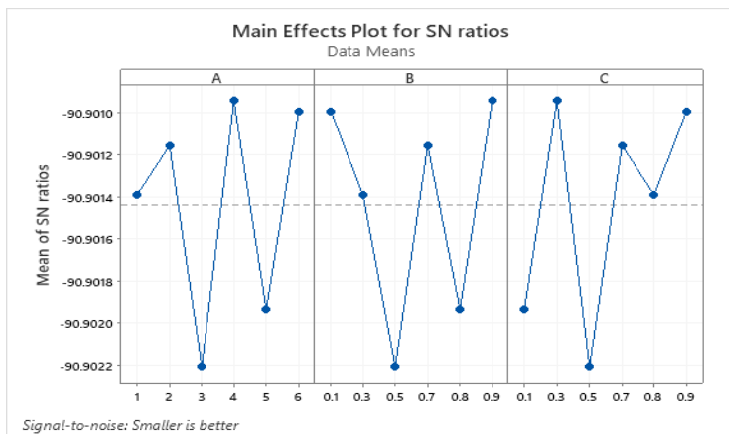
جدول ۷. اطلاعات مربوط به سطوح مختلف پارامترها

سطح ۶	سطح ۵	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
(۳۰،۲۰۰)	(۲۰۰،۳۰)	(۱۰۰،۶۰)	(۶۰،۱۰۰)	(۱۲۰،۵۰)	(۵۰،۱۲۰)	(جمعیت، تکرار)
۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۱	نرخ تقاطع
۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۱	نرخ جهش

نتایج مربوط به بررسی پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل زوج مرتب (تعداد جمعیت، تعداد تکرار)، نرخ تقاطع و نرخ جهش به تفکیک سطوح مختلف در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار میانگین پاسخ‌ها برای روش تاگوچی



شکل ۵. نمودار SN ratios برای روش تاگوچی

با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۴ و ۵ می‌توان بهترین سطح از هر پارامتر را مشخص نمود که در جدول ۸ انتخاب پارامترهای الگوریتم ژنتیک خلاصه شده است.

جدول ۸. نتایج انتخاب پارامترهای الگوریتم ژنتیک

مقدار	سطح انتخابی	(جمعیت، تکرار)
(۱۰۰۶۰)	۴	
۰/۹	۶	نرخ تقاطع
۰/۳	۲	نرخ جهش

### تجزیه و تحلیل نتایج

الگوریتم ژنتیک در محیط Matlab کدنویسی و برای نشان دادن کارایی آن از یک مثال بر اساس تحقیقات مرتبط در ادبیات موضوع استفاده گردید که شامل ۲ شیفت کاری، ۳ دستگاه (دستگاه ۱ و ۲ هر کدام دو نوع در بازار موجود است)، ۴ قطعه، ۳ عملیات و ۴ کارگر می‌باشد. مسئله دارای ۲ سلول و ظرفیت هر سلول ۲ ماشین است. زمان حمل قطعات در داخل و خارج سلول‌ها به ترتیب ۱ و ۲ واحد زمانی فرض می‌شود که هزینه هر واحد زمانی ۱ واحد پولی است. ابعاد سالن تولید ۸×۸ و محدودیت بودجه برای کارگران و ماشین‌ها به ترتیب برابر با ۶۸ و ۲۳۰۰۰ می‌باشد. داده‌های مربوط به دستگاه‌ها، قطعات و کارگران در جداول ۹ الی ۱۲ خلاصه شده است.

