Industrial Management Journal

Print ISSN: 2008-5885

Online ISSN: 2423-5369

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: 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

مدیریت صنعتی
شاپا چاپی: ۵۸۸۵-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۵۳۶۹-۲۴۲۳

ارائه مدل ریاضی برای مسئله چیدمان سلولی پویا بر اساس زمان‌بندی، 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 برخورداری
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: زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران موضوعی است که در مسئله چیدمان سلولی، بخش شایان توجهی از هزینه را به خود اختصاص می‌دهد. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که منابع مالی با محدودیت روبه‌رو باشد. در این پژوهش، مسئله چیدمان پویای سلولی بر اساس زمان‌بندی، تخصیص کارگر و محدودیت‌های منابع مالی روی ماشین‌ها و کارگران به‌طور هم‌زمان بررسی شده است؛ به‌گونه‌ای که هدف حداقل‌کردن هزینه کل، شامل هزینه ماشین‌ها، کارگران و حمل‌ونقل قطعات است.

روش: در ابتدا یک مدل ریاضی برای مسئله مدنظر ارائه شد، سپس خطی‌سازی 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 محدودیت‌های منابع مالی ماشین‌ها و کارگران تحلیل حساسیت انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان‌دهنده 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.

نتیجه‌گیری: تحلیل حساسیت نشان داد که محدودیت‌های منابع مالی برای خرید ماشین‌ها نسبت به محدودیت‌های مالی کارگران تأثیر بیشتری روی تابع هدف دارد که اهمیت آن را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، تخصیص کارگر، چیدمان سلولی پویا، زمان‌بندی، منابع مالی

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

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۰، دوره ۱۳، شماره ۳، صص. ۴۳۵- ۴۶۳
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰
doi: https://doi.org/10.22059/IMJ.2021.323160.1007843
نوع مقاله: علمی پژوهشی
ناشر: دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران
© نویسندگان

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[1]، 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، گااو، چنگ، وو، چن، شی و کین[2]، 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، زمان‌بندی عملیات و تخصیص منابع است (زهره‌وند، رفیعی، زهره‌وند، ۲۰۱۶). مسئله تشکیل سلول، در واقع تشکیل و گروه‌بندی 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[3]، 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[1]، ۲۰۱۹). از طرف دیگر در محیط پویای واقعی، افق برنامه‌ریزی به دوره‌های کوچک‌تر تقسیم می‌گردد که هر دوره دارای تقاضا و نیازمندی‌های مختلفی می‌باشد به‌طوری‌که 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 (آریانژاد، دلجو، میرزاپور آل هاشم[2]، ۲۰۰۹). اهمیت و ضرورت تولید سلولی پویا زمانی بیشتر هویدا می گردد 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 نیاکی، رحیمی[3]، 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 به‌صورت مجزا انجام شده است. دلجو، میرزاپور آل هاشم، دلجو و آریانژآد (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[1] (۲۰۱۸) مسئله تشکیل سلول در تولید سلولی را بررسی و برای حل آن یک روش خوشه‌بندی دو حالته ارائه کردند. توکلی‌مقدم، جوادیان، جوادی و صفایی[2] (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 طرح‌بندی سلولی می‌باشد. نیاکان، بابلی، مویاکس و بوتا جنولاز[3] (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 الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده نمودند. وو، چو، یانگ و وو[4] (۲۰۰۷) مسئله چیدمان سلولی، زمان‌بندی گروهی و طرح‌بندی گروهی را به‌طور هم‌زمان بررسی و برای حل آن یک الگوریتم ژنتیک و دو الگوریتم ابتکاری ارائه کردند. بوآزیز، برقیدا و لموآری[5] (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. آن‌ها برای حل مسئله یک مدل ریاضی و یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه نمودند. آریانژاد و همکاران (۲۰۰۹) برای رسیدن به یک چیدمان سلولی پویا و تخصیص مناسب کارگران مدل جدیدی را پیشنهاد دادند که هدف حداقل کردن هزینه می‌باشد. محمدی و فرقانی[6] (۲۰۱۷) مسئله تولید سلولی را با فرض تکرار ماشین و مسیریابی فرایند جایگزین بررسی و برای حل آن یک رویکرد ترکیبی از برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. ستوگلو و سورش[7] (۲۰۰۹) در تحقیق خود یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای سیستم تولید سلولی ترکیبی در نظر گرفتند که شامل آنالیز نوسانات تقاضا، گروه‌بندی ماشین‌ها در داخل سلول‌های تولیدی و تخصیص قسمت‌های مختلف سلول‌ها می‌باشد. دانیلویک و ایلیک (۲۰۱۹) مسئله تشکیل سلول در تولید سلولی را بررسی نموده و برای حل آن یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی ارائه نمودند. مهدوی، علوی، پایدار و سلیمانپور[8] (۲۰۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای سیستم‌های تولید سلولی در محیط پویا ارائه نمودند که در آن پیکربندی مجدد، ماشین‌های تکراری، ظرفیت ماشین و تخصیص کارگران لحاظ شده است. جولای، توکلی‌مقدم، گلمحدی و جوادی[9] (۲۰۱۲) در تحقیق خود مدلی را ارائه نمودند که به بررسی و رفع موانع تولید سلولی، چیدمان سلولی و طرح‌بندی سلولی پرداخته است. برای حل مدل از روش‌های ابتکاری و الگوریتم شاخه و کران استفاده شده است. آرکات، حسین آبادی فراهانی و حسینی[10] (۲۰۱۲) در تحقیق خود دو مدل عدد صحیح مختلط را برای طراحی سیستم یکپارچه تولید سلولی ارائه نمودند که برای حل آن‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. سلیم‌پور، پوروزیری و آزاب[11] (۲۰۲۱) مسئله تشکیل سلول و چیدمان سلولی را در شرایط پویا بررسی نموده و جهت حل آن از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی بالا می‌باشد.

