*Industrial Management Perspective*

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 10, Serial Number 38, Summer 2020, Pages 9-32 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.10.2.9

# A Simulation Based Genetic Algorithm for Flowshop Scheduling Problem Considering Energy Cost under Uncertainty

**Mina Faraji Amiri*, Javad Behnamian****

## Abstract

A flowshop problem with objective functions of minimizing makespan and energy cost has been investigated. Reducing production costs is one of the goals that industries always have in mind. Increasing public awareness about the energy issues creates a new attitude toward minimizing energy costs. In order to make the problem more compatible with the real-world conditions, the problem is considered under uncertainty. An existing research gap inspired this study. It is assumed that machines can use the three slow, normal and fast speeds to process jobs. At high speeds, consumption rate increases and completion time decreases, and vice versa. The difference in machine processing speeds yields different and contradictory values in the objective functions. Therefore, a method should be proposed in which, in addition to the order of jobs, the speed of machines could be determined. A mathematical model is presented, and then a simulation-based genetic algorithm is used to solve the problem on a large scale. Simulation is used for each evaluation of the objective function in the genetic algorithm to consider the uncertainty of processing times. Due to the stochastic processing time, the expected value model is used to deal with uncertainty. The computational results indicate that the algorithm and approach show a good performance.

**Keywords*: Green Scheduling; Stochastic Scheduling; Flowshop Problem; Simulation Based Genetic Algorithm; Uncertainty**.

Received: Dec. 11, 2019, Accepted: April 20, 2020.
* M.Sc., Bu-Ali Sina University.
** Associate Professor, Bu-Ali Sina University (Corresponding Author).
E-mail: behnamian@basu.ac.ir

***چشم‌انداز مدیریت صنعتی***

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال دهم، شماره ۳۸، تابستان ۱۳۹۹، ص‌ص ۹ – ۳۲ (**نوع مقاله: پژوهشی**)

DOI: 10.52547/JIMP.10.2.9

# الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی مبنا برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی با درنظرگرفتن هزینه انرژی تحت شرایط عدم‌قطعیت

**مینا فرجی امیری*، جواد بهنامیان****

**چکیده**

یک مسئله جریان کارگاهی با اهداف حداقل‌سازی زمان تکمیل و هزینه انرژی بررسی شده است. کاهش هزینه‌های تولید از اهدافی است که صنایع همواره در نظر دارند. بالارفتن آگاهی عمومی نسبت به مسئله انرژی باعث ایجاد نگرشی جدید در راستای کاهش هزینه انرژی شده است. برای نزدیک‌ترشدن مسئله به دنیای واقعی، مسئله تحت عدم‌قطعیت بررسی شده است. شکاف پژوهشی موجود الهام‌بخش پژوهش بوده است. فرض شده که ماشین‌ها می‌توانند از سه سرعت آهسته، نرمال و سریع برای پردازش کارها استفاده کنند. در سرعت بالا میزان مصرف افزایش یافته و زمان تکمیل کاهش می‌یابد و برعکس. این تفاوت در سرعت به ایجاد مقادیر متفاوت و متضاد در تابع اهداف منجر می‌شود؛ بنابراین باید راهکاری پیشنهاد شود که علاوه بر ترتیب کار، سرعت دستگاه‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم به‌صورت بهینه مشخص شوند. یک مدل ریاضی ارائه شده و سپس از الگوریتم ژنتیک مبتنی برشبیه‌سازی برای حل مسئله در ابعاد بزرگ استفاده شده است. به‌ازای هربار ارزیابی تابع هدف در الگوریتم از شبیه‌سازی استفاده شده است تا عدم‌قطعیت موجود در پارامتر زمان پردازش درنظر گرفته شود. با توجه به تصادفی‌بودن زمان پردازش، از مدل ارزش انتظاری برای مقابله با عدم‌قطعیت استفاده شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم و رویکرد حل پیشنهادی، عملکرد خوبی دارند.

**کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی سبز؛ زمان‌بندی احتمالی؛ جریان کارگاهی؛ الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی مبنا؛ عدم‌قطعیت.**

---

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱.

* کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا.

** دانشیار، دانشگاه بوعلی سینا (نویسنده مسئول).

E-mail: Behnamian@basu.ac.ir

## ۱. مقدمه

مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی، مسئله شناخته‌شده‌ای است که در زمان وجود جریان پیوسته‌ای از کارها توسط چند ماشین مطرح می‌شود. این مسئله از دو قسمت اصلی تشکیل شده است: گروهی از $m$ ماشین و مجموعه‌ای از $n$ کار که باید توسط ماشین‌ها پردازش شوند. محدودیت‌های مربوط به فناوری باعث ایجاد صف می‌شود. هر کار با یک ترتیب یکسان از همه ماشین‌ها عبور می‌کند که این مسئله با عنوان «مسئله جریان کارگاهی جایگشتی» شناخته می‌شود. مقصود تعیین توالی مناسب یا ترتیبی یکسان برای انجام همه کارها بر روی تعدادی ماشین با ترتیب ازقبل‌تعین‌شده است تا بتوان اهداف ازپیش‌تعیین‌شده و مدنظر را برآورده کرد. این مسئله با بیش از دو ماشین در کلاس مسائل NP-hard قرار دارد [۱۷]. انرژی از مهم‌ترین منابع برای تولید محسوب می‌شود. بنا بر اعلام «آژانس بین‌المللی انرژی[1]» ($IEA$)، صنعت مسئول استفاده ۳۸ درصد از کل مصرف انرژی در سال ۲۰۱۶ در جهان بوده است و نقش اساسی در تأثیرات محیطی دارد [۲۳].

ازآنجاکه هزینه یکی از اولویت‌های مهم مدیران است، افزایش قیمت انرژی که عامل مهم مرتبط با افزایش قیمت تولید در واحدهای صنعتی است، تصمیم‌گیرندگان را تشویق به درنظرگرفتن آن کرده است. کاهش هزینه انرژی از گام‌های تأثیرگذاری است که در این رابطه می‌توان برداشت. مصرف انرژی و هزینه انرژی با یکدیگر ارتباط دارند؛ بنابراین با کاهش هزینه‌های انرژی به‌طور غیرمستقیم مصرف انرژی نیز کاهش می‌یابد و با توجه به تجدیدناپذیربودن و احتمال کمبود منابع انرژی، این امر بسیار حائز اهمیت است. میزان آلودگی و خروج دی‌اکسید کربن نیز با مصرف انرژی ارتباط مستقیم دارد و با کاهش آن می‌توان منبع مهم آلودگی را کاهش داد. درواقع با کاهش هزینه انرژی، اهداف دیگری مانند کاهش مصرف و کاهش آلودگی نیز حاصل می‌شود. تحت فشار تغییرات آب‌وهوایی، افزایش هزینه‌های انرژی و رشد نگرانی‌های مرتبط با امنیت انرژی، واحدهای تولیدی هرچه بیشتر به مسئله انرژی علاقه‌مند شده‌اند و تولید پایدار جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. نگهدارندگی به این معنا است که بدون به‌مخاطره‌انداختن توانایی نسل‌های بعدی برای رفع نیازهایشان، نیازهای نسل فعلی برطرف شود. نگهدارندگی تنها درباره محیط‌زیست نیست؛ علاوه بر منابع طبیعی، منابع اقتصادی و اجتماعی نیز از نیازهای بشر هستند. سه ستون نگهدارندگی محیط‌زیست، اجتماع و اقتصاد است. نگهدارندگی فرض می‌کند که منابع محدود است و باید محافظه‌کارانه و عاقلانه با درنظرگرفتن اولویت‌هایی در درازمدت و بررسی نتایج راه‌کارهای مختلف، استفاده شود. تولید پایدار به‌معنای ارائه کالا و خدمات به‌نحوی است که باعث آلودگی نشود، از منابع و انرژی محافظت کند، از نظر اقتصادی شدنی باشد و برای مصرف‌کنندگان، کارگران و جامعه

1. International Energy Agency

امن و سالم باشد. تولید پایدار برای محیط‌زیست، جامعه، ارگان‌ها و کارمندان تماماً مزیت است. ازآنجاکه در بین مسائل مطرح در مفاهیم نگهدارندگی، محیط‌زیست و به‌خصوص منابع و انرژی از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردارند، بیشتر تلاش‌های صورت‌گرفته در این زمینه در جهت بهبود ابزار و ماشین‌ها به‌منظور کاهش اتلاف انرژی بوده است که این امر خود مستلزم صرف هزینه است. تنها در سال‌های اخیر به مسئله انرژی از بُعد استراتژی‌های عملی و مدیریتی مختلف، مانند مدیریت هوشیارتر، زمان‌بندی شروع به کار و بیکاری ماشین‌آلات و غیره نگریسته شده است. این پژوهش در تلاش است تا با استفاده از استراتژی‌های مدیریتی و صرف کمترین هزینه ممکن در مسئله زمان‌بندی به هدف کاهش هزینه انرژی دست یابد.

