



Paper Type: Original Article



Modeling and Solving Dual Resource Constrained Flexible Job-Shop Scheduling Problem Considering Machine Breakdown

Parham Soofi¹, Mehdi Yazdani^{1,*} , Maghsoud Amiri², Mohammad Amin Adibi¹

¹ Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran; parham.soofi@gmail.com; mehdi_yazdani2007@yahoo.com; maadibi.qiau@gmail.com.

² Department of Industrial Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran; mg_amiri@yahoo.com.

Citation:



Soofi, P., & Yazdani, M., Amiri, M., & Adibi, M. A. (2023). Modeling and solving dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem considering machine breakdown. *Journal of decisions and operations research*, 8(1), 153-175.

Received: 01/02/2021

Reviewed: 02/03/2021

Revised: 11/04/2021

Accepted: 21/05/2021

Abstract

Purpose: One of the most important issues in the field of production scheduling, which has recently received much attention from researchers, is Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Scheduling Problem (DRCFJSP). To deal with unexpected disruptions such as machine breakdowns, the job schedule must be robust so that in the event of a malfunction, the job schedule works properly and deviate less from the optimal solution. The purpose of this paper is to study the DRCFJSP problem with possible scenarios of machine failure or workshop disruption.

Methodology: In solving the under-studied problem, the assignment of jobs and the sequence of operations on each machine should be done in such a way that under any possible scenario, the maximum completion time is minimized so that the weight combination of system performance in average mode, system performance in worst mode, the penalty for violating the time window constraints of the due dates and the variance of the objective function value is optimal according to different scenarios. For this purpose, a Robust Scenario-based Stochastic Programming (RSSP) model based on a mixed integer linear programming model has been presented for this problem and has been solved by Gams software for validation in small and medium-sized problems. Also, due to the Np-hard nature of this problem, a meta-heuristic method based on Genetic Algorithm (GA) is proposed for solving the large-sized problems. Also, the results of a case study in Alborz Yadak company related to the problem of the research are reported in the article.

Findings: The results of the proposed RSSP model indicate that GAMS software is able to solve these problems up to medium sizes in an acceptable time and achieve a controlled and robust solution. Numerical results also show the proper performance of the proposed GA as an alternative to solve the RSSP model in the large-sized problems.

Originality/Value: In this paper, DRCFJSP problem is studied with possible scenarios of machine failure or disruption in the workshop. Also, a RSSP model according to the mixed integer linear programming formulation and a meta-heuristic Algorithm have been presented for mentioned problem in this article.

Keywords: Flexible job-shop scheduling, Dual-resource constrained, Machine breakdown, Robust scenario-based stochastic programming, Genetic algorithm.

Corresponding Author: mehdi_yazdani2007@yahoo.com  <http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.1.9.1>

Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





نوع مقاله: پژوهشی



مدل‌سازی و حل مساله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف تحت محدودیت منابع دوگانه انسان و ماشین با در نظر گرفتن خرابی ماشین‌آلات

پرهام صوفی^۱، مهدی یزدانی^{۱*}، مقصود امیری^۲، محمدامین ادیبی^۱

^۱ گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

^۲ گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: یکی از مهم‌ترین مسایل حوزه زمان‌بندی تولید که اخیراً بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است، مساله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین (*DRCFJSP*) است. برای مقابله با اختلال‌های غیرمنتظره مانند خرابی ماشین، باید برنامه زمان‌بندی کارها استوار باشد تا در صورت وقوع اختلال، برنامه زمانی دارای کارایی مناسبی باشد و از راه‌حل بهینه انحراف کمتری داشته باشد. لذا در این تحقیق، مساله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن سناریوهای محتمل خرابی ماشین‌ها یا اختلال در کارگاه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

روش‌شناسی پژوهش: در حل مساله مورد مطالعه، نحوه واگذاری مارها به ماشین‌ها و توالی عملیات بر روی هر ماشین باید به گونه‌ای صورت پذیرد که تحت هر سناریوی محتمل، حداکثر زمان تکمیل کارها کمینه شود تا ترکیب وزنی مربوط به عملکرد سیستم در حالت متوسط، عملکرد سیستم در حالت بدبینانه، جریمه نقض قیود پنجره‌های زمانی موعدهای تحویل کارها و واریانس مقدار تابع هدف با توجه به سناریوهای مختلف بهینه باشد. به این منظور یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار (*RSSP*) در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای این مساله ارایه گردیده است و به منظور اعتبارسنجی در ابعاد کوچک و متوسط به وسیله نرم‌افزار گمز حل شده است. با توجه به *Np-hard* بودن این مساله، یک روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (*GA*) برای حل مسایل در ابعاد بزرگ ارایه شده است. همچنین، نتایج یک مطالعه موردی در شرکت البرز یدک مرتبط با مساله تحقیق در مقاله گزارش شده است.

یافته‌ها: نتایج اجرای مدل *RSSP* پیشنهادی نشان می‌دهد که نرم‌افزار گمز قادر است که مسایل مذکور تا ابعاد متوسط را در یک زمان قابل قبول حل کند و به یک پاسخ کنترل شده و استوار دست یابد. همچنین نتایج عددی نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم *GA* پیشنهادی به عنوان یک گزینه برای حل مدل *RSSP* در مسایل با اندازه بزرگ است.

اصالت/ارزش افزوده علمی: در این تحقیق، مساله *DRCFJSP* با در نظر گرفتن سناریوهای محتمل خرابی ماشین‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار (*RSSP*) در قالب قاعده برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و یک روش فراابتکاری برای مساله مورد نظر ارایه گردیده است.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار، خرابی ماشین، زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف، منابع دوگانه محدود انسان و ماشین.

۱- مقدمه

در کسب‌وکار امروزی، پاسخگویی سریع به سفارش‌ها در حوزه‌های تجاری، خدماتی، تولیدی و ارایه محصولات باکیفیت بالاتر و هزینه‌های کمتر، یکی از مهم‌ترین عوامل و مزیت‌های رقابتی در بین شرکت‌ها می‌باشد که یک هدف اصلی تبدیل شده است. با توجه به

* نویسنده مسئول

mehdi_yazdani2007@yahoo.com

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.1.9.1>





محدودیت‌های منابع در یک سیستم تولیدی واقعی، نیل به هدف مذکور، مستلزم زمان‌بندی بهینه سفارش‌ها است که به معنای تخصیص بهینه منابع محدود به عملیات موردنیاز هر سفارش و توالی عملیات‌ها و کارها روی هر منبع است [3]. مسایل زمان‌بندی در سیستم‌های تولیدی، طیف وسیعی دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به مساله زمان‌بندی کار کارگاهی^۱ اشاره کرد که در پی تعیین توالی سفارش‌ها مختلف بر روی ماشین‌های موجود در یک سیستم تولیدی تعریف می‌شود به طوری که هر سفارش یک یا چند عملیات را در برمی‌گیرد که هر نوع عملیات توسط یک ماشین قابل انجام است. در توسعه مساله *FJSP*، مساله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف^۲ مطرح می‌شود که در آن با اضافه شدن مساله تخصیص هرکدام از عملیات‌های مختلف یک کار توسط چند ماشین قابل انجام است [7]. در مساله *FJSP* کلاسیک معمولاً یک منبع (ماشین) برای انجام کارها در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که اپراتور همواره در دسترس است. این امر در حالی صورت می‌گیرد که این فرض برای برخی از سیستم‌های تولید، بخصوص سیستم‌هایی که عملیات‌های مختلف نیاز به تخصص‌های خاص خود دارد، چندان منطقی نیست و از این رو، مساله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود^۳ در ادبیات مطرح شده است.

۲- مبانی نظری و مرور ادبیات

یکی از مفروضات اصلی در مساله *FJSP* و یا نسخه توسعه‌یافته آن با محدودیت منابع دوگانه انسان و ماشین، آن است که فرض می‌کند ماشین‌های تعریف‌شده همواره در دسترس هستند و خرابی ماشین‌ها را در نظر نمی‌گیرد. از طرف دیگر، معمولاً به زمان اتمام تمام سفارش‌ها توجه می‌شود و به موعد تحویل هر سفارش، کمتر پرداخته می‌شود. از این رو، اگر زمان‌بندی کارها در یک سیستم تولید کارگاهی مبتنی بر مدل‌های کلاسیک *FJSP* صورت پذیرد، ممکن است اولاً موجب شود که پنجره زمانی موعد تحویل سفارش‌ها نقض شود و ثانیاً در صورت بروز خرابی در هر ماشین، هم از منظر حداکثر زمان تکمیل کارها^۴ یا سفارش‌ها و هم از منظر موعد تحویل سفارش‌ها، اختلاف بسیار زیادی نسبت به برنامه زمانی اولیه رخ خواهد داد. بنابراین، در این تحقیق مدل‌سازی و حل مساله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین تحت خرابی ماشین‌ها و محدودیت پنجره زمانی برای تحویل سفارش‌ها مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

برای مرور اجمالی مقالات اخیر در حوزه *FJSP* مقاله مروری ارائه شده توسط ژو و همکاران [21] پیشنهاد می‌شود. در جدیدترین کارهای ارائه شده در حوزه مساله *FJSP*، برای حل این مساله، منگ و همکاران [13] به ارائه چهار مدل مختلف برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و یک مدل برنامه‌ریزی محدودیت پرداخته‌اند و مدل‌های توسعه داده شده را بر روی چندین مساله آزمایشی پیاده‌سازی کرده‌اند. خروجی نشان‌دهنده کارایی مدل برنامه‌ریزی محدودیت پیشنهادی آن‌ها بود. همچنین در پژوهش سان و همکاران [20] به توسعه مدل *FJSP* با در نظر گرفتن زمان حمل‌ونقل و آماده‌سازی ماشین‌ها پرداخته شده است و در آن چندین تابع هدف از جمله زمان، هزینه، تاخیر و غیره در نظر گرفته شده است و یک الگوریتم تکاملی چندهدفه برای حل مساله و به دست آوردن جواب‌های پارتو ارائه شده است. فلن و فری [8] از جمله کسانی هستند که تحقیقات پایه در محیط زمان‌بندی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین را انجام داده‌اند که در آن فرض می‌شود که نیروی انسانی نیز مانند ماشین محدود است ولی تخصص آن‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین پژوهش‌های مختلفی نظیر تحقیق مطالعاتی دی فلوی و همکاران [6] به یک مرور جامع در زمینه مساله *DRCFJSP* پرداخته‌اند.

لنگ و لی [11] به بهینه‌سازی چندهدفه مساله *DRCFJSP* مبتنی بر الگوریتم *NSGAII* پرداخته‌اند که در آن نیز فرض یکسان بودن تخصص نیروی انسانی برقرار است. لی و گو [12] به ارائه الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر^۴ برای حل مساله مذکور پرداخته‌اند.

یزدانی و همکاران [23] مساله *DRCFJSP* را با هدف کمینه‌سازی *makespan* مطالعه کردند و دو الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش^۵ و شبیه‌سازی تبرید^۶ را برای حل این مساله ارائه کردند. در برخی از پژوهش‌ها نیز مساله *DRCFJSP* با لحاظ کردن موعد تحویل نقطه‌ای برای تحویل سفارش‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است [2]. همچنین برای حل مساله مذکور، الگوریتم جستجوی حریصانه مورد استفاده قرار گرفته است. گانگ و همکاران [9] به توسعه یک الگوریتم زنبورعسل مصنوعی برای حل مساله *DRCFJSP* با در نظر گرفتن انعطاف در نیروی انسانی پرداخته‌اند که نتایج آن نشان می‌دهد این الگوریتم قادر بوده است که مساله مذکور را برای نمونه‌های ابعاد بزرگ در زمان قابل قبول حل کند که کمینه *makespan* رخ دهد. احمدی و همکاران [1] در تحقیق خود خرابی ماشین‌ها در مساله *FJSP* را مورد توجه قرار

¹ Flexible Job-Shop Scheduling Problem (FJSP)

² Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Scheduling Problem (DRCFJSP)

³ Makespan

⁴ Variable Neighborhood Search (VNS)

⁵ Vibration Damping Optimization (VDO)

⁶ Simulated Annealing (SA)



داده‌اند که در آن از الگوریتم‌های فراابتکاری و مبتنی بر شبیه‌سازی برای حل مساله استفاده نموده‌اند. سان و همکاران [19] نیز به خرابی احتمالی ماشین‌ها در مساله *FJSP* پرداخته‌اند و از رویکرد نظریه بازی برای کنترل کردن آن استفاده نموده‌اند. لازم به توضیح است که در تحقیقات صورت گرفته که خرابی ماشین‌ها را در نظر گرفته‌اند، در فضای تک منبعی به مساله *FJSP* پرداخته‌اند و عمدتاً مبتنی بر شبیه‌سازی به حل مساله پرداخته‌اند.

