



# **FLEXIBLE JOB SHOP SCHEDULING BY CONSIDERING TRANSPORTATION TIMES, ARRIVAL OF URGENT JOBS, AND VARIATION IN PROCESSING TIMES**

**Abdolhamid Safaei Ghadikolaei\*, Ahmad J. Afshari & Seyedeh Marzieh Ahmadi**

*Abdolhamid Safaei Ghadikolaei, Associate Professor of Industrial Management, Faculty of economics & administrative sciences, University of Mazandaran.*

*Ahmad J. Afshari, Assistant Professor of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shomal University.*

*Seyedeh Marzieh Ahmadi, MSc Student, Faculty of economics & administrative sciences, University of Mazandaran.*

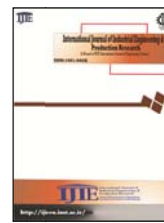
## **Keywords**

Dynamic scheduling,  
Flexible job shop scheduling,  
Efficiency,  
Stability

## **ABSTRACT**

*Scheduling problems in real manufacturing environment are inherently dynamic issues and often face to uncertainties and complexities, Although considering them does not lead to find the optimal solution quickly but make it possible to use the theoretical models, developed in the areas of planning and planning, completely. In this research we presented a mathematical model for Flexible Job Shop Scheduling by considering arrival of urgent jobs and variation in processing times with the objective of minimizing the makespan (as the efficiency criterion) and the deviation between the start times of the new and old schedules (as the stability criterion). Furthermore, in order to make the model closer to the practical situation, the transportation time between workstations is taken into account as a key assumption in the model which have not been considered simultaneously in the similar studies. In the numerical results section, Because the problem is NP-hard, an algorithm based on genetic principles is presented. The results of numerical analysis of random examples, that have been obtained by adding transportation parameters to a number of problems in the literature, are shown a very small percentage of error which shows the efficiency of the algorithm.*

**© 2016 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 27, No. 2, All Rights Reserved**



## زمانبندی تولید کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن زمان های حمل و نقل، ورود سفارش جدید و تغییر زمان عملیات

عبدالحمید صفایی قادیکلایی\*، احمد جعفرزاده افشاری و سیده مرضیه احمدی

### چکیده:

مسائل زمانبندی در محیط های واقعی ساخت و تولید ماهیتا مسائل پویایی هستند و اغلب با عدم قطعیت ها و پیچیدگی هایی روبرو هستند که توجه به آن ها، گرچه منجر به عدم دستیابی سریع به جواب بهینه می گردد اما بهره گیری کامل از مدل های نظری توسعه یافته در حوزه برنامه ریزی و زمانبندی را ممکن می سازد. در این پژوهش، مدلی از زمانبندی تولید کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن عدم قطعیت ورود سفارش جدید و تغییر زمان عملیات ارائه شده است که هدف آن کمینه کردن حداکثر دوره ساخت (به عنوان معیار کارایی) و کمینه کردن انحراف های بین زمان های شروع عملیات در دو برنامه اولیه و ثانویه (به عنوان معیار پایداری) می باشد. بعلاوه به منظور نزدیک تر ساختن مدل به شرایط عملی، زمان های حمل و نقل بین ایستگاه های کاری، به عنوان فرض کلیدی گنجانده شد که در تحقیقات مشابه در این حوزه، بطور همزمان در نظر گرفته نشده است. در بخش نتایج عددی، به دلیل NP-hard بودن مساله، الگوریتمی مبتنی بر اصول ژنتیک ارائه شد. نتایجی از تجزیه و تحلیل عددی مثال های تصادفی، که با افزودن پارامترهای مربوط به حمل و نقل به مسائل موجود در ادبیات به دست آمده اند، میزان درصد خطای بسیار ناچیز و در نتیجه کارآمدی الگوریتم را نشان داده است.

### کلمات کلیدی

زمانبندی پویا،  
زمانبندی تولید کارگاهی  
انعطاف پذیر،  
کارایی، پایداری

### ۱. مقدمه

زمانبندی تولید کارگاهی<sup>۱</sup> یکی از مهمترین مباحث مدیریت تولید و عملیات است که شاخه های از زمانبندی تولید محسوب شده و جزء پیچیده ترین مباحث بهینه سازی ترکیبی است [۱]. در مساله زمانبندی تولید کارگاهی کلاسیک (JSSP)، n کار وجود دارد که بر روی m ماشین پردازش می شوند، مسیر کارها ثابت و مشخص بوده و نیازی به وجود مسیر یکسان برای همه کارها نمی باشد [۲] مدل کارگاهی منعطف در واقع به زمانبندی انجام مجموعه ای از کارها که

هر کار شامل یک یا چند عملیات است و هر عملیات می تواند روی مجموعه ای از ماشین آلات انجام شود، می پردازد. هدف برنامه ریزی کارها به گونه ای است که یک یا چند معیار، به عنوان تابع هدف بهینه گردد. با توجه به تعریف، مساله تولید کارگاهی منعطف شامل دو زیر مساله اصلی به شرح زیر می باشد:

۱. زیر مساله تخصیص که مربوط به تخصیص هر عملیات به یک ماشین از مجموعه ماشین های ممکن است.
۲. زیر مساله زمانبندی که در آن توالی اجرای عملیات روی ماشین ها تعیین می گردد [۳].

این مساله برای اولین بار توسط بروکر و شلی مورد مطالعه قرار گرفت [۴]. آن ها حالت وجود ماشین های چندمنظوره را مورد بررسی قرار داده و برای مساله با دو کار، الگوریتمی چندجمله ای را ارائه نموده اند. لی و همکاران [۵] یک مدل را برای مساله زمانبندی تولید کارگاهی منعطف ارائه و سپس یک الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> را برای حداقل سازی زمان تکمیل پیشنهاد کردند. سعیدی مهرآباد و فتاحی [۶] ضمن ارائه مدلی ریاضی برای حل مساله FJSP در اندازه متوسط و بزرگ، یک

تاریخ وصول: ۹۲/۱۰/۱۵

تاریخ تصویب: ۹۳/۰۶/۱۰

احمد جعفرزاده افشاری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شمال،  
afshari@shomal.ac.ir

سیده مرضیه احمدی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران،  
marziye.ahmadi@gmail.com

\*نویسنده مسئول مقاله: عبدالحمید صفایی قادیکلایی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران،  
ab.safaei@umz.ac.ir

