



# Optimization of Cellular Reconfigurable Manufacturing System under Constraints of Machinery Layout

Sepehr Mahjouri Namin<sup>a</sup>, Ahmad Hakimi<sup>b\*</sup>, Fatemeh Rahbarnejad<sup>c</sup>

<sup>a</sup> MSc., Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.

<sup>b</sup> Ph.D., Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kurdistan University, Sanandaj, Iran.

<sup>c</sup> BSc., Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch, Tehran, Iran.

## Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Mahjouri Namin S, Hakimi A, Rahbarnejad F, Taghizadeh Harat A, Optimization of Cellular Reconfigurable Manufacturing System under Constraints of Machinery Layout. *Industrial Innovations*. 2023;1(3):237-254

 <https://doi.org/10.61186/jii.1.3.237>

## KEYWORDS

Production system optimization;  
Flexible configuration of cells;  
Machine layout design;  
Productivity.

## ABSTRACT

Today, manufacturing industries are under severe pressure due to the increase in the cost of energy, raw materials, manpower, capital and global competition, while these trends will be maintained for a long time, the problems facing production are getting deeper day by day. Become One of the strategic issues in the production industry is layout design, which determines the long-term efficiency of operations. Layout design means how to arrange facilities in a working environment for producing products (or providing services) consisting of various types of machines and equipment for the productivity and efficiency of more and more organizations. It is worth noting. Considering multi-line arrangement, flexible configuration of cells, calculating the cost of moving machines and calculating the cost of moving parts according to the distance of the machines from each other are among the things that differentiate this model from other models. It becomes According to this problem, in this research, a model of multi-objective mathematical planning for the problem of dynamic facility layout was presented, which was evaluated according to the considered objectives based on the exact solution method and then validated using the exact solution algorithm. According to the results obtained from solving the model, we can understand the importance of using the model so that the configuration of the cells and the allocation of parts to the cells and the arrangement of the machines in the cells with the aim of reducing the costs caused by The types of movement of parts, the costs of operating on machines and the costs of moving, buying and maintaining machines in the system, lead to an increase in the overall efficiency of the system and create a balance in the system. One of the advantages of this model is that by bringing the machines closer to each other, it tries to prevent extra movements inside the cells as much as possible, which increases cell productivity. Considering multi-line arrangement, flexible configuration of cells, calculating the cost of moving machines and calculating the cost of moving parts according to the distance of the machines from each other are among the things that differentiate this model from other models.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

One of the strategic issues in the production industry is layout design, which determines the long-term efficiency of operations. Layout design means how to arrange facilities in a working environment for producing products (or providing services) consisting of various types of machines and equipment for the productivity and efficiency of more and more organizations. It is worth noting, an appropriate design of the workplace will make the work flow in a smoother line, and as a result, the amount of production and the quality of the organization's production will increase. On the other hand, at the level of managing the performance of processes and equipment, estimating, maintaining and

\* Corresponding author.

E-mail address: [a.hakimi@uok.ac.ir](mailto:a.hakimi@uok.ac.ir)

DOI: <https://doi.org/10.61186/jii.1.3.237>

Received: October 15, 2023; Received in revised form: November 25, 2023; Accepted: December 11, 2023

Article type: Research paper

©Author



improving reliability is one of the most important concerns of engineers and managers of manufacturing industries. Various analytical methods have been developed to evaluate and manage reliability. The use of each of these analyzes depends on the life cycle stage of the equipment, its priority among other equipment, the amount of recorded data and other such factors. It should be noted that the types of reliability analysis are related and can be used from different perspectives to solve the problems caused by reducing the level of reliability.

## 2. Problem Definition

This model is a dynamic model in which several time periods are considered; the number of parts and, accordingly, the number of machines in each period is different from the previous period (considering production transportation equipment). The difference in the number and type of parts from one period to the next, in addition to the change in the number of machines, causes the position of the machines to be different in each period compared to the next period. Our goal in this model is to minimize the cost of two types of moving parts (intracellular and extracellular) as well as the cost of moving machines from one period to the next and the cost of performing operations on each machine due to It is the arrangement of production facilities. Considering the cost of setting up the production facilities for the movement of machines makes the model try to find an optimal arrangement for the machines in all periods so as to avoid moving the machines that have a high moving cost as much as possible be prevented and according to the intra-system transport planning defined in all periods, create a suitable layout for the production line. In this model, each operation of each part can only be performed on one of the machines that have the ability to perform that operation, and the ability to distribute parts that is available in the previous models is available in this model, does not exist. In this model, a number of machines of each type are available at the beginning of the first period, which are added to the level of production space based on social indicators if needed. If the number of required machines is more than the number of available machines, then we will purchase machines at the beginning of each period, and if we do not need a number of machines in a period, we will remove them from the production space. It is possible to avoid imposing the cost of maintenance that we consider for the existing machines at the level of the production space.

## 3. Result

According to the results obtained from solving the model, we can understand the importance of using the model so that the configuration of the cells and the allocation of parts to the cells and the arrangement of the machines in the cells with the aim of reducing the costs caused by The types of movement of parts, the costs of performing operations on machines and the costs of moving, buying and maintaining machines in the system, lead to an increase in the overall efficiency of the system and create a balance in the system. One of the advantages of this model is that by bringing the machines closer to each other, it tries to prevent extra movements inside the cells as much as possible, which increases cell productivity. Considering multi-line arrangement, flexible configuration of cells, calculating the cost of moving machines and calculating the cost of moving parts according to the distance of the machines from each other are among the things that differentiate this model from other models. It becomes considering this problem, in this research, a multi-objective mathematical programming model was presented for the problem of dynamic facility arrangement. For the purpose of further investigations, in future researches, various meta-heuristic solution methods can be presented to improve the solutions and solve the model in large sizes.



## بهینه‌سازی سیستم تولید با قابلیت پیکربندی مجدد سلولی تحت محدودیت چیدمان ماشین‌آلات

سپهر مهجوری نمین<sup>الف</sup>، احمد حکیمی<sup>ب\*</sup>، فاطمه رهبرنژاد<sup>ج</sup>

<sup>الف</sup> کارشناس ارشد، مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. [Sepehr.mahjouri@gmail.com](mailto:Sepehr.mahjouri@gmail.com)

<sup>ب</sup> دکتری، مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. [a.hakimi@uok.ac.ir](mailto:a.hakimi@uok.ac.ir)

<sup>ج</sup> کارشناس، مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، تهران، ایران. [fa.rahbarnezhad@gmail.com](mailto:fa.rahbarnezhad@gmail.com)

چکیده	واژگان کلیدی
<p>امروزه صنایع تولیدی تحت فشارهای شدید ناشی از افزایش هزینه‌های انرژی، مواد خام، نیروی انسانی، سرمایه و رقابت جهانی قرار دارد درحالی‌که این روندها برای درازمدت حفظ خواهد شد، مشکلات پیش روی تولید روزه‌روز عمیق‌تر می‌شود. یکی از مسائل استراتژیک در صنعت تولید طراحی چیدمان است که کارآیی بلندمدت عملیات را تعیین می‌کند. طراحی چیدمان ماشین‌آلات به معنای چگونگی قرار گرفتن تسهیلات در یک محیط کاری برای تولید محصولات (یا ارائه خدمات) متشکل از انواع ماشین‌آلات و تجهیزات برای بهره‌وری و کارآمدی هر چه بیشتر سازمان‌ها به‌طورجدی موردتوجه قرار دارد. در نظر گرفتن چیدمان چند سطری، پیکربندی انعطاف‌پذیر سلول‌ها، محاسبه هزینه جابجایی ماشین‌آلات و محاسبه هزینه جابجایی قطعات برحسب فاصله ماشین‌ها از یکدیگر ازجمله مواردی است که باعث تمایز این مدل نسبت به سایر مدل‌ها می‌شود. با توجه به این مسئله در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای مسئله چیدمان تسهیلات پویا و بهینه‌سازی سیستم تولید ارائه شدند که بر اساس روش حل دقیق ارزیابی شد و سپس با استفاده از الگوریتم حل دقیق، اعتبار سنجی شد.</p>	<p>بهینه‌سازی سیستم تولید؛ پیکربندی انعطاف‌پذیر سلول‌ها؛ طراحی چیدمان ماشین‌آلات؛ بهره‌وری.</p>
	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰</p>