جدول ۹. داده‌های مربوط به ماشین‌ها

اطلاعات ماشین - نوع	هزینه خرید	درآمد فروش	هزینه ثابت	هزینه متغیر	هزینه اضافه کاری	زمان در دسترس
۱-۲	۸۰۰۰	۲۰۰۰	۶۰۰	۸	۱۱	۴۸۰
۲-۱	۸۰۰۰	۲۵۰۰	۹۰۰	۵	۱۰	۴۸۰
۲-۲	۷۸۰۰	۲۰۰۰	۸۰۰	۷	۱۳	۴۸۰
۳	۷۰۰۰	۱۰۰۰	۶۰۰	۷	۱۱	۴۸۰

جدول ۱۰. اطلاعات مربوط به توالی عملیات و تقاضای هر قطعه در هر شیفت

قطعه	شیفت ۱		شیفت ۲	
	توالی عملیات روی ماشین‌ها	تقاضا	توالی عملیات روی ماشین‌ها	تقاضا
۱	۱-۲	۵۰	۱-۲	۶۰
۲	۲-۱-۳	۴۰	۲-۱-۳	۳۰
۳	۱-۲-۳	۵۰	۱-۲-۳	۵۰
۴	۲-۳	۳۰	۲-۳	۴۰

جدول ۱۱. اطلاعات مربوط به زمان عملیات روی ماشین‌ها

قطعه	ماشین - نوع			۴	۳	۲	۱
۱-۱	۱	۱	۱	-	۱/۵	۲	۱
۱-۲	۱/۵	۲/۵	۲/۵	-	۲/۵	۲/۵	۱/۵
۲-۱	۲	۲	۲	۳	۱/۵	۲	۲
۲-۲	۲	۲	۲	۳	۱/۵	۲/۵	۲
۳	-	۱	۱	۲	۱	۱	-

جدول ۱۲. هزینه‌های مربوط به استخدام و اخراج، حقوق و آموزش کارگران

هزینه استخدام	هزینه استخدام	حقوق (شیفت ۲، شیفت ۱)										آموزش					نوع - ماشین کارگر
		۳		۲-۲		۲-۱		۱-۲		۱-۱		۳	۲-۲	۲-۱	۱-۲	۱-۱	
۲۰	۱۵	۹	۸	۱۰	۹	۱۰	۹	۱۱	۱۰	۱۰	۹	۵	۱	۳	۱	۳	۱
۱۷	۱۵	۱۱	۱۰	۱۲	۱۱	۱۳	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۱	۱	۰	۱	۰	۲	۲
۲۰	۱۰	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۱۲	۱۲	۱۲	۱۱	۹	۹	۳	۰	۰	۱	۵	۳
۱۹	۱۰	۱۱	۱۰	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱	۱	۰	۱	۱	۲	۴

با حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک نتایج به دست آمده در جداول ۱۳ تا ۱۶ خلاصه شده است. جدول ۱۳ تخصیص هر ماشین به سلول‌ها و مختصات آن‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به منابع مالی موجود برای خرید دستگاه‌های تولیدی دو حالت از ۴ حالت، امکان پذیر می‌باشد که هزینه‌های این دو حالت در جدول ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به هزینه کمتر برای حالت اول، این حالت یعنی خرید نوع ۲ از ماشین ۱ و نوع ۱ از ماشین ۲ انتخاب می‌گردد.

جدول ۱۳. نتایج مربوط به مختصات و سلول استقراری هر ماشین

ماشین	۳	۲	۱
سلول تخصیص داده شده به ماشین	۲	۱	۱
مرکز ماشین (X)	۵	۲	۲
مرکز ماشین (Y)	۲	۲	۵

جدول ۱۴. نحوه انتخاب ماشین‌ها و هزینه آن‌ها

هزینه کلی ماشین‌ها	هزینه متغیر کل (شیفت ۲، شیفت ۱)		هزینه ثابت کل (شیفت ۲، شیفت ۱)		هزینه اضافه کاری (شیفت ۲، شیفت ۱)		مدت زمان انجام کار (شیفت ۲، شیفت ۱)		خروجی‌ها حالت‌های موجود
	۶۵۸۲	۶۵۸۹	۲۱۰۰	۲۱۰۰	۰	۰	۳۷۵	۳۵۲	
۱۷۳۷۱	۶۵۸۲	۶۵۸۹	۲۱۰۰	۲۱۰۰	۰	۰	۳۷۵	۳۵۲	خرید نوع ۱ از ماشین ۲ و نوع ۲ از ماشین ۱
۱۹۰۲۴	۷۵۴۲	۷۴۸۲	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۰	۰	۳۹۰	۳۶۵	خرید نوع ۲ از ماشین ۲ و نوع ۱ از ماشین ۱