اما اغلب سیستم‌های تولیدی بکار رفته در محیط‌های تولیدی با رویدادهای غیر قابل پیش‌بینی و اجتناب‌ناپذیر مواجه هستند که موجب تغییر در برنامه زمانبندی شده می‌شود. این رویدادها که از منابع مختلف مانند تغییر در زمان عملیات، از کار افتادگی غیرمنتظره ماشین، ورود سفارشات جدید، لغو یا اصلاح سفارش موجود و غیره ناشی می‌شود، منجر به شکاف بین تئوری زمانبندی و عمل زمانبندی گشته است و نوع جدیدی از مسائل زمانبندی با عنوان زمانبندی پویا<sup>۳</sup> را بوجود آورد. در مسائل زمانبندی پویا مجموعه‌ای نامحدود از کارها وجود دارد که ورود آن‌ها بعد از زمانبندی ادامه دارد. اولین مطالعه در زمانبندی تولید کارگاهی پویا توسط هالووی و نلسون [۱۰] بود. آن‌ها یک رویه چندراشه را توسط ایجاد برنامه‌ها به صورت متناوب<sup>۴</sup> پیاده‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که یک سیاست متناوب در محیط‌های تولید کارگاهی پویا مؤثر است. لی‌او و همکاران [۱۱] مساله FJS تحت محیط پویا را مورد بررسی قرار دادند و یک الگوریتم ژنتیک را پیشنهاد کرده و استراتژی زمانبندی مجدد محرک سیکل را بکار بردند. ادیبی و همکاران [۱۲] سیاست محرک رویداد<sup>۵</sup> را برای زمانبندی تولید کارگاهی واکنشی با ورود کارهای تصادفی و از کارافتادگی ماشین‌ها در نظر گرفتند و یک شبکه عصبی مصنوعی<sup>۶</sup> با معیار عملکرد چندهدفه شامل بیکاری<sup>۷</sup> و دوره‌ساخت<sup>۸</sup> را ارائه دادند. نتایج بالاترین اثربخشی و کارایی روش پیشنهاد شده در یک تنوعی از شرایط کارگاه را نشان داد. در سال ۱۳۸۹ نهبانندی و عباسیان [۱۳] در پژوهش خود مساله FJSP را با در نظر گرفتن پارامترهای پویایی و انعطاف‌پذیری و نیز چندمعیاره بودن تابع هدف مورد مطالعه قرار داده و یک الگوریتم ژنتیک با کروموزوم دوبعدی پویا برای حل مساله ارائه دادند. معیار دوره ساخت توسط برخی از پژوهشگران دیگر همچون فتاحی و فلاحی [۱۴] و گورن و همکاران [۱۵]، نیز در نظر گرفته شده است.

در حالی که معیارهای کارایی نظیر دوره‌ساخت، موعد تحویل و غیره از جمله معیارهای رایج در بیشتر پژوهش‌های زمانبندی هستند و در اکثر پژوهش‌ها به‌صورت تنها و یا با هم بکار می‌روند و بخوبی شناخته شده‌اند، تنها تعداد کمی از پژوهشگران اثر اختلال در زمانبندی را نشان داده‌اند. این اثر که پایداری<sup>۹</sup> نامیده می‌شود، رویکرد جدیدی می‌باشد که در سال‌های اخیر در پژوهش‌های زمانبندی مورد توجه قرار گرفته است، با این حال یک تعریف عمومی برای این واژه وجود ندارد [۱۶]. اولین بار چارچ و اوزسوی [۱۷] تعداد دفعات زمانبندی مجدد را به عنوان معیار پایداری بکار بردند و بیان کردند که زمانبندی

مجدد مکررتر به مفهوم یک برنامه با پایداری کمتر است. وو و همکاران [۱۸] پایداری را به صورت انحراف از زمان‌های شروع کارها بین برنامه اصلی و برنامه دریافت شده و نیز تفاوت توالی‌ها بین برنامه اصلی و برنامه اصلاح شده تعریف کرده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت که پایداری به مفهوم ایجاد کمینه تغییرات در برنامه زمانی ثانویه نسبت به برنامه زمانی اولیه است. رانگساریترانسمی و همکاران [۱۶] یک روش شناسی برای نشان دادن DJSP<sup>۱</sup> مبتنی بر تابع دومعیاره را ارائه دادند که بطور همزمان معیار کارایی و پایداری را در نظر می‌گیرد. همچنین فتاحی و فلاحی [۱۴] نیز ضمن ارائه مدل ریاضی با رویکرد چندهدفه که بطور همزمان کارایی و پایداری را در نظر می‌گیرد، الگوریتمی فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را ارائه دادند. معیار پایداری توسط پژوهشگران دیگر نظیر [۱۹]، [۱۵] نیز ارائه شده است. از سوی دیگر یکی از مسائل حائز اهمیت در سیستم‌های تولید کارگاهی، نحوه استفاده از سیستم‌های حمل و نقل می‌باشد. در نظر گرفتن زمان‌های حمل و نقل تجهیزات از قبیل جرثقیل، لیفتراک، رباط و غیره در مسائل زمانبندی تولید کارگاهی موجب می‌گردد که زمانبندی این سیستم‌ها واقعی‌تر و به شرایط واحدهای تولیدی نزدیک‌تر گردد. در این راستا، اگرچه چندین پژوهشگر، مطالعات خود را به حوزه مسائل JSP با محدودیت‌های حمل و نقل اختصاص داده‌اند، با این حال پیشرفت در این حوزه با توجه به پیچیدگی زیاد این مسائل حتی در نمونه‌های کوچک و ساده، کند می‌باشد [۲۰].

نوآوری اصلی پژوهش حاضر، توسعه مدلی از زمانبندی تولید کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن زمان‌های حمل و نقل تحت محیط پویا است که علیرغم کاربردهای بسیار در محیط‌های خدماتی و تولیدی واقعی، تاکنون در هیچ پژوهشی بطور همزمان مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مدل هدف حداقل کردن حداکثر دوره ساخت و انحرافات بین زمان‌های شروع عملیات در دو برنامه اولیه و ثانویه می‌باشد. پویایی مدل توسط ورود کارهای جدید و تغییر زمان عملیات نشان داده می‌شود. در رویکرد حل مساله این پژوهش، ضمن ارائه مثال‌های عددی تصادفی و ارائه نمودار گانت در ابعاد کوچک با استفاده از حل در نرم‌افزار لینگو<sup>۹</sup>، از روش حل الگوریتم ژنتیک استفاده خواهد شد. سایر بخش‌های پژوهش حاضر، به صورت مقابل دسته‌بندی شده است که عبارتند از: بخش (۲) تشریح مساله و ارائه مدل ریاضی، بخش (۳) پیچیدگی مساله، بخش (۴) رویکرد حل مساله و ارائه الگوریتم ژنتیک و بخش (۵) بحث و نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده.

## ۲. تعریف مسئله

### ۲-۱. مفروضات مساله

در این قسمت مدل ریاضی (برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی) به‌منظور شناسایی بیشتر مساله و همچنین استفاده از آن

$M'_{ijk}$  اگر عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  بتواند بر روی ماشین  $k$  انجام شود ۱، در غیر این صورت صفر  
 $d_{kl}$  فاصله بین دو ماشین  $k$  و  $l$   
 $\sigma_v$  سرعت وسیله حمل و نقل  $v$   
 $M$  یک مقدار بزرگ  
 $NV'_v$  و  $NV_v$  به ترتیب تعداد کل هر وسیله حمل و نقل در برنامه اولیه و ثانویه  
 $RT$  زمان شروع از دوره زمانبندی مجدد