در مسائل زمان‌بندی تولید یک فرض کلاسیک این است که زمان پردازش هر کار بر روی هر ماشین متفاوت، اما ازقبل‌شناخته‌شده (قطعی) است. در دنیای واقعی، مسائل همواره با عدم‌قطعیت مواجهه هستند. محیط‌های تولیدی در دنیای واقعی متحمل عدم‌قطعیت‌های بسیار و متفاوتی شامل تغییرات زمان پردازش، خرابی ماشین، تغییر در زمان‌های دردسترس، سفارش‌های باعجله و متوقف‌شدن کارها می‌شوند. درنظرگرفتن عدم‌قطعیت باعث نزدیک‌شدن شرایط مسئله به شرایط واقعی و راه‌اندازی موفقیت‌آمیز سیستم تولید می‌شود. این مسئله، انگیزه بررسی مسئله تحت عدم‌قطعیت بود. فرض بر این است که زمان‌های پردازش غیرقطعی است و از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند.

در این پژوهش یک مسئله جریان کارگاهی جایگشتی و تابع هدف حداقل‌سازی بیشترین زمان تکمیل و هزینه انرژی در قالب بهینه‌سازی دوهدفه در شرایط عدم‌قطعیت در نظر گرفته شده است. در ادامه پس از مروری بر مبانی نظری موضوع، به بیان مسئله و مدل‌سازی آن پرداخته خواهد شد. در ادامه با توصیف عدم‌قطعیت موجود در مسئله و نحوه برخورد با آن و با توجه به پیچیدگی مسئله، الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله ارائه می‌شود. درنهایت نیز با استفاده از چندین مسئله نمونه و معیار عملکردی متفاوت اعتبارسنجی برای روش حل پیشنهادی ارائه خواهد شد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مبانی نظری این موضوع در دو بخش زمان‌بندی پایدار و زمان‌بندی احتمالی بررسی شده است.

**زمان‌بندی پایدار.** از پژوهش‌هایی که اخیراً درباره مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی با درنظرداشتن معیارهای پایداری صورت گرفته، است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: شولز[1] (۲۰۱۸)، یک مدل ریاضی برای حداقل‌سازی کل هزینه تولیدات داخلی و خارجی شامل هزینه حمل‌ونقل و

1. Schulz

انرژی برای یک مسئله جریان کارگاهی ترکیبی در اندازه کوچک ارائه کرد. او از یک الگوریتم ژنتیک بر مبنای ماتریکس کدگذاری‌شده برای حل این مسئله بهره گرفت. از راه‌حل‌های این پژوهش می‌توان به استفاده از زمان‌های بیکاری اشاره کرد [۱۶]. ژای و همکاران [۱](۲۰۱۷)، یک روش زمان‌بندی پویا برای حداقل‌سازی هزینه الکتریسیته مسئله جریان کارگاهی که از انرژی تجدیدپذیر توربین‌های بادی استفاده می‌کند، ارائه کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی برای این مسئله ارائه دادند که در آن هزینه الکتریسیته و قدرت باد هر ساعت به‌روزرسانی می‌شود [۲۰]. مسمودی و همکاران [۲] (۲۰۱۶)، یک مسئله جریان کارگاهی ظرفیت‌دار را با ملاحظات انرژی با هدف حداقل‌سازی هزینه کل در نظر گرفتند. آن‌ها افق برنامه‌ریزی را به دوره‌های زمانی زیادی تقسیم کردند که هر یک از این دوره‌ها با طول زمان، تقاضای خروجی و قیمت الکتریسیته مشخص می‌شود. آن‌ها از دو الگوریتم رهاسازی و ثابت‌سازی برای حل مسئله استفاده کردند [۱].

گاهم و همکاران [۳] (۲۰۱۶)، پژوهش‌های گسترده‌ای درباره‌ی زمان‌بندی پایدار انجام دادند و پژوهشی مروری با موضوع «زمان‌بندی صرفه‌جو در انرژی در کارخانه‌های تولیدی: مرور و چارچوبی برای پژوهش» منتشر کردند. هدف ارائه این پژوهش، بهبود یک چارچوب پژوهش برای رویکرد زمان‌بندی صرفه‌جو در انرژی بود [۸]. منصوری و همکاران [۴] (۲۰۱۶)، برای یک مسئله جریان کارگاهی دوماشینه یک مدل ریاضی عددصحیح چندهدفه با زمان آماده‌سازی وابسته به توالی با دو هدف حداقل‌سازی زمان تکمیل و کل مصرف انرژی ارائه کردند. مسئله موردبررسی آن‌ها قطعی بود. در پژوهش آن‌ها ماشین‌ها دارای سرعت پردازش مختلف بودند. برای حل، یک الگوریتم ابتکاری سازنده ارائه شد و دو حد بالا و پایین برای مسئله به‌دست آمد [۱۴].

تانگ و همکاران [۵] (۲۰۱۶)، به زمان‌بندی پویای صرفه‌جو در انرژی برای مسئله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته تجمع ذرات پرداختند. ایده آن‌ها برای انرژی تقسیم‌بندی مصرف انرژی در سه زمان پردازش، شروع و آمادگی بود؛ به‌طوری‌که زمان آمادگی کاهش یابد [۱۸]. دینگ و همکاران [۶] (۲۰۱۶)، مسئله قطعی زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی را با اهداف حداقل‌سازی اثرات کربن و بیشترین زمان تکمیل بررسی کردند. در این پژوهش، ماشین‌ها دارای سرعت و قدرت متفاوت هستند که موجب ایجاد میزان متغیری از کربن و زمان تکمیل می‌شوند. این پژوهشگران برای حل مسئله مطرح‌شده یک الگوریتم چندهدفه NAH و همچنین یک الگوریتم چندهدفه تغییریافته جست‌وجوی حریصانه ارائه کردند [۵].

1. Zhai, Y. et al.
2. Masmoudi, O. et al.
3. Gahm, C. et al.
4. Mansouri, S.A. et al.
5. Tang, D. et al.
6. Ding, J.Y. et al.

ژانگ و همکاران[1] (۲۰۱۴)، یک فرمول‌بندی ریاضی با اهدف متضاد حداقل‌سازی زمان درگردش و هزینه برق و اثرات کربن برای مسئله جریان کارگاهی ارائه دادند. آن‌ها از تعرفه‌های زمان مصرف به نحوی که توان تولیدی به خطر نیفتد، استفاده کردند. مسئله در حالت قطعی بررسی شده است [۲۲]. لو و همکاران[2] (۲۰۱۳)، در پژوهشی با عنوان «زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی با هدف اصلی بهبود کارایی تولید و درنظرگرفتن هزینه الکتریسیته مصرفی ماشین»، از تعرفه‌ی زمان مصرف برای درنظرگرفتن معیار مربوط به انرژی استفاده کردند. آن‌ها از یک الگوریتم جدید چندهدفه کلونی مورچگان با اهداف بیشترین زمان تکمیل و هزینه الکتریسیته برای حل مسئله بهره گرفتند. مسئله این پژوهش قطعی بود [۱۳]. خلاصه مرور مبانی نظری در موضوع زمان‌بندی با درنظرگرفتن انرژی در جدول ۱، آمده است.