جدول ۱۵ کارگران استخدام شده، ماشین تخصیص داده شده به آن‌ها و هزینه‌های هر یک را به تفکیک نشان می‌دهد که بر اساس محدودیت ۶۸ واحدی برای هزینه آموزش و حقوق کارگران انتخاب شده است. هزینه استخدام و اخراج کارگران معادل با ۹۴، هزینه آموزش و حقوق ۶۸ و هزینه کل برابر با ۱۶۲ واحد پولی می‌باشد.

جدول ۱۵. نتایج مربوط به کارگران

کارگران استخدامی	ماشین تخصیص یافته به کارگر	هزینه استخدام و اخراج	مجموع هزینه آموزش و حقوق
۱	۲	۳۵	۲۲
۳	۱	۳۰	۲۴
۴	۳	۲۹	۲۲
مجموع هزینه		۹۴	۶۸
مجموع کل هزینه‌ها		۱۶۲	

با توجه به نتایج حل، هزینه حمل قطعات بین ماشین‌ها نیز ۳۳ واحد پولی به دست آمده است. در جدول ۱۶ کلیه هزینه‌ها به تفکیک ارائه شده است که مجموع هزینه کل برابر با ۳۴۰۶۶ واحد پولی می‌باشد.

جدول ۱۶. اطلاعات مربوط به هزینه کل

مجموع کل	درآمد فروش ماشین‌ها	هزینه حمل قطعات	هزینه مربوط به کارگران	هزینه کلی ماشین‌ها در دو شیفت	هزینه خرید ماشین‌ها در بهترین حالت
۳۴۰۶۶	۶۵۰۰	۳۳	۱۶۲	۱۷۳۷۱	۲۳۰۰۰

مسئله فوق در نرم‌افزار گمز بر اساس مدل ریاضی پیشنهاد شده نیز حل گردید که مقدار تابع هدف دقیقاً برابر با ۳۴۰۶۶ به دست آمد ولی زمان حل آن در مقایسه با الگوریتم ژنتیک قابل توجه بود به طوری که الگوریتم ژنتیک بعد از گذشت ۱۰ ثانیه به جواب فوق رسید در صورتی که زمان حل مدل ریاضی ۶۵ ثانیه می‌باشد.

### تحلیل حساسیت

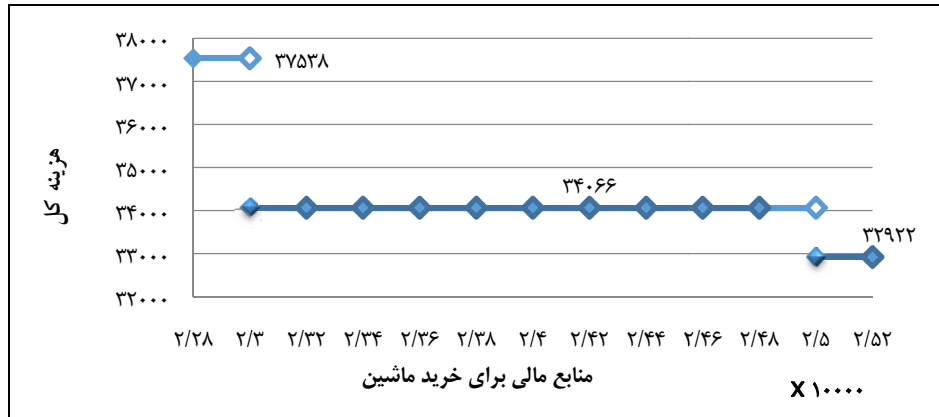
در این بخش پارامترهای محدودیت بودجه مربوطه به ماشین‌ها و کارگران تحلیل حساسیت شده و اثر هر کدام روی تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس مثال فوق، ترکیب‌های مختلف خرید ماشین و هزینه‌های آن در جدول ۱۷ خلاصه شده است که هزینه هر کدام از ترکیب‌ها به ترتیب ۲۲۸۰۰، ۲۳۰۰۰، ۲۴۸۰۰ و ۲۵۰۰۰ واحد پولی است.