از جمله مقالات اخیر و مرتبط با پژوهش می‌توان به پژوهش زندیه و همکاران [25] اشاره کرد که در آن به توسعه مساله *FJSP* پرداخته شده است و در آن برنامه شرایط نگهداری و تعمیرات ماشین‌ها در نظر گرفته شده است. الگوریتم رقابت استعماری بهبودیافته^۱ برای حل این مساله توسعه داده شده است. در مقایسه تحقیق پیش‌رو با تحقیقات پیشین در زمینه *FJSP*، باید اشاره کرد که از منظر منابع در زمان‌بندی، مساله این تحقیق از نوع منابع دوگان محدود است. از منظر پرداختن به خرابی ماشین‌ها و اختلال در کارگاه و یا عدم پرداختن به آن، این تحقیق خرابی ماشین‌ها و به عبارت دیگر اختلال در کارگاه را به صورت سناریوهای تصادفی لحاظ می‌کند و کمینه‌سازی *makespan* تحت شرایط اختلال ماشین‌ها را به صورت مجموع وزنی متوسط عملکرد سیستم در حالت بدبینانه در نظر می‌گیرد. از منظر رویکرد مدل‌سازی نیز در این تحقیق برای نخستین بار به ارایه رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار و توسعه آن برای حل مساله *DRCFJSP* تحت شرایط خرابی ماشین‌ها پرداخته می‌شود. مقایسه مقاله حاضر با برخی از پژوهش‌های مرتبط با مساله *FJSP* در جدول ۱ ارایه شده است. به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این تحقیق را به صورت زیر بیان کرد:

۱. پرداختن به مساله *DRCFJSP* تحت شرایط خرابی ماشین‌آلات (اختلال در کارگاه).
۲. ارایه یک توسعه از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار (*RSSP*) برای مدل‌سازی مساله *DRCFJSP* تحت شرایط اختلال و عدم قطعیت با در نظر گرفتن متوسط عملکرد سیستم تحت سناریوهای مختلف اختلال در سیستم، عملکرد سیستم در حالت بدبینانه و کنترل موعد زمانی تحویل سفارش‌ها به صورت یک پنجره زمانی نرم.
۳. توسعه یک رویکرد حل فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک^۲ برای حل مساله *DRCFJSP* در ابعاد بزرگ تحت شرایط خرابی ماشین‌آلات.
۴. انجام یک مطالعه موردی در شرکت البرز یدک برای پیاده‌سازی و حل مساله تحقیق در یک محیط صنعتی واقعی.

محتوای تحقیق پیش‌رو در ۷ بخش سازمان‌دهی شده است. در بخش ۳، به تشریح کامل مساله مورد نظر و جزئیات و اهداف آن پرداخته می‌شود. در بخش ۴، به مدل‌سازی مساله بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار پرداخته می‌شود. در بخش ۵، با توجه به پیچیدگی مساله مورد نظر تحقیق، به ارایه یک رویکرد حل فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک می‌پردازیم. در بخش ۶، به یک مطالعه موردی و حل چندین مساله آزمایشی برای ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی مدل و روش حل پیشنهادی پرداخته می‌شود. نهایتاً در بخش ۷، مقاله جمع‌بندی می‌شود و نتیجه‌گیری صورت می‌پذیرد.

جدول ۱- استراتژی‌های موجود.

Table 1- Current strategies.

نویسندگان	منابع تخصیص داده شده	در نظر گرفتن خرابی ماشین‌آلات	استواری پاسخ تحت عدم قطعیت	روش حل، معیار بهینه‌سازی	مطالعه موردی
ژیانگ و همکاران [22]	ماشین	✓	✓	الگوریتم جستجوی تکاملی، حداکثر زمان تکمیل کارها	
لی و گوا [12]	ماشین-انسان		✓	الگوریتم جستجوی همسایگی، حداکثر زمان تکمیل کارها	
سان و همکاران [14]	ماشین-انسان			نظریه بازی و شبیه‌سازی	
یزدانی و همکاران [23]	ماشین-انسان			الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و بهینه‌سازی میرایی ارتعاش، حداکثر زمان تکمیل کارها	
نوری و همکاران [15]	ماشین	✓		الگوریتم ازدحام ذرات، حداکثر زمان تکمیل کارها.	

¹ Improved imperialist competitive algorithm

² Genetic Algorithm (GA)

Table 1- Continued.

مطالعه موردی	روش حل، معیار بهینه‌سازی	استواری پاسخ تحت عدم قطعیت	در نظر گرفتن خرابی ماشین‌آلات	منابع تخصیص داده شده	نویسندگان
	الگوریتم جستجوی ممنوعه، حداکثر زمان تکمیل کارها		✓	ماشین	شن و همکاران [18]
	الگوریتم رقابت استعماری بهبودیافته، حداکثر زمان تکمیل کارها		✓	ماشین	زندیه و همکاران [25]
✓	روش ابتکاری تجزیه محور، حداکثر زمان تکمیل کارها و تاخیر	✓		ماشین	کرس و همکاران [10]
	الگوریتم جستجوی حریصانه، حداکثر زمان تکمیل کارها و تاخیر		✓	ماشین-انسان	آندراده پیندا و همکاران [2]
	الگوریتم ابتکاری مبتنی بر یادگیری و آموزش، حداکثر زمان تکمیل کارها		✓	ماشین	بودالا و ماهپارتا [4]
	الگوریتم ژنتیک، حداکثر زمان تکمیل کارها	✓	✓	ماشین	سجادی و همکاران [16]
✓	الگوریتم زنبور عسل مصنوعی، حداکثر زمان تکمیل کارها		✓	ماشین-انسان	گانگ و همکاران [9]
	الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه، زمان-هزینه-تاخیر		✓	ماشین	سان و همکاران [20]
✓	مدل RSSP و الگوریتم ژنتیک، کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها با توجه به متوسط عملکرد سیستم، عملکرد سیستم در حالت بدبینانه، انحراف معیار عملکرد و میزان نقض قیود پنجره‌های زمانی موعد تحویل کارها	✓	✓	ماشین-انسان	پژوهش حاضر



۳- بیان مساله

در تبیین مساله *DRCFJSP* موردنظر در این تحقیق، مجموعه‌ای از کارها (سفرارش‌ها) در نظر گرفته می‌شود که هر یک از آن‌ها عملیات‌های مشخصی را شامل می‌شود که باید توسط منابع محدود انسان و ماشین موجود در یک کارگاه مورد پردازش قرار گیرد تا همه کارها به‌طور کامل انجام شوند. با توجه به خاصیت انعطاف‌پذیری این مساله زمان‌بندی، برای انجام هر عملیات از هر کار بیش از یک ماشین و انسان در کارگاه می‌تواند موجود باشد اما نکته مهم این است که هر ماشین و انسان لزوماً قابلیت انجام پردازش روی هر عملیات را ندارد. به‌عبارت‌دیگر، برای هر عملیات مرتبط با هر کار، تنها تعداد محدودی از ماشین‌ها می‌توانند پردازش را انجام دهند و روی این ماشین‌ها نیز تعداد محدودی از نیروهای انسانی می‌توانند فعالیت کنند. همچنین در مساله *DRCFJSP* موردنظر، امکان خرابی ماشین‌آلات نیز موردتوجه قرار گرفته است. برای این منظور، ما خرابی ماشین‌ها را به‌صورت چندین سناریو تصادفی محتمل در کارگاه در نظر می‌گیریم. به‌عنوان مثال، یک سناریو می‌تواند این باشد که هر ماشین فقط یک بار خراب شود، یا یک سناریو می‌تواند این باشد که ماشین اول یک بار خراب شود ولی ماشین دوم خراب نشود و به همین صورت سناریوهای تعریف می‌شود. تمام سناریوهای ممکن برای اختلال در کارگاه در نظر گرفته می‌شوند و حل مساله باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که متوسط مقدار *makespan* تحت تمام سناریوهای محتمل حداقل شود. همچنین علاوه بر متوسط مقادیر *makespan* بیشینه تحت سناریوهای مختلف در مدل مساله لحاظ شده است و یک تابع هدف ترکیبی از حالت متوسط و حالت سخت‌گیرانه در نظر گرفته شده است تا ریسک تصمیم‌گیری حداقل شود. برای کنترل نوسان تابع هدف در سناریوهای مختلف، انحراف معیار تابع هدف در سناریوهای مختلف نیز در نظر گرفته شده است که باید حداقل شود. همچنین

در قیود پنجره زمانی موعدهای تحویل کارها در سناریوهای مختلف انعطاف لحاظ شده است که بر اساس آن می‌توان قیود با شانس کمتر را تا حدی نقض کرد تا هم متوسط عملکرد سیستم بهبود یابد و هم انحراف جواب‌ها کاهش یابد.

به‌طور خلاصه، در حل مساله *DRCFJSP* باید نحوه تخصیص ماشین‌ها به کارها و توالی عملیات بر روی هر ماشین به‌گونه‌ای صورت پذیرد که تحت هر سناریو محتمل کمینه *makespan* حاصل شود تا متوسط عملکرد سیستم در کنار عملکرد سیستم در حالت بدبینانه، با در نظر گرفتن میزان نقض قیود پنجره‌های زمانی موعدهای تحویل کارها و واریانس مقدار تابع هدف بهینه باشد. در این مساله، مفروضاتی باید در نظر گرفته شود. از جمله آن‌که زمان جابجایی نیروی انسانی ناچیز در نظر گرفته می‌شود. نیروی انسانی مشغول روی هر ماشین تا زمانی که کار واگذار شده به آن را تمام نکند نمی‌تواند به ماشین دیگر منتقل شود. قطع کردن^۱ پردازش کار روی ماشین مجاز نیست، به‌عبارت‌دیگر، خدمات پس‌از آن که شروع می‌شوند باید به‌طور کامل تحویل یا ارایه شوند. نهایتاً اینکه خرابی ماشین‌آلات به‌صورت سناریوهای اختلال در کارگاه تعریف می‌شوند به‌صورتی که در هر سناریو یک یا چند ماشین می‌تواند یک یا چند مرتبه دچار خرابی شوند (احتمال رخداد هر سناریو نیز از پیش تعیین شده در نظر گرفته می‌شود). در جدول ۲، مهم‌ترین ویژگی‌ها و مفروضات این مساله آورده شده است.

۴- مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

برای مدل‌سازی مساله *DRCFJSP* موردنظر این تحقیق، با توجه به آنکه خرابی ماشین‌ها به‌صورت سناریوهای تصادفی با شانس مشخص در نظر گرفته شده است، از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استفاده می‌شود. همچنین، از آنجاکه در رویکرد برنامه‌ریزی سناریو محور کلاسیک فقط متوسط عملکرد سیستم در نظر گرفته می‌شود و ممکن است همراه با ریسک باشد، ما از نسخه استوار آن استفاده می‌کنیم که در کنار متوسط عملکرد سیستم، عملکرد سیستم در حالت بدبینانه و انحراف معیار عملکرد سیستم نیز در نظر گرفته می‌شود. در ادامه این بخش، نخست به توضیح کامل رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار پرداخته می‌شود و سپس این رویکرد برای مدل‌سازی مساله، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲- مشخصات مساله *DRCFJSP* مطالعه شده در این پژوهش.

Table 2- Specifications of *DRCFJSP* problem studied in this research.

از منظر ماشین‌ها و انسان‌ها (منابع سرویس‌دهنده)	تفاوت در سرعت، عملکرد و تخصیص ماشین‌ها و انسان‌ها برای پردازش کارهای مختلف وجود دارد.
از منظر پردازش کارها (نحوه ارایه سفارش‌ها)	برای هر یک از کارها یا سفارش‌ها، یک پنجره زمانی موعدهای تحویل در نظر گرفته می‌شود. همه سفارش‌ها در آغاز افق برنامه‌ریزی مشخص هستند و در هر زمان قابل ارایه هستند. زمان آماده‌سازی مجدد به توالی کارها مرتبط نیست و زمان آماده‌سازی تقریباً ناچیز در نظر گرفته می‌شود.
	در قابلیت پردازش ماشین‌ها و مهارت انسان‌ها محدودیت وجود دارد و قادر به انجام تمام عملیات‌های کارهای مختلف نیستند.
	محدودیت پیش‌نیازی ^۲ یا پس‌نیازی ^۳ بین عملیات‌های کارها وجود دارد.
	ماشین‌ها لزوماً هر زمان در دسترس نیستند و احتمال خرابی ماشین و اختلال در کارگاه وجود دارد.
	هیچ انسان/ماشین نمی‌تواند بیش از یک عملیات را در یک زمان انجام دهد. به‌عبارت‌دیگر امکان انجام چند خدمت توسط یک ماشین و انسان در یک زمان مشخص وجود ندارد.
از منظر تابع هدف	کمینه‌سازی <i>makespan</i> با توجه به متوسط عملکرد سیستم، عملکرد سیستم در حالت بدبینانه، انحراف معیار عملکرد و میزان نقض قیود پنجره‌های زمانی موعدهای تحویل کارها.

¹ Preemption
² Precedence

³ Posterior





رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور، از جمله رویکردهای حل مساله تحت شرایط عدم قطعیت با داده‌های تصادفی سناریو محور است. در رویکرد SSP، متغیرها به دو دسته افزایش می‌شوند: متغیرهای مستقل از سناریو و متغیرهای وابسته به سناریو. متغیرهای مستقل از سناریو در تمام سناریوها مقدار ثابتی دارند و تحت هیچ‌یک از سناریوهای محتمل، قابل تغییر نیستند. در مقابل، متغیرهای وابسته تحت هر سناریو و با توجه به متغیرهای مستقل از سناریو، مقدارشان تغییر می‌کند. رویکرد SSP در پی تعیین پاسخ برای متغیرهای مستقل از سناریو است به طوری که تحت هر سناریو محتمل با تغییر در متغیرهای وابسته به سناریو مساله موجه باشد. تابع هدف در رویکرد SSP، بهینه کردن متوسط عملکرد سیستم تحت همه سناریوها است. در حالت کلی، رویکرد SSP به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \text{Min } E Z = \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s, \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T y \text{ for all } s \in S, \\ A_s x_s + K_s y = b_s \text{ for all } s \in S, \\ Ry = q, \\ y \in Y, x_s \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

که در آن مقدار هدف تحت سناریو $s \in S$ ، x_s متغیرهای وابسته به سناریو (معمولاً متغیر پیوسته و نامنفی) و y متغیرهای مستقل از سناریو (معمولاً متغیر باینری)، $(c_s, d_s, A_s, K_s, b_s)$ مقدار پارامترهای مساله تحت سناریو $s \in S$ ، (R, q) مقدار پارامترهای قطعی و نهایتاً π_s احتمال وقوع سناریو $s \in S$ است [17]، [24].