*جدول ۱. خلاصه مرور مبانی نظری در موضوع زمان‌بندی با درنظرگرفتن انرژی*

| شماره مقاله | مدل تولیدی | تابع هدف ها | رویکرد انرژی | روش حل | توضیحات |
|---|---|---|---|---|---|
| [۱۶] | جریان کارگاهی ترکیبی | کاهش تمام هزینه‌های تولید شامل هزینه انرژی و حمل‌ونقل | تغیر زمان تولید | فراابتکاری ژنتیک بر مبنای ماتریس کُدشده | |
| [۲۰] | جریان کارگاهی | هزینه انرژی | تغیر زمان تولید | یک رویکرد پویای زمان‌بندی | |
| [۱۵] | جریان کارگاهی ظرفیت‌دار | هزینه انرژی+ نگه‌داری+ آماده‌سازی | تغیر زمان تولید | الگوریتم رهاسازی- ثابت‌سازی و ژنتیک | |
| [۱۴] | جریان کارگاهی دوماشینه | بیشترین زمان تکمیل + مصرف انرژی | تغیر سرعت پردازش | ابتکاری سازنده | |
| [۱۸] | جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر | بیشترین زمان تکمیل + مصرف انرژی | کاهش زمان بیکاری | فراابتکاری ترقی‌یافته تجمع ذرات | مسئله پویا |
| [۵] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل +خروج کربن دی‌اکسید | تغیر سرعت پردازش | فراابتکاری جست‌وجو حریصانه + ابتکاری | |
| [۲۲] | جریان کارگاهی | هزینه انرژی + کربن دی‌اکسید + زمان در گردش | تغیر زمان تولید | حل مدل دقیق | تعرفه زمان مصرف |
| [۱۳] | جریان کارگاهی ترکیبی | بیشترین زمان تکمیل + مصرف انرژی | تغیر زمان تولید | فراابتکاری کلونی مورچگان | تعرفه زمان مصرف |

**زمان‌بندی احتمالی.** عدم‌قطعیت در مسائل زمان‌بندی سال‌ها است که توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است از جمله مرتبط‌ترین آن‌ها با این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

1. Zhang, H. et al.
2. Luo, H. et al/

گونزالس نیرا و همکاران[1] (۲۰۱۷)، یک الگوریتم شبیه‌سازی ـ ابتکاری ارائه کردند که اصول تصادفی‌سازی و تکنیک‌های شبیه‌سازی را به‌منظور حداقل‌کردن زمان تکمیل موردانتظار در یک مسئله جریان کارگاهی به کار می گیرد. در این پژوهش زمان پردازش و زمان مونتاژ متغیرها تصادفی هستند [۹]. فرامینان و گونزالس[2] (۲۰۱۵)، به بررسی مباحثی اساسی درباره تخمین بیشترین زمان تکمیل موردانتظار برای یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی پرداختند. زمان پردازش در پژوهش آنها از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند و میانگین توزیع لاگ نرمال از توزیع یکنواخت گرفته شده است. مسئله پژوهش آن‌ها تنها دارای یک هدف بیشترین زمان تکمیل موردانتظار بود [۷]. وانگ و همکاران[3] (۲۰۱۵)، یک الگوریتم ترکیبی مؤثر تخمین توزیع دومرحله‌ای شبیه‌سازی مبنا برای مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی با زمان پردازش غیرقطعی ارائه دادند. زمان پردازش‌های واقعی توسط یک توزیع نرمال تولید می‌شود. تنها تابع هدف مسئله پژوهش آن‌ها حداقل‌سازی بیشترین زمان تکمیل موردانتظار بود. این الگوریتم از یک مدل شبیه‌سازی دومرحله‌ای و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک نیز استفاده می‌کند [۱۹]. جوان و همکاران[4] (۲۰۱۴)، یک الگوریتم شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی برای حل مسئله جریان کارگاهی جایگشتی با زمان پردازش احتمالی ارائه کردند که ترکیبی از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و فراابتکاری جست‌وجوی محلی تکرارشونده بود. تنها تابع هدف مدنظر آن‌ها برای این مسئله بیشترین زمان تکمیل موردانتظار است. در پژوهش‌های آن‌ها هیچ فرض خاصی بر روی تابع توزیع احتمال زمان پردازش وجود ندارد که جزو نقاط قوت پژوهش آن‌ها محسوب می‌شود [۱۱]. بیکر و آلتیمر[5] (۲۰۱۲)، یک مسئله جریان کارگاهی و توزیع عمومی زمان پردازش را در نظر گرفتند. زمان پردازش دارای میانگین و واریانس مشخص‌شده‌ای است و زمان‌های پردازش به‌صورت مستقل از یک خانواده توزیع احتمالی پیروی می‌کنند. سه رویه ابتکاری سازنده ارائه شده است که این رویه‌ها از ابتکاری‌های CDS و NAH و قوانین جانسون و تالوار پیروی می‌کنند [۲].

لیفوق و همکاران[6] (۲۰۰۷)، برای نخستین بار مسئله زمان‌بندی احتمالی چندهدفه را بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها زمان‌های پردازش احتمالی و دارای توزیع احتمال نرمال، لاگ نرمال، یکنواخت، نمایی و حالتی که توزیع هر ماشین با دیگری متفاوت باشد، بودند. دو هدف «حداقل‌سازی بیشترین زمان تکمیل» و «تأخیر کلی» مدنظر قرار گرفت. آن‌ها سه رویه مختلف که از یک الگوریتم تکاملی چندهدفه به نام «الگوریتم تکاملی شاخص مبنا» الهام گرفته شده

1.Gonzalez-Neira, E. et al.
2. Framinan, J. M., P-Gonzalez, P.
3. Wang, K. et al.
4. Juan, A.A. et al.
5. Baker, K.R., Altheimer, D.
6. Liefooghe, A. et al.

است، ارائه کردند [۱۲]. گورگاند و همکاران[1] (۲۰۰۵)، پژوهشی با عنوان «تحلیل مارکوفی برای زمان‌بندی و ارزیابی عملکرد در مسئله جریان کارگاهی احتمالی با انبار میانی از هر ظرفیتی» انجام دادند. در پژوهش آن‌ها زمان پردازش دارای توزیع نمایی بود. آن‌ها یک طرح بازگشتی با استفاده از روابط چپمن ـ کلموگروف و زنجیره مارکوفی برای محاسبه بیشترین زمان تکمیل موردانتظار ارائه کردند. این طرح با فراابتکاری‌هایی بر اساس انجماد تدریجی ترکیب شده است [۱۰]. خلاصه مرور مبانی نظری در موضوع زمان‌بندی احتمالی در جدول ۲، مشاهده می‌شود.

*جدول ۲. خلاصه مرور مبانی نظری در موضوع زمان‌بندی احتمالی*

| شماره مقاله | مدل تولیدی | تابع هدف‌ها | پارامتر تصادفی مسئله، توزیع آن | رویکرد احتمالی تابع هدف | مواجهه با عدم قطعیت | روش حل | توضیحات |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [۹] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل | زمان پردازش و زمان مونتاژ | مقدار موردانتظار | با دستاویز | الگوریتم شبیه‌سازی- ابتکاری | |
| [۷] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل | زمان پردازش لاگ نرمال | مقدار موردانتظار | با دستاویز | ابتکاری، شبیه‌سازی | تخمین زمانبندی |
| [۱۹] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل | زمان پردازش نرمال | مقدار موردانتظار | با دستاویز | فراابتکاری ترکیبی، شبیه‌سازی | تخمین توزیع |
| [۱۱] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل | زمان پردازش (تفاوت در زمان پردازش هر ماشین) | مقدار موردانتظار | با دستاویز | فراابتکاری ترکیبی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو | جست‌وجو محلی تکرارشونده |
| [۲] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل | زمان پردازش توزیع عمومی | مقدار موردانتظار | با دستاویز | سه ابتکاری، نمونه‌گیری | بر مبنای CDS و NAH و تالوار و جانسون |
| [۱۲] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل، تأخیر کلی | زمان پردازش نمایی، نرمال، لاگ نرمال و یکنواخت با توزیع هر ماشین متفاوت | مقدار موردانتظار | احتمالی پیش‌بینانه | سه‌ابتکاری متفاوت بر مبنای فراابتکاری | الگوریتم تکاملی شاخص مبنا |
| [۱۰] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل | زمان پردازش نمایی | مقدار موردانتظار | روابط مارکوفی | ترکیب دقیق با فراابتکاری | بی و باذخیره میانی محدود |

1. Gourgand, M. et al.

بررسی پژوهش‌های ذکرشده نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی هم‌زمان به بررسی زمان‌بندی احتمالی با درنظرداشتن معیارهای پایداری نپرداخته است. در پژوهش حاضر، مسئله جریان کارگاهی با هدف حداقل‌کردن بیشترین زمان تکمیل و هزینه مصرف انرژی در شرایطی که زمان پردازش تصادفی است، بررسی می‌شود. شکاف پژوهشی موجود و اهمیت مسئله انرژی و لزوم درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در مسائل باعث صورت‌گرفتن پژوهش حاضر شده است.

## ۳. روش شناسی پژوهش

**بیان مسئله.** با انگیزه‌گرفتن از کارهایی که پیش‌تر راجع به آن بحث شد و پی‌بردن به اهمیت موضوع، در این پژوهش مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی احتمالی با درنظرگرفتن معیار پایداری به‌طوری‌که زمان پردازش غیرقطعی است، بررسی و مدلی برای آن ارائه می‌شود. در اینجا پیرو پژوهش‌های وانگ و همکاران (۲۰۱۵) و بیکر و آلتیمر (۲۰۱۲) فرض شده است زمان‌های پردازش نامنفی و دارای عدم‌قطعیت هستند و از توزیع یکنواخت پیروی می‌کنند [۲، ۱۹]. در مدل ارائه‌شده هر کار بر روی هر ماشین می‌تواند با سرعت آرام، تند و یا معمولی پردازش شود.