جدول ۱۷. هزینه مربوط به خرید هر یک از حالت‌ها

حالات	ماشین‌های خریداری شده	هزینه خرید
حالت اول	نوع دوم از ماشین اول و نوع دوم از ماشین دوم و ماشین سوم	۲۲۸۰۰
حالت دوم	نوع دوم از ماشین اول و نوع اول از ماشین دوم و ماشین سوم	۲۳۰۰۰
حالت سوم	نوع اول از ماشین اول و نوع دوم از ماشین دوم و ماشین سوم	۲۴۸۰۰
حالت چهارم	نوع اول از ماشین اول و نوع اول از ماشین دوم و ماشین سوم	۲۵۰۰۰

در شکل ۶ تأثیر محدودیت منابع مالی برای خرید ماشین‌های تولیدی بر روی هزینه کل بررسی شده است. بر اساس حالت‌های مختلف در جدول ۱۷، نمودار تحلیل حساسیت به صورت پلکانی می‌باشد که در نقاط ذکر شده در جدول

۱۷، هزینه کل تغییر می کند. هزینه کل با محدودیت ۲۳۰۰۰ واحد پولی از هزینه کل در حالت ۲۲۸۰۰ واحد پولی کمتر خواهد شد. همچنین در نقطه ۲۴۸۰۰، هزینه کل نسبت به نقطه ۲۳۰۰۰ تغییری نخواهد کرد. بهترین مقدار زمانی است که منابع مالی مربوط به ماشین ها ۲۵۰۰۰ واحد پولی باشد.

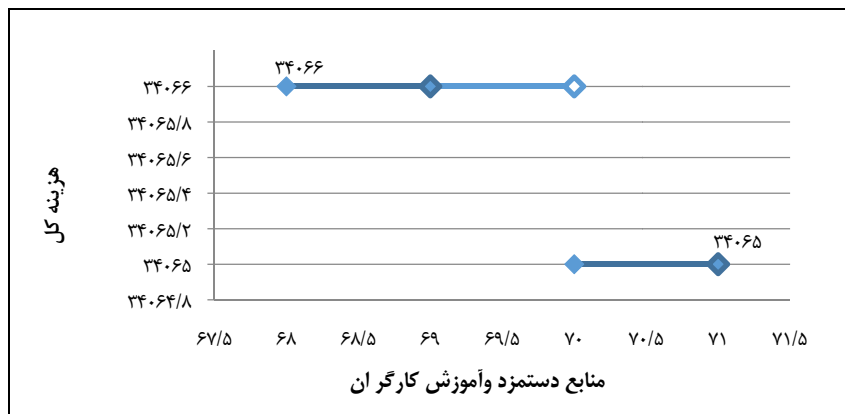


شکل ۶. آنالیز حساسیت هزینه کل نسبت به منابع مالی برای خرید ماشین ها

تأثیر محدودیت منابع مالی برای کارکنان با فرض سه مقدار برای آن بررسی شده که نتایج آن در جدول ۱۸ ارائه گردیده است. نمودار تحلیل حساسیت این پارامتر در شکل ۷ نشان می دهد که با تغییر مقدار از ۶۸ به ۶۹ تغییری در هزینه کل ایجاد نمی شود اما اگر به ۷۰ افزایش یابد هزینه کل ۱ واحد کاهش خواهد داشت و در ادامه با افزایش این مقدار تغییری در هزینه ایجاد نمی شود. بنابراین بهترین حالت برای محدودیت منابع مالی کارگران مقدار ۷۰ می باشد.