در توسعه رویکرد SSP، مالوی و همکاران [14]، علاوه بر متوسط عملکرد سیستم، با تعریف دو مفهوم استواری حل^۱ یا استواری بهینگی^۲ و استواری مدل^۳ یا استواری شدنی بودن^۴، اولاً واریانس مقدار تابع هدف را نیز در تابع هدف در نظر گرفتند و در ثانی در قیود وابسته به سناریو انعطاف لحاظ کردند که بر اساس آن می‌توان قیود با شانس کمتر را تا حدی نقض کرد تا هم متوسط عملکرد سیستم بهبود یابد و هم انحراف جواب‌ها کاهش یابد. مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار^۵ به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \text{Min } E Z + \text{Var } Z + \text{Penalty} = \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \\ \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right)^2 + \omega \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \xi_s^2, \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T y \text{ for all } s \in S, \\ A_s x_s + K_s y = b_s + \xi_s \text{ for all } s \in S, \\ Ry = q, \\ y \in Y, x_s \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

که در آن ξ_s متغیر میزان نقض قید در سناریو $s \in S$ است. یو و لی [24] با جایگذاری تابع قدرمطلق به جای توان دوم، فرم خطی سازی مدل مالوی را توسعه داده‌اند که مدل پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \text{Min } \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(2\theta_s - z_s + \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right) + \\ \omega \sum_{s \in S} \pi_s (\xi_s^+ + \xi_s^-), \\ \theta_s - z_s + \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \geq 0 \text{ for all } s \in S, \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T y \text{ for all } s \in S, \\ A_s x_s + K_s y = b_s + \xi_s^+ - \xi_s^- \text{ for all } s \in S, \\ Ry = q, \\ y \in Y, x_s \geq 0, \\ \xi_s^+, \xi_s^-, \theta_s \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

¹ Solution robustness
² Optimality robustness
³ Model robustness

⁴ Feasibility robustness
⁵ Robust Scenario based Stochastic Programming (RSSP)

که در آن $\theta_s \geq 0$ یک متغیر کمکی برای خطی سازی است و مقدار انحراف معیار تحت سناریو s است. ما در این تحقیق، در توسعه مدل $RSSP$ فوق، عملکرد سیستم در حالت بدبینانه را نیز لحاظ می کنیم. بنابراین، فرم کلی رویکرد $RSSP$ که برای مدل سازی مساله $DRCFJSP$ مورد نظر این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرد به صورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(2\theta_s - z_s + \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right) + \\ \omega \sum_{s \in S} \pi_s (\xi_s^+ + \xi_s^-) + \rho \max_{s \in S} \pi_s \cdot z_{s'} \\ \theta_s - z_s + \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \geq 0 \text{ for all } s \in S, \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T \cdot y \text{ for all } s \in S, \\ A_s x_s + K_s y = b_s + \xi_s^+ - \xi_s^- \text{ for all } s \in S, \\ Ry = q, \\ y \in Y, x_s \geq 0, \\ \xi_s^+, \xi_s^-, \theta_s \geq 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

جایی که ω ضریب استواری شدنی بودن مدل و λ ضریب اهمیت به واریانس جوابها در سناریوهای مختلف و ρ ضریب استواری مدل در حالت/سناریوی بدبینانه است.

۲-۴- مدل سازی مساله $DRCFJSP$ بر اساس رویکرد $RSSP$

نماد و علائم بکار گرفته شده در فرمولاسیون این مساله به صورت زیر است:

مجموعه ها، اندیس ها و پارامترهای ورودی

مجموعه کارها/ سفارش ها (اندیس گذاری با i, r).	$I = \{1, 2, \dots, N\}$
عملیات مورد نیاز کار i (اندیس گذاری با j, s), از نماد o_{ij} برای نشان دادن عملیات j th ماشین i استفاده می کنیم.	$O_i = \{1, 2, \dots, n_i\}$
مجموعه ماشین ها (اندیس گذاری با k).	$K = \{1, 2, \dots, M\}$
مجموعه نیروی انسانی/کارگران (اندیس گذاری با l).	$L = \{1, 2, \dots, H\}$
زیر مجموعه کارگران که می توانند روی ماشین k کار کنند.	$S^k \subseteq L$
زیر مجموعه ماشین ها که می توانند عملیات o_{ij} را انجام دهند.	$V^{ij} \subseteq K$
زیر مجموعه کارگران که می توانند عملیات o_{ij} را انجام دهند.	$W^{ij} \subseteq L$
زیر مجموعه ماشین ها که کارگر l می تواند با استفاده از آن ها عملیات o_{ij} را انجام دهد.	$U^{ijl} \subseteq K$
زیر مجموعه کارها/ سفارش ها که پیش نیاز کار i هستند.	$H^i \subseteq I$
مجموعه سناریوهای اختلال یا خرابی ماشین (اندیس گذاری با ξ).	Ξ
مدت زمان پردازش عملیات o_{ij} توسط ماشین k با کارگر انسانی l .	P_{ijkl}
پنجره زمانی موعد تحویل هر سفارش.	$d_i = [Ld_i, Ud_i]$
مدت زمان تعمیر ماشین k .	r_k
تعداد دفعات خرابی ماشین k بر واحد زمان تحت سناریو ξ .	$b_{k\xi}$
احتمال وقوع سناریو ξ .	π_ξ
ضریب کنترل نوسانات (واریانس) مقدار تابع هدف در سناریوهای مختلف خرابی ماشین ها.	λ
ضریب اهمیت به حالت بدبینانه در سناریوهای مختلف خرابی ماشین ها.	ρ
ضریب استواری شدنی بودن (کنترل کننده پنجره زمانی).	ω

متغیرها

اگر پردازش عملیات o_{ij} به ماشین k با کارگر انسانی l تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت صفر است.	Y_{ijkl}
اگر عملیات o_{ij} بعد از o_{rs} پردازش شود برابر با ۱، در غیر این صورت صفر است.	X_{ijrs}
زمان اتمام عملیات o_{ij} بدون در نظر گرفتن خرابی ماشین ها.	C_{ij}
کل مدت پردازش کارهای توسط ماشین k .	P_k





تعداد مرتبه خرابی ماشینین k .	$R_{k\xi}$
Makespan تحت سناریو ξ .	C_{ξ}^{max}
ξ یک متغیر کمکی برای محاسبه انحراف از میانگین تحت سناریو.	θ_{ξ}
زمان اضافه بر حداکثر پنجره زمانی موعد تحویل.	$\Delta_{i\xi}^{+}$
زمان کمتر از حداقل پنجره زمانی موعد تحویل.	$\Delta_{i\xi}^{-}$
متوسط makespan تحت همه سناریوها.	EC
بیشینه makespan تحت همه سناریوها.	WC

تابع هدف

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{\xi \in \Xi} \pi_{\xi} \cdot C_{\xi}^{max} + \rho \max_{\xi \in \Xi} C_{\xi}^{max} + \omega \sum_{\xi \in \Xi} \sum_{i \in I} \pi_{\xi} (\Delta_{i\xi}^{+} + \Delta_{i\xi}^{-}) \\ & + \lambda \sum_{\xi \in \Xi} \pi_{\xi} \left(C_{\xi}^{max} - \sum_{\xi \in \Xi} \pi_{\xi} \cdot C_{\xi}^{max} + 2\theta_{\xi} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

رابطه (۵) تابع هدف مساله را نشان می‌دهد که بر اساس آن مجموع وزنی مربوط به متوسط عملکرد سیستم تحت همه سناریوها، عملکرد سیستم در حالت بدبینانه، میزان نقض قیود پنجره زمانی مواعدهای تحویل سفارش‌ها وابسته به سناریوها و واریانس مقدار تابع هدف جواب کمیته می‌شود.

قیود و محدودیت‌ها

$$\theta_{\xi} \geq EC - C_{\xi}^{max} \text{ for all } \xi \in \Xi, \quad (6)$$

$$WC \geq C_{\xi}^{max} \text{ for all } \xi \in \Xi, \quad (7)$$

$$\sum_{k \in V^{i,j}} \sum_{l \in S^k} Y_{ijkl} = 1 \text{ for all } i \in I, j \in O_i, \quad (8)$$

$$C_{ij} \geq C_{i,j-1} + \sum_{k \in V^{i,j}} \sum_{l \in S^k} p_{ijkl} \cdot Y_{ijkl} \text{ for all } i \in I, j \in O_i, \quad (9)$$

$$C_{ij} \geq C_{rs} + \sum_{l \in S^k} p_{ijkl} \cdot Y_{ijkl} - M(1 - X_{ijrs}) - M \left(2 - \sum_{l \in S^k} Y_{ijkl} - \sum_{l \in S^k} Y_{rskl} \right) \quad (10)$$

for all $i < N, j \in O_i, r > i, s \in O_r, k \in \{V^{i,j} \cap V^{r,s}\}$,

$$C_{rs} \geq C_{ij} + \sum_{l \in S^k} p_{ijkl} \cdot Y_{ijkl} - M \cdot X_{ijrs} - M \left(2 - \sum_{l \in S^k} Y_{ijkl} - \sum_{l \in S^k} Y_{rskl} \right) \quad (11)$$

for all $i < N, j \in O_i, r > i, s \in O_r, k \in \{V^{i,j} \cap V^{r,s}\}$,

$$C_{ij} \geq C_{rs} + \sum_{k \in U^{i,j,l}} p_{ijkl} \cdot Y_{ijkl} - M(1 - X_{ijrs}) - M \left(2 - \sum_{k \in U^{i,j,l}} Y_{ijkl} - \sum_{k \in U^{i,j,l}} Y_{rskl} \right) \quad (12)$$

for all $i < N, j \in O_i, r > i, s \in O_r, l \in S^k$,

$$C_{rs} \geq C_{ij} + \sum_{k \in U^{i,j,l}} p_{ijkl} \cdot Y_{ijkl} - M \cdot X_{ijrs} - M \left(2 - \sum_{k \in U^{i,j,l}} Y_{ijkl} - \sum_{k \in U^{i,j,l}} Y_{rskl} \right) \quad (13)$$

for all $i < N, j \in O_i, r > i, s \in O_r, l \in S^k$,

$$\begin{cases} Ld_i \leq \max_{j \in O_i} \{C_{ij}\} \leq Ud_i \text{ for all } i \in I, \\ \Downarrow \\ C_{in_i} \leq Ud_i + \Delta_{i\xi}^{+} \text{ for all } i \in I, \xi \in \Xi, \\ C_{in_i} \geq Ld_i - \Delta_{i\xi}^{-} \text{ for all } i \in I, \xi \in \Xi, \end{cases} \quad (14)$$

$$P_k \geq \sum_{i \in I} \sum_{j \in O_i} \sum_{l \in S^k} p_{ijkl} \cdot Y_{ijkl} \text{ for all } k \in K, \quad (15)$$

$$R_{k\xi} \geq b_{k\xi} \cdot P_k \text{ for all } k \in K, \xi \in \Xi, \quad (16)$$

$$C_{\xi}^{max} \geq \max_{i \in I, j \in O_i} \{C_{ij}\} + \sum_{k \in K} r_k \cdot R_{k\xi} \text{ for all } \xi \in \Xi, \quad (17)$$

$$Y_{ijkl}, X_{ijrs} \in \{0,1\}, C_{ij}, P_k, C_{\xi}^{max}, \Delta_{i\xi}^{+}, \Delta_{i\xi}^{-} \geq 0, R_{k\xi} \in \mathbb{Z}^+. \quad (18)$$



در رابطه (۶) مقدار نوسان در هر سناریو محاسبه می‌شود. لازم به توضیح است که $EC = \sum_{\xi \in \Xi} \pi_{\xi} \cdot C_{\xi}^{max}$ است. در رابطه (۷) بیشینه $makespan$ با در نظر گرفتن همه سناریوها محاسبه می‌شود ($WC = \max_{\xi \in \Xi} C_{\xi}^{max}$). رابطه (۸) تضمین می‌کند که عملیات هر کار به یک ماشین و کارگر واگذار می‌شود. رابطه (۹) توالی عملیات هر کار را نشان می‌دهد و زمان تکمیل عملیات هر کار را محاسبه می‌کند. روابط (۱۰) و (۱۱) بیان می‌کند که اگر دو عملیات از دو کار متفاوت به یک ماشین واگذار شود، آنگاه پردازش یکی از آن‌ها بعد از دیگری انجام می‌شود. روابط (۱۲) و (۱۳) بیان می‌کند که اگر دو عملیات از دو کار متفاوت توسط یک کارگر انجام شوند، یکی از آن‌ها بعد از دیگری انجام می‌شود. رابطه (۱۴) محدودیت‌های پیش‌نیازی را برای هر کار تضمین می‌کند. رابطه (۱۵) محدودیت پنجره زمانی موعده تحویل سفارش‌ها را کنترل می‌کند. لازم به توضیح است که تحت سناریوهای مختلف، ممکن است که زمان تکمیل سفارشی به اندازه $\Delta_{i\bar{s}}^+$ بیشتر و یا به اندازه $\Delta_{i\bar{s}}^-$ کمتر از پنجره زمانی باشد لذا میزان این تخلف از موعده تحویل در تابع هدف دیده می‌شود. در رابطه (۱۶) کل مدت زمان فعالیت (پردازش کار) هر ماشین محاسبه می‌شود. در رابطه (۱۷) تعداد دفعات خرابی هر ماشین در هر سناریو محاسبه می‌شود. رابطه (۱۸)، $makespan$ را تحت هر سناریو به دست می‌آورد. واضح است در صورت عدم خرابی ماشین‌ها، این مقدار برابر است با زمان تکمیل آخرین کار ($\max_{i \in I, j \in O_i} \{C_{ij}\}$) اما چون خرابی ماشین‌ها و مدت زمان تعمیر آن‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود، تابع $\Phi_{\xi}(r_k, R_{k\xi})$ که کل مدت زمان توقف ماشین‌ها به علت خرابی (تعمیر) را نشان می‌دهد به مقدار قبل افزوده می‌شود. در اینجا، $\Phi_{\xi}(r_k, R_{k\xi}) = \sum_{k \in K} r_k \cdot R_{k\xi}$ یعنی مجموع مدت زمان توقف ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود. نهایتاً در رابطه (۱۹) متغیرهای مساله آورده شده است. مدل $RSSP$ فوق، یک برنامه خطی مختلط است که در ابعاد مشخصی قابل حل توسط $CPLEX Solver$ نرم‌افزارهای مختلفی از جمله $GAMS$ است. باین وجود، برای حل مساله در ابعاد بزرگ، نیاز به ارایه یک رویکرد حل کارا تر است که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.