اگر کارها با سرعت تند پردازش شوند، زمان پردازش آن‌ها کاهش یافته و درنتیجه زمان تکمیل کاهش یافته، اما میزان مصرف انرژی افزایش می‌یابد که به افزایش هزینه انرژی منجر می‌شود و برعکس. درواقع سرعت مختلف موجب تغییرات متضاد توابع هدف می‌شود. مسئله موردنظر با نماد $Fm \mid perm \mid E(C\max), E(EC)$ نشان داده می‌شود.

### مفروضات مدل

ـ ماشین‌ها نمی‌توانند در یک زمان بیش از یک کار را انجام دهند.
ـ هر کار در یک زمان می‌تواند تنها روی یک ماشین پردازش شود.
ـ هر کار تنها یکبار بر روی هر ماشین پردازش می‌شود.
ـ عملیات امکان متوقف‌شدن را ندارد.
ـ کارها می‌توانند بین ماشین‌ها منتظر بمانند (ذخیره نامحدود بین ماشین‌ها).
ـ از هر نوع از ماشین‌ها فقط یک عدد موجود است.
ـ تمام کارها در زمان صفر دردسترس هستند (مسئله پویا نیست).
ـ زمان جابه‌جایی بین ماشین‌ها وجود ندارد.
ـ زمان آماده‌سازی در داخل زمان پردازش منظور شده است.
ـ به غیر از زمان پردازش احتمالی نوع دیگری از عدم‌قطعیت در مسئله وجود ندارد.
ـ ماشین‌ها دارای مجموعه مشخصی از سرعت‌ها (تند، معمولی، آرام) هستند.
ـ مصرف انرژی ماشین در سرعت‌های مختلف آن و در حال بیکاری متفاوت است.

**اندیس ها**

$i, h$: اندیس ماشین $i, h = 1, ..., m$.

$j$: اندیس کار $j = 1, ..., n$

$k$: اندیس موقعیت یک نقطه در توالی $k = 1, ..., n$

$s$: اندیس سرعت $s = 1, 2, 3$

**پارامترها**

$m$: تعداد ماشین‌ها.

$n$: تعداد کارها.

$\tilde{p}_{ij}$: زمان پردازش کار $j$ روی ماشین $i$.

$v_s$: سرعت پردازش (به‌ترتیب برای اندیس‌های $s = 1, 2, 3$ نشان‌دهنده سرعت‌های تند، متوسط و کُند است).

$e_{is}$: میزان مصرف انرژی در واحد زمان ماشین $i$ زمانی که در حال پردازش با سرعت $s$ است.

$f_i$: میزان مصرف انرژی در واحد زمان ماشین $i$ در حال بیکاری.

$u$: هزینه انرژی در واحد زمان.

**متغیرهای مثبت**

$\theta_i$: زمان بیکاری روی ماشین $i$.

$c_{ik}$: زمان تکمیل $k$امین کار پردازش‌شده روی ماشین $i$.

$s_{ik}$: زمان شروع $k$امین کار پردازش‌شده روی ماشین $i$.

$C\max$: زمان تکمیل آخرین کار روی آخرین ماشین.

$EC$: کل هزینه انرژی.

**متغیر صفر و یک**

$x_{ijks}$: اگر کار $j$، $k$امین کاری باشد که روی ماشین $i$ با سرعت $s$ پردازش می‌شود، یک و در غیر این‌صورت صفر است.

**مدل مسئله**

$$\min E(C\max) \quad (۱)$$

$$\min E(EC) \quad (۲)$$

$$s.t: c_{11} \geq \sum_{j=1}^{n} \sum_{s=1}^{3} \frac{\tilde{p}_{1j}}{v_s} x_{1j1s} \quad (۳)$$

$$c_{ik} \geq c_{i-1,k} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{s=1}^{3} \frac{\tilde{p}_{ij}}{v_s} x_{ijks}, i \in \{2,...,m\}, k \in \{1,...,n\} \quad (۴)$$

$$c_{ik} \geq c_{i,k-1} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{s=1}^{3} \frac{\tilde{p}_{ij}}{v_s} x_{ijks}, i \in \{1,...,m\}, k \in \{2,...,n\} \quad (۵)$$

$$\sum_{k=1}^{n} \sum_{s=1}^{3} x_{ijks} = 1, \forall i, \forall j \quad (۶)$$

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{s=1}^{3} x_{ijks} = 1, \forall i, \forall k \quad (۷)$$

$$\sum_{s=1}^{3} x_{ijks} = \sum_{s=1}^{3} x_{hjks}, \forall i, \forall h, \forall j, \forall k \quad (۸)$$

$$C\max \geq c_{mn} \quad (۹)$$

$$\theta_i = C\max - \sum_{j=1}^{n} \sum_{s=1}^{3} \frac{\tilde{p}_{ij}}{v_s} x_{ijks}, \forall i \quad (۱۰)$$

$$EC = u(\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \sum_{s=1}^{3} \sum_{k=1}^{n} \frac{e_{is} \tilde{p}_{ij} x_{ijks}}{v_s} + \sum_{i=1}^{m} f_i \theta_i) \quad (۱۱)$$

$$\theta_i \geq 0, c_{ik} \geq 0, s_{ik} \geq 0, EC \geq 0, C\max \geq 0, x_{ijks} \in \{0,1\} \quad (۱۲)$$

محدودیت‌های اول و دوم تابع هدف مسئله، حداقل‌سازی مقدار موردانتظار بیشترین زمان تکمیل و کل هزینه انرژی است را نشان می‌دهند. محدودیت سوم، زمان تکمیل اولین کار پردازش‌شده بر روی اولین ماشین را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های چهارم و پنجم، زمان تکمیل سایر کارهای پردازش‌شده بر روی باقی ماشین‌ها را محاسبه می‌کند. محدویت‌های ششم و هفتم تضمین می‌کنند تا به هر موقعیت توالی، یک کار و هر کار، یک موقعیت توالی تخصیص داده شود. محدودیت هشتم تضمین می‌کند که هر کار روی هر ماشین دقیقاً با یک سرعت پردازش شود. ازآنجاکه جمع دو طرف تساوی یک خواهد شد، به‌ازای یک سرعت مقدار خواهد گرفت. محدودیت نهم زمان تکمیل آخرین کار بر روی آخرین ماشین که همان تابع هدف اول است را محاسبه می‌کند. محدودیت دهم زمان بیکاری روی هر ماشین را محاسبه می‌کند. محدودیت یازدهم کل هزینه انرژی (تابع هدف دوم) را محاسبه می‌کند. محدودیت دوازدهم نوع متغیرهای مسئله را تعیین می‌کند.

**حل یک مثال عددی.** در اینجا برای بررسی صحت کارکرد مدل، یک مسئله با ۱۰ کار و ۳ ماشین با سرعت پردازش تند (۱/۲)، نرمال (۱) و کند (۰/۸)، میزان مصرف انرژی ماشین (برای هر سه ماشین) در حالت بیکاری ۰/۵ و عامل هزینه ۱ و اطلاعات زیر، حل شده است.

*جدول ۱. میزان مصرف انرژی درحالت پردازش با سرعت* e(i,s)/ s

| e(i,s) | s=۱ | s=۲ | s=۳ |
|---|---|---|---|
| i=۱ | ۱/۲ | ۰/۹ | ۰/۶ |
| i=۲ | ۱/۳ | ۱ | ۰/۷ |
| i=۳ | ۱ | ۰/۸ | ۰/۵ |

*جدول ۲. زمان پردازش کار روی ماشین با تابع یکنواخت (۲۰، ۳۵)* p(i,j)=uniform

| p(i,j) | j=۱ | j=۲ | j=۳ | j=۴ | j=۵ | j=۶ | j=۷ | j=۸ | j=۹ | j=۱۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| i=۱ | ۲۳/۰۶۴ | ۲۴/۹۳۱ | ۲۲/۱۵۹ | ۲۴/۲۶۴ | ۲۳/۵۰۸ | ۲۰/۱۹۳ | ۲۱/۲۶۵ | ۲۰/۰۴۹ | ۲۳/۶۹۷ | ۲۴/۱۳۲ |
| i=۲ | ۲۰/۵۵۰ | ۲۱/۲۱۰ | ۲۱/۵۲۳ | ۲۴/۲۳۶ | ۲۰/۷۸۹ | ۲۳/۰۰۲ | ۲۲/۰۱۸ | ۲۴/۰۸۳ | ۲۰/۸۰۷ | ۲۰/۳۱۰ |
| i=۳ | ۲۴/۷۹۶ | ۲۴/۲۴۱ | ۲۴/۳۵۰ | ۲۳/۶۹۸ | ۲۴/۶۹۹ | ۲۳/۸۷۱ | ۲۱/۱۵۶ | ۲۳/۴۹۱ | ۲۳/۲۹۹ | ۲۱/۶۸۶ |