جدول ۱۸. هزینه کل بر اساس محدودیت منابع مالی برای کارگران

منابع مالی برای حقوق و آموزش کارگران	هزینه کل
۶۸	۳۴۰۶۶
۶۹	۳۴۰۶۶
۷۰	۳۴۰۶۵



شکل ۷. آنالیز حساسیت هزینه کل نسبت به منابع دستمزد و آموزش کارگران

### بررسی پیچیدگی مسئله

با توجه به Np-hard بودن مسئله مورد بررسی با اضافه شدن ابعاد مسئله مانند تعداد کارگران، تعداد سلول‌ها، تعداد قطعه و تعداد ماشین‌ها، زمان حل بهینه آن به شدت افزایش یافته و حتی زمان حل الگوریتم ژنتیک نیز افزایش خواهد یافت. در جدول ۱۹ زمان حل و تابع هدف برای مسائل مختلف توسط مدل ریاضی در گمز (سالور بارون) و الگوریتم ژنتیک در Matlab محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مسائل با ابعاد کوچک تابع هدف الگوریتم ژنتیک بسیار نزدیک به مقدار بهینه می‌باشد که نشان از کارایی بالای این الگوریتم است به طوری که در زمان بسیار کمتری نسبت به روش بهینه قابلیت یافتن جواب نسبتاً خوب را دارد. نتایج جدول ۱۹ نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد مسئله امکان محاسبه جواب بهینه در زمان مناسب وجود ندارد و از آنجا که کارایی الگوریتم ژنتیک در ابعاد کوچک بسیار بالاست بنابراین از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ قابل استفاده است. با مقایسه نتایج مربوط به مسائل ۱، ۲ و ۳ مشخص می‌گردد که با افزایش تعداد کارگران پیچیدگی مسئله بیشتر شده به طوری که زمان حل مسئله نیز افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد سلول‌ها نیز مسئله پیچیده‌تر می‌شود که مقایسه نتایج حل دو مسئله ۴ و ۵ دلیلی بر این ادعا می‌باشد. نتایج جدول ۱۹ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد قطعات و ماشین‌ها نیز مسئله سخت‌تر می‌گردد که مسائل ۹ الی ۱۶ نیز این موضوع را به وضوح نشان می‌دهد.

جدول ۱۹. مقایسه زمان حل مسئله و جواب تابع هدف

شماره مسئله	تعداد کارگر - تعداد سلول - تعداد قطعه - تعداد ماشین	تابع هدف بهینه (گمز)	زمان حل دقیق (ثانیه)	تابع هدف (ژنتیک)	زمان حل الگوریتم ژنتیک (ثانیه)
۱	۳-۲-۲-۵	۶۴۱۴	۵	۶۴۱۴	۱
۲	۳-۳-۲-۵	۸۰۱۱	۹	۸۰۱۱	۳
۳	۳-۴-۲-۵	۸۰۷۸	۲۰	۸۰۷۸	۴
۴	۴-۴-۲-۵	۱۲۳۶۷	۵۲	۱۲۳۶۷	۷
۵	۴-۵-۲-۵	۱۲۷۶۷	۳۷۴	۱۲۷۷۷	۱۰
۶	۸-۷-۳-۱۰	۱۴۱۸۱	۶۰۴	۱۴۱۹۶	۲۱
۷	۹-۷-۳-۱۰	۱۶۹۲۰	۶۲۹	۱۶۹۳۸	۲۹
۸	۱۰-۸-۳-۱۰	۱۷۴۱۲	۶۴۷	۱۷۴۵۰	۳۸
۹	۱۲-۹-۴-۱۵	-	-	۲۱۰۱۸	۵۰
۱۰	۱۳-۱۰-۴-۱۵	-	-	۳۱۷۶۴	۹۷
۱۱	۱۵-۱۱-۴-۱۵	-	-	۳۶۹۱۲	۱۰۰
۱۲	۱۶-۱۲-۵-۲۰	-	-	۴۰۵۵۲	۱۱۴
۱۳	۱۸-۱۳-۵-۲۰	-	-	۴۲۶۰۰	۱۲۰
۱۴	۲۰-۱۴-۵-۲۰	-	-	۴۵۷۹۲	۱۳۱
۱۵	۲۲-۱۶-۶-۲۵	-	-	۵۱۹۶۰	۱۴۰
۱۶	۲۳-۱۷-۶-۲۵	-	-	۵۷۰۷۳	۱۵۵
۱۷	۲۴-۱۸-۶-۲۵	-	-	۶۲۳۲۴	۱۶۴