#### متغیرها

$t_{ij}$  زمان شروع عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  در برنامه اولیه  
 $t'_{ij}$  زمان شروع عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  در برنامه جدید  
 $C_{ij}$  زمان تکمیل عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  در برنامه اولیه  
 $C'_{ij}$  زمان تکمیل عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  در برنامه جدید  
 $C_{Max}$  حداکثر زمان تکمیل کارها  
 $X_{ijk}$  اگر ماشین  $k$  برای عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  انتخاب شود ۱، در غیر این صورت صفر  
 $X'_{ijk}$  اگر ماشین  $k$  برای عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  انتخاب شود ۱، در غیر این صورت صفر  
 $Z_{ijhngk}$  اگر عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  قبل از عملیات  $\lambda_h$  از کار  $\lambda_m$  بر روی ماشین  $K$  انجام گیرد ۱، در غیر این صورت صفر  
 $Z'_{ijhngk}$  اگر عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  قبل از عملیات  $\lambda_h$  از کار  $\lambda_m$  بر روی ماشین  $K'$  انجام گیرد ۱، در غیر این صورت صفر  
 $Y_{klv}$  اگر بین ماشین  $k$  و  $l$ ، وسیله حمل و نقل  $v$  استفاده شود ۱، در غیر این صورت صفر  
 $FF_{ij}$  اگر عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  قبل از  $RT$  شروع شود ۱، در غیر این صورت صفر  
 $FC_{ij}$  اگر عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  قبل از  $RT$  تمام شود برابر با ۱، در غیر این صورت صفر

#### تابع هدف

در این مدل به منظور ارزیابی راه‌حل از دو عامل کارایی و پایداری استفاده شده است. عامل کارایی توسط معیار دوره ساخت ( $C_{Max}$ ) و معیار پایداری نیز توسط انحراف کل زمان‌های شروع کارها در برنامه اولیه و برنامه جدید یا برنامه بعد از وقوع پیشامد اندازه‌گیری می‌شود که در محدودیت‌های (۲) تا (۵) نحوه محاسبه آن‌ها نشان داده می‌شود.

$$Minz = C_{Max} + \sum_i \sum_j \Delta_{ij} \quad (1)$$

محدودیت‌های مدل

محدودیت (۲) و (۳) انحراف از زمان شروع عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  در دو برنامه جدید و قدیم را نشان می‌دهد.

$$\Delta_{ij} \geq t_{ij} - t'_{ij} \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (2)$$

$$\Delta_{ij} \geq t'_{ij} - t_{ij} \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (3)$$

برای حل بهینه مسائل کوچک ارائه می‌گردد. یک مجموعه از  $n$  کار در ابتدای برنامه زمانی، زمانبندی شده‌اند و یک مجموعه از  $n'$  کار جدید که بعد از شروع برنامه می‌رسد، وجود دارد. هر کار شامل یک توالی از عملیات  $O_{ij}$  می‌باشد. هر عملیات به یک مجموعه از ماشین‌های پردازش و یک زمان پردازش وابسته است. وقتی یک کار، یک عملیات را به پایان رساند به منظور حرکت به ماشین دیگر، مستلزم منبع حمل و نقل می‌باشد. برنامه اولیه برای سفارشات پذیرفته شده در زمان صفر و در حالتی قطعی تهیه می‌شود. پیشامد ورود سفارشات جدید و تغییر زمان عملیات، در این مدل در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که بر اساس تصمیم مدیر، برنامه به صورت دوره‌ای مورد بازنگری قرار می‌گیرد. در صورت تغییر زمان پردازش عملیات مربوط به یک کار، مقدار جدید جایگزین می‌شود. همچنین زمانبندی عملیات باقیمانده از برنامه در حالت قطعی و کارهای جدید، بر اساس توابع کارایی و پایداری بطور همزمان، صورت می‌گیرد. کارایی با تابع هدف  $C_{Max}$  و پایداری با انحراف زمان شروع عملیات مربوط به کارهای واجد شرایط محاسبه می‌شود. منظور از کارهای واجد شرایط، عملیات مربوط به کارهایی است که تا قبل از شروع دوره زمانبندی مجدد، فرآیند پردازش آن‌ها شروع نشده است. مفروضات مدل به شرح زیر است:

- هر ماشین تنها یک عملیات را در یک زمان پردازش می‌کند.
- زمان آماده‌سازی بین عملیات ناچیز است و مستقل از ترتیب عملیات می‌باشد.
- زمان حمل‌ونقل بین ایستگاه‌ها قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد.
- قطع کردن عملیات یا بریدگی مجاز نمی‌باشد.
- بین هر دو ماشین یک وسیله حمل و نقل و از یک نوع اختصاص می‌یابد.

#### ۲-۲. مدل ریاضی

در ادامه اندیس‌ها و مجموعه‌ها، پارامترهای ورودی، متغیرها و مدل ریاضی نشان داده خواهد شد.

#### اندیس‌ها و مجموعه‌ها

$h, i$  شاخص کار در برنامه اولیه  $i = 1, \dots, n$   
 $h', i'$  شاخص کار در برنامه جدید  $i' = 1, \dots, n'$   
 $g, j$  شاخص عملیات  $j = 1, \dots, J_i$   
 $k, l$  شاخص ماشین  $k = 1, \dots, M$   
 $k', l'$  شاخص ماشین در برنامه جدید  $k' = 1, \dots, M$   
 $v$  شاخص مربوط به وسایل حمل و نقل

#### پارامترهای ورودی

$P_{ijk}$  زمان پردازش عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  بر روی ماشین  $K$   
 $P'_{ijk}$  زمان پردازش عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  بر روی ماشین  $K'$   
 $M_{ijk}$  اگر عملیات  $\lambda_m$  از کار  $\lambda_n$  بتواند بر روی ماشین  $k$  انجام شود ۱، در غیر این صورت صفر

$$t'_{ij} \geq C'_{ng} - (2 - X'_{ijk} - X'_{hgk} + Z'_{ijhkg}).M \quad (15)$$

$$\forall i \in n + n', j \in j_i, h \in n + n', g \in g_h, k \in K', h \neq i \vee g \neq j$$

محدودیت (۱۶) و (۱۷) بیان می کند که اگر عملیات  $g$  از کار  $h$  و عملیات  $z$  از کار  $h$  روی ماشین  $k$  باشد، توالی انجام کارها به چه صورت خواهد بود.

$$Z_{ijhkg} \leq \left( \frac{X_{ijk} + X_{hgk}}{2} \right) \quad \forall i \in n, j \in j_i, h \in n, g \in g_h, k \in K \quad (16)$$

$$Z'_{ijhkg} \leq \left( \frac{X'_{ijk} + X'_{hgk}}{2} \right) \quad \forall i \in n + n', j \in j_i, h \in n + n', g \in g_h, k \in K' \quad (17)$$

محدودیت (۱۸) و (۱۹) بیان می کند که بین هر دو ماشین یک وسیله حمل و نقل قرار می گیرد. (تنها یک منبع حمل و نقل بین دو ماشین  $L$  و  $K$  اختصاص می یابد).

$$\sum_v Y_{klv} = 1 \quad \forall k, l \in K \quad (18)$$

$$\sum_v Y'_{klv} = 1 \quad \forall k, l \in K' \quad (19)$$

محدودیت (۲۰) و (۲۱) نشان می دهد که از یک نوع وسیله حمل و نقل در مسیر رفت و برگشت یک ماشین استفاده می شود.

$$Y_{klv} = Y_{lkv} \quad \forall k, l \in K, v \in V \quad (20)$$

$$Y'_{klv} = Y'_{lkv} \quad \forall k, l \in K', v \in V \quad (21)$$

محدودیت (۲۲) و (۲۳) نشان می دهد که زمان شروع عملیات مربوط به هر کار، بعد از اتمام عملیات قبلی از همان کار و با در نظر گرفتن زمان جابجایی از ماشین قبلی به ماشین فعلی، است. به عبارت دیگر این محدودیت بیان می کند که در صورتی یک کار می تواند شروع شود که محدودیت پیش نیازی آن رعایت شده باشد.