۵- رویکرد حل فراابتکاری پیشنهادی

مساله $DRCFJSP$ تعریف شده در این پژوهش توسعه‌ای پیچیده‌تر از مساله $FJSP$ کلاسیک است و در رده مسایل $NP-hard$ قرار می‌گیرد و به‌کارگیری مدل‌های $MILP$ با حل‌کننده‌هایی همچون $CPLEX$ برای حل این مساله در ابعاد بزرگ کارا نیست و مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. با مرور ادبیات مسایل زمان‌بندی مشخص می‌شود از الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف برای حل مسایل زمان‌بندی بهره گرفته شده است. در این بین، الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و برخی از الگوریتم‌های ترکیبی در پژوهش‌های بیشتری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. چن و ینگ [5] و ژنگ و همکاران [27] در پژوهش خود از GA در حل مساله زمان‌بندی و یا توسعه‌های آن استفاده نموده‌اند. در این پژوهش نیز برای حل مساله $DRCFJSP$ در ابعاد بزرگ، از جستجوی فراابتکاری مبتنی GA استفاده می‌شود. در ادامه، نحوه به‌کارگیری این الگوریتم فراابتکاری برای حل مساله تعریف شده این پژوهش توضیح داده می‌شود.

۱-۵- نمایش جواب

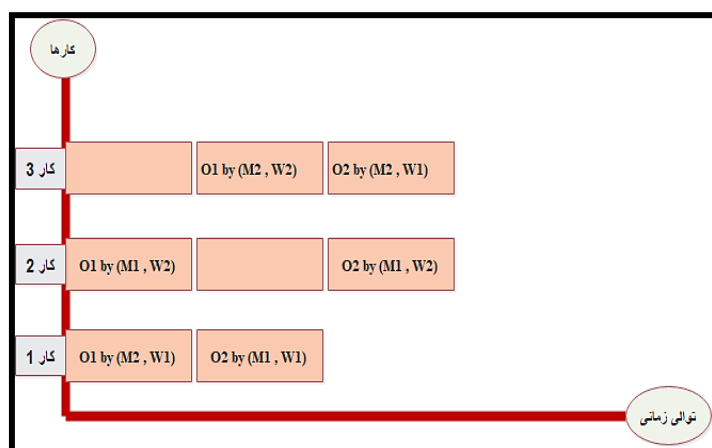
در مرحله اول، ساختار کروموزوم باید مشخص شود. شکل ۱ روش نمایش جواب پیشنهادی برای نشان دادن کروموزوم را نشان می‌دهد. این کروموزوم از چندین ردیف تشکیل شده است که هر کدام از آن‌ها ژن‌های کروموزوم می‌باشند و متغیرهای مساله را نشان می‌دهند. چهار مولفه اول در سمت چپ هر ردیف، متغیرهای مساله را نشان می‌دهند که نحوه اختصاص ماشین‌ها و کارگران به عملیات، یعنی کار، عملیات، ماشین و شماره کارگر را به ترتیب مشخص می‌کنند. در مثال ارایه شده، ردیف اول نشان می‌دهد که عملیات ۱ از کار ۱ به ماشین ۲ و کارگر ۱ اختصاص داده شده است و در اولویت دوم در توالی کارها قرار دارد. ستون پنجم برای تعیین توالی عملیات به ماتریس اضافه می‌شود. هر عدد در این ستون به ترتیب زمان پایان کار مربوطه را نشان می‌دهد. به این ترتیب به کلیه عملیات‌ها اعدادی تخصیص داده می‌شود تا نشان دهد به چه طریقی در صف انتظار قرار می‌گیرند. در شکل ۲، به فرض آنکه زمان انجام هر عملیات یکسان است، گانت چارت مرتبط به این نمایش جواب را نشان می‌دهد.



توالی	نیروی انسانی	ماشین	عملیات	کار
2	1	2	1	1
1	2	1	1	2
3	1	1	2	1
4	2	2	1	3
6	1	2	2	3
5	2	1	2	2

۳ کار؛ هر کار ۲ عملیات؛ ۲ ماشین؛ ۲ نیروی انسانی

شکل ۱- ساختار نمایش جواب الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی برای مساله DRCFJSP.
Figure 1- Solution representation of meta-heuristic algorithm for DRCFJS.



شکل ۲- نمودار زمان بندی مرتبط با نمایش جواب شکل ۱.
Figure 2- Related Gantt chart of the solution representation.

۲-۵- تولید جواب اولیه

در GA پیشنهادی، برای تولید جواب اولیه از دو مکانیزم تولید تصادفی و تولید با اولویت استفاده شده است. در تولید تصادفی، جمعیت اولیه با انتخاب تصادفی منابع (ماشین و انسان) از میان منابعی که قادر به انجام هر عملیات هستند، تولید می شود. در مرحله بعد، با توجه به محدودیت های پیش نیازی، توالی به صورت تصادفی برای عملیات ها تعیین می شود. این روش تولید جواب اولیه برای تضمین تنوع در فضای جواب مطرح شده است. از طرف دیگر، در روش تولید مبتنی بر الویت، ماشین ها را از مجموعه ماشین ها مناسب جهت انجام هر عملیات انتخاب می کنیم و توالی عملیات بر اساس بیشترین زمان پردازش باقیمانده صورت می پذیرد. این روش برای تولید جواب های اولیه با کیفیت بکار گرفته شده است [26].

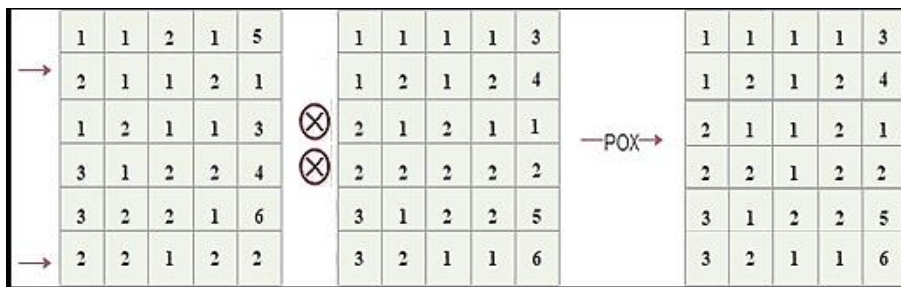
۳-۵- جستجوی همسایگی مبتنی بر تقاطع و جهش

در GA دو عملگرهای تقاطع و جهش برای جستجوی همسایگی و یافتن جواب های جدید از روی جواب های موجود مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه دو عملگر تقاطع و جهش در GA پیشنهادی برای حل مساله DRCFJSP آورده می شود.

عملگر تقاطع مبتنی بر تقدم^۱ برای تقاطع در GA پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرد. برای توصیف نحوه عملکرد این اپراتور، همانند شکل ۳ از دو والد اهداکننده به عنوان نمونه استفاده می شود. نفر اول به عنوان اهداکننده و دیگری به عنوان گیرنده در نظر گرفته شده است. ابتدا برخی از ژن های تصادفی از والد اهداکننده انتخاب می شوند. ژن های تصادفی انتخاب شده توسط فلش نشان داده شده است. در مرحله

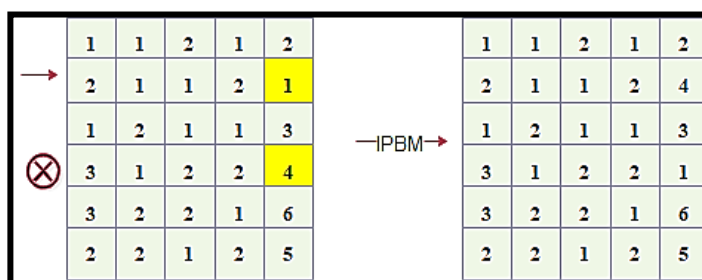
^۱ Precedence Order based Crossover (POX)

بعد، کار والد گیرنده از همان نوع کارهایی انتخاب می‌شود که از والد اهداکننده انتخاب شده و حذف می‌شود. ژن‌های برداشته شده با علامت ضربدر در شکل ۳ نشان داده شده است. ژن‌های منتخب از والد اهداکننده جایگزین ژن‌های والد گیرنده می‌شوند و ژن‌های باقی‌مانده در والد گیرنده بدون تغییر باقی می‌مانند. با وجود برقراری محدودیت‌های توالی و انتخاب، فرزندان جدید ایجاد می‌شوند و از این طریق از تولید کروموزوم‌های نشدنی با این روش جلوگیری می‌شود.



شکل ۳- عملگر تقاطع POX در GA پیشنهادی.

Figure 3- POX crossover operator in proposed GA.



شکل ۴- عملگر جهش IPBM در GA پیشنهادی.

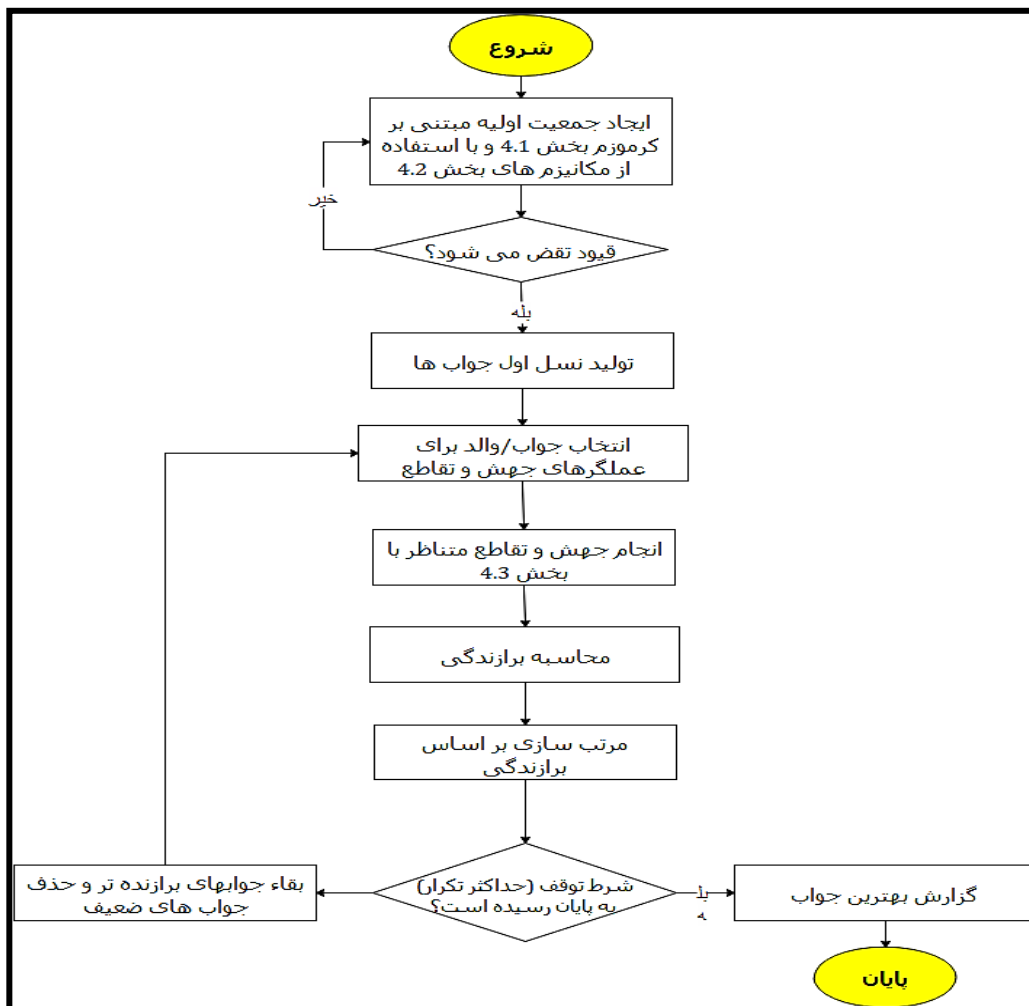
Figure 4- IPBM mutation operator in the proposed GA.

برای تولید جواب‌های متنوع و ایجاد اکتشاف بیشتر در GA، به یک عملگر جهش نیاز است. در عملگر *Improved Position Based Mutation operator (IPBM)* پیشنهادی، ابتدا کروموزوم‌های تصادفی را، از جواب‌هایی که مبتنی بر مکانیزم چرخه رولت انتخاب شده‌اند، جهت اعمال عملگر جهش بر روی آن در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است که مکانیزم چرخه رولت در اینجا موجب می‌شود به جواب‌هایی با برازندگی بهتر اجازه داده شود که شانس بیشتری برای جهش و در نتیجه گسترش یک فضای جستجوی کارآمد داشته باشند و به جلوگیری از افتادن در فضای جواب‌های محلی کمک کنند. از طرف دیگر، جواب‌ها با برازندگی کمتر، احتمال بیشتری دارند که توسط یک عملگر تقاطع با کروموزوم‌هایی با ژن‌های بهتر، ادغام شوند. پس از انتخاب کروموزوم جهت عملگر جهش، یک جفت ژن به طور تصادفی از هر یک از کروموزوم‌ها انتخاب می‌شود. یکی از مولفه‌ها حذف می‌شود (توسط دایره در شکل ۴ نشان داده شده است). سپس، با توجه به محدودیت‌های توالی، مجدد در کروموزوم وارد می‌شود. در شکل ۵ فلوچارت GA پیشنهادی برای حل مساله *DRCFJSP* آورده شده است.