خروجی گمز با زمان اجرا ۰/۰۳۱ ثانیه به‌صورت زیر است:

$z۱=Cmax=۳۱۵/۲۸۵$ , $z۲=TEC=۶۵۱/۸۷۱$

$x(۱,۱,۷,۳)=x(۱,۲,۵,۳)=x(۱,۳,۸,۳)=x(۱,۴,۲,۱)=x(۱,۵,۶,۳)=x(۱.۶.۳.۲)=x(۱,۷,۴,۱)=x(۱,۸,۱,۲)=x(۱,۹,۹,۳)=x(۱,۱۰,۱۰,۳)=x(۲,۱,۷,۳)=x(۲,۲,۵,۲)=x(۲,۳,۸,۲)=x(۲,۴,۲,۳)=x(۲,۵,۶,۳)=x(۲.۶.۳.۳)=x(۲,۷,۴,۱)=x(۲,۸,۱,۳)=x(۲,۹,۹,۲)=x(۲,۱۰,۱۰,۳)=$

$x(۳,۱,۷,۳)=x(۳,۲,۵,۳)=x(۳,۳,۸,۳)=x(۳,۴,۲,۱)=x(۳,۵,۶,۱)=x(۳.۶.۳.۳)=x(۳,۷,۴,۳)=x(۳,۸,۱,۳)=x(۳,۹,۹,۱)=x(۳,۱۰,۱۰,۱)=۱$

**عدم‌قطعیت، دلیل و نحوه برخورد با آن.** در اغلب مسائل بهینه‌سازی کمّیت‌هایی که استفاده شده‌اند، داده‌های دقیقی نبوده و به شرایط محیطی وابسته هستند. چنین مسائلی در حوزه‌های کاربردی بسیاری آشکار می‌شوند و چالش‌های جالب بسیاری در مفهوم و محاسبات ایجاد می‌کنند. شریک‌های اصلی در روش‌شناسی بهینه‌سازی تحت عدم‌قطعیت برنامه‌ریزی احتمالی و برنامه‌ریزی پویا هستند. برنامه‌ریزی پویا زمانی قابل‌استفاده است که مسئله قابلیت تجزیه به زیرمسائل را داشته باشد. این زیر مسائل مستقل از هم نیستند. رویکرد این پژوهش برای درنظرگرفتن عدم‌قطعیت، برنامه‌ریزی احتمالی است.

برنامه‌ریزی احتمالی ابتدا با پژوهش دانتزیگ[1] (۱۹۵۵)، با عنوان برنامه‌ریزی خطی تحت عدم‌قطعیت آغاز شد [۴]. برنامه‌ریزی احتمالی چارچوبی برای مدل‌بندی مسائل بهینه‌سازی فراهم می‌آورد که شامل اطلاعات غیرقطعی است. در برنامه‌ریزی احتمالی فرض می‌شود که داده‌های نامعلوم متغیرهایی تصادفی‌اند که توزیع احتمال مشخصی دارند. یکی از روش‌های حل برنامه‌ریزی احتمالی تبدیل برنامه‌ریزی تصادفی به معادل قطعی آن است که همواره با ریسک انتخاب نامناسب مقادیر همراه است و همچنین دقت بالایی ندارد و شرایط را به‌خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند. از روش‌های دیگر می‌توان به برنامه‌ریزی استوار اشاره کرد. در این روش توجه روی بدترین سناریوی موجود و تولید جواب‌های شدنی برای آن است. این روش کاربرد عملی چندانی ندارد و تمامی شرایط را درنظر نمی‌گیرد.

تحلیل حساسیت و استفاده از سناریوها نیز از رویکردهای دیگر هستند. تحلیل حساسیت یک روش پس از بهینگی است و برای مسائل بزرگ و تغییرات هم‌زمان مناسب نیست؛ بنابراین در این پژوهش به‌کار نمی‌روند. این روش عموماً در هنگام مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شود. سناریوها نیز حالات مختلف داده‌ها را در چند مدل ساده خلاصه می‌کند. هدف در برنامه‌ریزی احتمالی یافتن جوابی است که در تمامی اطلاعات ممکن مسئله شدنی باشد و نیاز تصمیم‌گیرنده را در بهینه‌سازی تابع هدف برآورده کند.

رویکرد موردنظر در این پژوهش، استفاده از شبیه‌سازی است؛ به این معنی که تعداد دفعات زیادی مسئله را با مقادیر مختلف پارامتر تصادفی حل می‌کند تا عملکرد آن مشخص و قابل‌تحلیل باشد. این روش، محدودیت روش‌های تحلیل حساسیت و برنامه‌ریزی استوار را ندارد و مانند روش سناریو و قطعی تنها یک یا چند حالت محدود را بررسی نمی‌کند و حالت کامل‌تری از آن‌ها است. شبیه‌سازی شامل تمامی مقادیر از بدترین حالت تا بهترین حالت است. به‌طورکلی از مزیت تمام روش‌های گفته‌شده استفاده می‌کند. تغییرات مقادیر پارامتر موجب تغییرات مقادیر تابع اهداف نیز می‌شود؛ بنابراین برای گزارش مقدار تابع اهداف از میانگین نتایج و درواقع از مدل ارزش انتظاری $(E-\mathrm{mod}el)$ استفاده می‌شود.

انواع برنامه‌ریزی احتمالی بر اساس مواجهه با محدودیت‌های مدل به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- برنامه‌ریزی احتمالی بادستاویز که در این نوع برنامه‌ریزی تخطی از محدودیت‌ها مشمول جریمه می‌شود و جایز نیست، مدل‌های دستاویز به‌صورت آشکاری مفهوم زمان را در برمی‌گیرند. مسئله بررسی‌شده در این پژوهش از این نوع می‌باشد. برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای و چندمرحله‌ای از مدل‌های بادستاویز هستند. ۲- برنامه‌ریزی احتمالی با محدودیت‌های احتمالی که در این نوع برنامه‌ریزی محدودیت‌ها در سطح اطمینان مشخصی برآورده می‌شوند. درواقع برای درصد

1. Dantzig, G.B.

ازپیش‌تعیین‌شده‌ای از مشاهدات پارامترهای تصادفی مدل، محدودیت‌ها نقض نمی‌شوند. مدل‌ها می‌توانند دارای تابع هدفی از نوع امید ریاضی، واریانس یا احتمالی باشند. مدل ارائه‌شده در این پژوهش از نوع بادستاویز است و تخطی از محدودیت‌ها جایز نیست.

**پیچیدگی مسئله.** با توجه به آنکه مسئله پایه این پژوهش یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی است و این مسئله در شکل پایه‌ای خود یک مساله NP-hard است، به‌طور قطع مسئله درنظرگرفتن توابع هدف چندگانه باعث پیچیده‌ترشدن آن هم خواهد شد. پیچیدگی دیگر مسئله به عدم‌قطعیت آن بازمی‌گردد. عدم‌قطعیت پیچیدگی‌ای است که هنگام تعریف و مدل‌سازی مسئله وارد می‌شود و باید از رویکردی برای ازبین‌بردن آن استفاده کرد. با توجه به تمام پیچیدگی‌های موجود در ذات مسئله موردبررسی، حل آن به‌صورت بهینه در ابعاد بزرگ در زمان معقول غیرممکن بوده و درنتیجه در ادامه برای حل آن یک الگوریتم فرابتکاری توسعه داده خواهد شد.

**الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی مبنا.** در این بخش یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله موردنظر ارائه می‌شود. پژوهشگران برای حل این‌گونه مسائل از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌کنند. از میان روش‌های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک به‌دلیل سهولت و گستردگی استفاده و همچنین قابلیت بالای ترکیب و تطبیق با مسائل و الگوریتم‌های مختلف از اهمیت ویژه‌ای در این میان برخوردار است [۱]. الگوریتم‌های ژنتیک روش‌های قابل‌تطبیقی برای حل مسائل بهینه‌سازی هستند که بر اساس پردازش‌های ژنتیکی که در عضوهای بیولوژیک صورت می‌گیرد، بنا شده‌اند. در گذر زمان و نسل‌های بسیار، جمعیت‌ها براساس قوانین انتخاب طبیعی تکامل پیدا کرده‌اند. در هر نسل هر فرد (کروموزوم) تازه نمایانگر یک راه‌حل برای مسئله مدنظر است و برای رسیدن به تکامل مطلوب باید کروموزوم‌ها مورد پردازش و تغییر قرار گیرند. گام‌های الگوریتم ژنتیک در الگوریتم ۱، ارائه شده است.