### ۱- مقدمه

صنعت تولید رکن اصلی توسعه ملی و نشان‌دهنده سطح علم و فناوری یک کشور است. با تشدید رقابت در بازار و تسریع جایگزینی محصول، تولید سازمانی به سمت تولید شخصی، متنوع، دسته‌ای، کوچک و سایر روش‌های تولید تغییر کرده است که منجر به مفاهیم حالت‌های تولید به‌موقع و هوشمند می‌شود. با این حال، یک خط تولید سنتی دارای چرخه تولید طولانی، راندمان کاری کم، تخصیص منابع غیرمنطقی و... بوده که این معضلات تنها با الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند قابل حل می‌باشند. بنابراین، بهینه‌سازی خط تولید برای تولید هوشمند به‌تدریج به یک موضوع تحقیقاتی داغ در صنعت تولید در سال‌های اخیر تبدیل شده است. با بهبود استانداردهای زندگی، فناوری تولید انبوه سنتی، دیگر نمی‌تواند تقاضای بازار مشتری محور را برآورده کند؛ در نتیجه صنعت تولید علاوه بر اتخاذ سبک طراحی که بتواند به‌سرعت با نیازهای مشتریان برای انواع محصولات سازگار شود، باید مدل‌های تولید مناسب را نیز برای پاسخگویی به زمان تحویل سریع مطالعه کند. در دهه گذشته، ویژگی‌های سنتی بازار با عوامل نوظهوری مانند تقاضای متغیر بازار، نیاز به انعطاف‌پذیری، چرخه‌های عمر کوتاه‌تر محصول و شخصی‌سازی انبوه جایگزین شد که به‌شدت محیط تولید را تغییر داد و شرکت‌های صنعتی را مجبور به پذیرش آن کرد تا انواع جدیدی از

\* نویسنده مسئول؛

پارادایم‌های تولید را پیاده‌سازی کند. سیستم‌های تولیدی قابل پیکربندی مجدد (<sup>1</sup>RMS) به‌عنوان سیستم‌های مؤثری در مقابله با چالش‌های کنونی که به‌سرعت در حال تغییر ساختار خود، یعنی ساختارهای فیزیکی و نرم‌افزاری و ساختارهای منطقی برای رسیدگی به تغییرات در نیازهای بازار بودند، رشد کردند. تشکیل سلول اولین گام در طراحی سیستم‌های تولید سلولی است.

یکی از مسائل استراتژیک در صنعت تولید طراحی چیدمان است که کارایی بلندمدت عملیات را تعیین می‌کند. طراحی چیدمان به معنای چگونگی قرار گرفتن تسهیلات در یک محیط کاری برای تولید محصولات (و یا ارائه خدمات) متشکل از انواع ماشین‌آلات و تجهیزات برای بهره‌وری و کارآمدی هر چه بیشتر سازمان‌ها به‌طورجدی موردتوجه قرار دارد. طراحی مناسب محل کار باعث می‌شود تا جریان کار در یک خط روان‌تر گردد، و به‌تبع آن میزان تولیدات و کیفیت تولید سازمان افزایش یابد.

از سوی دیگر، در سطح مدیریت عملکرد فرایندها و تجهیزات برآورد، حفظ و بهبود قابلیت اطمینان از مهم‌ترین دغدغه‌های مهندسان و مدیران صنایع تولیدی می‌باشد. برای ارزیابی و مدیریت قابلیت اطمینان روش‌های تحلیلی مختلفی توسعه پیدا کرده است. استفاده از هرکدام از این تحلیل‌ها به مرحله چرخه عمر تجهیز، اولویت آن در بین دیگر تجهیزات، میزان داده‌های ثبت‌شده و عواملی دیگر از این دست بستگی دارد. باید توجه داشت که انواع تحلیل‌های قابلیت اطمینان به هم مرتبط بوده و در رفع مشکلات ناشی از کاهش سطح قابلیت اطمینان از منظرهای مختلف قابل استفاده هستند.

## ۲- مرور ادبیات

تولید سلولی که یک استراتژی تولید ابتکاری مبتنی بر تکنولوژی تولید گروهی می‌باشد، روشی است که برای افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی در محیط‌های تولید رقابتی امروزی از قبیل سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر و تولید بهنگام استفاده می‌شود [۱].

از مزیت‌های پیاده‌سازی تولید سلولی را چنین می‌توان بیان نمود [۲]:

- ✓ کاهش زمان راه‌اندازی
- ✓ کاهش موجودی قطعات در حال ساخت
- ✓ کاهش هزینه جابجایی قطعات
- ✓ افزایش کارایی ماشین‌آلات

یک موضوع قابل توجه در تولید سلولی کوتاه کردن چرخه حیات تولید می‌باشد. نادیده گرفتن محصولات جدیدی که به وجود می‌آیند می‌تواند در آینده تغییرات پیش‌بینی‌نشده‌ای را به سیستم‌های تولید سلولی تحمیل کند و باعث قطع تولید و هزینه‌های غیرمنتظره می‌شود. از این‌رو تغییرات چرخه تولید باید در طراحی سلول‌ها در نظر گرفته شود. این‌گونه مدل‌ها سیستم‌های تولید سلولی پویا (<sup>2</sup>DCMS) نامیده می‌شوند [۳].

در این مدل فرض می‌کنیم تغییر در ترکیب و مقدار محصول موردتقاضا می‌تواند پیش‌بینی شود به‌طوری‌که یک برنامه‌ریزی چند دوره‌ای ممکن گردد. ترکیب محصول به یک مجموعه از انواع قطعاتی که باید در یک دوره برنامه‌ریزی تولید شود اشاره دارد. یک مثال از مسئله تولید سلولی پویا در طی چهار دوره در شکل ۱ نشان داده شده است که مبتنی بر مدل پویای چیدمان ماشین‌آلات می‌باشد [۴].

اگر هیچ هزینه‌ای برای تغییر از یک پیکربندی بهینه به پیکربندی بهینه دیگر در نظر گرفته نشود، بهترین استراتژی بکار بردن پیکربندی بهینه برای هر دوره می‌باشد. اما پیکربندی دوباره سلول‌ها هزینه‌هایی نظیر: جابجایی ماشین‌آلات، نصب و برداشتن ماشین‌ها، زمان تولید از دست‌رفته و راه‌اندازی دوباره را تحمیل می‌کند. به دلیل هزینه‌های پیکربندی مجدد، ممکن

<sup>1</sup> Reconfigurable Manufacturing System

<sup>2</sup> Dynamic Cellular Manufacturing System

است یک پیکربندی زیر بهینه در یک دوره بهترین باشد زیرا بکار بستن این پیکربندی زیر بهینه ممکن است باعث کاهش هزینه‌های پیکربندی مجدد و هزینه‌های کلی گردد [۵]. از این رو هنگام ایجاد سلول‌های تولیدی در نظر گرفتن هزینه‌های پیکربندی مجدد سلول‌ها امری مهم می‌باشد [۶]. همان‌طور که در بالا ذکر شد، پیکربندی مجدد سلول‌ها به سبب نوسانات در میزان تقاضای تولید می‌باشد. در این مورد یک تصمیم مناسب از میان استراتژی‌های موجود از قبیل خریداری ماشین‌آلات جدید، جابجایی ماشین‌ها بین جایگاه‌های تخصیص‌یافته جاری، طراحی مجدد تولید قطعات و غیره، جهت کاهش هزینه‌های خرید و سرمایه‌گذاری ماشین‌ها، و هزینه پیکربندی مجدد و هزینه جابجایی درون‌سلولی و برون‌سلولی قطعات گرفته می‌شود.