$$t_{ij} \geq C_{ij-1} + \sum_{v \in V} \left( \frac{Y_{lkv} \cdot d_{kl}}{\sigma_v} \right) - (2 - X_{ijk} - X_{ij-1k}).M \quad \forall i \in n, j = 2 \dots j_i, k, l \in K \quad (22)$$

$$t'_{ij} \geq C'_{ij-1} + \sum_{v \in V} \left( \frac{Y'_{lkv} \cdot d_{kl}}{\sigma_v} \right) - (2 - X'_{ijk} - X'_{ij-1k}).M \quad \forall i \in n + n', j = 2 \dots j_i, k, l \in K' \quad (23)$$

محدودیت (۴) و (۵) زمان دوره ساخت را در دو برنامه اولیه و جدید تعریف می کند. زمان دوره ساخت، زمان کل مورد نیاز برای پردازش کارها می باشد.  $C_{ij}$  و  $C'_{ij}$  زمان تکمیل عملیات  $z$  در دو برنامه می باشد که در محدودیت های (۶) و (۷) محاسبه می شود.

$$C_{Max} \geq C_{ij} \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (4)$$

$$C'_{Max} \geq C'_{ij} \quad \forall i \in n + n', j \in j_i \quad (5)$$

$$C_{ij} \geq t_{ij} + \sum_{k \in K} p_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (6)$$

$$C'_{ij} \geq t'_{ij} + \sum_{k \in K'} p'_{ijk} \cdot X'_{ijk} - FC_{ij} \cdot M \quad \forall i \in n + n', j \in j_i \quad (7)$$

محدودیت (۸) و (۹) موجب می گردد که ماشین مورد نیاز هر عملیات از بین ماشین های قابل اختصاص به آن عملیات انتخاب گردد. ماشین های قابل اختصاص برای هر عملیات توسط پارامتر صفر-یک  $M_{ijk}$  تعریف شده اند. عملیات  $z$  از کار  $h$  می تواند بر روی ماشین  $K$  انجام شود اگر  $M_{ijk}=1$  باشد.

$$X_{ijk} \leq M_{ijk} \quad \forall i \in n, j \in j_i, k \in K \quad (8)$$

$$X'_{ijk} \leq M'_{ijk} \quad \forall i \in n + n', j \in j_i, k \in K' \quad (9)$$

محدودیت (۱۰) و (۱۱) موجب می گردد هر عملیات روی یک ماشین انجام شود.

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K'} X'_{ijk} = 1 \quad \forall i \in n + n', j \in j_i \quad (11)$$

محدودیت (۱۲) تا (۱۵)، بیان می کند عملیات  $z$  از کار  $h$  و عملیات  $g$  از کار  $h$  نمی توانند در یک زمان بر روی ماشین  $k$  پردازش شوند.

$$t_{hg} \geq C_{ij} - (3 - X_{ijk} - X_{hgk} - Z_{ijhkg}).M \quad \forall i \in n, j \in j_i, h \in n, g \in g_h, k \in K, h \neq i \vee g \neq j \quad (12)$$

$$t_{ij} \geq C_{hg} - (2 - X_{ijk} - X_{hgk} + Z_{ijhkg}).M \quad \forall i \in n, j \in j_i, h \in n, g \in g_h, k \in K, h \neq i \vee g \neq j \quad (13)$$

$$t'_{hg} \geq C'_{ij} - (3 - X'_{ijk} - X'_{hgk} - Z'_{ijhkg}).M \quad \forall i \in n + n', j \in j_i, h \in n + n', g \in g_h, k \in K', h \neq i \vee g \neq j \quad (14)$$

$$\begin{aligned} X_{ijk}, X'_{ijk}, Y_{klv}, Y'_{klv}, Z_{ijhkg}, Z'_{ijhkg}, FF_{ij}, FC_{ij} \\ \in \{0,1\} \\ P_{ijk} \geq 0, P'_{ijk} \geq 0, C_{ij} \geq 0, C'_{ij} \geq 0, t_{ij} \\ \geq 0, t'_{ij} \geq 0 \end{aligned} \quad (37)$$

### ۳. NP-hard بودن مساله

پیچیدگی یک مساله ترکیبی، عبارت است از مقدار زمانی که در یک الگوریتم برای حل آن مساله صرف می‌شود. مساله FJSP این پژوهش، توسعه یافته مساله تولید کارگاهی کلاسیک با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری ماشین‌های موازی می‌باشد. گری و همکارانش [۲۱] در سال ۱۹۷۶ در پژوهش خود ثابت کردند که مساله تولید کارگاهی کلاسیک، NP-hard است، بنابراین FJSP هم شدیداً NP-hard می‌باشد [۲۲].

### ۴. رویکرد حل مساله

برای اینگونه مسائل زمانبندی، راهکار بهینه‌سازی کارآمدی موردنیاز است تا با در نظر داشتن پیچیدگی ناشی از افزایش نمایی فضای جواب، مقادیر مناسبی برای معیار عملکرد مساله بدست آید. در تحقیق حاضر سعی شده است از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک در طراحی روشی مناسب برای حل این مساله استفاده شود. در ادامه ساختار الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مساله معرفی و پس از تنظیم پارامترها، کارایی الگوریتم پیشنهادی براساس معیار عملکرد و از طریق آزمایشات عددی تصادفی نشان داده خواهد شد.

#### ۴-۱. الگوریتم ژنتیک

گام‌های الگوریتم ژنتیک ارائه شده برای مساله‌ی مورد نظر عبارتند از:

۱. ایجاد یک مجموعه جواب شدنی به عنوان جمعیت اولیه
  ۲. ارزیابی هر کروموزوم و تعریف تابع برازش مناسب
  ۳. فرآیند تکثیر
  ۴. اعمال عملگرهای تقاطع و جهش بر روی کروموزوم‌های والد
  ۵. همگرایی الگوریتم
- در ادامه هر یک از این اجزای طراحی شده به تفصیل شرح داده خواهد شد.

#### ۴-۱-۱. بازنمایی کدینگ جواب‌ها

مهم‌ترین بخش یک الگوریتم ژنتیک نحوه‌ی نمایش جواب‌ها است. به این منظور کروموزوم‌ها باید طوری طراحی شوند که جواب مساله‌ی مورد نظر را دربرگیرند. در الگوریتم پیشنهادی هر کروموزوم از شش بخش تشکیل شده است. سه بخش آن مربوط به زمان قبل از شکست و سه بخش دیگر با ماهیتی مشابه مربوط به زمان پس از شکست می‌باشند.

بخش اول مربوط به تخصیص عملیات به ماشین‌ها و بخش تعیین‌کننده توالی انجام عملیات روی ماشین‌ها است. هر بخش از یک ماتریس (تعداد کل عملیات  $\times$ ) تشکیل می‌شود. برای مثال اگر دو

محدودیت (۲۴) و (۲۵) تضمین می‌کند که تعداد هر وسیله نقلیه از ظرفیت موجود از آن نوع بیشتر نشود.