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 پیلای[1] (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[2] (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[3] (۲۰۲۰) مسئله تشکیل سلول، زمان‌بندی گروه و تولید را با در نظر گرفتن نت 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[4] (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[5] (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[6] (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[7] (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[8] (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[9] (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. Rafiei & Ghodsi
8. Chang, wu & Wu
9. Mehdizadeh & Rahimi

شده است ولی هر دو به‌صورت هم‌زمان در ادبیات موضوع مشاهده نگردید. از آن‌جا که در مسائل تولیدی، بودجه و منابع مالی نقش مهمی ایفا می‌کند در این تحقیق مسئله تولید سلولی با چیدمان پویا و محدودیت منابع مالی و بودجه با زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران به‌صورت هم‌زمان بررسی می‌گردد. در این مسئله امکان انتقال ماشین‌ها به مکان جدید، افزایش یا کاهش آن، استخدام و اخراج نیروی انسانی و آموزش آن‌ها وجود دارد به‌طوری‌که با در نظر گرفتن محدودیت بودجه، هزینه کل ماشین و نیروی انسانی حداقل گردد و با تعیین استقرار مناسبی از ماشین‌ها تقاضای مدنظر تأمین گردد. مقایسه بین تحقیق حاضر با تحقیقات گذشته در جدول ۱ نشان می‌دهد که در این تحقیق خلأ عدم بررسی دو مسئله زمان‌بندی و تخصیص کارگران به‌طور هم‌زمان پوشش داده می‌شود و محدودیت بودجه نیز به مسئله اضافه شده است. بنابراین ابعاد نوآوری پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد.

- در این تحقیق زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته شده است.
- محدودیت بودجه برای کارگران و ماشین‌الات فرض شده است.
- در این تحقیق امکان انتقال ماشین‌ها به مکان جدید، افزایش یا کاهش آن، استخدام و اخراج نیروی انسانی و آموزش آن‌ها وجود دارد

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

نویسندگان	سال انتشار	چیدمان پویا	تشکیل سلول	چینش بین سلولی	چینش داخل سلول	زمان‌بندی 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 شبیه‌سازی تبرید
وو و همکاران	۲۰۰۷		●	●	●	●			الگوریتم ژنتیک
بوآزیز و همکاران	۲۰۲۰		●	●			●		مدل ریاضی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید
آریانژاد و همکاران	۲۰۰۹	●	●				●		مدل ریاضی
محمدی و فرقانی	۲۰۱۷		●	●	●				الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی پویا
ستگلو و سورش	۲۰۰۹		●				●		مدل ریاضی
دانیلویک و ایلیک	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
سلیم‌پور و همکاران	۲۰۲۱	●	●						الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات
کریشنان و همکاران	۲۰۱۲		●	●	●				الگوریتم ژنتیک

ادامهٔ جدول ۱

نویسندگان	سال انتشار	چیدمان پویا	تشکیل سلول	چینش بین سلولی	چینش داخل سلول	زمان‌بندی عملیات	تخصیص کارگران	محدودیت بودجه	روش حل
کیا و همکاران	۲۰۱۲	•	•	•	•				الگوریتم شبیه‌سازی 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 جست‌وجوی ممنوع
مهدی‌زاده و رحیمی	۲۰۱۶	•	•	•	•		•		مدل ریاضی، فراابتکاری
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، زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران را با محدودیت بودجه مربوط به ماشین‌ها و نیروی انسانی بررسی می‌نماید به‌طوری 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 به‌طوری که بعضی از دستگاه‌ها انواع مختلفی داشته و هر کدام دارای هزینه‌های متفاوتی می‌باشد. از طرفی این واحد تولیدی در نظر دارد تا از میان تعدادی کارگر که سطح مهارت و هزینه‌های 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 هزینه‌های ماشین مانند هزینه‌های ثابت و متغیر، خرید، انتقال، استهلاک و اضافه‌کاری، هزینه حمل قطعات و استخدام و اخراج، آموزش و حقوق کارگران می‌باشد به گونه‌ای که تحت محدودیت‌های بودجه بتوان با خرید ماشین و استخدام کارگران مناسب و تعیین چیدمان مطلوب ماشین‌ها، پاسخ‌گوی حجم تقاضای مدنظر بود. در ادامه مفروضات مسئله، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم و مدل ریاضی آن به تفکیک ارائه می‌گردد.

مفروضات مسئله

۱. ابعاد تمام دستگاه‌ها یکسان (۲×۲) و واحد است.

۲. هر دستگاه تنها یک نوع عملیات را انجام می‌دهد.

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 j را تولید و سپس قطعه j+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

P : اندیس شیفت $(P = 1,2, \dots, P_s)$
k : اندیس کارگر $(k = 1,2, \dots, K)$
i : اندیس ماشین $(i = 1,2, \dots, m)$
d : اندیس عملیات $(d = 1,2, \dots, N_j)$
t : اندیس نوع ماشین $(t = 1,2, \dots, Tm_t)$
c : اندیس سلول $(c = 1,2, \dots, C)$
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
β_{it} : هزینه متغیر i^{th} ماشین از نوع t
θ_{it} : هزینه اضافه‌کاری 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 i^{th} ماشین از نوع t در شیفت P

a_{kit} : هزینه آموزش کارگر k برای کار با i^{th} ماشین از نوع t

H_k : مجموع هزینه استخدام و اخراج کارگر k

T_{it}^P : مدت‌زمان در دسترس بودن i^{th} ماشین از نوع t در شیفت P

w_{jdit}^P : مدت‌زمان عملیات d مربوط به قطعه j روی i^{th} ماشین از نوع t در شیفت P

t_{it} : بیشترین درصد اضافه‌کاری 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 حمل‌ونقل