۶- نتایج عددی و تحلیل

در این بخش، به حل مساله و گزارش خروجی‌ها و تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. برای این منظور، ابتدا یک مطالعه موردی از مساله *DRCFJSP* مورد نظر پژوهش آورده می‌شود و متناظر با این مطالعه موردی، به حل مساله مبتنی بر مدل و رویکرد حل پیشنهادی پرداخته می‌شود و نتایج عددی حاصل شده گزارش و تحلیل می‌شوند. سپس، جهت ارزیابی روش فراابتکاری پیشنهادی، چند مساله آزمایشی در ابعاد مختلف به صورت تصادفی تولید می‌شود و با استفاده از مدل ریاضی و روش فراابتکاری پیشنهادی حل می‌شوند. در نهایت پاسخ هر یک از روش‌ها با استفاده از دو معیار، ارزیابی می‌شوند. لازم به ذکر است، از آنجاکه مدل ریاضی این پژوهش با در نظر گرفتن رویکردهای حل پیشنهادی به صورت *MILP* است، از *CPLEX Solver* موجود در نرم‌افزار *GAMS* نسخه 24.7.1، برای حل مدل ریاضی استفاده شده است. همچنین، از نرم‌افزار *MATLAB 2019 b* برای پیاده‌سازی الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و حل مساله بهره گرفته شده است.





شکل ۵- فلوچارت GA پیشنهادی برای حل مساله DRCFJSP.
Figure 5- Proposed GA flowchart for solving DRCFJSP problem.

۱-۶- مطالعه موردی مساله DRCFJSP

در این بخش، به یک مطالعه موردی از مساله *DRFJSS* مربوط به خط تولید کارخانه البرز یدک تولیدکننده شیرهای *CNG* می‌پردازیم که در آن برای ماشین‌کاری قطعات از دستگاه مختلفی استفاده می‌شود. سفارش‌هایی که باید ماشین‌کاری شوند عبارت‌اند از: مهره سوزنی، سوزن، اتصال سوزن، نگه‌دارنده بوبین، پیستون، مگنت، مهره، فیوز پلاگ، دیسک انفجاری و مهره جریان اضافی ($N=10$). عملیاتی که باید روی $M=6$ ماشین در دسترس انجام شوند عبارت‌اند از: سوراخ‌کاری، روتراشی، رزوه زنی و شیارزنی ($O=4$). در جدول ۳ این کارها کدگذاری شده‌اند و عملیات موردنیاز برای هر کار نیز مشخص و کدگذاری شده است. در این کارگاه تعداد $L=5$ کارگر با صلاحیت‌های متفاوت برای کار با ماشین‌آلات در دسترس هستند. در جدول ۴ زمان پردازش عملیات توسط ماشین‌های مختلف نشان داده شده است و در جدول ۵ نیز صلاحیت نیروی انسانی برای انجام عملیات مختلف روی ماشین‌های مختلف مشخص شده است. در جدول ۶، سناریو خرابی و زمان تعمیر برای کلیه ماشین‌های موجود بیان شده است. به‌عنوان مثال، ماشین $M1$ دارای دو سناریوی خرابی محتمل است؛ یعنی یک بار خراب شدن با احتمال 0.2 و دو بار خراب شدن با احتمال 0.8 . در این مطالعه موردی، هیچ‌یک از کارها اولویتی بر دیگری ندارند، یعنی $H^i = \emptyset$.

جدول ۳- معرفی کارها و عملیات هر کار در مطالعه موردی مساله.
Table 3- The jobs and operations of each job in case study.

شماره شیارزنی	عملیات کارها	سوراخ‌کاری	روتراشی	رزوه زنی
-	مهره سوزنی	(J1 , O1)	(J1 , O2)	(J1 , O3)
(J2 , O4)	سوزن	-	(J2 , O2)	(J2 , O3)
(J3 , O4)	اتصال سوزن	(J3 , O1)	(J3 , O2)	(J3 , O3)

جدول ۳- ادامه.

Table 3- Continued.

شماره	عملیات	سوراخ کاری	روتراشی	رزوه زنی	شماره
-	نگهدارنده بوبین	(J4 , O1)	-	(J4 , O3)	-
(J5 , O4)	پیستون	(J5 , O1)	(J5 , O2)	-	(J5 , O4)
-	مگنت	(J6 , O1)	(J6 , O2)	(J6 , O3)	-
(J7 , O4)	مه‌ره	(J7 , O1)	(J7 , O2)	(J7 , O3)	(J7 , O4)
(J8 , O4)	فیوز پلاگ	(J8 , O1)	(J8 , O2)	(J8 , O3)	(J8 , O4)
(J9 , O4)	دیسک انفجاری	(J9 , O1)	(J9 , O2)	(J9 , O3)	(J9 , O4)
-	مه‌ره جریان اضافی	(J10 , O1)	(J10 , O2)	(J10 , O3)	-

جدول ۴- مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین.

Table 4- Operation processing time by the machine.

شماره	عملیات	سوراخ کاری	روتراشی	رزوه زنی	شماره
-	مه‌ره سوزنی	(3 , 4)	(2 , 2.5)	(4 , 5)	-
(16 , 17.5)	سوزن	-	(6 , 7.5)	(2 , 3)	(16 , 17.5)
(16 , 17.5)	اتصال سوزن	(2 , 2.9)	(6 , 7.5)	(9 , 10.5)	(16 , 17.5)
-	نگهدارنده بوبین	(17 , 17.5)	-	(5 , 5.9)	-
(12 , 13)	پیستون	(6 , 7.2)	(2 , 2.5)	-	(12 , 13)
-	مگنت	(2 , 2.9)	(2.3 , 2.8)	(5 , 7.2)	-
(3 , 3.5)	مه‌ره	(12 , 13.7)	(9 , 9.5)	(8 , 9.4)	(3 , 3.5)
(3.1 , 3.5)	فیوز پلاگ	(10 , 11.7)	(8 , 9.5)	(6 , 7.2)	(3.1 , 3.5)
(3.3 , 3.7)	دیسک انفجاری	(7 , 7.2)	(4 , 4.5)	(4 , 4.9)	(3.3 , 3.7)
-	مه‌ره جریان اضافی	(5 , 5.9)	(6 , 7)	(6 , 7.1)	-

جدول ۵- تخصص/صلاحیت نیروی انسانی برای پردازش عملیات مختلف روی ماشین‌ها.

Table 5- Worker qualification for performing different operations on the machines.

شماره	عملیات	سوراخ کاری	روتراشی	رزوه زنی	شماره
-	مه‌ره سوزنی	W (1,2,4,5)	W (1,2,3)	W (2,3,4,5)	-
W (1,2,3)	سوزن	-	W (2,3,5)	W (1,2,3,4)	W (1,2,3)
W (1,2,5)	اتصال سوزن	W (1,2,3,4,5)	W (1,4,5)	W (1,3,5)	W (1,2,5)
-	نگهدارنده بوبین	W (1,3,4,5)	-	W (2,3,4,5)	-
W (1,3)	پیستون	W (2,3,5)	W (2,3,4,5)	-	W (1,3)
-	مگنت	W (1,3,4,5)	W (1,3,4)	W (3,5)	-
W (1,2,5)	مه‌ره	W (1,2,3,4)	W (2,,5)	W (1,3,5)	W (1,2,5)
W (1,2,5)	فیوز پلاگ	W (1,2,4)	W (2,,3,4,5)	W (3,4,5)	W (1,2,5)
W (2,4)	دیسک انفجاری	W (1,3)	W (1,2,3)	W (2,3)	W (2,4)
-	مه‌ره جریان اضافی	W (1,3,4,5)	W (1,2,3)	W (1,2,5)	-

جدول ۶- اطلاعات مرتبط با سناریوهای خرابی و زمان تعمیر ماشین‌آلات.

Table 6- Disruption scenarios and repair time data.

M6	M5	M4	M3	M2	M1
(0, 0.3; 1, 0.6; 2, 0.1)	(0, 0.1; 1, 0.9)	(0, 0.2; 1, 0.8)	(1, 0.4; 2, 0.4; 3, 0.2)	(1, 0.6; 2, 0.3; 3, 0.1)	(1, 0.2; 2, 0.8)
6	5	7	7	9	8

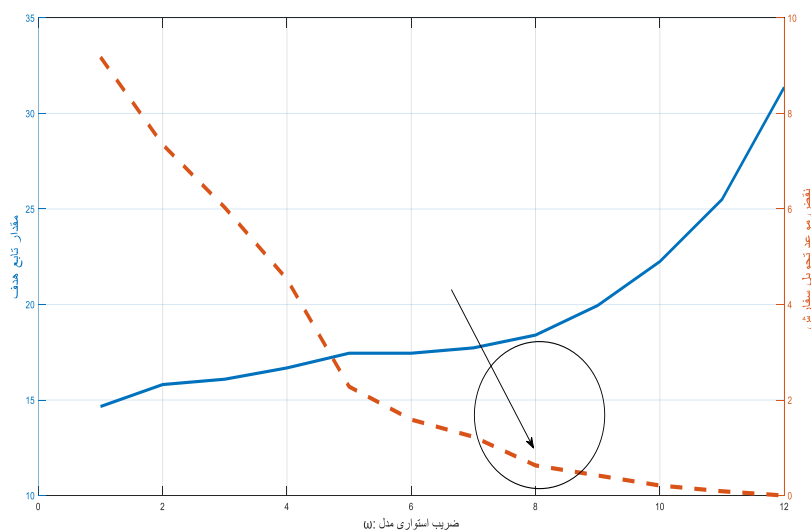
تعداد خرابی و احتمال r_k





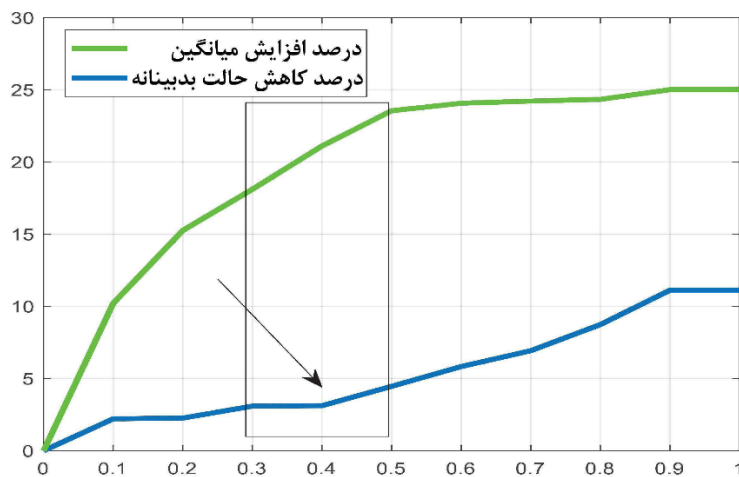
به منظور اجرای رویکرد *RSSP* پیشنهادی، ابتدا سه فاکتور ω ، λ و ρ باید تنظیم شوند که در شکل های ۶، ۷ و ۸ به نحوه تنظیم هر یک از آن ها پرداخته شده است. برای تنظیم ω ، واضح است که مقدار بیشتر ω باعث استواری بیشتر می شود و احتمال نقض محدودیت (تاخیر) را کاهش می دهد. باین حال، محافظه کاری بیش از حد ممکن است مقدار *EC* را افزایش دهد. ملاحظه می شود که برای $\omega \geq 12$ ، استواری مدل ۱۰۰٪ و احتمال تاخیر در پنجره زمانی برابر ۰ است. باین وجود، در این شرایط، احتیاط بیش از حد در اختصاص کارها به ماشین ها باعث می شود که *EC* در مقایسه با شرایط غیر محافظه کاری یا $\omega = 0$ به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یابد. با کاهش ω ، اگرچه *EC* کاهش می یابد، اما هم زمان درصد استواری جواب در مقایسه با $\omega = 8$ کاهش می یابد، بنابراین، برای فاکتور استواری مقداری مناسب است زیرا استواری با سطح اطمینان مبتنی بر اعتبار بالاتر از ۹۵٪ است. شکل ۶ بیان می کند که $\omega = 8$ مقداری مناسب برای ضریب استواری می باشد.

پس از تنظیم ضریب استواری شدنی بودن در مدل *RSSP* پیشنهادی، باید فاکتور تاثیرگذار دیگر یعنی ضریب اهمیت بدترین حالت (ρ) را تنظیم کنیم. همان طور که قبلا ذکر شد، ضریب ρ باعث می شود پیشینه *makespan* یا *WC* با اهمیت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان می دهد که با افزایش این ضریب از $\rho = 0$ به $\rho = 0.4$ ، درصد افزایش *WC* بیش از ۴٪ کاهش می یابد در حالی که درصد افزایش *EC* تقریباً ۶٪ افزایش می یابد. برای $\rho > 0.4$ ، اگرچه *WC* دوباره کاهش می یابد، اما درصد افزایش *EC* قابل اغماض نیست. بنابراین $\rho = 0.4$ می تواند به عنوان یک مقدار مناسب برای این عامل در نظر گرفته شود (شکل ۷). نهایتاً پس از تنظیم $\omega = 8$ و $\rho = 0.4$ ، ضریب کاهش نوسان (λ) از ۰ تا ۲ مقداری مناسب شده است که ملاحظه می شود $\lambda = 0.8$ ، بیش از ۱۵٪ از نوسان مقدار *makespan* در سناریوهای مختلف کاهش می یابد. پس بنابراین، برای این پارامتر نیز مقدار $\lambda = 0.8$ در نظر گرفته شده است.