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in K} Y_{klv} \leq NV_v \quad \forall v \in V \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K'} \sum_{l \in K'} Y'_{klv} \leq NV'_v \quad \forall v \in V \quad (25)$$

محدودیت (۲۶) و (۲۷) تعیین‌کننده‌ی کارهایی هستند که قبل از RT شروع می‌شوند و محدودیت (۲۸) و (۲۹) موجب می‌گردد که زمان شروع این کارها در دو برنامه برابر باشد.

$$t_{ij} < RT + (1 - FF_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (26)$$

$$t_{ij} \geq RT - FF_{ij} \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (27)$$

$$t'_{ij} > t_{ij} - (1 - FF_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (28)$$

$$t'_{ij} \leq t_{ij} - (1 - FF_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (29)$$

$$FF_{ij} = 0 \quad \forall i \in n', j \in j_i$$

محدودیت (۳۰) و (۳۱) تعیین می‌کند که کدام کارها قبل از شروع دوره زمانبندی مجدد تکمیل شده‌اند و محدودیت (۳۲) و (۳۳) موجب می‌گردد که زمان تکمیل این کارها بعد از شروع دوره زمانبندی مجدد مانند قبل باقی بماند.

$$C_{ij} < RT + (1 - FC_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (30)$$

$$C_{ij} \geq RT - FC_{ij} \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (31)$$

$$C'_{ij} \geq C_{ij} - (1 - FC_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (32)$$

$$C'_{ij} \leq C_{ij} - (1 - FC_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i \quad (33)$$

$$FC_{ij} = 0 \quad \forall i \in n', j \in j_i$$

محدودیت (۳۴) موجب می‌گردد پردازش کارهایی که شروعشان قبل از RT نیست، بعد از شروع دوره زمانبندی مجدد و بعد از اتمام کارهایی که تا لحظه RT مشغول هستند، آغاز شود.

$$t'_{ij} \geq RT - FF_{ij} \cdot M \quad \forall i \in n + n', j \in j_i \quad (34)$$

محدودیت (۳۵) و (۳۶) موجب می‌گردد که عملیات لازم از کار آم که قبل از RT شروع شده و به ماشین‌k تخصیص یافته است، در برنامه جدید نیز بر روی K انجام گیرد.

$$X_{ijk} \geq X'_{ijk} - (1 - FF_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i, k \in K \quad (35)$$

$$X_{ijk} \leq X'_{ijk} + (1 - FF_{ij}) \cdot M \quad \forall i \in n, j \in j_i, k \in K \quad (36)$$

محدودیت (۳۷) نمایانگر متغیرهای نامنفی و باینری می‌باشد.

برای هر کروموزوم از جمعیت آن قدر این کار را تکرار می‌کنیم تا به یک جواب شدنی برسیم و در نهایت جمعیت کامل گردد.

#### ۴-۱-۳. ارزیابی کروموزوم‌ها

برای ارزیابی جواب‌های (کروموزوم‌های) تولید شده از مقدار تابع هدف به صورت زیر استفاده می‌گردد.

$$\text{Fitness} = M - \text{Objective value}$$

که  $M$  یک عدد بزرگ نسبت به مقادیر تابع هدف می‌باشد.

#### ۴-۱-۴. فرآیند تکثیر

در الگوریتم ژنتیک جمعیت جواب‌ها از هر نسل به نسل بعد تکامل پیدا می‌کنند. تکامل جمعیت از طریق عملگرهای ژنتیکی همچون تقاطع و جهش انجام می‌گیرد. پیش از اعمال عملگرها باید کروموزوم‌هایی که عملگرها باید روی آن‌ها اجرا گردد، انتخاب شوند. روش‌های متفاوتی برای انتخاب جواب‌ها جهت اعمال عملگرها وجود دارد. یکی از این روش‌ها چرخه‌ی رولت نام دارد که در این تحقیق از آن استفاده شده است. در این روش، جواب‌های با میزان برآزش بهتر احتمال بیشتری برای انتخاب جهت اعمال عملگرها دارند. همچنین، در الگوریتم پیشنهادی بخشی از جمعیت بدون تغییر، مستقیماً به نسل بعد انتقال می‌یابند. این تعداد، از بهترین جواب‌های هر نسل انتخاب می‌گردند و مابقی جمعیت از طریق انتخاب والدین و اعمال عملگرها به وجود می‌آیند.

#### ۴-۱-۵. عملگر تقاطع

عملگر تقاطع مورد استفاده در این تحقیق بر دو نوع است. نوع اول بر روی بخش‌های مربوط به تخصیص عملیات به ماشین‌ها و تعیین توالی آن‌ها بر روی ماشین استفاده می‌شود که شامل عملگر تک نقطه‌ای است. در این روش یک ستون از ماتریس کروموزوم به تصادف انتخاب شده و بخش قبل از این ستون از والد اول و مابقی از والد دوم گرفته می‌شود. در شکل ۳ نحوه‌ی عملکرد این نوع تقاطع نشان داده شده است.

نوع دوم عملگر تقاطع مورد استفاده در این تحقیق، عملگر عدد تصادفی<sup>۱۱</sup> نام دارد. این عملگر برای بخش مربوط به تخصیص وسایل حمل و نقل بین ماشین‌ها استفاده می‌گردد. بدین صورت که برای هر ژن از کروموزوم فرزند یک عدد تصادفی در بازه‌ی  $[0, 1]$  اختصاص می‌یابد. در صورتی که عدد تصادفی مربوطه کوچکتر از  $\frac{1}{2}$  بود، ژن مورد نظر از والد اول و در غیر این صورت از والد دوم گرفته می‌شود. نحوه‌ی عملکرد این عملگر نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. از هر یک از این دو روش، دو فرزند حاصل می‌گردد و در هر بار اجرای عملگر تقاطع یکی از این دو روش با احتمال یکسان انتخاب شده و جهت تولید فرزند اجرا می‌گردند.

کار داشته باشیم و هر کار نیز شامل سه عملیات باشد بنابراین تعداد کل عملیات برابر ۶ می‌باشد. هر درایه از ماتریس مربوط به یک عملیات از یک کار می‌باشد و عدد مربوط به آن درایه در بخش اول نشان دهنده ماشینی است که عملیات مربوطه را پردازش می‌نماید و در بخش دوم الویت انجام کار را نشان می‌دهد. در بخش سوم نیز وسایل حمل و نقل به فاصله بین ماشین‌ها اختصاص می‌یابند. شکل ۱ و ۲ نحوه‌ی نمایش کروموزوم را ارائه می‌دهد.

	O <sub>11</sub>	O <sub>12</sub>	O <sub>13</sub>	O <sub>21</sub>	O <sub>22</sub>	O <sub>23</sub>
بخش ۱	2	1	2	2	1	1
بخش ۲	0.08 72	0.12 55	0.19 33	0.67 98	0.20 29	0.44 32

شکل ۱. نحوه نمایش کروموزوم

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
M <sub>1</sub>	0	1	1
M <sub>2</sub>	1	0	2
M <sub>3</sub>	1	2	0

شکل ۲. نحوه تخصیص وسایل حمل‌ونقل بین ماشین‌ها

همان‌طور که در شکل می‌بینید عملیات اول از کار اول به ماشین ۲، عملیات دوم از کار اول به ماشین ۱ و همین‌طور مابقی عملیات به ماشین‌ها اختصاص یافته‌اند. همچنین به طوری که ملاحظه می‌شود O<sub>21</sub> و O<sub>11</sub> هر دو روی ماشین ۲ پردازش می‌شوند. اما با توجه به بخش دوم، کروموزوم O<sub>21</sub> از اولویت بالاتری نسبت به O<sub>11</sub> برخوردار است و بنابراین زودتر از آن انجام می‌گردد. بقیه عملیات نیز به همین ترتیب روی ماشین‌ها قرار می‌گیرند. در بخش سوم نیز عدد هر درایه از ماتریس نشان دهنده نوع وسیله حمل و نقلی است که در حد فاصل دو ماشین قرار گرفته است. به همین صورت بخش‌های مشابهی برای زمانبندی عملیات و تخصیص وسایل حمل و نقل بعد از شکست وجود دارد که در آن عملیات مربوط به کارهای جدید و وسایل حمل‌ونقل جدید نیز به حالت قبل اضافه شده است.