$BKHM$: 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 i^{th} ماشین و خط مبنا در شیفت P

y_i^P : فاصله عمودی بین مرکز i^{th} ماشین و خط مبنا در شیفت P

Tb_{it}^P : میزان اضافه‌کاری 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_{jidt}^P : زمان شروع عملیات d قطعه j روی i^{th} ماشین 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

$T_{jd'd}^P$: زمان حمل قطعه j بین عملیات d' و d در شیف P

O_{it}^P : مدت زمان استفاده از i^{th} ماشین از نوع t در شیفت P

u_{jdi}^P : اگر عملیات d برای قطعه j روی i^{th} ماشین 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 i^{th} ماشین نوع t داشته باشد ۱ در غیر این صورت صفر است

$f_{jdj'd''i}^P$: اگر عملیات d'' از قطعه j' زودتر از عملیات d از قطعه j روی i^{th} ماشین 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 $x_i^P \le x_v^P \le x_u^P$ یا $x_u^P \le x_v^P \le x_i^P$ برقرار باشد ۱ در غیر این صورت صفر است

qy_{iuv}^P : اگر رابطه $y_i^P \le y_v^P \le y_u^P$ یا $y_u^P \le y_v^P \le y_i^P$ 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 می‌گردد که به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

رابطه ۱)
$$MinZ = \sum_{P=2}^{P_s}\sum_{i=1}^{m} q\left(\left|x_i^P - x_i^{P-1}\right| + \left|y_i^P - y_i^{P-1}\right|\right) + \sum_{k=1}^{K} H_k h_k$$
$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{Tm_t}\left((C_{it} - R_{it})X_{it}\right) + \sum_{P=1}^{P_s}\sum_{j=1}^{n}\sum_{d=1}^{N_j-1}\left(T_{jd(d+1)}^P tf\right)$$
$$+P_s\sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{Tm_t}(hs_{it}X_{it}) + \sum_{P=1}^{P_s}\sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{Tm_t}\left(\left(\theta_{it}Tb_{it}^P\right) + \left(\beta_{it}O_{it}^P\right)\right)$$
$$+\sum_{P=1}^{P_s}\sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{Tm_t}\sum_{k=1}^{K}\left(sa_{kit}^P Rs_{kit}X_{it}\right) + \sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{Tm_t}\sum_{k=1}^{K}(a_{kit}A_{kit}Rs_{kit}X_{it})$$

رابطه ۲)
$$\sum_{t=1}^{Tm_t} X_{it} = 1 \qquad \forall\, i$$

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

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

رابطه ۵)
$$x_i^P \le H - 1 \qquad \forall\, i, P$$

رابطه ۶)
$$y_i^P \le V - 1 \qquad \forall\, i, P$$

رابطه ۷)
$$\left|x_i^P - x_u^P\right| + \left|y_i^P - y_u^P\right| \ge 3 \quad i = 1,2,\dots m-1\ u = i+1, i+2, \dots, m\ \ \forall\, P$$

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

$$-\left(x_v^P - x_i^P\right)\left(x_u^P - x_v^P\right) \le M\left(1 - px_{iuv}^P\right) \ \forall\, i,u,v,P$$ رابطه ۹)

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

$$-\left(y_v^P - y_i^P\right)\left(y_u^P - y_v^P\right) \le M\left(1 - qy_{iuv}^P\right) \ \forall\, i,u,v,P$$ رابطه ۱۱)

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

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

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

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

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{Tm_t} Rs_{kit}X_{it} \le 1 \quad \forall\, k$$ رابطه ۱۶)

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

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

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

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

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

$$g_{j'd''}^P u_{j'd''i}^P - g_{jd}^P u_{jdi}^P + Mf_{jdj'd''i}^P \ge D_{j'}^P w_{j'd''it}^P X_{it} u_{j'd''i}^P \ \forall P,j,j',d,d'',i,t$$ رابطه ۲۲)

$$T^P_{jd'd} = \left(\left|x^P_i - x^P_u\right| + \left|y^P_i - y^P_u\right|\right)A_j u^P_{jd'i} u^P_{jdu} Z^P_{ic} Z^P_{uc} + \left(\left|x^P_i - x^P_u\right| + \left|y^P_i - y^P_u\right|\right)E_j u^P_{jd'i} u^P_{jdu} Z^P_{ic}\left(1 - Z^P_{uc}\right) \quad \forall d', d, P, j, i, c \;\; i \neq u$$

رابطه ۲۳)

$$st^P_{jidt} = g^P_{jd} u^P_{jdi} X_{it} - D^P_j w^P_{jdit} X_{it} u^P_{jdi} + M\left(1 - u^P_{jdi}\right) \quad \forall P, j, i, d, \mathrm{t}$$

رابطه ۲۴)

$$STT^P_{it} \leq st^P_{jidt} \qquad \forall P, j, i, d, \mathrm{t}$$

رابطه ۲۵)

$$FTT^P_{it} \geq g^P_{jd} u^P_{jdi} X_{it} \quad \forall P, j, i, d, \mathrm{t}$$

رابطه ۲۶)

$$O^P_{it} = FTT^P_{it} - STT^P_{it} \quad \forall P, i, \mathrm{t}$$

رابطه ۲۷)

$$Tb^P_{it} \geq FTT^P_{it} - \left(T^P_{it} X_{it}\right) \quad \forall P, i, \mathrm{t}$$