یکی از مسائل استراتژیک در صنعت تولید طراحی چیدمان است که کارآیی بلندمدت عملیات را تعیین می‌کند. طراحی مناسب محل کار باعث می‌شود تا جریان کار در یک خط روان‌تر گردد، و به تبع آن میزان تولیدات و کیفیت تولید سازمان افزایش یابد [۷]. سیستم‌های تولیدی قابل پیکربندی مجدد (RMS) به‌عنوان سیستم‌های مؤثری در مقابله با چالش‌های کنونی که به سرعت در حال تغییر سخت‌افزار خود، یعنی ساختارهای فیزیکی و نرم‌افزاری و ساختارهای منطقی برای رسیدگی به تغییرات در نیازهای بازار بودند، رشد کردند [۸]. این سیستم‌ها در یک الگوی تولید سلولی به نام سیستم تولید قابل پیکربندی مجدد سلولی (CRMS<sup>۳</sup>) شامل مجموعه‌ای از سلول‌های پویا، به نام سلول‌های ماشینی قابل تنظیم مجدد (RMC<sup>۴</sup>) که در آن ماشین‌ها به جای فیزیکی، به روشی منطقی سازمان‌دهی می‌شود، مرتب‌شده‌اند. RMC شامل ماشین‌ابزارهای قابل تنظیم مجدد (RMTs<sup>۵</sup>) هستند که با ساختار مدولار از طریق مجموعه‌ای از ماژول‌های اساسی و کمکی مشخص شده و تعداد وظایف امکان‌پذیر برای انجام را افزایش می‌دهد. به‌طور جزئی، چنین ماشین‌هایی توسط قطعات ثابت، یعنی ماژول‌های پایه که موجودیت‌های ساختاری را نشان می‌دهند و توسط موجودیت‌های دینامیکی و سینماتیکی، یعنی ماژول‌های کمکی، تشکیل شده‌اند که می‌توانند در صورت نیاز بر روی / از RMT نصب و جدا شوند. مجموعه خاصی از قابلیت‌های وظیفه‌روشن کار CRMS به این معنی است که RMCها موجودیت‌های پویایی هستند که با پیکربندی مجدد RMTها از نظر آرایش ماژول‌های کمکی در افق تولید تکامل می‌یابد [۹].

مهندسان صنایع اعتقاد دارند که هیچ چیدمانی ایده‌آل نیست و همیشه گزینه‌های بهتری می‌تواند وجود داشته باشد، پس خوب یا بد بودن چیدمان یک مسأله‌ی نسبی است و تأثیرگذاری آن روی پارامترهای دیگر می‌تواند درجات متفاوتی داشته باشد. چیدمان مناسب باعث می‌شود که ماژول‌های کمکی مسافت‌های کوتاه‌تری را طی کنند، امنیت بیشتری داشته باشند و نظم بیشتری را در کارخانه حاکم کند [۱۰].

این پژوهش در تلاش است تا یک مدل بهینه‌سازی ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت پویا CRMS با در نظر گرفتن چیدمان ماشین‌آلات و لحاظ کردن قابلیت اطمینان توسعه دهد. هدف اصلی مدل تجزیه و تحلیل و ایجاد تعادل بین تلاش برای پیکربندی مجدد RMT میزبان قطعه، از نظر نصب و جداسازی ماژول کمکی، در مقابل جریان بخش بین سلولی و ماژول کمکی می‌باشد. برای انجام این کار، تابع هدف پیشنهادی زمان سفر بخش بین سلولی، زمان سفر ماژول کمکی و زمان پیکربندی مجدد برای نصب و جداسازی ماژول‌های کمکی را به حداقل می‌رساند. طبق رویه صنعتی، در فرمول‌بندی مدل، ماژول‌های کمکی موجودیت‌های کمیاب هستند که در مقدار محدودی وجود دارد. این جنبه جدید است زیرا در مطالعات موجود (الامینی و همکاران ۲۰۲۰، جبال‌آملی و آرکات ۲۰۰۸) [۱۱، ۱۲] ماژول‌های کمکی، که مؤلفه‌های اصلی RMSها را نشان می‌دهند، شرکت‌های صنعتی معمولاً دارای مجموعه‌ای از ماژول‌های کمکی هستند که شامل تعدادی ماژول کمکی و تعداد محدودی واحد ماژول کمکی در هر نوع می‌باشد. در نظر گرفتن ماژول‌های کمکی به‌عنوان موجود در تعداد محدود از دیدگاه اقتصادی بسیار مهم است، به‌عنوان مثال سرمایه‌گذاری در تجهیزات و ابزار به‌شدت بر برنامه‌ریزی تولید تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، در سطح مدیریت عملکرد فرآیندها و تجهیزات برآورد، حفظ و بهبود قابلیت اطمینان از مهم‌ترین دغدغه‌های

<sup>3</sup> Cellular Reconfigurable Manufacturing System

<sup>4</sup> Reconfigurable Machining Cellular

<sup>5</sup> Reconfigurable Machine Tools

مهندسان و مدیران صنایع تولیدی می‌باشد. برای ارزیابی و مدیریت قابلیت اطمینان روش‌های تحلیلی مختلفی توسعه پیدا کرده است. استفاده از هر کدام از این تحلیل‌ها به مرحله چرخه عمر تجهیز، اولویت آن در بین دیگر تجهیزات، میزان داده‌های ثبت شده و عواملی دیگر از این دست بستگی دارد. باید توجه داشت که انواع تحلیل‌های قابلیت اطمینان به هم مرتبط بوده و در رفع مشکلات ناشی از کاهش سطح قابلیت اطمینان از منظرهای مختلف قابل استفاده هستند [۱۳].

در این بین سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر به عنوان یکی از کاراترین روش‌های مورداستفاده در کاهش و یا حذف این مشکلات در فرایندهای تولیدی، به شمار می‌روند. چیدمان تسهیلات تولید بیشتر از آنکه یک راه حل تکنیکی به حساب آیند، به عنوان یک راه حل تجاری که منجر به بهبود سوددهی (کاهش پیش زمان سفارش و سطوح موجودی، پاسخ سریع به تغییرات بازار، سطوح کار نیروی انسانی پایین تر و بهبود اثربخشی تولید با انعطاف‌پذیری عملیاتی) می‌شود، خود را مطرح ساخته‌اند. همچنین با صرف زمان کوتاهی جهت طراحی نحوه چیدمان تجهیزات و فضاها قبل از استقرار آن‌ها، می‌توان از بروز بسیاری از خسارت‌ها و نارضایتی‌ها مانند مشکلات واحدهای تولیدی، مانند زمان طولانی فرآیند تولید، وجود گلوگاه‌ها در واحد تولیدی و نارضایتی کارکنان و... جلوگیری کرد. مسلماً جابه‌جایی و ایجاد تغییرات در چیدمان فضاها و تجهیزات بر روی کاغذ به مراتب ساده تر و کم‌هزینه تر از انتقال و جابه‌جایی واقعی آن‌ها است. به همین دلیل محققان در جریان این مسائل، به دنبال یافتن الگوریتم‌ها و روش‌های تصمیم‌گیری هستند تا در عین حال که به جواب خوبی در مورد نحوه چیدمان تجهیزات و واحدها می‌رسند، پاسخ قابل اجرا در محیط عملیاتی بوده و با شرایط محیط کار سازگار باشد.