*الگوریتم ۱. الگوریتم ژنتیک*

۱. کدگذاری جواب و تبدیل مسئله به یک راه حل قابل‌جست‌وجو؛
۲. تعیین پارامترهای الگوریتم شامل تعداد جواب‌های لایه پارتو، اندازه جمعیت، تعداد تکرار فرایند تکامل، نرخ تقاطع، جهش و غیره؛
۳. تعیین تصادفی وزن اهداف؛
۴. مقداردهی و تشکیل جمعیت اولیه؛
۵. ارزیابی جمعیت اولیه (تابع هزینه با رویکرد شبیه‌سازی)؛
۶. تکرار فرایند تکامل نسل به تعداد تعین‌شده شامل:
a. تقاطع
b. جهش
c. انتخاب؛
۷. ذخیره بهترین جواب نسل جدید به‌عنوان یکی از جواب‌های لایه پارتو با وزن تعیین‌شده در گام ۳؛
۸. تکرار گام‌های ۴ تا ۸ تا رسیدن به تعداد ازقبل‌تعیین‌شده جواب‌های لایه پارتو.

الگوریتم بالا ساختار کلی دارد و جزئیات به‌کارگیری شامل نحوه تعریف کروموزوم‌ها، تابع برازندگی یا هزینه، عملگرهای تقاطع، جهش و انتخاب و ترمیم جواب‌های نشدنی تولیدشده توسط اپراتورها است که هر یک در ادامه تشریح می‌شود.

**نحوه کدکردن کروموزم‌ها.** هر کروموزوم به یکی از افراد جمعیت اشاره دارد و نشان‌دهنده یک راه‌حل در فضای حل است. برای کارآمدی الگوریتم باید رابطه یک به یکی بین راه‌حل کدشده و کوروموزوم برقرار باشد؛ به این معنا که هر راه‌حل تنها می‌تواند به یک کروموزم اشاره داشته باشد و برعکس. در الگوریتم ژنتیک هر کروموزوم (راه‌حل) توسط کُدی نمایش داده می‌شود. کُد باید به‌گونه‌ای طراحی شود تا برخی از محدودیت‌های مسئله را ارضا کند. در کُد ارائه‌شده این پژوهش، محدودیت‌های مربوط به ساختار جواب مانند توالی و تخصیص سرعت ارضا شده است. نحوه کُدکردن در مسئله موردنظر این پژوهش به‌نحوی که برای الگوریتم قابل‌پردازش باشد؛ به این صورت است که ماتریسی در نظر گرفته می‌شود، سطر اول توالی کارها را نشان می‌دهد و تعداد سطرهای بعدی به اندازه تعداد ماشین‌ها و نشان‌دهنده سرعت کار بر روی ماشین است. جدول ۳، یک کروموزوم برای مسئله ای با ۵ کار و ۲ ماشین را نشان می‌دهد که ابتدا کار ۵ پردازش می‌شود و سپس کار ۲ و غیره. کار ۵ با سرعت ۲ (نرمال) بر روی ماشین اول و با سرعت ۱ (تند) بر روی ماشین دوم در حال پردازش است.

*جدول ۳. نحوه‌ی کُدکردن جواب*

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| توالی کارها | ۵ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ |
| سرعت کار بر روی ماشین اول | ۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۲ |
| سرعت کار بر روی ماشین دوم | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ |

**تابع هزینه با رویکرد شبیه‌سازی.** در مسائل بهینه‌سازی هر راه‌حل با توجه به ویژگی‌های مدل به مقادیر مشخصی از تابع اهداف منجر می‌شود. در الگوریتم ژنتیک نیز هر کروموزوم (راه‌حل) نشان‌دهنده یک نقطه در فضای جواب است. چگونگی به‌دست‌آوردن این جواب به مدل، محدودیت و پارامترهای مسئله بستگی دارد. نحوه به‌دست‌آوردن این مقدار با استفاده از تابعی که در مسائل حداکثرسازی به برازندگی و در مسائل حداقل‌سازی به هزینه معروف است، مشخص می‌شود. در مسئله این پژوهش هر دو هدف از نوع حداقل‌سازی است. قسمتی از محدودیت‌های مدل توسط نحوه کُدکردن ارضا شده و سایر محدودیت‌هایی که به به‌دست‌آوردن تابع اهداف منجر می‌شوند در تابع هزینه برطرف می‌شوند. مسئله پژوهش حاضر از مسائل چندهدفه و شامل دو تابع هدف بیشترین زمان تکمیل و هزینه انرژی است.

بر خلاف مسائل تک‌هدفه که می‌توان به یک جواب بهینه رسید در مسائل چندهدفه مجموعه‌ای از جواب‌ها با نام «جواب‌های غالب یا پارتو» مطرح است که هیچ‌یک ارجحیتی نسبت به یکدیگر ندارند و تصمیم‌گیرنده بر اساس اولویت‌های خود قادر به انتخاب جواب از مجموعه است. نکته قابل‌توجه یافتن جواب‌های بهینه پارتو است. تاکنون روش‌های متعددی مانند جمع وزنی، روش محدودیت، روش ال‌پی متریک و غیره پیشنهاد شده است. روش جمع وزنی به‌علت سادگی در استفاده و اینکه با تغییرات مناسب وزن‌ها قادر به به‌دست‌آوردن تمامی جواب‌های موجود در لایه پارتو است، بیشتر موردتوجه قرار گرفته است. در الگوریتم حاضر نیز از روش جمع وزنی برای به‌دست‌آوردن جواب‌های غیرمغلوب استفاده شد.

در پژوهش حاضر پارامتر زمان پردازش دارای عدم‌قطعیت است و از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. همان‌طور که گفته شد، رویکردهای مختلفی مانند تبدیل به قطعی، تعریف سناریو، شبیه‌سازی و غیره برای عدم‌قطعیت وجود دارد که در این پژوهش برای مواجهه با آن و درنظرگرفتن تأثیرات آن بر جواب از رویکرد شبیه‌سازی در حل مسئله استفاده شده است به این صورت که به‌ازای هر بار ارزیابی تابع هدف، مسئله با ۱۰۰ زمان پردازش تصادفی مختلف از توزیع یکنواخت حل می‌شود و میانگین توابع اهداف به‌دست آمده به‌عنوان جواب نهایی ارزیابی مدنظر قرار می‌گیرد. درواقع ۱۰۰ سناریوی تصادفی آزمایش می‌شود. به‌علت زمان‌بربودن حل و تعداد ارزیابی زیاد در تولید لایه‌ی پارتو از تعداد ۱۰۰ شبیه‌سازی استفاده شده است و درواقع هر جواب به‌دست‌آمده میانگین ۱۰۰ اجرای مستقل است.

**عملگر تقاطع.** به فرایندی که طی آن ویژگی‌های چند والد در فرزندان ادغام می‌شود، عملگر تقاطع گفته می‌شود. عملگر تقاطع برای کاوش راه‌حل‌های موجود در جهت یافتن راه‌حل بهتر به‌کار می‌رود. روش‌های مختلفی برای تقاطع در مبانی نظری موجود است. در پژوهش حاضر از تقاطع تک‌نقطه‌ای بر روی دو والد تصادفی انتخاب شده و تولید دو فرزند جدید استفاده شده است.

**عملگر جهش.** جهش به‌معنای ایجاد ساختارهای جدید در جمعیت به‌منظور کاوش مناطق جدید جواب است. عملگر جهش با حفظ گوناگونی جمعیت از افتادن الگوریتم در بهینه محلی جلوگیری می‌کند. شکل‌های مختلفی از عملگر جهش در مبانی نظری وجود دارد. در این پژوهش یکی از اعضای جمعیت به تصادف انتخاب شده و پس از آن با تعین دو نقطه‌ی تصادفی از کروموزوم اقدام به جابه‌جایی این دو نقطه و در واقع جابه‌جایی دو ستون، می‌شود. شکل ۱، عملکرد جهش را نشان می‌دهد.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ۵ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ |
| ۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۲ |
| ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ |

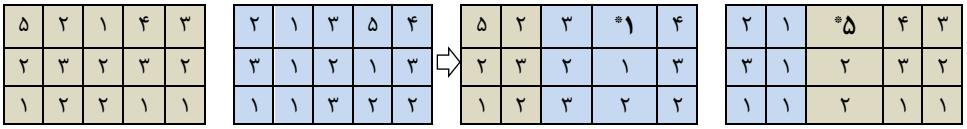
⇨

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ۴ | ۲ | ۱ | ۵ | ۳ |
| ۳ | ۳ | ۲ | ۲ | ۲ |
| ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ |

*شکل ۱. عملگر جهش*

**انتخاب.** بعد از تولید فرزندان جدید از عملگرهای تقاطع و جهش و ارزیابی آن‌ها، این افراد تولیدشده به همراه نسل قبلی خود یک حوضچه جواب را تشکیل می‌دهد. اعضای این حوضچه بر اساس بهتربودن جواب رتبه‌بندی شده و درنهایت به تعداد اندازه جمعیت از این جواب‌های برتر به‌عنوان نسل بعدی که باید فرایند تکامل روی آن صورت گیرد، انتخاب می‌شود.