رابطه ۲۸)

$$Tb^P_{it} \leq T^P_{it} t_{it} \qquad \forall P, i, \mathrm{t}$$

رابطه ۲۹)

$$FTT^P_{it} \leq (1 + t_{it}) T^P_{it} \quad \forall P, i, \mathrm{t}$$

رابطه ۳۰)

$$x^P_i, y^P_i \geq 0 \; and \; integr \;\; u^P_{jdi}, Z^P_{ic}, Rs_{kit}, h_k, A_{kit}, X_{it}, px^P_{iuv}, qy^P_{iuv}, f^P_{jdj'd''i} \in \{0,1\}$$

رابطه ۳۱)

$$Tb^P_{it}, g^P_{jd}, g^P_j, T^P_{jd'd}, O^P_{it}, FTT^P_{it}, STT^P_{it}, st^P_{jidt} \geq 0$$

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

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 به‌طوری 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. زمان‌بندی تولید برای هر قطعه توسط روابط ۱۸-۲۲ انجام می‌گیرد. از رابطه ۱۹ اطمینان حاصل می‌شود که زمان اتمام هر قطعه از زمان اتمام هر یک از عملیات 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 اضافه‌کاری برای هر ماشین برابر با تفاوت بین زمان پایان فعالیت با مدت‌زمان در دسترس ماشین موردنظر و حداکثر میزان اضافه‌کاری برای هر ماشین معادل با مدت‌زمان در دسترس آن ماشین می‌باشد. از طرفی زمان پایان فعالیت هر ماشین حداکثر برابر با مجموع زمان در در دسترس و میزان اضافه‌کاری مجاز برای آن ماشین می‌باشد که رابطه ۳۰ آن را تضمین می‌نماید. رابطه ۳۱ نیز شرایط متغیرهای تصمیم را بیان می‌کند.

خطی‌سازی مدل

مدل ارائه‌شده یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است و برای خطی کردن آن، تعدادی متغیر جدید و محدودیت کمکی ارائه می‌شود که در این ادامه تشریح می‌گردد.

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

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

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

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

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

تابع هدف و محدودیت‌های ۴، ۱۶ و ۱۷ شامل عبارت $Rs_{kit}X_{it}$ می‌باشند که ضرب دو متغیر صفر و یک است و یک عبارت غیرخطی به حساب می‌آید. برای خطی کردن آن باید یک متغیر صفر و یک جدید Rsx_{kit} و دو محدودیت ۳۶ و ۳۷ ایجاد گردد.

رابطه ۳۶) $$Rs_{kit} + X_{it} \leq 1 + Rsx_{kit} \qquad \forall k, i, t$$

رابطه ۳۷) $$Rs_{kit} + X_{it} \geq 2Rsx_{kit} \qquad \forall k, i, t$$

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

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

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

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

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

ضرب دو متغیر در محدودیت‌های ۸–۱۱ باعث غیرخطی شدن آن‌ها شده است که با تعریف متغیرهای صفر و یک d_{uv}^P و d_{vi}^P و محدودیت‌های ۴۲ و ۴۹ خطی‌سازی محدودیت‌های ۸ و ۹ انجام می‌گیرد. برای خطی‌سازی معادلات ۱۰ و ۱۱ نیز دقیقا به همین ترتیب عمل می‌شود.

رابطه ۴۲) $x_v^P - x_i^P \le M d_{vi}^P \qquad \forall v,i,P$

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

رابطه ۴۴) $x_u^P - x_v^P \le M d_{uv}^P \qquad \forall v,u,P$

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

رابطه ۴۶) $d_{vi}^P + d_{uv}^P - 1 \le p x_{iuv}^P \qquad \forall i,v,u,P$

رابطه ۴۷) $-d_{vi}^P - d_{uv}^P + 1 \le p x_{iuv}^P \qquad \forall i,v,u,P$

رابطه ۴۸) $d_{vi}^P - d_{uv}^P + 1 \ge p x_{iuv}^P \qquad \forall i,v,u,P$

رابطه ۴۹) $-d_{vi}^P + d_{uv}^P + 1 \ge p x_{iuv}^P \qquad \forall i,v,u,P$

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

رابطه ۵۰) $T_{jd'd}^P = A_j u_{jd'i}^P u_{jdu}^P F_{iuc}^P + E_j u_{jd'i}^P u_{jdu}^P F_{iuc}^{\prime P}$

$d' = d - 1 \; \forall d,P,j,i,c \;\; i \ne u$

رابطه ۵۱) $Z_{ic}^P + Z_{uc}^P - 2 \ge M\left(l_{iuc}^P - 1\right) \qquad \forall P,c,u,i$

رابطه ۵۲) $Z_{ic}^P + Z_{uc}^P - 1 \ge M l_{iuc}^P \qquad \forall P,c,u,i$

رابطه ۵۳) $F_{iuc}^P \ge \left(x_i^P - x_u^P\right) + \left(y_i^P - y_u^P\right) + M\left(l_{iuc}^P - 1\right) \;\; \forall P,c,u,i$

رابطه ۵۴) $F_{iuc}^P \ge \left(x_i^P - x_u^P\right) - \left(y_i^P - y_u^P\right) + M\left(l_{iuc}^P - 1\right) \;\; \forall P,c,u,i$

رابطه ۵۵) $F_{iuc}^P \ge -\left(x_i^P - x_u^P\right) + \left(y_i^P - y_u^P\right) + M\left(l_{iuc}^P - 1\right) \;\; \forall P,c,u,i$

رابطه ۵۶) $F_{iuc}^P \ge -\left(x_i^P - x_u^P\right) - \left(y_i^P - y_u^P\right) + M\left(l_{iuc}^P - 1\right) \;\; \forall P,c,u,i$