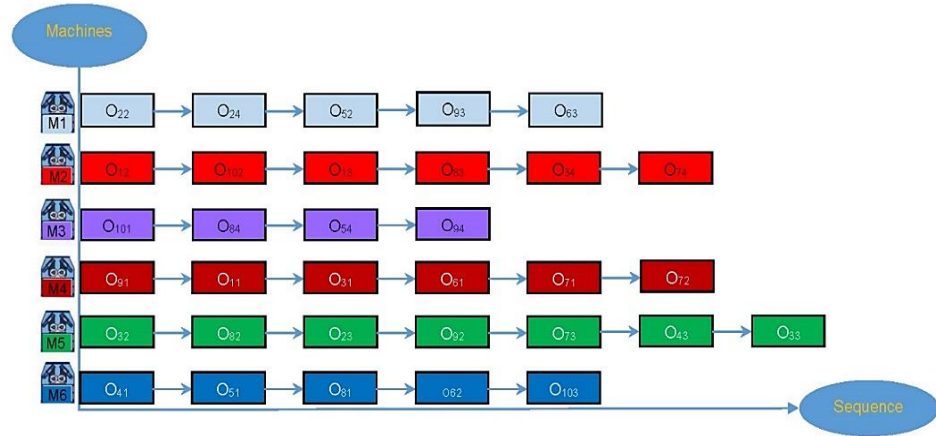
شکل ۶- تنظیم ضریب استواری شدنی بودن (ω) در مدل *RSSP* پیشنهادی.

Figure 6- Sensitivity analysis of the robustness coefficient in proposed *RSSP* model.



شکل ۷- تنظیم ضریب اهمیت به حالت بدبینانه (ρ) در مدل *RSSP* پیشنهادی.

Figure 7- Sensitivity analysis of the worst case coefficient in proposed *RSSP* model.



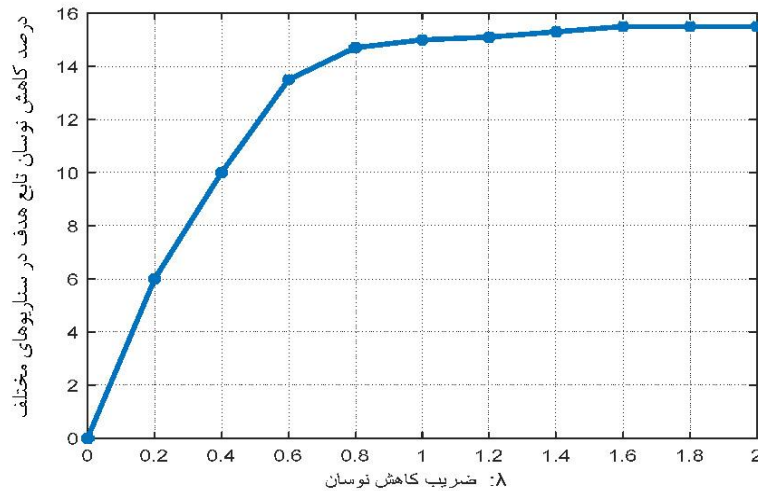
شکل ۸- تنظیم ضریب اهمیت به نوسان (λ) در مدل RSSP پیشنهادی.
 Figure 8- Sensitivity analysis of the variance in proposed RSSP model.

جدول ۷ تخصیص منابع به سفارش‌ها را در حل مطالعه موردی مساله *DRCFJSP* را مبتنی بر رویکرد *RSSP* نشان می‌دهد؛ همچنین در شکل ۹ زمان‌بندی کارها روی منابع (ماشین‌ها و اپراتورها) آورده شده است.

جدول ۷- واگذاری کارها/ فعالیت‌ها به ماشین‌ها و اپراتورها (مبتنی بر رویکرد *RSSP* پیشنهادی).

Table 7- Job/Operation allocation to the machines and operators (according to proposed RSSP model).

	O1	O2	O3	O4
J1	(M4,W1)	(M2,W3)	(M2,W2)	-
J2	-	(M1,W5)	(M5,W1)	(M1,W3)
J3	(M4,W4)	(M5,W5)	(M5,W3)	(M2,W2)
J4	(M6,W5)	-	(M5,W5)	-
J5	(M6,W2)	(M1,W5)	-	(M3,W3)
J6	(M4,W1)	(M6,W3)	(M1,W5)	-
J7	(M4,W2)	(M4,W5)	(M5,W1)	(M2,W5)
J8	(M6,W4)	(M5,W2)	(M2,W3)	(M3,W1)
J9	(M4,W3)	(M5,W2)	(M1,W3)	(M3,W4)
J10	(M3,W1)	(M2,W3)	(M6,W5)	-



شکل ۹- نحوه واگذاری کارها به ماشین‌ها و توالی آن.
 Figure 9- Job allocation to the machines and their sequences.

۲-۶- ارزیابی رویکرد مدل RSSP پیشنهادی در مطالعه موردی

در این بخش، جواب استوار به‌دست‌آمده از مدل *RSSP* پیشنهادی را ارزیابی می‌کنیم. برای این منظور، دو معیار را برای اعتبارسنجی و مقایسه پاسخ این رویکرد *RSSP* پیشنهادی با حالت اسمی (یعنی شرایطی که استواری مدل و خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته نشود) تعریف می‌کنیم. برای توضیح معیارهای اعتبارسنجی، فرض کنید که مساله *DRCFJSP* با استفاده از رویکرد "*M*" حل شده است و متناظر با زمان‌بندی حاصل از رویکرد *M*، مقدار $Z_{\xi,p}^M$ در شرایط خرابی ماشین‌ها تحت سناریوی $\xi \in \Xi$ حاصل می‌شود. همچنین مقدار $Z_{\xi,p}^*$ را



به‌عنوان مقدار بهینه سناریوی خرابی تعریف کنیم. بدیهی است که رویکرد M زمانی ارزشمندتر است که $z_{\xi,p}^M$ نسبت به $z_{\xi,p}^*$ انحراف کمتری داشته باشد. به عبارت دیگر، مقادیر کمتر $|z_{\xi,p}^M - z_{\xi,p}^*|$ نشان‌دهنده ارزش بالاتر رویکرد M هستند. بنابراین، ما می‌توانیم از دو معیار اعتبارسنجی به شرح زیر استفاده کنیم:

$$Cr1 = \sum_{\xi \in \Xi} \pi_{\xi} (|z_{\xi,p}^M - z_{\xi,p}^*|). \quad (20)$$

$$Cr2 = \max_{\xi \in \Xi} \pi_{\xi} (|z_{\xi,p}^M - z_{\xi,p}^*|). \quad (21)$$

مقادیر کمتر معیار ۱ و معیار ۲ نشان می‌دهد که رویکرد M با ارزش‌تر است. در جدول ۸، دو معیار فوق برای رویکرد $RSSP$ پیشنهادی و همچنین رویکرد اسمی محاسبه شده است. مطابق معیارهای تعریف‌شده، جواب روش پیشنهادی $RSSP$ از راه‌حل اسمی بسیار با ارزش‌تر است زیرا در هر دو حالت متوسط و بدترین حالت، انحراف کمتری از جواب بهینه دارد؛ و جواب رویکرد اسمی را در هر دو معیار حدود ۲۰٪ بهبود می‌دهد.

جدول ۸- ارزیابی پاسخ رویکرد $RSSP$ نسبت به حالت اسمی در دو معیار متوسط انحراف از بهینگی (معیار ۱) و بیشینه انحراف از بهینگی (معیار ۲).

Table 8- Evaluation of the solution of $RSSP$ model compared to the nominal approach according to criteria 1 and criteria 2.

رویکرد	معیار ۱		معیار ۲	
	مقدار	بهبود %	مقدار	بهبود %
رویکرد اسمی	23.41	-	18.96	-
رویکرد $RSSP$ پیشنهادی	19.33	17.42	14.21	25.05

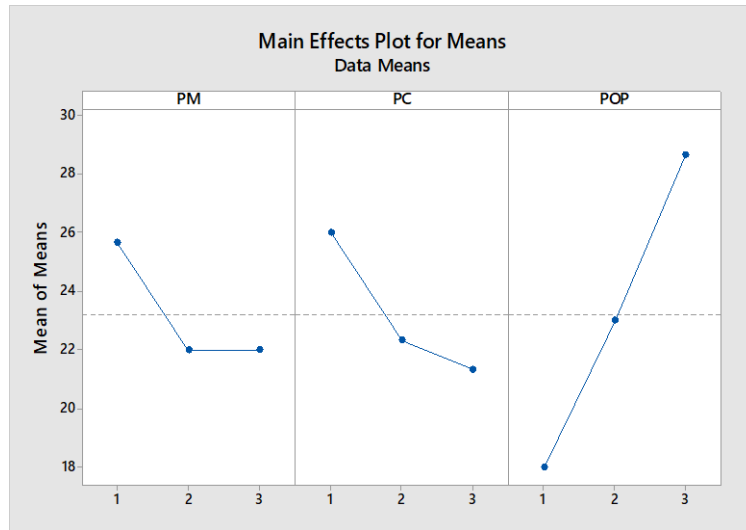
۳-۶- ارزیابی عملکرد مدل و روش حل فراابتکاری پیشنهادی

در این بخش انجام یک مطالعه محاسباتی با در نظر گرفتن مسایل با ابعاد مختلف به ارزیابی عملکرد مدل ریاضی ارایه شده الگوریتم فراابتکاری GA پیشنهادشده می‌پردازیم. ۳۰ مساله در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به شکل تصادفی ایجاد گردید و مطالعات محاسباتی بر روی آن‌ها انجام گردید که ۱۰ مساله اول در ابعاد کوچک، مسایل (۱۱) تا (۲۰) در ابعاد متوسط و ۱۰ مساله نهایی در ابعاد بزرگ می‌باشند. برای حل مدل ریاضی مساله در ابعاد کوچک و متوسط از الگوریتم $GAMS$ بهره گرفته شده است. همچنین از نرم‌افزار $MATLAB$ برای پیاده‌سازی و حل مساله از طریق الگوریتم ژنتیک در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مساله استفاده شده است. از آنجاکه کیفیت (بهترین پاسخ، زمان حل و غیره) هر روش فراابتکاری برای بهینه‌سازی، به شدت متأثر از مقدار تنظیم‌شده برای پارامترهای آن است، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوچی، مهم‌ترین پارامترها در روش حل GA پیشنهادی، اندازه جمعیت (POP)، نرخ جهش (PM) و نرخ تقاطع (PC)، مبتنی بر معیار S/N تنظیم شده است. شرح سطوح مختلف پارامترها و نتایج نهایی به دست آمده از تنظیم پارامتر در جدول ۹ بیان شده است. برای هر یک از عوامل POP ، PM و PC ، سه سطح به صورت $POP (L1=80, L2=100, L3=120)$ ، PC ، $PM (L1=0.15, L2=0.20, L3=0.25)$ و $(L1=0.8, L2=0.85, L3=0.90)$ تعریف شده است. همچنین نمودار مربوط به متوسط مقادیر نرخ S/N برای سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم در شکل ۱۰ آورده شده است. برای هر عامل سطحی به‌عنوان سطح بهینه در نظر گرفته شده است که متوسط مقادیر S/N آن اندازه بزرگ‌تری داشته باشد. در نتیجه در الگوریتم GA پیشنهادی اندازه جمعیت هر نسل برابر با ۱۲۰، ۸۰٪ از جواب‌های جدید ایجادشده جهت تکمیل جمعیت نسل بعدی توسط عملگر تقاطع، ۱۵٪ توسط عملگر جهش و ۵٪ باقی مانده جواب‌های نسل بعدی از طریق انتقال بهترین جواب‌های نسل فعلی به نسل بعد ایجاد می‌شوند.

جدول ۹- نتایج تنظیم پارامترهای الگوریتم GA پیشنهادی به روش تاگوچی.

Table 9- Taguchi parameter setting for the proposed GA algorithm.

پارامترها	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح بهینه انتخابی
POP	80	100	120	120
PC	0.8	0.85	0.9	0.8
PM	0.15	0.2	0.25	0.15



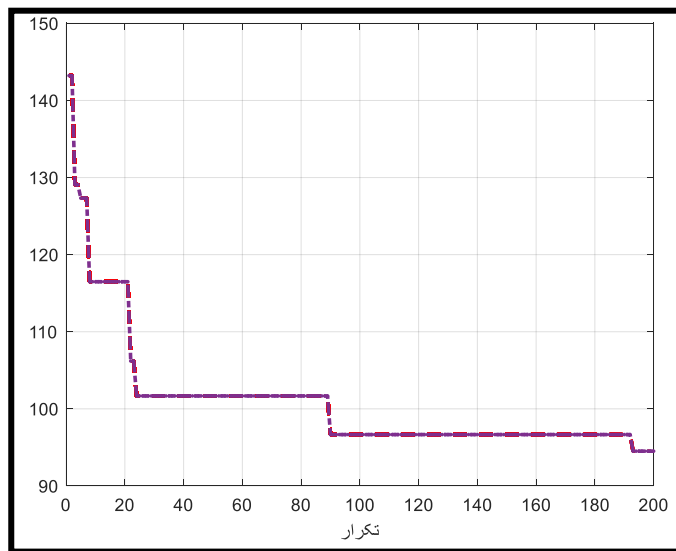
شکل ۱۰- نمودار متوسط مقادیر نرخ S/N برای تنظیم پارامترهای الگوریتم GA پیشنهادی.
Figure 10- S/N ratio charts for parameter setting of the proposed GA algorithm.