#### ۴-۱-۲. ایجاد جمعیت اولیه

بعد از تبیین ساختار برای نمایش جواب‌های مساله، اولین گام از الگوریتم، تولید جمعیت اولیه جواب‌هاست. بیشتر الگوریتم‌های فراابتکاری تکاملی جمعیت‌محور، از یک رویکرد تصادفی برای تولید جواب‌های اولیه استفاده می‌کنند. در این پژوهش نیز همین رویکرد اتخاذ شده است. به این منظور هر کروموزوم به صورت تصادفی تولید می‌شود. در صورتی که کروموزوم تولید شده، شدنی باشد مورد قبول واقع شده و وارد جمعیت می‌شود، در غیر این صورت حذف می‌شود.

تقاطع تک نقطه‌ای

نقطه برش

	O <sub>11</sub>	O <sub>12</sub>	O <sub>13</sub>	O <sub>21</sub>	O <sub>22</sub>	O <sub>23</sub>
والد ۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱
	۰.۰۸۷۲	۰.۱۲۵۵	۰.۱۹۳۳	۰.۶۷۹۸	۰.۲۰۲۹	۰.۴۴۳۲
والد ۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱
	۰.۶۵۱۱	۰.۱۷۸۰	۰.۱۹۳۹	۰.۱۷۱۴	۰.۵۲۵۱	۰.۴۴۸۸
فرزند ۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱
	۰.۰۸۷۲	۰.۱۲۵۵	۰.۱۹۳۳	۰.۱۷۱۴	۰.۵۲۵۱	۰.۴۴۸۸
فرزند ۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱
	۰.۶۵۱۱	۰.۱۷۸۰	۰.۱۹۳۹	۰.۶۷۹۸	۰.۲۰۲۹	۰.۴۴۳۲

شکل ۳- نمایش تقاطع تک نقطه‌ای مساله

تقاطع تصادفی

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>		M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
M <sub>1</sub>	0	1	1	M <sub>1</sub>	0	2	3
M <sub>2</sub>	1	0	2	M <sub>2</sub>	2	0	1
M <sub>3</sub>	1	2	0	M <sub>3</sub>	3	1	0
	والد ۱				والد ۲		
	0	0.45	0.59		0.45	0	0.18
	0.45	0	0.18		0.59	0.18	0
	فرزند ۱				فرزند ۲		

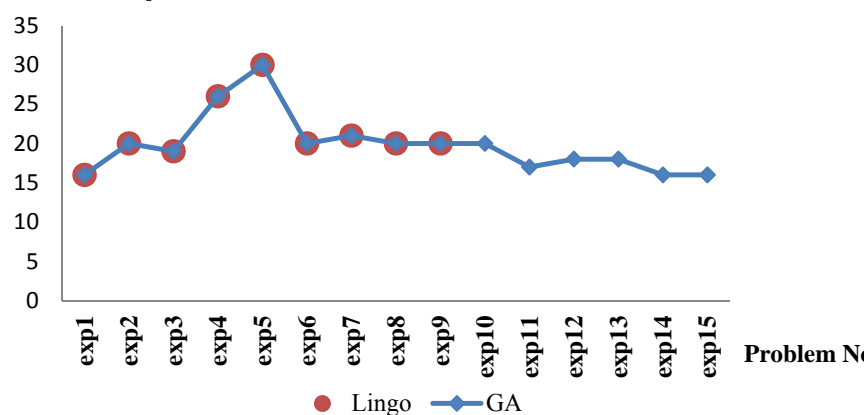
شکل ۴. نمایش تقاطع تصادفی مساله



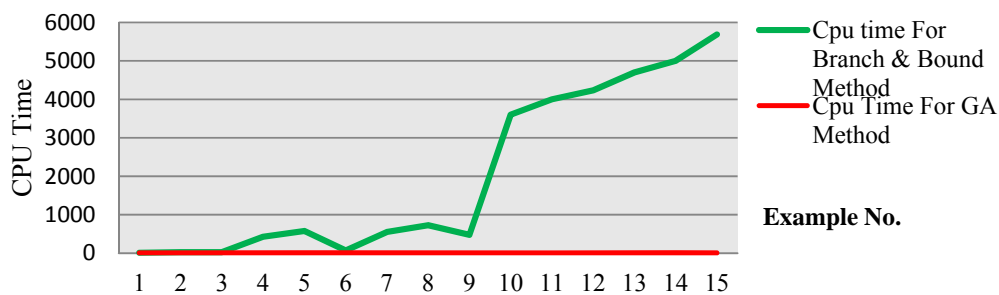


2	2	1	2	9	459	910	20	25	20	20	6.0310	0	0
3	2	2	2	10	755	1353	19	25	19	19	5.8064	0	0
4	2	2	4	11	1487	2736	26	426	26	26	7.1445	0	0
5	2	2	4	12	1487	2745	30	2583	30	30	12.9802	0	0
6	3	1	4	9	1490	3281	20	69	20	20	8.6772	0	0
7	3	1	4	10	1490	3287	21	549	21	21.36	5.8960	1.71	0
8	3	2	4	10	2192	4342	20	726	20	20.55	8.1928	2.75	0
9	3	2	4	12	2192	4360	20	477	20	20.2	7.2433	1	0
10	3	3	4	12	1487	2697	NA	>3600	20	20.19	7.8071	0.95	---
11	4	1	4	13	2195	5142	NA	>3600	17	17.36	5.9968	2.11	---
12	4	2	4	14	3041	6419	NA	>3600	18	18.25	7.8666	1.38	---
13	4	3	4	15	4031	7918	NA	>3600	18	18.30	6.3262	1.66	---
14	5	1	5	14	3809	9349	NA	>3600	16	16.12	10.703	0.75	---
15	5	2	5	15	5042	11222	NA	>3600	16	16.08	6.7889	0.5	---

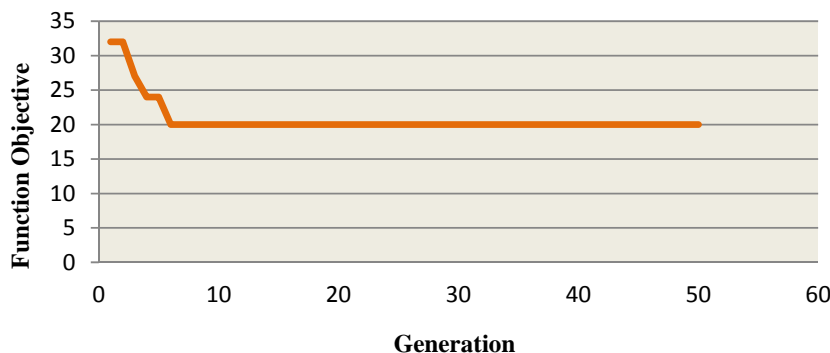
Function Objective



شکل ۶. نمودار مقایسه جواب الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار لینگو

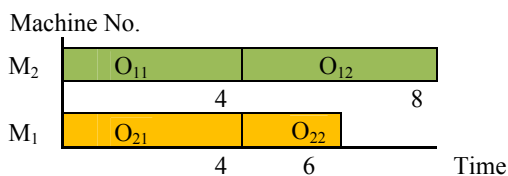


شکل ۷. نمودار مقایسه زمان حل الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار لینگو



شکل ۸. نمودار همگرایی برای مثال شماره ۹

و نقل نوع سوم (رباط) انتخاب شده است. شکل ۹ حالت بهینه را نشان می‌دهد که  $C_{Max}$  برابر با ۸ می‌باشد.