وجود عبارت $g_{jd}^P X_{it}$ در روابط ۲۴ و ۲۶ باعث غیرخطی شدن این محدودیت‌ها شده است که بـرای خطـی کـردن آن‌ها از متغیر غیر منفی gx_{jdit}^P به جای عبارت $g_{jd}^P X_{it}$ و محدودیت‌های ۵۷–۵۹ استفاده می‌گردد.

$$gx_{jdit}^{P} \le MX_{it} \qquad \forall P,i,j,d,t$$ رابطه ۵۷)

$$gx_{jdit}^{P} \le g_{jd}^{P} \qquad \forall P,i,j,d,t$$ رابطه ۵۸)

$$gx_{jdit}^{P} \ge g_{jd}^{P} - M(1-X_{it}) \qquad \forall P,i,j,d,t$$ رابطه ۵۹)

با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته 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، به‌طوری که با افزایش ابعاد مسئله زمان حل به‌صورت چشمگیری افزایش خواهد یافت. بدین لحاظ جهت حل آن در ابعاد بزرگتر از الگوریتم فرابتکاری 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 نرم‌افزار 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		٤			٥		
ماشین / اطلاعات	۱	۲	۱	۲	۳	٤	۱	۲	۱	۲	۱	۳	۱	۲	۳
قیمت خرید	۱۲۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۱۸۰۰	۲۱۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۳۰۰	۹۰۰	۱۱۰۰	۸۰۰	۹۵۰	۱۱۰۰	۷۵۰
درآمد فروش	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۶۰۰	۱۴۰۰	۲۳۰۰	۱۸۰۰	۱۰۰۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۶۵۰	۹۰۰	۶۰۰
هزینه متغیر	۹	۷	۱۲	۱۰	۱۰	۱۳	۶	۹	۱۱	۸	۱۰	۷	۱۰	۶
هزینه اضافه‌کاری	۱۱	۹	۱۴	۱۱	۱۲	۱۵	۸	۱۰	۱۴	۱۰	۱۱	۸	۱۲	۸
هزینه ثابت و استهلاک	۱۲۵	۱۳۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۳۰	۹۰	۱۲۰	۱۱۵	۱۲۰	۱۵۰	۹۵	۸۵	۱۱۰
محدودیت بودجه	۹۰۰۰		۲۰۰۰۰				۱۲۰۰۰			۸۵۰۰			۷۴۰۰	

جدول ۳. داده‌های مربوط به قطعات

شماره مسئله	۱		۲			۳		٤		٥	
قطعه / اطلاعات	۱	۲	۱	۲	۳	۱	۲	۱	۲	۱	۲
تقاضا	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۵	۷۰	۱۲۰	۱۵۰	۶۵	۸۰	۴۵	۷۰
زمان عملیات۱ (دقیقه:ثانیه)	۳:۳۰	۶:۳۰	۲:۲۰	۱:۴۵	۳:۳۰	۱۲:۳۰	۱۶:۲۰	۳:۴۵	۴:۳۰	۱:۳۰	۲:۱۵
زمان عملیات۲ (دقیقه:ثانیه)	۴:۳۰	۷:۳۰	---	۴:۲۰	۶:۰۰	۱۸:۱۰	۱۰:۴۵	۶:۲۰	۱:۲۵	۴:۰۰	۸:۳۰
زمان عملیات۳ (دقیقه:ثانیه)	---	---	---	---	۷:۳۰	۵:۲۰	---	---	---	۳:۲۵	---
ترتیب ماشین‌ها برای انجام عملیات	۲-۱	۱-۲	۲	۳-۲	۳-۴-۱	۱-۲-۱	۲-۱	۲-۱	۱-۳	۳-۲-۱	۳-۱

جدول ٤. داده‌های مربوط به کارگران

شماره مسئله	١			٢						٣				٤				٥		
کارگر / اطلاعات	١	٢	٣	١	٢	٣	٤	٥	٦	١	٢	٣	٤	١	٢	٣	٤	١	٢	٣
هزینه استخدام و اخراج	٣٥	٣٢	٣٠	٣٣	٢٧	٣١	٤٠	٣٤	٣٨	٥٠	٥٥	٦٠	٧٠	٩٠	٩٥	٨٧	٩٢	٥٠	٦٠	٥٨
حقوق کار با ماشین١	١٢	١٢	٩	١١	١٢	١٤	١٠	١٠	١٣	١٥	١٧	١٢	١٦	٢٠	٢٤	٢٣	٢٥	٢٠	٢٠	١٨
حقوق کار با ماشین٢	١١	٩	١٠	١٣	١٢	١٤	٩	١١	١٤	١٨	١٢	١٦	١٧	٢٤	٢٦	٣٠	٢٤	١٨	١٦	١٦
حقوق کار با ماشین٣	--	--	--	١٠	١٤	٩	١٣	١٢	١٥	--	--	--	--	٢٠	٢٠	١٨	٢٢	٢٤	١٦	٢٠
حقوق کار با ماشین۴	--	--	--	١٢	١٠	١١	١٤	١٥	١١	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
هزینه آموزش ماشین١	٧	٥	٣	٦	٨	١٠	١١	٩	١٥	٨	٦	١٠	١٥	١٨	٢٠	١٩	٢٠	١٢	١٣	١٠
هزینه آموزش ماشین٢	٦	٠	٣	٨	٦	١٢	٩	١١	١٤	٩	١٠	١٧	١٢	١٦	١٦	١٦	١٦	٩	١١	١١
هزینه آموزش ماشین٣	--	--	--	٩	١٠	٨	١٢	١٠	١١	--	--	--	--	١٢	١٣	١٥	٩	١٤	١٤	١٣
هزینه آموزش ماشین۴	--	--	--	١٤	١٤	١٣	١٢	١٣	١٢	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
محدودیت بودجه	٧٠			١١٠						٨٤				١٢٠				١٥٠		