در نتیجه یک تحلیل چندجانبه، تغییرات عملکرد کلی سیستم تولید را که تحت تأثیر محدودیت ماژول‌های کمکی است، ارزیابی می‌کند و در کنار آن، این پژوهش در تلاش است تا با گسترش تحقیقات قبلی، تأثیر وجود محدودیت استقرار یا چیدمان ماشین‌آلات و بحث قابلیت اطمینان را در مفروضات مدل بررسی کند.

### ۳- مدل سازی ریاضی چیدمان تسهیلات تولید

این مدل یک مدل پویا می‌باشد که در آن چند دوره زمانی در نظر گرفته شده است؛ تعداد قطعات و به تبع آن تعداد ماشین‌ها در هر دوره با دوره قبل متفاوت می‌باشد (در نظر گرفتن تجهیزات حمل و نقل تولید). تفاوت تعداد و نوع قطعات از یک دوره به دوره بعد علاوه بر تغییر در تعداد ماشین‌ها، باعث می‌شود جایگاه ماشین‌ها در هر دوره نسبت به دوره بعد متفاوت باشد. هدف ما در این مدل مینیمم کردن هزینه حاصل از دو نوع جابجایی قطعات (درون سلولی و برون سلولی) و همچنین هزینه حاصل از جابجایی ماشین‌ها از یک دوره به دوره بعد و هزینه انجام عملیات روی هر ماشین در اثر چیدمان تسهیلات تولید می‌باشد. در نظر گرفتن هزینه چیدمان تسهیلات تولید برای جابجایی ماشین‌ها باعث می‌شود که مدل سعی کند یک چیدمان بهینه برای ماشین‌ها در کل دوره‌ها بیابد تا حتی المقدور از جابجایی ماشین‌هایی که دارای هزینه جابجایی بالا می‌باشند جلوگیری شود و مطابق با برنامه ریزی حمل و نقل درون سیستمی تعریف شده در کل دوره‌ها چیدمان مناسبی برای خط تولید ایجاد نماید. در این مدل هر عملیات هر قطعه فقط می‌تواند روی یکی از ماشین‌هایی که قابلیت انجام آن عملیات را دارند انجام شود و قابلیت پخش قطعات که در مدل‌های قبلی [۱۴] موجود می‌باشد، در این مدل وجود ندارد. در این مدل تعدادی ماشین از هر نوع در ابتدای دوره اول موجود می‌باشد که در صورت نیاز به سطح فضای تولید بر اساس شاخص‌های اجتماعی اضافه می‌شود. اگر تعداد ماشین‌های مورد نیاز از تعداد ماشین‌های موجود بیشتر باشد در این صورت در ابتدای هر دوره اقدام به خرید ماشین می‌نماییم و در صورتی که در یک دوره به تعدادی از ماشین‌ها نیاز نداشته باشیم از سطح فضای تولید برداشته می‌شود تا از تحمیل هزینه نگهداری که برای ماشین‌های موجود در سطح فضای تولید در نظر می‌گیریم، جلوگیری شود. حرکت قطعات به دودسته درون سلولی و برون سلولی تقسیم می‌شود و بسته به نوع قطعه هزینه آن متفاوت است (برای هر نوع یک تابع هدف در نظر گرفته شده است تا بتوان مدیریت هزینه‌ها به خوبی اجرا شود). یکی از نوآوری‌های مدل ارائه شده این است که هزینه جابجایی درون سلولی و برون سلولی وابسته به فاصله و مسافت طی شده بین دو ماشین است. و فاصله بین دو ماشین وابسته به جایگاه‌هایی است که ماشین‌ها در آن قرار می‌گیرند. همه ماشین‌ها ابعاد یکسانی دارند و در جایگاه‌هایی با بعد یکسان قرار می‌گیرند. ماشین‌ها باید در جایگاه‌هایی قرار گیرند که فاصله آن‌ها از دیگر جایگاه‌ها مشخص و ثابت است. در اینجا یک

چیدمان در چندین ردیف یا به عبارتی یک چیدمان دوبعدی در نظر گرفته شده است که این شکل در کارهای قبلی مورد استفاده قرار نگرفته است.

### ۳-۱- فرضیات مدل سازی

- هر نوع قطعه دارای تعداد مشخصی عملیات می باشد که باید بر اساس توالی مربوطه انجام گیرد.
- زمان انجام برای همه عملیات های یک قطعه روی ماشین های مختلفی که توانایی انجام آن عملیات را دارا می باشند، مشخص می باشد.
- میزان تقاضا برای هر نوع قطعه در هر دوره به صورت غیرقطعی می باشد.
- ظرفیت هر نوع ماشین مشخص می باشد.
- هزینه های ثابت مربوط به هر ماشین مشخص می باشد. این هزینه ها شامل هزینه نگهداری ماشین هایی که در سطح فضای تولید است، می باشد.
- در ابتدای دوره اول تعدادی ماشین از هر نوع در دسترس می باشد.
- تعداد ماشین های در دسترس از هر نوع در هر دوره برابر است با ماشین های در دسترس در دوره قبل بعلاوه ماشین های خریداری شده در ابتدای این دوره.
- در این مدل تعداد ماشین ها ثابت نیست و در هر دوره برحسب تعداد و نوع قطعات و در صورتی که تعداد ماشین های در دسترس برای تولید کافی نباشد، در ابتدای دوره ماشین خریداری می شود.
- تعداد ماشین های موجود در سطح فضای تولید در هر دوره برابر است با تعداد ماشین های دوره قبل بعلاوه تعداد ماشین هایی که در دوره جدید از محل ماشین های در دسترس به فضای تولید اضافه می گردد، منهای ماشین هایی که از مجموعه ماشین ها کاسته می شود.
- هزینه متغیر تولید هر ماشین برای انجام عملیات به میزان قطعه ای که به آن ماشین تخصیص می یابد بستگی دارد.
- هزینه جابجایی هر نوع ماشین بین دو دوره مشخص است.
- تعداد سلول هایی که در هر دوره باید شکل گیرد از قبل مشخص است (تعداد ایستگاه های کاری جهت بالانس مشخص می باشد).
- ماکسیمم و مینیمم سائز سلول مشخص می باشد.
- همه ماشین ها توان انجام یک یا بیش از یک عملیات را دارا می باشند. مثلاً هر عملیات از یک قطعه می تواند بر روی چند ماشین مختلف با زمان های پردازش مختلف اجرا شود.
- در مدل ریاضی دو نوع تجهیز برای حمل و نقل در نظر گرفته شده است. تجهیزات حمل و نقل میان سلولی که از طریق لیفتراک انجام می شود و تجهیزات حمل و نقل درون سلولی که با جرثقیل های دروازه ای یا سقفی انجام می شود.