ابتدا مطالعه موردی بخش قبل که پیش‌تر با CPLEX حل و جواب بهینه آن به دست آمده است، این بار با الگوریتم GA حل شده است که روند همگرایی الگوریتم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در ادامه برای ارزیابی روش‌های GA و CPLEX Solver نرم‌افزار GAMS در حل مدل RSSP پیشنهادی، مسایل تصادفی ایجاد شده مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. برای حل هر یک از مسایل نمونه، حداکثر محدودیت زمان حل ۷۲۰۰ ثانیه (۲ ساعت) و حداکثر محدودیت تکرار $MaxIter=200$ را به عنوان شرط توقف به ترتیب برای CPLEX Solver نرم‌افزار GAMS و الگوریتم GA در نظر گرفته‌ایم. برای مقایسه نتایج الگوریتم GA با روش CPLEX، دو معیار با عنوان درصد بهبود کیفیت و درصد بهبود زمان به شرح زیر محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته است:

$$PQI = \frac{M(C^{max})_{CPLEX} - M(C^{max})_{GA}}{M(C^{max})_{CPLEX}} * 100. \quad (22)$$

$$PTI = \frac{Time_{CPLEX} - Time_{GA}}{Time_{CPLEX}} * 100. \quad (23)$$

در این حالت واضح است که اگر PQI مثبت باشد، کیفیت جواب را در مقایسه با CPLEX بهبود می‌بخشد و اگر PTI مثبت باشد، GA زمان حل را در مقایسه با CPLEX کاهش می‌دهد. توجه داشته باشید که اگر PQI منفی باشد، نشان می‌دهد که جواب CPLEX یا بهینه است یا کیفیت جواب به دست آمده توسط CPLEX بهتر از GA است. در این حالت اگر PQI صفر باشد نشان‌دهنده این است که هر دو روش دقیق و فراابتکاری به یک جواب یکسان از نظر تابع هدف مساله دست یافته‌اند.



شکل ۱۱- روند همگرایی الگوریتم GA پیشنهادی در مطالعه عددی مساله DRCFJSP.
Figure 11- Convergence trend of the proposed GA algorithm in DRSFJSP problem.

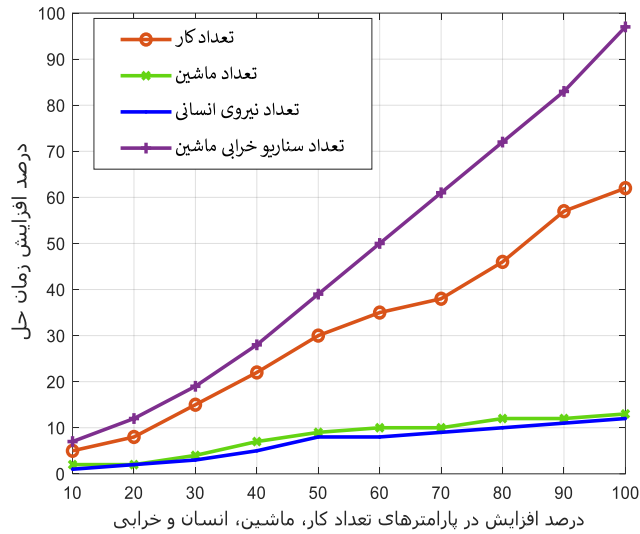
Table 10- Comparing optimal solution of the GAMS and GA on the problem instances.

شماره مساله	مشخصات مسایل نمونه				مقدار تابع هدف			زمان حل (Sec)		معیار مقایسه	
	M	H	$ \Xi $	Z_{CPLEX}	Z_{GA}		$Time_{CPLEX}$	$Time_{GA}$	PQI(%)	PTI (%)	
					بهترین	متوسط					
1	4	2	2	3	9.312	9.312	9.312	77.51	66.12	0.00	14.69
2	5	3	3	6	12.431	12.431	12.431	152.43	123.12	0.00	19.22
3	6	2	2	8	14.693	14.942	15.072	229.03	151.31	-2.58	33.93
4	6	3	3	10	17.133	17.133	17.133	301.43	169.54	0.00	43.75
5	7	2	2	12	20.431	21.011	21.541	394.12	201.43	-5.43	48.89
6	7	3	2	15	22.454	22.454	22.454	472.17	232.54	0.00	50.75
7	8	3	3	17	25.751	25.751	25.751	502.01	258.10	0.00	48.58
8	8	4	3	20	28.954	29.203	29.875	656.43	393.45	-3.18	40.06
9	9	4	3	22	29.093	30.003	30.521	667.12	400.19	-4.90	40.01
10	9	4	4	25	29.641	30.721	31.073	705.54	423.49	-4.83	39.97
11	9	5	4	30	31.043	32.124	32.950	731.70	441.05	-6.14	39.72
12	10	4	4	40	45.451	46.16	47.43	810.21	490.43	-4.35	39.46
13	10	5	5	45	52.863	53.53	55.12	852.94	500.67	-4.26	41.30
14	10	6	5	50	73.67	74.03	75.37	926.27	563.12	-2.31	39.21
15	12	6	5	55	76.543	76.91	77.19	1420.12	817.56	-0.84	42.43
16	14	6	5	60	87.549	87.55	87.55	3394.43	1675.15	0	50.65
17	16	7	5	65	92.454	92.95	93.86	5902.12	2117.09	-1.52	64.13
18	18	7	6	70	104.547	101.14	103.64	7200	3399.84	0.87	52.78
19	20	7	6	75	120.043	116.43	118.46	7200	2930.40	1.32	59.30
20	23	8	7	80	187.323	178.12	179.25	7200	2295.36	4.31	68.12
21	26	8	7	85	N/A	197.01	198.12	7200	2456.05	-	-
22	29	9	8	90	N/A	210.12	213.31	7200	2832.13	-	-
23	32	9	8	95	N/A	232.32	237.00	7200	3190.93	-	-
24	35	10	8	100	N/A	261.43	264.03	7200	3201.12	-	-
25	38	12	9	100	N/A	281.54	284.43	7200	3423.43	-	-
26	40	14	10	100	N/A	308.61	311.54	7200	3631.40	-	-
27	43	16	12	110	N/A	319.72	323.12	7200	3521.67	-	-
28	45	18	14	110	N/A	371.69	375.49	7200	3951.94	-	-
29	48	20	16	110	N/A	399.90	402.93	7200	4103.03	-	-
30	50	22	18	120	N/A	505.12	508.08	7200	4421.51	-	-



در جدول ۱۰، نتایج به دست آمده از نرم افزار GAMS و الگوریتم GA بر روی مسایل نمونه گزارش شده است. ستون‌های ۲، ۳، و ۴ این جدول مشخصات مساله را نشان می‌دهند. ستون ۵ اندازه مجموعه سناریوهای خرابی را مشخص می‌نماید. در ستون ۶ بهترین جواب به دست آمده از نرم افزار GAMS با توجه به محدودیت زمانی ۷۲۰۰ ثانیه نمایش داده شده است. همچنین در ستون ۷ و ۸ بهترین جواب و میانگین جواب‌های به دست آمده از الگوریتم GA با توجه به ۱۰ تکرار الگوریتم بیان شده است. در ستون‌های ۹ و ۱۰ زمان‌های دستیابی به جواب‌های مربوط به نرم افزار GAMS و الگوریتم GA نمایش داده شده است. همچنین در ستون‌های ۱۱ و ۱۲ مقادیر معیارهای PQI و PTI محاسبه شده است. نتایج به دست آمده از این ۲ ستون در ابعاد کوچک و متوسط مساله نشان می‌دهد که PQI در ابتدا مقدار عددی منفی یا صفر را اختیار کرده است و مقدار PTI هم مثبت می‌باشد؛ اما با افزایش ابعاد مساله مقدار PQI به سمت مقادیر مثبت میل پیدا کرده است و مقادیر PTI هم با نرخ صعودی همچنان مثبت باقی مانده است که نمایانگر کیفیت جواب بهتر و زمان حل مناسب مسایل توسط الگوریتم GA نسبت به روش دقیق به کار گرفته شده است. از آنجایی که CPLEX از مساله ۲۱ به بعد نمی‌تواند یک جواب موجه مناسب را در یک زمان منطقی پیدا کند. مقایسه نتایج روش دقیق و فراابتکاری از این طریق متوقف می‌شود. همان‌طور که در جدول ۱۰ مشخص می‌باشد مشاهده می‌کنیم که نرم افزار GAMS توانسته است برای مساله ۲۱ به بعد به جوابی مناسب در زمان تعیین شده دست پیدا کند و این در صورتی است که الگوریتم GA توانسته برای این مسایل به یک جواب موجه قابل اطمینان برسد. بنابراین به این نتیجه می‌رسیم که روش CPLEX نرم افزار GAMS به عنوان یک روش دقیق توانایی حل و بهینه‌سازی مسایل در ابعاد بزرگ را در یک زمان منطقی ندارد. لذا الگوریتم GA پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش CPLEX برای حل ابعاد بزرگ مساله مورد نظر مورداستفاده قرار گیرد.

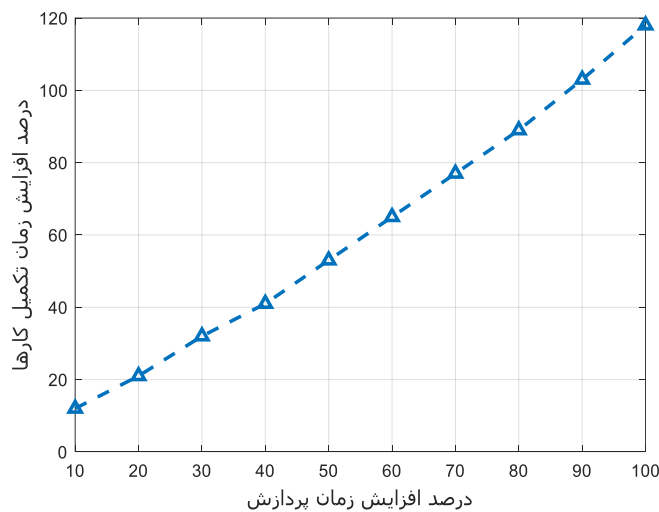
در این بخش، به تحلیل حساسیت نتایج مدل نسبت به پارامترهای مساله و همچنین تحلیل پیچیدگی مساله نسبت به پارامترهای آن پرداخته می‌شود. همان‌طور که در مدل‌سازی مساله مشاهده می‌شود، تعداد کارها (I)، تعداد ماشین‌ها (K)، تعداد نیروی انسانی (L) و از همه مهم‌تر تعداد سناریوهای خرابی ماشین‌ها (Ξ) از جمله پارامترهای مهم روی پیچیدگی مساله هستند که زمان حل مساله را بشدت تحت تاثیر قرار می‌دهند.



شکل ۱۲- تحلیل پیچیدگی (درصد افزایش زمان حل مساله) نسبت به پارامترهای تعداد کار، ماشین، انسان و خرابی.

Figure 12- Complexity analysis (percentage of run-time increasing) respect I, K, L, Ξ .

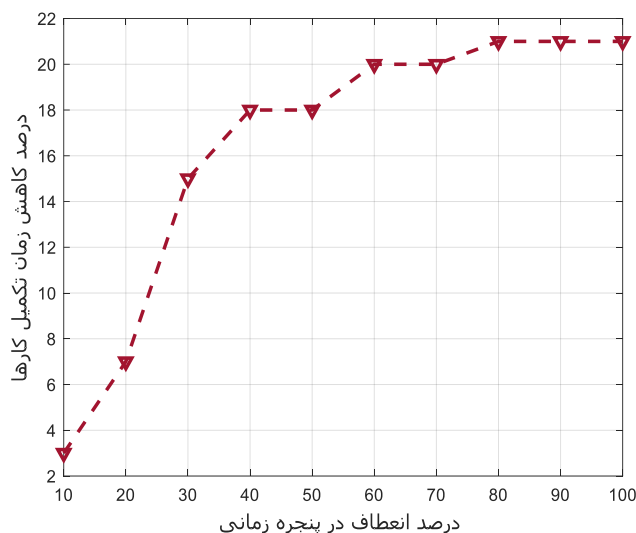
در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که افزایش مقدار این پارامتر به چه صورت موجب افزایش زمان حل مساله شده است. همچنین علاوه بر آن که در بخش ۱ تا ۶ تحلیل کاملی روی پارامترهای استواری مدل صورت پذیرفت، در اینجا نیز به تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدت‌زمان پردازش کارها، مدت‌زمان تعمیر ماشین‌های خراب‌شده و انعطاف در پنجره زمانی تحویل سفارش‌ها، پرداخته می‌شود که نتایج آن به ترتیب در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ آورده شده است.



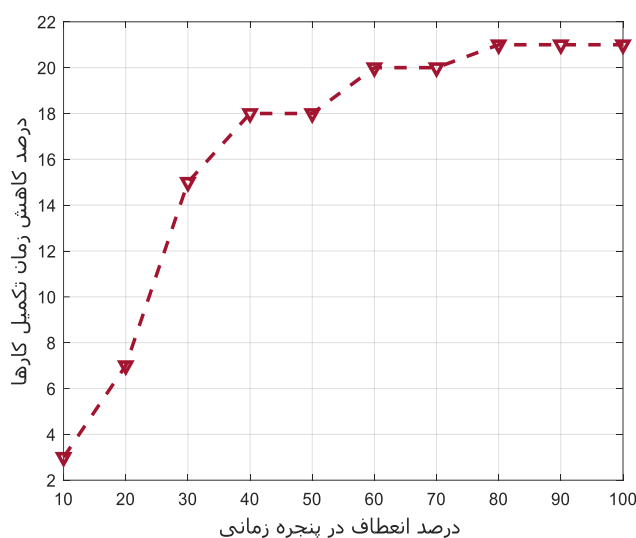
شکل ۱۳- تحلیل حساسیت مقدار makespan نسبت به پارامتر مدت‌زمان پردازش.

Figure 13- Sensitivity analysis of makespan respect to process time.





شکل ۱۴- تحلیل حساسیت مقدار makespan نسبت به پارامتر مدت زمان تعمیر.
Figure 14- Sensitivity analysis of makespan respect to repair time.



شکل ۱۵- تحلیل حساسیت مقدار makespan نسبت به انعطاف (باز کردن) پنجره زمانی.
Figure 15- Sensitivity analysis of makespan respect to time window flexibility.