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 ٥. نتایج مربوط به ماشین‌ها

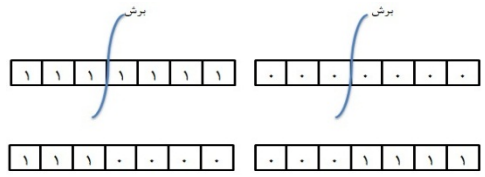
شماره مسئله	ماشین	قیمت خرید	درآمد فروش	هزینه ثابت	هزینه متغیر	هزینه اضافه‌کاری
١	١	١٢٠٠	١٠٠٠	١٢٥	۴۵٢	٠
	٢	١٥٠٠	١١٠٠	١٣٠	٣۵٣	٠
٢	١	٢٠٠٠	١۵٠٠	١۴٠	۴٨۶	٠
	٢	١٨٠٠	١۶٠٠	١٠٠	۵٢۵	٠
	٣	٢١٠٠	١۴٠٠	١١٠	۴٧۶	٠
	۴	٢۵٠٠	٢٣٠٠	١٣٠	۶۵٠	٠
٣	١	٢٠٠٠	١٨٠٠	٩٠	٣٧٢	١۵۴٠
	٢	١٣٠٠	١٠٠٠	١٢٠	۵۴٧	١١٣٠
۴	١	٩٠٠	۶٠٠	١١۵	۶٢٨	٠
	٢	١١٠٠	١٠٠٠	١٢٠	۴٨١	٠
	٣	٨٠٠	۵٠٠	١۵٠	٧٠٣	٠
۵	١	٩۵٠	۶۵٠	٩۵	۵٢٩	٠
	٢	١١٠٠	٩٠٠	٨۵	۶١۴	٠
	٣	٧۵٠	۶٠٠	١١٠	۴٠١	٠

جدول ٦. نتایج مربوط به هزینه‌های کارگر

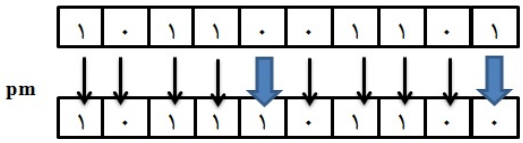
شماره مسئله	کارگران استخدامی	دستگاه تخصیص یافته به کارگر	هزینه استخدام و اخراج	مجموع هزینه آموزش و حقوق
۱	۲	۲	۳۲	۹
	۳	۱	۳۰	۱۲
۲	۱	۱	۳۳	۱۷
	۲	۲	۲۷	۱۸
	۳	۳	۳۱	۱۷
	۶	۴	۳۸	۲۳
۳	۱	۱	۵۰	۲۳
	۲	۲	۵۵	۲۲
۴	۱	۱	۹۰	۳۸
	۳	۳	۸۷	۳۳
	۴	۲	۹۲	۴۰
۵	۱	۲	۵۰	۲۷
	۲	۳	۶۰	۳۰
	۳	۱	۵۸	۲۸
۶	۱	۱	۸۴	۳۱
	۲	۲	۸۰	۲۹

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 (امین‌پور، ایرج‌پور، 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 به‌گونه‌ای 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 به‌طوری 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، به‌طوری 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 هرکدام از این دو عمل، با نرخ جهش و تقاطع در الگوریتم مشخص می‌شود (تیموری، امیری، الفت، زندیه، ۱۳۹۹). به‌طور 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 به‌طوری 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.



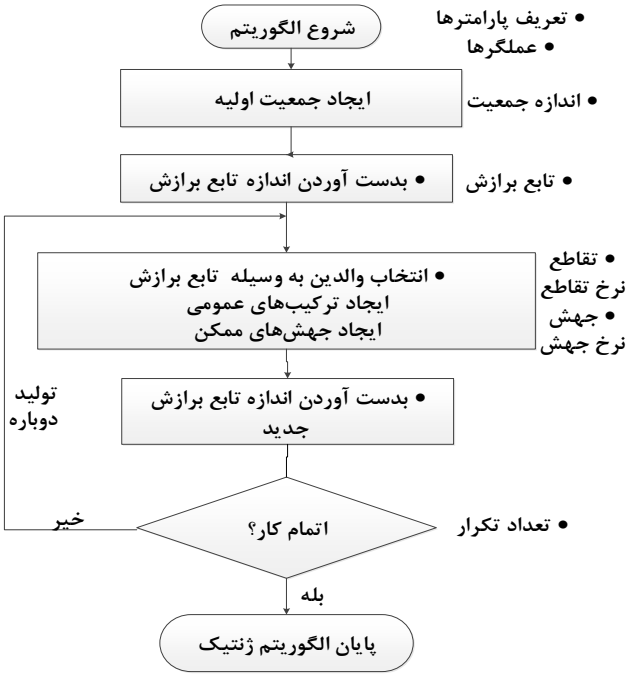
شکل ۱. نحوه انجام عملیات تقاطع تک نقطه‌ای



شکل ۲. نحوه انجام عملیات جهش

عملیات جهش امکان فرار از نقاط بهینه محلی را فراهم می‌آورد. بر این اساس به‌صورت تصادفی تعدادی از کروموزوم‌ها انتخاب و به‌طور 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 Pm بود، به ازای هر ژن عمل جهش انجام می‌شود، در غیر این صورت از جهش دادن صرف‌نظر می‌شود. در شکل ۲ نحوه انجام عملیات جهش نشان داده شده است به‌طوری که در ژن پنجم و دهم جهش صورت گرفته است. بدیهی است که در این مرحله نیز موجه بودن جواب‌ها بررسی می‌گردد به‌طوری 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 به‌صورت تصادفی و با توجه به محدودیت‌های مسئله ایجاد می‌گردد. شکل ۳ فلوچارت مربوط به الگوریتم ژنتیک جهت مدل مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم ژنتیک برای مدل