**نحوه برخورد با جواب‌های نشدنی.** لزوماً جواب‌ها بعد از به‌کارگیری همه اپراتورها موجه نیستند. در اینجا از استراتژی تعمیر استفاده شده است. در عملگر تقاطع با توجه به آنکه سطر اول جواب توالی کارها را نشان می‌دهد و تقاطع نقطه‌ای ممکن است موجب به‌هم‌ریختن این توالی و درنتیجه غیرموجه‌شدن جواب شود. سایر سطرهای ماتریس سرعت پردازش هر کار بر هر ماشین را نشان می‌دهد و با عملگر تقاطع مشکلی در موجه‌بودن جواب به‌وجود نمی‌آید؛ همچنین عملگر جهش به‌دلیل ساختار کُدکردن جواب، همواره جوابی موجه را نتیجه می‌دهد. به‌عنوان نمونه از استراتژی تعمیر، سطر اول جواب شکل ۲ را در نظر بگیرید. همچنان که با نماد * در سطر اول فرزندان حاصل از عملگر تقاطع مشخص شده، در نخستین نقطه‌ای که ناهماهنگی وجود داشته داشته باشد (در اینجا عدد تکراری یک و پنج ) با عددی که در رشته وجود ندارد، جایگزینی صورت گرفته و به این ترتیب موجه‌بودن جواب حاصل ار عملگر حفظ خواهد شد.



*شکل ۲. عملگر تقاطع و تعمیر خروجی حاصل از آن*

## ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش بعد از معرفی چند شاخص معتبر در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه، تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی، اعتبارسنجی در بخش ابعاد کوچک و بزرگ انجام می‌شود؛ به این صورت که در ابعاد کوچک خروجی گمز با الگوریتم پیشنهادی مقایسه شده و در ابعاد بزرگ از الگوریتم زیرجمعیت استفاده شده است که این الگوریتم برای نخستین بار توسط چانگ و همکاران[1] (۲۰۰۵)، برای حل یک زمان‌بندی ماشین‌های موازی چندهدفه استفاده شد که در اینجا برای مسئله موردبررسی در این پژوهش تطبیق داده شده است [۳].

**روش شاخص‌های ارزیابی.** بعد از ایجاد لایه پارتو توسط مجموعه‌ای از جواب‌های غیرمغلوب، مسئله اصلی ارزیابی کیفیت جواب‌ها است. به این منظور به معیارهای کمّی برای ارزیابی جواب‌ها نیاز است که در این پژوهش از سه معیار زیر استفاده شده است:

$MID$ (میانگین فاصله‌ی ایده‌آل): نزدیکی جواب پارتو و نقطه‌ی ایده‌آل (. و .) را محاسبه می‌کند. هرچه این معیار کمتر باشد، الگوریتم بهتر است. با تعداد جواب‌های غیرمغلوب $n$، با استفاده از فرمول ۱۳، می‌توان این معیار را به‌دست آورد:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n}, c_i = \sqrt{f_{1i}^{\,2} + f_{2i}^{\,2}} \qquad (۱۳)$$

$SNS$: گستردگی جواب‌های غیر مغلوب را نشان می‌دهد. بالابودن این معیار، کارایی الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (MID - c_i)^2}{n-1}} \qquad (۱۴)$$

$RAS$: نرخ دستیابی هم‌زمان دو تابع هدف را نشان می‌دهد. کمتربودن این معیار نشان‌دهنده کیفیت بهتر جواب است.

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{f_{i1} - F_i}{F_i}\right) + \left(\frac{f_{i2} - F_i}{F_i}\right)}{n}, F_i = \min\{f_{1i}, f_{2i}\} \qquad (۱۵)$$

1. Chang, P. C. et al.

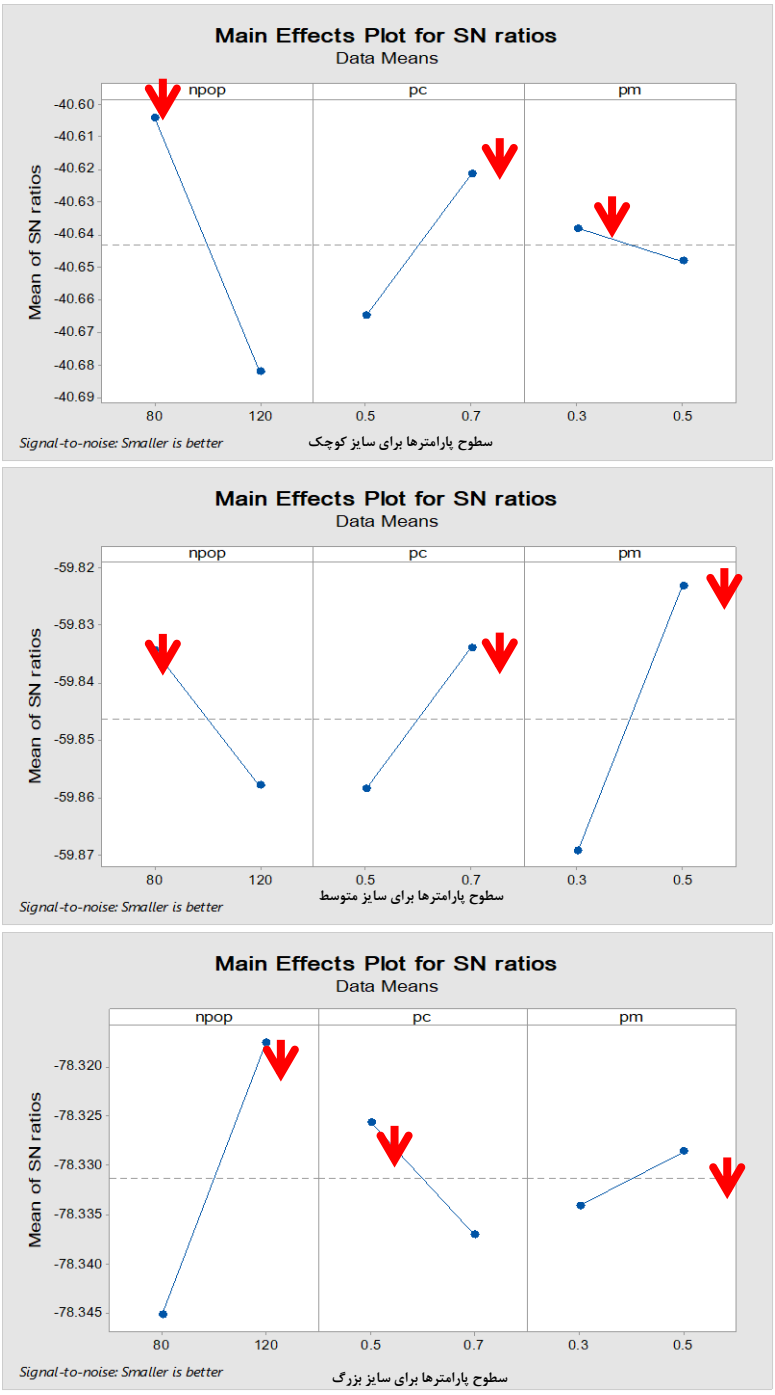
**تنظیم پارامترهای الگوریتم.** برای اینکه الگوریتم جواب‌های خوبی ارائه دهد، لازم است تا پارامترهای آن آزمایش شود و مقادیری از آن‌ها که جواب‌های بهتری ایجاد می‌کنند، انتخاب شوند. پارامترهای الگوریتم ارائه‌شده و همچنین سطوح موردنظر آن‌ها در جدول ۴، نشان داده شده است. به این منظور در اینجا هشت آزمایش با فرض $f_i = 0.5\ \forall i$ و $e_{i1} = 1.2, e_{i2} = 0.9, e_{i3} = 0.6\ \forall i$ برای سه اندازه کوچک، بزرگ و متوسط به‌طور تصادفی ایجاد و اجرا شد و نتایج حاصل از صد جواب به‌دست‌آمده بررسی و جواب‌های غالب مشخص شدند؛ سپس معیارهای ارزیابی برای هر اجرا بدست آمده در جدول ۵ قابل مشاهده است. در نهایت با استفاده از روش تاگوچی سطوح مناسب پارامترها مشخص شده است. شکل ۳ به‌ترتیب نتایج تحلیل‌ها و سطوح مناسب برای اندازه کوچک، متوسط و بزرگ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل برای هر اندازه از مسئله، مقادیر بهینه پارامترها با فلش نشان داده شده است. برای مثال، پارامتر $npop$ یا تعداد جمعیت در ابعاد کوچک و متوسط مقدار بهینه ۸۰ و در ابعاد بزرگ مقدار بهینه ۱۰ را دارد.