در شکل ۱۲ ملاحظه می شود که هر درصد افزایش در پارامترهای تعداد کارها (I)، تعداد ماشین ها (K)، تعداد نیروی انسانی (L) و تعداد سناریوهای خرابی ماشین (E) چند درصد موجب افزایش زمان حل مساله $DRCFJSP$ مورد نظر این تحقیق می شود. ملاحظه می شود که پارامتر E عامل موثرتری در پیچیدگی مساله است و افزایش آن موجب پیچیدگی بیشتر مساله و رشد زیادی در زمان حل مساله می شود.

در شکل های ۱۳، ۱۴ و ۱۵، درصد تغییر مقدار makespan نسبت به درصد تغییرات در پارامترهای مدت زمان پردازش کارها، مدت زمان تعمیر ماشین های خراب شده و میزان انعطاف در پنجره زمانی تحویل سفارش ها آورده شده است. ملاحظه می شود که افزایش مدت زمان پردازش کارها و مدت زمان تعمیر ماشین ها، هر دو موجب افزایش در makespan می شود. هرچند که تاثیر مدت زمان پردازش ماشین ها تاثیر بیشتری دارد. همچنین، همان طور که در شکل ۱۵ ملاحظه می شود، افزایش انعطاف در پنجره زمانی موعد تحویل سفارش مشتریان موجب می شود بتوان انعطاف بیشتری در برنامه زمانی کارها و نیروی انسانی ایجاد کرد و بنابراین زمان کل تکمیل کارها کاهش می یابد. این نکته نیز باید اشاره شود که انعطاف در پنجره زمانی تحویل کارها از مقداری به بعد، هیچ تاثیر خاصی در مقدار makespan ندارد.

در بسیاری از شرکت‌ها و صنایع تولیدی و خدماتی، مساله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی منابع فیزیکی و نیروی انسانی برای انجام بهینه سفارش‌ها/خدمات، قابل‌بیان به‌صورت یک مساله *JSP* است که بعضاً به حالت خاص آن یعنی *FJSP* بیان می‌شود. در صورتی که منابع دوگانه هم‌زمان مورد استفاده قرار گیرند این مساله به‌صورت *DRCFJSP* بیان می‌شود که در این تحقیق این مبحث مورد توجه قرار گرفته است. حل بهینه مساله مذکور برای شرکت‌های مختلف موجب می‌شود که با کمترین اتلاف منابع (انسان و ماشین) سفارش‌ها در کمترین زمان و با کمینه هزینه انجام شود و کارایی شرکت و مزیت رقابتی آن افزایش یابد. یکی از چالش‌های مهمی که در حل این مساله باید مورد توجه قرار گیرد، خرابی احتمالی ماشین‌ها و اختلال در سیستم تولیدی است. اگر در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ماشین‌ها به خرابی احتمالی آن‌ها توجه نشود، ممکن است یک برنامه زمانی و تخصیص ماشین به کارها ایجاد شود که در عمل تاب‌آوری و استواری بسیاری پایینی داشته باشد و با خرابی یک ماشین، برنامه از حالت بهینه بسیار فاصله بگیرد. این در صورتی است که در این تحقیق، مبتنی بر مدل *RSSP* پیشنهادی، خرابی‌های محتمل برای ماشین‌ها نیز در ابتدا مورد توجه قرار می‌گیرد و برنامه زمانی انجام کارها و واگذاری آن‌ها به ماشین‌ها با در نظر گرفتن خرابی احتمالی آن‌ها صورت می‌پذیرد. نتایج عددی اجرای مدل پیشنهادی نشان می‌دهد در صورتی که خرابی احتمالی ماشین‌ها در ابتدای دوره برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گیرد، زمان‌بندی ایجاد شده با توجه مدل *RSSP* از استواری قابل قبولی برخوردار است و نسبت به مدلی که خرابی‌های احتمالی را در نظر نمی‌گیرد، هم از منظر متوسط عملکرد سیستم و هم از منظر عملکرد سیستم در حالت بدبینانه، دارای نتایج بهتری است.

۷- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات صورت گرفته در زمینه زمان‌بندی سیستم‌های تولیدی، ملاحظه می‌شود که در نظر گرفتن هم‌زمان منابع انسان و ماشین، پنجره زمانی موعد تحویل سفارش‌ها و از همه مهم‌تر، در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها و اختلال در سیستم تولیدی، از جمله مهم ترین مواردی هستند که در توسعه مدل‌های کلاسیک *FJSP* می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، مساله *DRCFJSP* تحت خرابی ماشین‌ها و محدودیت پنجره زمانی برای تحویل سفارش‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل مساله *DRCFJSP* مورد نظر تحقیق، ابتدا فرض کرده‌ایم که خرابی تجهیزات به‌صورت یک مجموعه متناهی از اختلالات ممکن در کارگاه در نظر گرفته می‌شود و شانس وقوع هر سناریو خرابی ماشین از پیش برآورد شده است. سپس به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار (*RSSP*) پرداخته شده است که در آن، اولاً متوسط *makespan* تحت سناریوهای مختلف کمینه می‌شود، ثانیاً مقدار *makespan* در حالت بدبینانه حداقل می‌شود و ثالثاً استواری مدل از منظر کنترل پنجره زمانی موعدهای تحویل سفارش‌ها حفظ می‌شود. همچنین در این مدل کمینه‌سازی واریانس مقدار تابع هدف مورد توجه قرار می‌گیرد. رویکرد *RSSP* پیشنهادی این تحقیق، به‌صورت یک مدل *MILP* بیان شده است که قابل حل توسط *CPLEX* در ابعاد کوچک و متوسط است. با این حال، از آنجاکه مساله *DRCFJSP* یک مساله *NP-hard* است، یک روش فراابتکاری *GA* برای مسایل در مقیاس‌های بزرگ پیشنهاد شده است.

این تحقیق از نوع *FJSP* است. همچنین از منظر منابع در زمان‌بندی این تحقیق از نوع *DRC* است. از منظر پرداختن به خرابی ماشین‌ها، این تحقیق خرابی ماشین‌ها و به‌عبارت‌دیگر اختلال در کارگاه را به‌صورت سناریوهای تصادفی در نظر می‌گیرد.

در حل یک مطالعه موردی با استفاده از رویکرد *RSSP* پیشنهادی و مقایسه آن با رویکرد اسمی (که خرابی ماشین‌ها را در نظر نمی‌گیرد)، ملاحظه می‌شود که اول پاسخ رویکرد *RSSP* پیشنهادی هم از منظر متوسط عملکرد و هم از منظر عملکرد در حالت بدبینانه نزدیک به ۲۰٪ پاسخ رویکرد اسمی را بهبود می‌دهد، دوم نوسان بهینگی در رویکردهای استوار پیشنهادی بسیار کمتر از رویکرد مقدار اسمی است. نهایتاً، در ارزیابی روش‌ها ملاحظه می‌شود که *CPLEX* می‌تواند مدل پیشنهادی *RSSP* را برای اندازه‌های کوچک و متوسط از مساله *DRCFJSP* حل کند. در این اندازه‌ها عملکرد *GA* به این صورت است که *PQI* دارای مقادیر منفی کوچک است و مقدار *PTI* هم مثبت است که این امر به این معنی است که جواب *GA* نزدیک به جواب روش دقیق به کار گرفته شده در نرم‌افزار گمز بوده و پاسخ آن هم از نظر زمانی سریع‌تر حاصل می‌شود. با این حال در ابعاد بزرگ‌تر مساله یعنی مسایل (۱۸) تا (۲۰)، مقادیر *PQI* و *PTI* مثبت است که نشان از برتری الگوریتم *GA* از نظر کیفیت جواب و سرعت پاسخ‌دهی دارد و یا اینکه *CPLEX* نمی‌تواند از مساله ۲۱ به بعد یک جواب شدنی را در یک زمان منطقی پیدا کند که در این حالت امکان مقایسه دو روش متوقف می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان داد



الگوریتم *GA* پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای روش *CPLEX* برای حل ابعاد بزرگ مساله موردنظر مورد استفاده قرار گیرد.

توافقنامه نویسندگان

همه نویسندگان، نسخه نهایی ارسال شده را مشاهده و تایید کرده‌اند. آن‌ها تضمین می‌کنند که مقاله، اثر اصلی نویسندگان بوده، قبلاً چاپ نشده و در حال حاضر تحت انتشار نمی‌باشد.



منابع مالی

هیچ‌گونه بودجه یا کمک‌هزینه تحقیق در طی مطالعه مذکور دریافت نشده است.

تعارض با منافع

کلیه نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد.

منابع

- [1] Ahmadi, E., Zandieh, M., Farrokh, M., & Emami, S. M. (2016). A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms. *Computers & operations research*, 73, 56-66.
- [2] Andrade-Pineda, J. L., Canca, D., Gonzalez-R, P. L., & Calle, M. (2019). Scheduling a dual-resource flexible job shop with makespan and due date-related criteria. *Annals of operations research*, 291, 5-35. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03196-0>
- [3] Applegate, D., & Cook, W. (1991). A computational study of the job-shop scheduling problem. *ORSA journal on computing*, 3(2), 149-156.
- [4] Buddala, R., & Mahapatra, S. S. (2019). Two-stage teaching-learning-based optimization method for flexible job-shop scheduling under machine breakdown. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 100(5), 1419-1432.
- [5] Chen, R., Yang, B., Li, S., & Wang, S. (2020). A self-learning genetic algorithm based on reinforcement learning for flexible job-shop scheduling problem. *Computers & industrial engineering*, 149, 106778. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106778>
- [6] Dhiflaoui, M., Nouri, H. E., & Driss, O. B. (2018). Dual-resource constraints in classical and flexible job shop problems: a state-of-the-art review. *Procedia computer science*, 126, 1507-1515.
- [7] Fattahi, P., Mehrabad, M. S., & Jolai, F. (2007). Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of intelligent manufacturing*, 18(3), 331-342.
- [8] Felan, J. T., & Fry, T. D. (2001). Multi-level heterogeneous worker flexibility in a dual resource constrained (DRC) job-shop. *International journal of production research*, 39(14), 3041-3059.
- [9] Gong, G., Chiong, R., Deng, Q., & Gong, X. (2020). A hybrid artificial bee colony algorithm for flexible job shop scheduling with worker flexibility. *International journal of production research*, 58(14), 4406-4420.
- [10] Kress, D., Müller, D., & Nossack, J. (2019). A worker constrained flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times. *OR spectrum*, 41(1), 179-217.
- [11] Lang, M., & Li, H. (2011). Research on dual-resource multi-objective flexible job shop scheduling under uncertainty. *2011 2nd international conference on artificial intelligence, management science and electronic commerce (AIMSEC)* (pp. 1375-1378). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6010821>
- [12] Lei, D., & Guo, X. (2014). Variable neighbourhood search for dual-resource constrained flexible job shop scheduling. *International journal of production research*, 52(9), 2519-2529.
- [13] Meng, L., Zhang, C., Ren, Y., Zhang, B., & Lv, C. (2020). Mixed-integer linear programming and constraint programming formulations for solving distributed flexible job shop scheduling problem. *Computers & industrial engineering*, 142, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106347>
- [14] Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
- [15] Nouri, M., Bekrar, A., Jemai, A., Trentesaux, D., Ammari, A. C., & Niar, S. (2017). Two stage particle swarm optimization to solve the flexible job shop predictive scheduling problem considering possible machine breakdowns. *Computers & industrial engineering*, 112, 595-606.
- [16] Sajadi, S. M., Alizadeh, A., Zandieh, M., & Tavan, F. (2019). Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns: multi-objectives genetic algorithm approach. *International journal of mathematics in operational research*, 14(2), 268-289.



- [17] Salehi, F., Mahootchi, M., & Hussein, S. M. M. (2019). Developing a robust stochastic model for designing a blood supply chain network in a crisis: a possible earthquake in Tehran. *Annals of operations research*, 283(1), 679-703.
- [18] Shen, L., Dauzère-Pérès, S., & Neufeld, J. S. (2018). Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times. *European journal of operational research*, 265(2), 503-516.
- [19] Sun, D.-h., He, W., Zheng, L.-j., & Liao, X.-y. (2014). Scheduling flexible job shop problem subject to machine breakdown with game theory. *International journal of production research*, 52(13), 3858-3876.
- [20] Sun, J., Zhang, G., Lu, J., & Zhang, W. (2021). A hybrid many-objective evolutionary algorithm for flexible job-shop scheduling problem with transportation and setup times. *Computers & operations research*, 132, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105263>
- [21] Xie, J., Gao, L., Peng, K., Li, X., & Li, H. (2019). Review on flexible job shop scheduling. *IET collaborative intelligent manufacturing*, 1(3), 67-77.
- [22] Xiong, J., Xing, L. N., & Chen, Y. W. (2013). Robust scheduling for multi-objective flexible job-shop problems with random machine breakdowns. *International journal of production economics*, 141(1), 112-126.
- [23] Yazdani, M., Zandieh, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Jolai, F. (2015). Two meta-heuristic algorithms for the dual-resource constrained flexible job-shop scheduling problem. *Scientia Iranica*, 22(3), 1242-1257.
- [24] Yu, C.-S., & Li, H.-L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, 64(1-3), 385-397.
- [25] Zandieh, M., Khatami, A. R., & Rahmati, S. H. A. (2017). Flexible job shop scheduling under condition-based maintenance: improved version of imperialist competitive algorithm. *Applied soft computing*, 58, 449-464.
- [26] Zhang, G., Hu, Y., Sun, J., & Zhang, W. (2020). An improved genetic algorithm for the flexible job shop scheduling problem with multiple time constraints. *Swarm and evolutionary computation*, 54, 100664. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100664>
- [27] Zhang, G., Sun, J., Liu, X., Wang, G., & Yang, Y. (2019). Solving flexible job shop scheduling problems with transportation time based on improved genetic algorithm. *Mathematical biosciences and engineering*, 16(3), 1334-1347.