## یافته‌ها و مصادیق کاربردی تحقیق

محدودیت بودجه همیشه یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تأثیرگذار و حیاتی در تصمیم‌گیری مدیران می‌باشد. در این تحقیق محدودیت بودجه به عنوان یک جنبه کاربردی در مسئله در نظر گرفته شده و مسئله با این محدودیت بررسی گردیده است. با زمان بندی صحیح عملیات و تخصیص مناسب کارگران از هزینه‌های اضافی در زمینه آموزش غیرتخصصی کارگران و استخدام یا اخراج بیهوده آن‌ها جلوگیری شده و مدیران مربوطه می‌توانند بودجه ذخیره شده این موارد را در موقعیت‌های مناسب دیگری مصرف نمایند. از طرفی به منظور باقی ماندن در عرصه رقابت و به دست آوردن و حفظ سهم بازار لازم است که یک واحد تولیدی بتواند پاسخگوی تغییرات مکرر سلیقه‌های مشتریان بخصوص در طرح و تقاضای آن‌ها باشد. در این تحقیق با در نظر گرفتن تشکیل سلول و چیدمان پویا این امکان برای تغییر سلول‌ها، ترکیب آن‌ها، چیدمان بین سلول‌ها و داخل آن‌ها وجود دارد به گونه‌ای در هر دوره امکان جابجایی و تغییرات موجب می‌شود که تولید کننده بتواند با انعطاف‌پذیری بالا درصد پاسخگویی به نیازهای بازار برآید. از طرفی وجود چیدمان پویا موجب کاهش هزینه‌های جریان مواد و قطعات نیم‌ساخته، صرفه‌جویی در خرید ماشین‌های اضافی و استخدام اضافی کارگران می‌گردد که این موارد باعث کاهش قیمت تمام شده محصول و افزایش قدرت رقابت با رقیبان می‌گردد. همچنین موجب این می‌گردد که مدیران با محدودیت بودجه در مضیقه نباشند و از محل کاهش هزینه‌ها برای موقعیت‌های مهم و حیاتی تصمیم‌گیری صحیح و مناسبی داشته باشند.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق مسئله تولید سلولی با چیدمان پویا، زمان بندی عملیات و تخصیص کارگران به صورت هم‌زمان با فرض محدودیت بودجه در رابطه با ماشین‌آلات و نیروی انسانی بررسی می‌گردد. همچنین امکان انتقال ماشین‌ها به مکان جدید، افزایش یا کاهش آن، استخدام و اخراج نیروی انسانی و آموزش آن‌ها وجود دارد. در ابتدا برای مسئله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه و خطی سازی آن نیز انجام شد. اعتبارسنجی مدل توسط چند مثال عددی بررسی شد که نتایج معتبر بودن مدل را نشان داد. سپس یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله ارائه گردید. نتایج حل توسط الگوریتم ژنتیک نشان داد که این الگوریتم دارای کارایی بالایی بوده و در مدت زمان مناسب جواب نسبتاً خوبی ارائه می‌دهد. از جمله محدودیت‌های این تحقیق عدم در نظر گرفتن موعد تحویل و هزینه‌های دیرکرد برای هر قطعه می‌باشد که می‌توان آن را به عنوان پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده مطرح نمود. قطعی بودن تقاضا و هزینه‌ها نیز از دیگر محدودیت‌های تحقیق حاضر می‌باشد که در تحقیقات آینده می‌تواند به صورت غیرقطعی، فازی و یا احتمالی فرض گردد. همچنین حل مسئله با الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر و مقایسه آن با نتایج این تحقیق نیز می‌تواند از جمله موضوعات مهم در تحقیقات آینده باشد.