شکل ۹. نمودار چارت راه حل بهینه برای داده‌های اولیه

جدول ۵ شامل اطلاعات جدید برای مساله بعد از وقوع پیشامد می‌باشد. همانطور که بیان شد، در این مقاله ورود دو کار جدید و تغییر زمان پردازش عملیات دوم از کار اول در نظر گرفته شده است. مدیر تصمیم می‌گیرد که زمانبندی مجدد هر چهار روز انجام گیرد ( $RT=4$ ). بنابراین در پایان روز ۴ و بعد از ورود دو کار جدید اطلاعات به صورت زیر می‌باشد.

$P_{ijk}$	Machine 1	Machine 2
Job <sub>1</sub>	O <sub>11</sub>	تکمیل شد
	O <sub>12</sub>	7
Job <sub>2</sub>	O <sub>21</sub>	تکمیل شد
	O <sub>22</sub>	2
Job <sub>3</sub>	O <sub>31</sub>	5
	O <sub>32</sub>	6
Job <sub>4</sub>	O <sub>41</sub>	0
	O <sub>42</sub>	6

در زمانبندی مجدد بر اساس اطلاعات جدید، فرض می‌شود کارهایی که بر روی ماشین قابل، انجام شده و یا در حین فرآیند پردازش قرار دارد، بر روی همان ماشین باقی خواهد ماند. بنابراین

#### ۴-۲-۲. عملکرد معیار پایداری

برای ارزیابی عملکرد معیار پایداری چندین مثال در نرم‌افزار لینگو اجرا شد که به دلیل کوچک بودن ابعاد مساله، معیار پایداری مقدار صفر را نشان می‌داد. اما مثالی که در زیر ارائه می‌شود تا حدودی نحوه عملکرد این معیار را نشان می‌دهد. فرض می‌شود این مساله دارای دو کار و چهار عملیات می‌باشد. شماره ماشین‌ها و زمان‌های پردازش برای ماشین‌های قابل تخصیص از هر عملیات در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین داده‌های مربوط به فاصله بین ماشین در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳. داده‌های اولیه

$P_{ijk}$	Machine 1	Machine 2
Job <sub>1</sub>	O <sub>11</sub>	5
	O <sub>12</sub>	6
Job <sub>2</sub>	O <sub>21</sub>	4
	O <sub>22</sub>	2

جدول ۴. ماتریس فاصله

D	Machine 1	Machine 2
Machine 1	0	20
Machine 2	20	0

فرض می‌کنیم که سه نوع وسیله حمل‌ونقل شامل لیفتراک، جرثقیل و رباط وجود دارد که تعداد هر نوع از این وسیله حمل و نقل (به ترتیب لیفتراک، جرثقیل، رباط) و سرعت مربوط به آن عبارتند از:

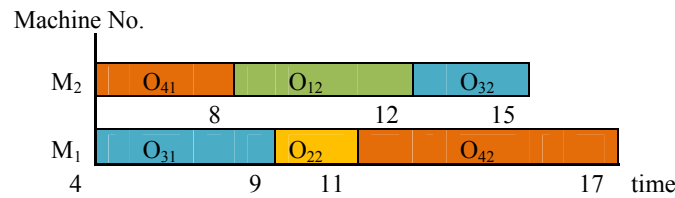
$$NV = \{3, 3, 3\}$$

$$\sigma v = \{5, 2, 10\}$$

با توجه به اطلاعات داده شده، مساله توسط مدل ریاضی حل و نتایج آن بدست آمده است. در این حالت تابع هدف مدل به دلیل نبود رویداد غیرمنتظره، تنها حداقل‌سازی دوره ساخت در نظر گرفته شده است. خروجی‌های مساله نشان می‌دهد که وسیله حمل

مساله با تابع هدف  $C_{Max}$  توسط مدل ارائه شده، حل شد که خروجی‌های مربوط به آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

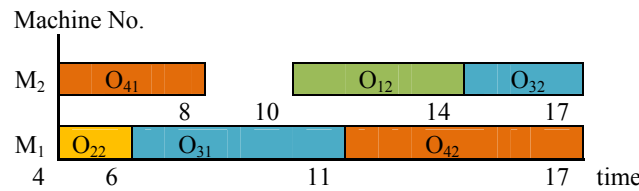
تنها عملیات باقی‌مانده از کارهای قدیم و کارهای جدید که وارد شده‌اند، زمانبندی خواهند شد. در ابتدا با توجه به این اطلاعات،



شکل ۱۰. نمودار گانت زمانبندی مجدد با تابع هدف کارایی

موجب شد که زمانبندی عملیات دوم از کار ۲ (O<sub>22</sub>) مانند زمانبندی این عملیات در حالت قطعی انجام شود و موجب کاهش انحراف از زمان شروع عملیات مربوط به این کار در دو برنامه شده است.

زمانبندی مجدد عملیات باقیمانده و کارهای جدید براساس معیار کارایی و معیار پایداری در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود معیار کارایی تغییر نکرده اما معیار پایداری بهبود یافته است. به عبارت دیگر، معیار پایداری در این حالت



شکل ۱۱. نمودار گانت زمانبندی مجدد با تابع هدف کارایی و پایداری

مدل توسط نرم‌افزار لینگو ۹ و با توجه به خروجی‌های مساله، نمودارهای گانت مربوط به آن‌ها در حالت‌های با در نظر گرفتن معیار کارایی و پایداری به صورت همزمان و بدون در نظر گرفتن معیار پایداری، رسم شد. این نمودارها نشان داد که در نظر گرفتن معیار پایداری به همراه معیار کارایی، موجب پایدارتر شدن برنامه نسبت به حالت اولیه گشته است و این بیان‌کننده تاثیر این معیار در مساله مورد نظر و کارآمدی مدل ارائه شده می‌باشد.