### ۳-۲- اندیس های مدل

$$P = \{1, 2, \dots, P\}$$

اندیس مورد استفاده برای نوع قطعات

$$K(p) = \{1, 2, \dots, Kp\}$$

اندیس مورد استفاده برای عملیات قطعه نوع p

$M = \{1, 2, \dots, M\}$	اندیس مورد استفاده برای نوع ماشین‌ها
$C = \{1, 2, \dots, C\}$	اندیس مورد استفاده برای شماره سلول‌ها
$L = \{1, 2, \dots, L\}$	اندیس مورد استفاده برای شماره جایگاه‌ها
$T = \{1, 2, \dots, T\}$	اندیس مورد استفاده برای شمارش دوره‌های زمانی

### ۳-۳- پارامترهای مدل

$IE_p$	قابلیت اطمینان جابجایی بین سلولی برای هر قطعه نوع $p$ با استفاده از تجهیزات حمل‌ونقل درون کارگاهی
$IA_p$	قابلیت اطمینان جابجایی درون سلولی برای هر قطعه نوع $p$ با استفاده از تجهیزات درون سلولی
$\delta_m$	هزینه جابجایی برای هر ماشین نوع $m$ از یک دوره به دوره بعد
$\beta_m$	هزینه انجام عملیات روی ماشین نوع $m$ برای یک تایم زمانی
$\alpha_m$	هزینه نگهداری ماشین نوع $m$ در هر دوره
$\gamma_m$	هزینه خرید هر ماشین نوع $m$ بر اساس شاخص اجتماعی
$\bar{D}_{pt}$	مقدار تقاضا برای هر قطعه نوع $p$ در دوره $t$
$T_m$	ظرفیت هر ماشین نوع $m$
$BU$	حد بالای ظرفیت سلول
$BL$	حد پایین ظرفیت سلول
$A_m$	تعداد ماشین‌های نوع $m$ در دسترس در ابتدای دوره اول
$tk_{pm}$	زمان انجام عملیات $k$ ام قطعه $p$ ام روی ماشین نوع $m$ (تئوری صف تولید قطعات)
$d_{ll'}$	فاصله بین دو جایگاه $L$ و $L'$
$a_{kpm} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر عملیات $k$ ام قطعه $p$ بتواند روی ماشین نوع $m$ انجام شود در غیر این صورت

### ۳-۴- متغیرهای تصمیم

$Z_{kpm} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر عملیات $k$ ام قطعه نوع $p$ روی ماشین نوع $m$ که در جایگاه $L$ و سلول $c$ واقع است در دوره $t$ انجام شود. در غیر این صورت
--	---

$W_{mlct} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر ماشین نوع $m$ در دوره $t$ در سلول $c$ و در جایگاه $L$ واقع باشد در غیر این صورت
$N_{mt}^U$	تعداد ماشین‌های نوع $m$ که در دوره $t$ چیدمان شود
$N_{mt}^p$	تعداد ماشین‌های نوع $m$ اضافه‌شده به ماشین‌های در دسترس در دوره $t$
$N_{mt}^{Rem}$	تعداد ماشین‌های نوع $m$ کاسته شده از فضای تولید در دوره $t$ بر اساس چیدمان تسهیلات صورت گرفته
$N_{mt}^{Ret}$	تعداد ماشین‌های نوع $m$ که در دوره $t$ از ماشین‌های در دسترس به فضای تولید اضافه می‌شود.
$N_{mt}^A$	تعداد ماشین‌های نوع $m$ در دسترس در دوره $t$

محدودیت‌ها:

$$\sum_m \sum_l \sum_c a_{kpm} \cdot Z_{kpm} = 1 \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (1)$$

$$N_{m1}^A = A_m + N_{m1}^p \quad \forall m \in M \quad (2)$$

$$N_{mt}^A = N_{m,t-1}^A + N_{mt}^p \quad \forall m \in M, \forall t \neq 1 \in T \quad (3)$$

$$N_{m1}^U = N_{m1}^{Ret} \quad \forall m \in M \quad (4)$$

$$N_{mt}^U = N_{m,t-1}^U + N_{mt}^{Ret} - N_{mt}^{Rem} \quad \forall m \in M, \forall t \neq 1 \in T \quad (5)$$

$$N_{mt}^U \leq N_{mt}^A \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_m N_{mt}^U \leq L \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_c \sum_l W_{mlct} = N_{mt}^U \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_m \sum_l W_{mlct} \leq B_U \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_m \sum_l W_{mlct} \geq B_L \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_k^{Kp} Z_{kpm} \cdot D_{pt} \cdot t_{kpm} \leq T_m \cdot W_{mlct} \quad \forall m \in M, \forall l \in L, \forall c \in C, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_m^M \sum_c^C W_{mlct} \leq 1 \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (12)$$

$$N_{mt}^P \geq 0, N_{mt}^U \geq 0, N_{mt}^{Ret} \geq 0, N_{mt}^{Rem} \geq 0 \text{ \& integer } \forall m \in M, \forall t \in T \quad (13)$$

$$Z_{kpm} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in Kp, \forall p \in P, \forall m \in M, \forall l \in L, \forall c \in C, \forall t \in T \quad (14)$$

$$W_{mlct} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in M, \forall l \in L, \forall c \in C, \forall t \in T \quad (15)$$

محدودیت (۱) تضمین می‌کند که در هر دوره هر عملیات هر قطعه فقط روی یکی از ماشین‌هایی که توان انجام آن را داراست انجام می‌شود. محدودیت (۲) و (۳) نشان می‌دهد که تعداد ماشین‌های در دسترس در هر دوره برابر است با تعداد ماشین‌های در دسترس در دوره قبل بعلاوه تعداد ماشین‌هایی که در ابتدای این دوره خریداری می‌شود. محدودیت (۴) و (۵) نشان می‌دهد که تعداد ماشین‌های مورد استفاده در هر دوره برابر است با تعداد ماشین‌هایی که در دوره قبل مورد استفاده قرار گرفته‌اند بعلاوه ماشین‌هایی که از محل ماشین‌های در دسترس به فضای تولید اضافه می‌شوند منهای ماشین‌هایی که از سطح فضای تولید حذف می‌شوند. محدودیت (۶) نشان می‌دهد که تعداد ماشین‌های مورد استفاده در هر دوره باید کمتر از ماشین‌های در دسترس در آن دوره باشد. محدودیت (۷) محدودیت تعداد جایگاه‌های مورد استفاده می‌باشد، بدین معنی که تعداد ماشین‌هایی که می‌توان در یک دوره استفاده کرد حداکثر می‌تواند برابر تعداد جایگاه‌ها باشد. محدودیت (۸) نشان می‌دهد که تعداد کل جایگاه‌هایی که در کل سلول‌ها در یک دوره و برای یک نوع ماشین خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد برابر است با تعداد کل ماشین‌های از آن نوع که در آن دوره موجود می‌باشند. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که سائز سلول بین بالاترین کران و پایین‌ترین کران قرار می‌گیرد. محدودیت (۱۱) نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت هر ماشین است. محدودیت (۱۲) نشان‌دهنده آن است که هر جایگاه در سلول‌ها در هر دوره فقط می‌تواند یک ماشین را در خود جای دهد. محدودیت‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) محدودیت‌های منطقی بزرگتر از صفر، صحیح و باینری هستند.

### ۳-۵- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی ارائه شده به شرح زیر می‌باشد:

$$\min c_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_m^M \sum_l^L \sum_{m'}^M \sum_{l'}^L \sum_p^P \sum_{k_p}^{Kp} Z_{kpm} \cdot Z_{k+1pm'l'c't} \cdot D_{pt} \cdot d_{ll'} \cdot IA_p \quad (16)$$

$$\min c_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_m^M \sum_l^L \sum_{m'}^M \sum_{l'}^L \sum_p^P \sum_{k_p}^{Kp} Z_{kpm} \cdot Z_{k+1pm'l'c't} \cdot D_{pt} \cdot d_{ll'} \cdot IE_p \quad (17)$$

$$\min c_3 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{t=1}^{T-1} \sum_l^L \sum_m^M \delta_m \cdot \left| \sum_c^C W_{mlct} - \sum_c^C W_{mlc,t+1} \right| \quad (18)$$

$$\min c_4 = \sum_{t=1}^T \sum_m^M \gamma_m \cdot N_{mt}^P \quad (19)$$

$$\min c_5 = \sum_{t=1}^T \sum_m^M \alpha_m \cdot N_{mt}^U \quad (20)$$

$$\min c_6 = \sum_{t=1}^T \sum_p^P \sum_{k_p}^{K_p} \sum_m^M \sum_l^L \sum_c^C Z_{kpmlct} \cdot D_{pt} \cdot t_{kpm} \cdot \beta_m \quad (21)$$

تابع هدف شامل دو نوع هزینه جابجایی قطعات و یک جابجایی ماشین‌ها، هزینه خرید و نگهداری ماشین‌ها و همچنین یک هزینه تولید وابسته به ماشین می‌باشد.