## منابع

- امین‌پور، سعید؛ ایرج‌پور، علیرضا؛ یزدانی، مهدی؛ محتشمی، علی (۱۳۹۹). طراحی مدل چندهدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت خودرو با توجه به طرح‌های بازده انرژی و زمان. *مدیریت صنعتی*، ۱۲(۲)، ۳۱۹-۳۴۳.
- تیموری، احسان؛ امیری، مقصود؛ الفت، لعیا؛ زندیه، مصطفی (۱۳۹۹). مدل انتخاب تأمین کننده، تخصیص سفارش و قیمت‌گذاری در مدیریت زنجیره تأمین چند کالایی تک دوره‌ای و چند تأمین کننده با رویکرد روش‌های سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک. *مدیریت صنعتی*، ۱۲(۱)، ۱-۲۳.
- چینی‌فروشان، پیام؛ پورقناد، بهروز؛ شهرکی، نرگس (۱۳۹۰). ارائه رویکردی جدید در حل مسئله تشکیل سلولی با در نظر گرفتن مسیرهای تولیدی جایگزین. *فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی*، ۹(۲۳)، ۲۰۹-۲۳۱.
- محمدی، محمد؛ فرقانی، کامران (۱۳۹۷). حل مسئله یکپارچه تشکیل سلول، چیدمان گروهی و مسیریابی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی با برنامه‌ریزی پویا. *فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۶(۴۹)، ۶۷-۱۰۴.

## References

- Alimian, M., Ghezavati, V., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). New integration of preventive maintenance and production planning with cell formation and group scheduling for dynamic cellular manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 341-358.
- Aminpour, S., Irajpour, A., Yazdani, M., Mohtashami, A. (2020). The Design of a Multi-directional Network Chain Model Offering a Closed Loop in the Automotive Industry by Providing Energy and Time Efficiency Programs. *Industrial Management Journal*. 12(2), 319-343. (in Persian)
- Arkat, J., Hosseinabadi Farahani, M., Hosseini, L. (2011). Integrating cell formation with cellular layout and operations scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5), 637-647.
- Aryanezhad, M.B., Deljoo, V., Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J. (2009). Dynamic cell formation and the worker assignment problem: a new model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3), 329-342.
- Bagheri, M., Bashiri, M. (2013). A new mathematical model towards the integration of cell formation with operator assignment and inter-cell layout problems in a dynamic environment. *Applied Mathematical Modelling*, 38(4), 1237-1254.
- Bouaziz, H., Berghida, M., Lemouari, A. (2020). Solving the generalized cubic cell formation problem using discrete flower pollination algorithm. *Expert Systems with Applications*, 150, 13345.
- Chang, C.C., Wu, T.H., Wu, C.W. (2013). An efficient approach to determine cell formation, cell layout and intracellular machine sequence in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 438-450.
- Chinifrooshan, P., Pourghannad, B., Shahraki, N. (2011). A New Approach for Solving Cell Formation Problem Considering Alternative Process Routings. *Journal of Industrial Management Studies*, 9(23), 209-231. (in Persian)