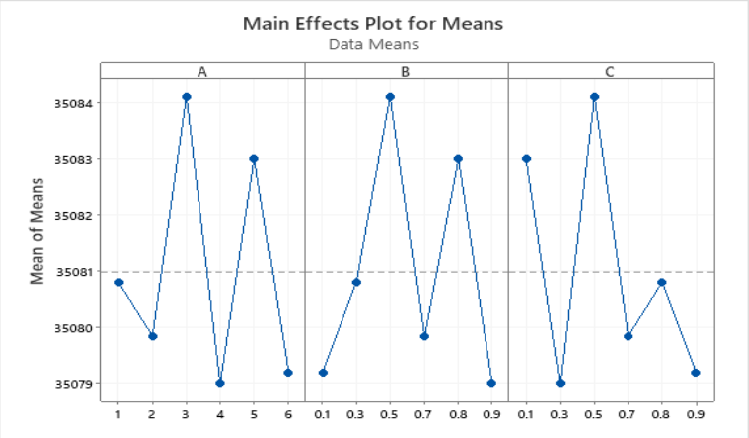
تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک با روش تاگوچی

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 به‌صورت یک زوج مرتب در نظر گرفته شده است به‌طوری 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.

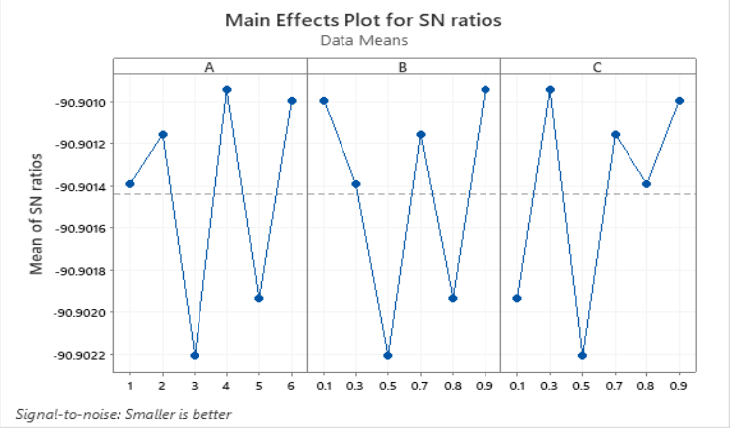
جدول ۷. اطلاعات مربوط به سطوح مختلف پارامترها

	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ٤	سطح ٥	سطح ٦
(جمعیت، تکرار)	(۵۰،۱۲۰)	(۱۲۰،۵۰)	(۶۰،۱۰۰)	(۱۰۰،۶۰)	(۲۰۰،۳۰)	(۳۰،۲۰۰)
نرخ تقاطع	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۸	۰/۹
نرخ جهش	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۸	۰/۹

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 ٤. نمودار میانگین پاسخ‌ها برای روش تاگوچی



شکل ٥. 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	
(۱۰۰،۶۰)	۴	(جمعیت، تکرار)
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 هرکدام 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 ـ نوع	هزینه خرید	درآمد فروش	هزینه ثابت	هزینه متغیر	هزینه اضافه‌کاری	زمان در دسترس
۱-۱	۱۰۰۰۰	۴۰۰۰	۶۰۰	۶	۹	۴۸۰
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 وتقاضای هر قطعه در هر شیفت

	شیفت۱		شیفت۲	
قطعه	توالی‌عملیات‌روی ماشین ها	تقاضا	توالی‌عملیات‌روی ماشین ها	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	۱	۲	۳	٤
۱-۱	۱	۲	۱/۵	–
۱-۲	۱/۵	۲/۵	۲/۵	–
۲-۱	۲	۲	۱/۵	۳
۲-۲	۲	۲/۵	۱/۵	۳
۳	–	۱	۱	۲

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

نوع- ماشین کارگر	آموزش					حقوق (شیفت۲، شیفت۱)									هزینه استخدام	هزینه استخدام
	۱-۱	۱-۲	۲-۱	۲-۲	۳	۱-۱		۱-۲		۲-۱		۲-۲		۳		
۱	۳	۱	۳	۱	۵	۹	۱۰	۱۰	۱۱	۹	۱۰	۹	۱۰	۸	۹	۱۵	۲۰
۲	۲	۰	۱	۰	۱	۱۱	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۳	۱۱	۱۲	۱۰	۱۱	۱۵	۱۷
۳	۵	۱	۰	۰	۳	۹	۹	۱۱	۱۲	۱۲	۱۲	۱۰	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۲۰
۴	۲	۱	۱	۰	۱	۱۱	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱	۱۲	۱۰	۱۱	۱۰	۱۹

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

جدول ١٤. نحوه انتخاب ماشین‌ها و هزینه آن‌ها

خروجی‌ها / حالت‌های موجود	مدت زمان انجام کار (شیفت۲، شیفت۱)		هزینه اضافه کاری (شیفت۲، شیفت۱)		هزینه ثابت کل (شیفت۲، شیفت۱)		هزینه متغیر کل (شیفت۲، شیفت۱)		هزینه کلی ماشین ها
خرید نوع۱ از ماشین ۲ و نوع۲ از ماشین ۱	۳۵۲	۳۷۵	۰	۰	۲۱۰۰	۲۱۰۰	۶۵۸۹	۶۵۸۲	۱۷۳۷۱
خرید نوع۲ از ماشین۲ و نوع ۲ از ماشین۱	۳۶۵	۳۹۰	۰	۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۷۴۸۲	۷۵۴۲	۱۹۰۲۴

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 تخصیص‌یافته 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
مجوع کل هزینه‌ها		۱۶۲	

با توجه به نتایج حل، هزینه حمل قطعات بین ماشین‌ها نیز ۳۳ واحد پولی به دست‌آمده 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

مجوع کل	درآمد فروش ماشین‌ها	هزینه حمل قطعات	هزینه مربوط به کارگران	هزینه‌کلی 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 دقیقا برابر با ۳۴۰۶۶ به دست آمد ولی زمان حل آن در مقایسه با الگوریتم ژنتیک قابل توجه بود به‌طوری‌که الگوریتم ژنتیک بعد از گذشت ۱۰ ثانیه به جواب فوق رسید در صورتی که زمان حل مدل ریاضی ۶۵ ثانیه می‌باشد.