### ۳-۶- خطی سازی مدل

حال جهت خطی سازی مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی ارائه شده داریم:

در تابع هدف (۱۶):

$$ZZ_{kpmlm'l'ct} = Z_{kpmlct} \cdot Z_{k+1pm'l'ct}$$

در محدودیت (۱):

$$ZZ_{kpmlm'l'ct} \geq 2 - Z_{kpmlct} + Z_{k+1pm'l'ct}$$

$$ZZ_{kpmlm'l'ct} \geq Z_{kpmlct}$$

$$ZZ_{kpmlm'l'ct} \geq Z_{k+1pm'l'ct}$$

خطی سازی قسمت دوم

$$\left| \sum_c^C W_{mlct} - \sum_c^C W_{mlc,t+1} \right|$$

خطی سازی در تابع هدف:

$$\left| \sum_c^C W_{mclt} - \sum_c^C W_{mclt+1} \right| = WP_{mclt} + WM_{mclt}$$

همچنین محدودیت زیر اضافه می‌گردد:

$$\sum_c^C W_{mclt} - \sum_c^C W_{mclt+1} = WP_{mclt} - WM_{mclt} \quad \forall m \in M, \forall l \in L, \forall t \in T$$

### ۴- حل مدل

برای نشان دادن صحت مدل ارائه شده، چند مثال عددی با استفاده از نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX حل شده است. با توجه به چند هدفه بودن مدل ریاضی، با استفاده از رویکرد وزن دهی به اهداف مدل ریاضی به صورت تک هدفه تدوین شده و ارزیابی مدل بر اساس آن صورت پذیرفته است. لذا صحت‌گذاری مدل ریاضی به شرح ذیل می‌باشد:

در مثال اول تعداد متغیرهای مدل برابر با ۵۲۵۸۵ متغیر و تعداد محدودیت‌های آن برابر با ۳۵۷۰۹ محدودیت می‌باشد. با

نرم افزار گمز بعد از ۵۲:۳۵:۲۰ جواب بهینه به دست آمده است.

مثال دوم با توجه به ابعاد بزرگتر مورد ارزیابی قرار گرفته است تعداد متغیرهای این مدل در این مثال برابر با ۳۳۸۱۸۴ متغیر و تعداد محدودیت‌های آن برابر با ۳۳۸۰۷۱ محدودیت می‌باشد. با نرم افزار گمز بعد از ۱۳:۲۱:۳۳ به جواب بهینه به دست آمده است.

تعداد متغیرهای مدل در مثال سوم برابر با ۲۸۷۴۲۴ متغیر و تعداد محدودیت‌های آن برابر با ۲۴۲۴۸۴ محدودیت می‌باشد. با نرم افزار گمز بعد از ۱۸:۲۱:۳۳ به جواب بهینه به دست آمده است.

در مثال چهارم مدل یک مدل پویا می‌باشد که در آن چند دوره زمانی در نظر گرفته شده است و تعداد قطعات و به تبع آن تعداد ماشین‌ها در هر دوره با دوره قبل متفاوت می‌باشد. تفاوت تعداد و نوع قطعات از یک دوره به دوره بعد علاوه بر تغییر در تعداد ماشین‌ها، باعث می‌شود جایگاه ماشین‌ها در هر دوره نسبت به دوره بعد متفاوت باشد.

هدف ما در این مدل مینیمم کردن هزینه حاصل از دو نوع جابجایی قطعات (درون سلولی و برون سلولی) و همچنین هزینه حاصل از جابجایی ماشین‌ها از یک دوره به دوره بعد و هزینه انجام عملیات روی هر ماشین می‌باشد. در نظر گرفتن هزینه برای جابجایی ماشین‌ها باعث می‌شود که مدل سعی کند یک چیدمان بهینه برای ماشین‌ها در کل دوره‌ها بیابد تا حتی المقدور از جابجایی ماشین‌هایی که دارای هزینه جابجایی بالا می‌باشند جلوگیری شود. در این مدل هر عملیات هر قطعه فقط می‌تواند روی یکی از ماشین‌هایی که قابلیت انجام آن عملیات را دارند انجام شود و قابلیت پخش قطعات که در مدل‌های قبلی موجود می‌باشد در این مدل وجود ندارد. در این مدل تعدادی ماشین از هر نوع در ابتدای دوره اول موجود می‌باشد که در صورت نیاز به سطح فضای تولید اضافه می‌شود.

اگر تعداد ماشین‌های مورد نیاز از تعداد ماشین‌های موجود بیشتر باشد در این صورت در ابتدای هر دوره اقدام به خرید ماشین می‌نماییم و در صورتی که در یک دوره به تعدادی از ماشین‌ها نیاز نداشته باشیم از سطح فضای تولید برداشته می‌شود تا از تحمیل هزینه نگهداری که برای ماشین‌های موجود در سطح فضای تولید در نظر می‌گیریم، جلوگیری شود.

جدول ۱ مجموعه پارامترهای چهار مثال را نشان می‌دهد و جدول ۲ اطلاعات مربوط به تابع هدف مثال‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مجموعه پارامترهای مثال‌های عدم قطعیت

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مثال
U(1,10)\$	$\beta_m$	U(0,1000)	$D_{pt}$	1
U(10000,20000)\$	$\gamma_m$	U(0,1)	$t_{kpm}$	1
3	$k_p$	2,1	$\sum_m a_{kpm}$	1
3	$B_U$	50\$	$IE_p$	1
2	$B_L$	5\$	$IA_p$	1
2	$C$	U(500,1000)\$	$\delta_m$	1
4	$M$	U(1000,2000)\$	$\alpha_m$	1
3	$P$	2	$T$	1
3	$k_p$	2,3	$\sum_m a_{kpm}$	2
3	$B_U$	50\$	$IE_p$	2
2	$B_L$	5\$	$IA_p$	2
3	$C$	U(500,1000)\$	$\delta_m$	2
5	$M$	U(1000,2000)\$	$\alpha_m$	2
5	$P$	2	$T$	2

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مثال
3	$k_p$	2	$\sum_m a_{kpm}$	
3	$B_U$	50\$	$IEp$	3
2	$B_L$	5\$	$IAp$	
3	$C$	U(500,1000)\$	$\delta_m$	
5	$M$	U(1000,2000)\$	$\alpha_m$	
4	$P$	2	$T$	
3	$k_p$	2,3	$\sum_m a_{kpm}$	
3	BU	50\$	IEp	4
2	BL	5\$	IAp	
3	C	\$(1000,500)U	$\delta_m$	
4	M	\$(2000,1000)U	$\alpha_m$	
5	P	3	T	

جدول ۲ اطلاعات مربوط به تابع هدف مثال‌ها را نشان می‌دهد. هزینه جابجایی بین سلولی در این مثال صفر می‌باشد و این بدین معنی است که آرایش سلول‌ها به گونه‌ای است که هر سلول قادر است تمامی عملیات همه قطعات اختصاص یافته به خود را انجام دهد.