در مقایسه پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها می‌توان گفت که با وجود اینکه مبحث FJSP، مبحثی جدید نمی‌باشد و تحقیقات داخلی و خارجی بسیاری (از جمله [۱۳] و [۱۴]) در این حوزه صورت گرفته است اما پژوهشی که مساله مورد نظر را با فرض صفر نبودن زمان‌های حمل و نقل در یک محیط پویا بطور همزمان در نظر بگیرد، مشاهده نشده است. با این حال در مصداق‌های عملی این مساله، ویژگی‌های دیگری نیز وجود دارد که توجه به آن‌ها می‌تواند حوزه‌های جذابی را برای مطالعات آتی فراهم آورد. با توجه به نتایج، پیشنهاد می‌شود که تاثیر معیارهای پایداری دیگر مانند کمینه کردن انحراف از زمان‌های تکمیل عملیات کارها و یا واریانس زمان‌های تکمیل در دو برنامه در نظر گرفته شود و نیز مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از در نظر گرفتن این معیارهای متفاوت، صورت گیرد. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری تلفیقی برای کاهش سرعت همگرایی و پراکندگی جواب‌ها، مقایسه نتایج آن‌ها با

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش مساله زمانبندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن پیشامد ورود کارهای جدید و تغییر زمان عملیات به عنوان عوامل پویای مدل در کنار زمان‌های حمل‌ونقل تجهیزات، مورد مطالعه قرار گرفت. توجه به پویایی مساله در کنار فرض صفر نبودن زمان‌های حمل و نقل، تحلیل ریاضی مدل با استفاده از روش‌های متعارف را بسیار مشکل و غیرعملی کرده است. بنابراین برای حل مساله از قابلیت‌های الگوریتم فراابتکاری ژنتیک - که کاربرد ویژه‌ای در حل مسائل زمان و زمانبندی دارد - استفاده شد. برای ارزیابی کارآمدی الگوریتم از ۱۵ مثال عددی تصادفی که با الگوبرداری از مثال موجود در ادبیات بدست آمده، استفاده شد. همچنین پارامترهای مربوط به زمان‌های حمل و نقل برای مثال‌های مذکور، از داده‌های یک سیستم واقعی استخراج و کارایی این الگوریتم با استفاده از رابطه تعریف شده در پژوهش روشنایی [۲۲] مورد سنجش قرار گرفت. نتایج حل حاصل از ۱۵ مساله تصادفی، کارآمدی الگوریتم طراحی شده و درصد خطای صفر برای تفاوت بین بهترین جواب ژنتیک با بهترین جواب لینگو و میانگین جواب ژنتیک در ۹ مسئله اول را نشان داد. اما با بزرگتر شدن ابعاد مساله این درصد خطا برای بهترین جواب و میانگین جواب ژنتیک، افزایش یافت که بسیار ناچیز بود. همچنین برای نمایش عملکرد معیار پایداری، از یک مثال عددی تصادفی استفاده شد. پس از حل

- on Electronics Information and Systems, 2009, Vol. 129, pp. 505-511.
- [9] Ozguven C, Ozkibir L, Yavuz Y. Mathematical models for Job-shop Scheduling problems with routing and process plan flexibility, Applied Mathematical Modelling, 2010, Vol. 34, pp. 1539-1548.
- [10] Holloway CA, Nelson RT. Job shop scheduling with due dates and variable processing times, Management Science, 1974, Vol. 20, pp. 1264-1275.
- [11] Liu AJ, Yang Y, Deng QS, Lu H, Zhang YD, Zhou ZY, Wu GH, Zhao XH. Dynamic scheduling on multi-objective flexible job shop, Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, No. 12, Vol. 17, pp. 2629-2637.
- [12] [Adibi MA, Zandieh M, Amiri M. Multi-objective scheduling of dynamic job shop using variable neighborhood search, Expert Systems with Applications, 2010, No. 1, Vol. 37, pp. 282-287.
- [۱۳] نپاوندی، نسیم؛ عباسیان، محمد. حل مساله زمانبندی کار کارگاهی چندهدفی تنعطف‌پذیر پویا به وسیله الگوریتم ژنتیک توسعه یافته. نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۱۳۸۹، ۲۱ (۳)، صص. ۲-۱۲.
- [14] Fattahi P, Fallahi A. Dynamic scheduling in flexible job shop systems by considering simultaneously efficiency and stability, Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, Vol. 2, pp. 114-123.
- [15] Goren S, Sabuncouglu I, Koc U. Optimization of schedule stability and efficiency under processing time variability and random machine breakdowns in a job shop environment, Naval Research Logistics, 2010, Vol. 59, pp. 26-38.
- [16] Rangsaritratamee R, Ferrell Jr W, Kurz M. Dynamic rescheduling that simultaneously considers efficiency and stability, Computers & Industrial Engineering, 2004, 46, pp. 1-15.
- [17] Church LK, Uzsoy R. Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1992, No. 3, Vol. 5, pp. 153-163.
- [18] Wu SD, Storer RH, Chang PC. One-machine rescheduling heuristics with efficiency and stability as criteria, Computers and Operations Research, 1993, No.1, Vol. 20, pp. 1-14.
- نتایج حاصل از این پژوهش و نیز مطالعه موردی مدل در یک محیط واقعی از دیگر پیشنهادها آتی می‌تواند باشد.
- پی‌نوشت**
1. Job Shop Scheduling
  2. Genetic Algorithm
  3. Dynamic
  4. Periodic Policy
  5. Event-driven Policy
  6. Artificial neural network
  7. Tardiness
  8. Makespan
  9. Stability
  10. Dynamic Job Shop Scheduling
  11. Random key
- مراجع**
- [۱] ذگردی، سید حسام‌الدین؛ بهشتی‌نیا، محمدعلی؛ جعفری حاج آقا، ناصر. کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل در مساله زمانبندی تولید کارگاهی با ماشین‌های موازی، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۱۳۸۸، ۲۰ (۲)، صص. ۱۱-۲۱.
- [۲] بهروزی، مهدی؛ عشقی، کوروش. بکارگیری الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی دسته ذرات برای حل مساله سنتی زمانبندی کارگاهی، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۱۳۸۸، ۲۰ (۲)، صص. ۵۷-۷۵.
- [۳] یوسفی یگانه، بابک؛ خانلرزاده، نرگس؛ رحیمی‌فرد، علی. الگوریتم مبتنی برای حل مساله زمانبندی کار کارگاهی منعطف با امکان ایجاد وقفه در انجام فعالیت‌ها، ۱۳۹۰، ۲۲ (۴)، صص. ۳۳۲-۳۴۰.
- [4] Bruker P, Schlie R. Job shop scheduling with multi-purpose machines, Computing, 1990, Vol. 45, pp. 369-375.
- [5] Lee YH, Jeong CS, Moon C. Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain, Computer & Industrial Engineering, 2002, Vol. 43, pp. 351-374.
- [6] Saidi-mehrabad M, Fattahi P. Flexible job shop scheduling with tabu search algorithm, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, Vol. 32, pp. 563-570.
- [۷] جعفرزاده افشاری، احمد، امین ناصری، محمدرضا، مدل مبتنی بر جستجوگر محلی ژنتیک برای مساله زمانبندی استقرار کارگاهی تعمیم یافته با زمان‌های عملیات قابل کنترل، ۱۳۹۲، ۲۴ (۱): صص ۴۴-۵۴.
- [8] Ida K, Oka K. Flexible job shop scheduling problem by genetic algorithm, IEEJ Transactions

- [21] Garey MR, Johnson DS, Sethi R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling, *Mathematics of Operations Research*, 1976, No. 2, Vol. 1, pp. 117-129.
- [22] Roshanaei V. mathematical modeling and optimization of flexible job shops scheduling problem, *Electronic thesis and dissertations*, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada, 2012.
- [19] Al-Hinai N, ElMekkawy TY. Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm, *International Journal of Production Economics*, 2011, No. 2, Vol. 132, pp. 279-291.
- [20] Zhang Q, Manier H, Manier MA. A genetic algorithm with tabu search procedure for Flexible Job Shop Scheduling with transportation constraints and bounded processing times, *Computer & Operation Research*, 2012, No. 39, pp. 1713-1723.