- Chu, X., Gao, D., Cheng, S., Wu, L., Chen, J., Shi, Y., Qin, Q. (2019). Worker assignment with learning-forgetting effect in cellular manufacturing system using adaptive memetic differential search algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 381-396.
- Danilovic, M., Ilic, O. (2019). A novel hybrid algorithm for manufacturing cell formation problem. *Expert Systems with Applications*, 135(30), 327-350.
- Deljoo, V., Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Deljoo, F., Aryanezhad, M.B. (2010). Using genetic algorithm to solve dynamic cell formation problem. *Applied Mathematical Modelling*, 34(4), 1078-1092.
- Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., Golmohammadi, A., Javadi, B. (2012). An Electromagnetism-like algorithm for cell formation and layout problem. *Expert Systems with Applications*, 39(2), 2172-2182.
- Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., Khorrami, J. (2012). Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2642-2658.
- Kia, R., Shirazi, H., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A multi-objective model for designing a group layout of a dynamic cellular manufacturing system. *Journal of Industrial Engineering International*, 9(1), 1-14.
- Kong, T., Seong, K., Song, K., Lee, K. (2018). Two-mode Modularity Clustering of Parts and Activities for Cell Formation Problems. *Computers & Operations Research*, 100, 77-88.
- Krishnan, K.K., Mirzaei, S., Venkatasamy, V., Pillai, V.M. (2012). A comprehensive approach to facility layout design and cell formation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5), 737-753.
- Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M.M., Solimanpur, M. (2010). Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment. *Computers & Mathematics with Applications*, 60(4), 1014-1025.
- Mahdavi, I., Teymourian, E., Tahami Baher, N., Kayvanfar, V. (2013). An integrated model for solving cell formation and cell layout problem simultaneously considering new situations. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4), 655-663.
- Mehdizadeh, E., Daei Niaki, S.V., Rahimi, V. (2016). A vibration damping optimization algorithm for solving a new multi-objective dynamic cell formation problem with workers training. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 35-52.
- Mehdizadeh, E., Rahimi, V. (2016). An integrated mathematical model for solving dynamic cell formation problem considering operator assignment and inter/intra cell layouts. *Applied Soft Computing*, 42, 325-341.
- Mohammadi, M., Forghani, K. (2017) A hybrid method based on genetic algorithm and dynamic programming for solving a bi-objective cell formation problem considering alternative process routings and machine duplication. *Applied Soft Computing*, 53, 97-110.

- Mohammadi, M., Forghani, K. (2018). Solving an Integrated Cell Formation, Group Layout and Routing Problem Using Dynamic Programming Based Metaheuristic Algorithms. *Journal of Industrial Management Studies*, 16(49), 67-104. (in Persian)
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., Botta-Genoulaz, V. (2016). A bi-objective model in sustainable dynamic cell formation problem with skill-based worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 38, 46-62.
- Rafiei, H., Ghodsi, R. (2013). A bi-objective mathematical model toward dynamic cell formation considering labor utilization. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4) 2308-2316.
- Rajesh, K.V.D., Abid Ali, M.D., Chalapathi, P.V. (2018). Voids Based Approach for Solving Cell Formation Problems. *Materials Today: Proceedings*, 5(13), 27185–27192.
- Salimpour, S., Pourvaziri, H., Azab, A. (2021). Semi-robust layout design for cellular manufacturing in a dynamic environment. *Computers & Operations Research*, 133, 105367.
- Satuglu, S., Suresh, N.C. (2009). A goal-programming approach for design of hybrid cellular manufacturing systems in dual resource constrained environment. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 560-575.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Javadi, B., Safaei, N. (2007). Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands. *Applied Mathematics and Computation*, 184(2), 721-728.
- Teymouri, E., Amiri, M., Olfat, L., Zandieh, M. (2020). Presenting a Supplier Selection, Order Allocation, and Pricing Model in Multi-item, Single-Period, and Multi-Supplier Supply Chain Management with Surface Response Methodology and Genetic Algorithm Approach. *Industrial Management Journal*. 12(1), 1-23. (in Persian)
- Wu, X., Chu, C.-H., Wang, Y., Yue, D. (2007). Genetic algorithms for integrating cell formation with machine layout and scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 53(2), 277-289.
- Xue, G., Offodile, O.F. (2020). Integrated optimization of dynamic cell formation and hierarchical production planning problems. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106155.
- Zohrevand, A.M., Rafiei, H., Zohrevand, A.H. (2016). Multi-objective dynamic cell formation problem: A stochastic programming approach. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 323-332.