جدول ۲ هزینه‌های نهایی عدم قطعیت

مثال	هزینه عملیات	هزینه جابجایی ماشین	هزینه درون سلولی	هزینه بین سلولی	هزینه نگهداری ماشین	هزینه خرید ماشین	Zbest
۱	۳۴۴۰۹	۴۲۵	۱۲۷۶۰	۰	۱۴۹۰۰	۸۳۰۰۰	۱۴۵۴۰۹
۲	۶۲۴۲۰	۰	۳۱۴۱۰	۱۳۳۱۵۰	۱۲۲۰۰	۱۲۲۰۰۰	۳۶۱۱۸۰
۳	۳۵۹۵۴۰۱	۸۵۰	۱۳۸۰۰	۰	۲۲۸۰۰	۱۱۴۰۰۰	۱۸۶۵۵۴۰۱
۴	۵۴۹۷۳	۰	۲۷۵۰۰	۰	۲۰۶۰۰	۱۰۳۰۰۰	۲۰۶۰۷۳

برای مثال اول همان‌طور که مشاهده می‌شود هزینه‌ای که برای جابجایی ماشین‌ها در نظر گرفته شده باعث می‌گردد تا ماشین‌ها در یک چینش مناسب قرار گرفته و از یک دوره به دوره بعد کمتر جابجا شود. چگونگی چینش ماشین‌ها و همچنین آرایش سلول‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست از آن جایی که در دوره اول برای قطعه ۳ تقاضا وجود داشت و این قطعه برای انجام عملیات خود به ماشین ۴ نیاز داشت، لذا در دوره اول ماشین ۴ خریداری شده است و در دوره بعدی که به این ماشین نیاز نیست از سطح فضای تولید برداشته شده است تا از تحمیل هزینه نگهداری جلوگیری شود. در این مدل در هر دوره برحسب میزان تقاضا تعداد ماشین‌ها کم یا زیاد می‌شود بنابراین هیچ‌گاه هیچ ماشینی بلااستفاده باقی نمی‌ماند. یکی از مشکلات ما در ارائه این مدل به دست آوردن جواب در سایزهای بزرگ یا حتی متوسط می‌باشد که به دلیل قابلیت پخش تقاضا روی ماشین‌های مختلف می‌باشد در این مثال در دوره اول بخشی از تقاضای قطعات ۱ و ۲ در سلول اول

تولید می‌شود و همه عملیات‌های آن به‌طور کامل در همین سلول انجام می‌شود و همه تقاضای قطعه ۳ و بخشی از تقاضای قطعات ۱ و ۲ در سلول دوم تولید می‌شود و همه عملیات‌های آن به‌طور کامل در همین سلول انجام می‌گردد. در دوره دوم نیز تقاضای قطعات ۱ و ۲ در سلول اول و دوم تقسیم می‌شود.

برای مثال دوم همان‌طور که مشاهده می‌شود هزینه‌ای که برای جابجایی ماشین‌ها در نظر گرفته شده باعث می‌گردد تا ماشین‌ها در یک چیدمان مناسب قرار گرفته و از یک دوره به دوره بعد کمتر جابجا شود. محل ماشین‌ها و همچنین سلول‌ها از یک دوره به دوره بعد کاملاً انعطاف‌پذیر می‌باشد و به‌عنوان مثال برای این مثال خاص محل سلول‌ها از یک دوره به دوره بعد تغییر می‌یابد که این باعث می‌شود که از ایجاد هزینه برای جابجایی ماشین‌ها از یک جایگاه به جایگاه دیگر جلوگیری شود. ماشین‌هایی را که قرار است عملیات‌های متوالی قطعات را انجام دهند به هم نزدیک می‌شود و حتی‌المقدور در یک سلول قرار گیرند تا اپراتور مربوط به آن ماشین‌ها راحت‌تر بتواند به آن سلول و ماشین‌ها سرویس دهد. تا این عملیات با کمترین هزینه انجام شود.

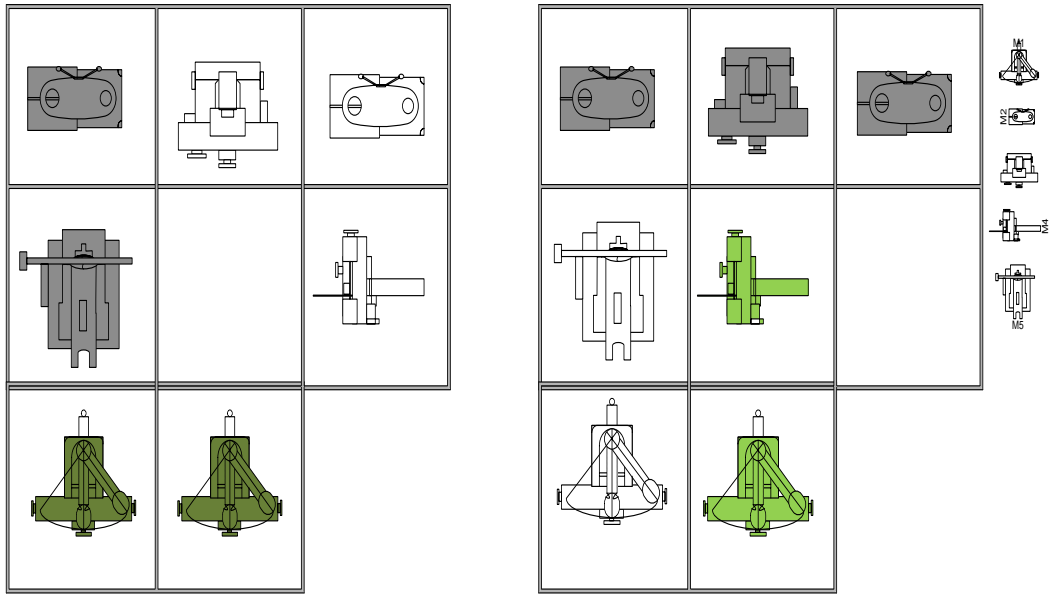
در مثال سوم مشاهده می‌شود هزینه‌ای که برای جابجایی ماشین‌ها در نظر گرفته شده باعث می‌گردد تا ماشین‌ها در یک چیدمان مناسب قرار گرفته و از یک دوره به دوره بعد کمتر جابجا شود. همچنین محل ماشین‌ها و همچنین سلول‌ها از یک دوره به دوره بعد کاملاً انعطاف‌پذیر می‌باشد و به‌عنوان مثال برای این مثال خاص محل سلول‌ها از یک دوره به دوره بعد تغییر می‌یابد که این باعث می‌شود که از ایجاد هزینه برای جابجایی ماشین‌ها از یک جایگاه به جایگاه دیگر جلوگیری شود و در این مثال فقط در یک مورد جابجایی ماشین داشتیم و در بقیه موارد با تغییر در پیکربندی سلول‌ها از جابجایی ماشین‌ها جلوگیری شده است.

جدول ۳ در هر عملیات تعداد قطعات و محل پردازش آن را نمایش می‌دهد. پخش قطعات با رعایت هزینه جابجایی باعث می‌شود که علاوه بر اینکه قطعات برای هر عملیات خود به دنبال ماشینی هستند که این عملیات را با کمترین هزینه انجام می‌دهد، ماشین‌هایی را که قرار است عملیات‌های متوالی قطعات را انجام دهند به هم نزدیک کند و حتی‌المقدور در یک سلول قرار دهد تا اپراتور مربوط به آن ماشین‌ها راحت‌تر بتواند به آن سلول و ماشین‌ها سرویس دهد.