تحلیل حساسیت

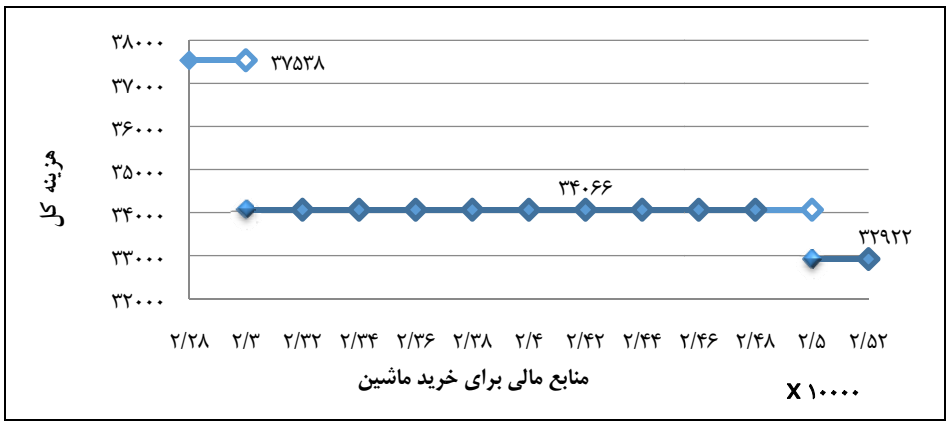
در این بخش پارامترهای محدودیت بودجه مربوطه به ماشین‌ها و کارگران تحلیل حساسیت شده و اثر هر کدام روی تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس مثال فوق، ترکیب‌های مختلف خرید ماشین و هزینه‌های آن در جدول ۱۷ خلاصه شده است که هزینه هر کدام از ترکیب‌ها به ترتیب ۲۲۸۰۰، ۲۳۰۰۰، ۲۴۸۰۰ و ۲۵۰۰۰ واحد پولی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

۱۷، هزینه کل تغییر می‌کند. هزینه کل با محدودیت ۲۳۰۰۰ واحد پولی از هزینه کل در حالت ۲۲۸۰۰ واحد پـولی کمتـر خواهد شد. همچنین در نقطه ۲۴۸۰۰، هزینه کل نسبت به نقطه ۲۳۰۰۰ تغییری نخواهد کرد. بهترین مقدار زمانی اسـت که منابع مالی مربوط به ماشین‌ها ۲۵۰۰۰ واحد پولی باشد.

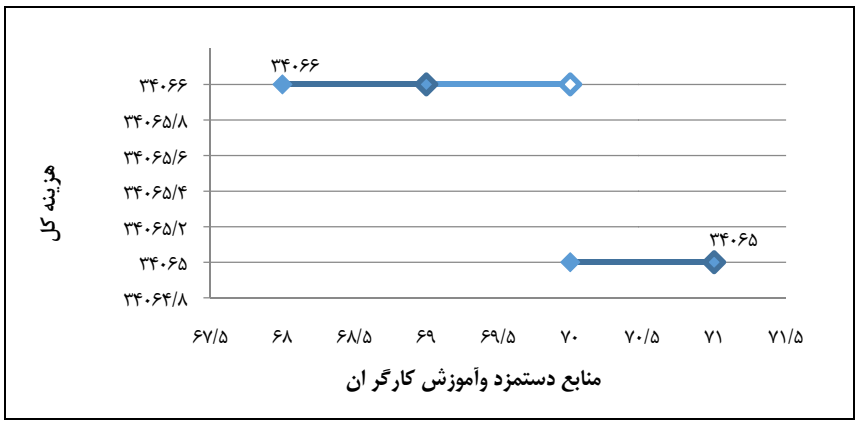


شکل ٦. آنالیز حساسیت هزینه کل نسبت به منابع مالی برای‌خرید ماشین‌ها

تأثیر محدودیت منابع مالی برای کارکنان با فرض سه مقدار برای آن بررسی شده که نتایج آن در جـدول ۱۸ ارائـه گردیده است. نمودار تحلیل حساسیت این پارامتر در شکل ۷ نشان می‌دهد که بـا تغییـر مقـدار از ۶۸ بـه ۶۹ تغییـری در هزینه کل ایجاد نمی‌شود اما اگر به ۷۰ افزایش یابد هزینه کل ۱ واحد کاهش خواهد داشت و در ادامـه بـا افـزایش ایـن مقدار تغییری در هزینه ایجاد نمی‌شود. بنابراین بهترین حالت برای محدودیت منابع مالی کارگران مقدار ۷۰ می‌باشد.

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

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



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 الگوریم 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 به‌طوری که در زمان بسیار کمتری نسبت به روش بهینه قابلیت یافتن جواب نسبتا 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 به‌طوری 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 زمان‌بندی 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، زمان‌بندی عملیات و تخصیص کارگران به‌صورت 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 خطی‌سازی 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 نسبتا 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 به‌صورت 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.

Chiniforooshan, 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 MetaheuristicAlgorithms. *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 constrainted 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.