جدول ۳ اطلاعات مربوط به انجام عملیات در دوره اول و دوم

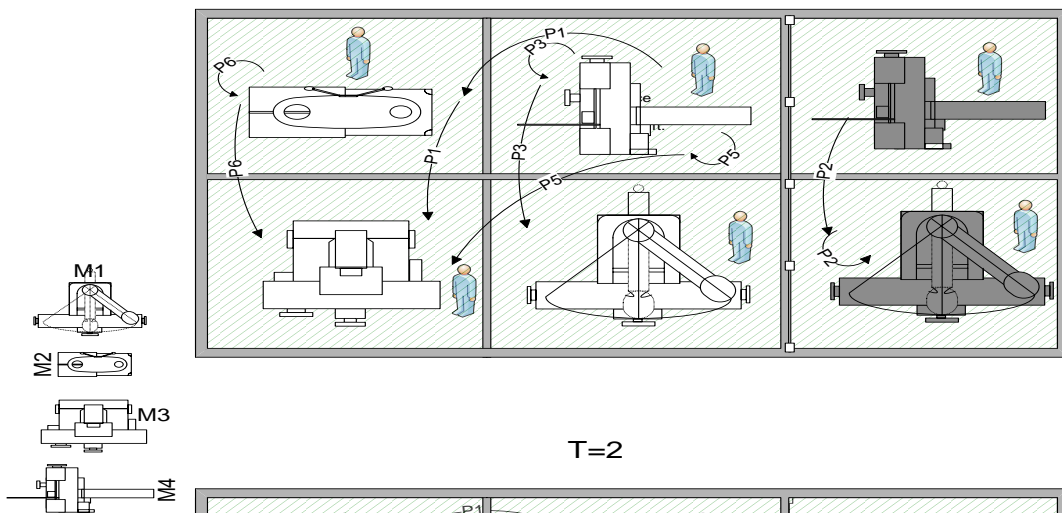
Machine info			P1	P2	P3	P4
دوره اول						
C	M	L	۱	۲	۳	۱ ۲ ۳
	M1	۷			۳۵۲	۱۴۶ ۳۵۲
C1	M5	۴			۲۰۶	
	M2	۱		۲۰۰		
C2	M2	۳				
	M3	۲	۲۰۰	۲۰۰		
C3	M1	۸			۳۴۸	۳۴۸ ۳۰۰
	M4	۵			۳۴۸	۳۰۰ ۳۰۰
دوره دوم						
C	M	L	۱	۲	۳	۱ ۲ ۳
	M2	۳		۲۶	۱۰۵	۷۰۰ ۲۷۳
C1	M3	۲	۱۰۵	۷۹		۲۷۳ ۲۷۳
	M4	۶				۷۰۰ ۷۰۰
C2	M2	۱		۳۹۵	۳۹۵	۲۷ ۲۷
	M5	۴	۳۹۵			
C3	M1	۷				
	M1	۸			۲۵۰	۲۵۰ ۲۵۰



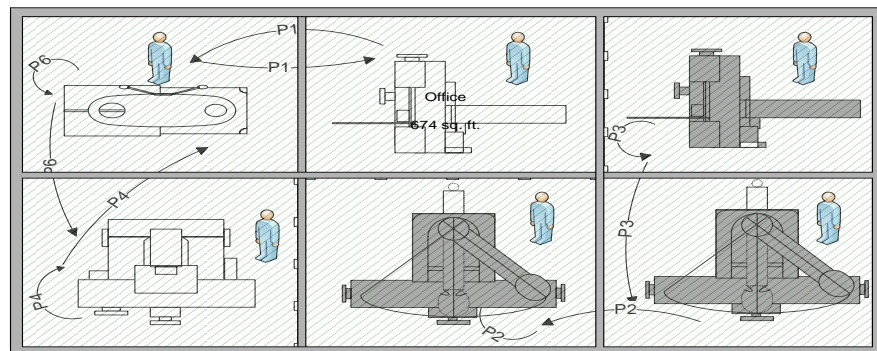


(ب)

T=1



T=2



(ت)

شکل ۱ پیکربندی سلول‌ها و چیدمان ماشین‌ها: الف) مثال اول، ب) مثال دوم، پ) مثال سوم، ت) مثال چهارم

### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از حل مدل می‌توان به اهمیت استفاده از مدل پی برد به طوری که پیکربندی سلول‌ها و

تخصیص قطعات به سلول‌ها و چیدمان ماشین‌ها در سلول‌ها باهدف کاهش هزینه‌های ناشی از انواع جابجایی قطعات، هزینه‌های ناشی از انجام عملیات روی ماشین‌ها و هزینه‌های ناشی از جابجایی، خرید و نگهداری ماشین‌آلات در سیستم، منجر به افزایش بهره‌وری کل سیستم گردیده و باعث ایجاد تعادل در سیستم می‌شود. یکی از مزیت‌های این مدل این است که با نزدیک کردن ماشین‌ها به یکدیگر در تلاش است تا حد امکان از حرکات اضافی در درون سلول‌ها جلوگیری کند که این امر موجب افزایش بهره‌وری سلول می‌شود. در نظر گرفتن چیدمان چند سطری، پیکربندی انعطاف‌پذیر سلول‌ها، محاسبه هزینه جابجایی ماشین‌آلات و محاسبه هزینه جابجایی قطعات برحسب فاصله ماشین‌ها از یکدیگر از جمله مواردی است که باعث تمایز این مدل نسبت به سایر مدل‌ها می‌شود. با توجه به این مساله در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای مسئله چیدمان تسهیلات پویا ارائه شد. به‌منظور بررسی‌های بیشتر می‌توان در تحقیقات آتی به ارائه روش‌های حل فرا ابتکاری مختلف جهت بهبود جواب‌ها و حل مدل در سایزهای بزرگ پرداخت.

## ۶- منابع

- [1] Sharma A, Sharma RK. Modelling and analysis of enablers for successful implementation of cellular manufacturing system. *International Journal of Process Management and Benchmarking*. 2018;8:103-23. <https://doi.org/10.1504/IJPMB.2018.10009238>.
- [2] Aalaei A, Davoudpour H. A robust optimization model for cellular manufacturing system into supply chain management. *International Journal of Production Economics*. 2017;183:667-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.014>.
- [3] Bilgen E, Rheault J. Solar chimney power plants for high latitudes. *Solar Energy*. 2005;79:449-58. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.01.003>.
- [4] Eguia I, Molina JC, Lozano S, Racero J. Cell design and multi-period machine loading in cellular reconfigurable manufacturing systems with alternative routing. *International Journal of Production Research*. 2017;55:2775-90. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1193673>.
- [5] Balakrishnan J, Cheng CH. Multi-period planning and uncertainty issues in cellular manufacturing: A review and future directions. *European journal of operational research*. 2007;177:281-309. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.027>.
- [6] Rezazadeh H, Khiali-Miab A. A two-layer genetic algorithm for the design of reliable cellular manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2017;8:315-32. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.1.001>.
- [7] Huo J, Liu J, Gao H. An nsga-ii algorithm with adaptive local search for a new double-row model solution to a multi-floor hospital facility layout problem. *Applied Sciences*. 2021;11:1758. <https://doi.org/10.3390/app11041758>.
- [8] Kia R, Baboli A, Javadian N, Tavakkoli-Moghaddam R, Kazemi M, Khorrami J. 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*. 2012;39:2642-58. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.01.012>.
- [9] Samarghandi H, Eshghi K. An efficient tabu algorithm for the single row facility layout problem. *European journal of operational research*. 2010;205:98-105. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.034>.
- [10] Paes FG, Pessoa AA, Vidal T. A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the unequal area facility layout problem. *European journal of operational research*. 2017;256:742-56. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.022>.
- [11] Alimian M, Ghezavati V, Tavakkoli-Moghaddam R. New integration of preventive maintenance and production planning with cell formation and group scheduling for dynamic cellular manufacturing systems. *Journal of manufacturing systems*. 2020;56:341-58. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.011>.
- [12] Saeed Jabal Ameli M, Arkat J. Cell formation with alternative process routings and machine reliability consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;35:761-8.
- [13] Drira A, Pierreval H, Hajri-Gabouj S. Facility layout problems: A survey. *Annual reviews in control*. 2007;31:255-67. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.04.001>.

- [14] Bortolini M, Ferrari E, Galizia FG, Regattieri A. An optimisation model for the dynamic management of cellular reconfigurable manufacturing systems under auxiliary module availability constraints. *Journal of manufacturing systems*. 2021;58:442-51. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.01.001>.