*جدول ۴. پارامترها و سطوح الگوریتم*

| پارامترها | سطوح |
|---|---|
| تعداد تکرار حلقه | ۱۰۰ |
| تعداد اعضای جمعیت (*npop*) | ۸۰–۱۲۰ |
| نرخ تقاطع (*pc*) | ۰/۰–۷/۵ |
| نرخ جهش (*pm*) | ۰/۰–۵/۳ |

*جدول ۵. نتایج آزمایش‌ها برای تنظیم پارامترها*

| مسئله | اندازه کوچک | | | اندازه متوسط | | | اندازه بزرگ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MID | SNS | RAS | MID | SNS | RAS | MID | SNS | RAS |
| ۱ | ۱۸۶/۴۴۵۴ | ۱۳/۱۲۹۵۲ | ۰/۸۲۶۰۰۳ | ۱۷۰۰/۵۶۴ | ۸۲/۶۹۴۹۵ | ۲/۸۱۰۳۲۹ | ۱۴۳۲۰/۱۹ | ۱۷۲/۹۵۸۲ | ۸/۸۳۴۷ |
| ۲ | ۱۸۴/۹۴۹ | ۱۲/۷۷۴۶۱ | ۰/۷۹۷۱۷۹ | ۱۷۰۱/۸۲۳ | ۸۸/۳۷۹۹۲ | ۲/۸۲۲۶۴۲ | ۱۴۳۲۳/۸۴ | ۱۹۳/۹۶۶۶ | ۸/۸۹۷۲ |
| ۳ | ۱۸۴/۵۲۳۶ | ۱۲/۳۴۵۸۷ | ۰/۷۷۳۳۵۱ | ۱۷۰۱/۵۱۸ | ۸۹/۳۴۱۹۷ | ۲/۸۱۱۴۹۱ | ۱۴۳۰۶/۴۲ | ۱۵۳/۶۳۳۹ | ۸/۸۴۳۸ |
| ۴ | ۱۸۶/۴۹۵۳ | ۱۳/۳۹۱۹۲ | ۰/۸۵۶۲۹۹ | ۱۶۹۳/۴۸ | ۸۵/۱۵۰۹۱ | ۲/۷۷۹۱۷ | ۱۴۳۱۳/۴۳ | ۱۷۹/۱۲۶۵ | ۸/۹۱۷۴ |
| ۵ | ۱۸۷/۷۶۴۵ | ۱۲/۷۴۴۱۱ | ۰/۹۰۱۸۶۳ | ۱۷۱۴/۷۴۹ | ۹۲/۹۳۶۸۹ | ۲/۹۲۹۸۲۹ | ۱۴۲۴۸/۸۷ | ۱۷۱/۲۹۳۵ | ۸/۷۰۴۷ |
| ۶ | ۱۸۸/۵۰۳۲ | ۱۳/۷۴۲۵۲ | ۰/۹۲۲۴۴ | ۱۶۹۹/۰۸۴ | ۹۴/۸۹۶۵۷ | ۲/۸۲۰۳۵۶ | ۱۴۲۴۲/۲۷ | ۱۵۹/۷۹۵۱ | ۸/۷۶۲۲ |
| ۷ | ۱۸۶/۵۰۰۶ | ۱۲/۸۴۲۸ | ۰/۸۶۰۳۴۱ | ۱۷۰۷/۸۱۲ | ۹۱/۳۱۴۵۹ | ۲/۸۹۴۲۰۳ | ۱۴۳۱۵/۴۵ | ۱۸۱/۶۹۰۹ | ۸/۹۰۵۸ |
| ۸ | ۱۸۶/۴۳۴۵ | ۱۴/۱۲۴۸۱ | ۰/۸۳۸۹۹۴ | ۱۶۹۴/۲۰۸ | ۸۴/۸۲۳۰۸ | ۲/۸۰۷۴۴۱ | ۱۴۲۷۴/۹۶ | ۲۱۶/۰۱۱۷ | ۸/۸۶۶۳ |




*شکل ۳. تعیین سطوح پارامتر به روش تاگوچی*

**نتایج عددی در ابعاد کوچک.** به‌منظور اعتبارسنجی الگوریتم، جواب‌های به‌دست‌آمده از آن با حل دقیق در ابعاد کوچک مقایسه شده است. جدول ۶، قسمتی از جواب‌های به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. در مورد حل دقیق تمامی جواب‌های غالب به‌دست‌آمده گزارش شده است (ردیف‌ها نشان‌دهنده تعداد جواب‌های به‌دست‌آمده از حل دقیق است)؛ ولی به‌علت زمان‌بربودن تنها بعضی از جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم توانایی به‌دست‌آوردن جواب بهینه را در صورت دادن زمان کافی برای حل دارد و همگرا است.

*جدول ۶. نتایج عددی در ابعاد کوچک*

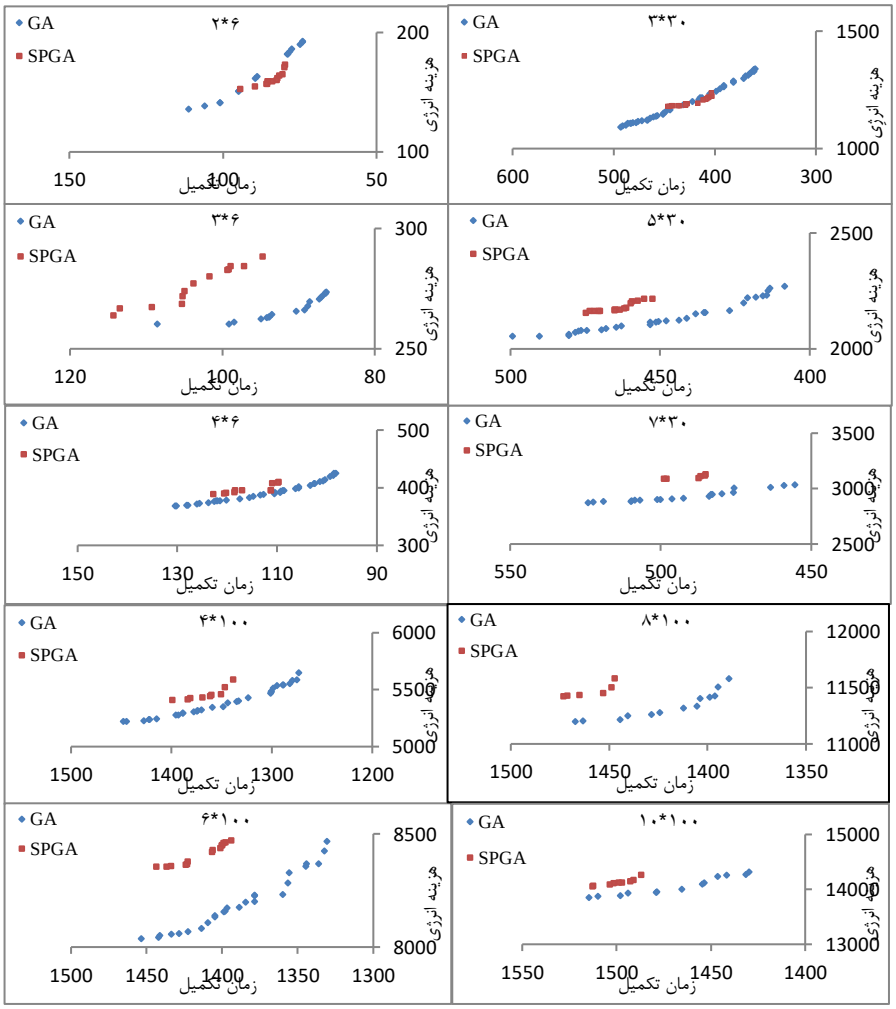
| مسئله | گمز | | الگوریتم پیشنهادی | |
|---|---|---|---|---|
| | تابع هدف اول | تابع هدف دوم | تابع هدف اول | تابع هدف دوم |
| ۱ | ۳۳۳/۳۶۶۳۳۳۳ | ۹۱۷/۲۸۵ | ۳۲۱/۹۶۱۱۵ | ۹۰۵/۸۷۹۹۹۱۷ |
| ۲ | ۴۵۶/۸۷۷ | ۵۹۰/۵۳۶۳۳۳۳ | ۳۶۴/۵۷۸۳۱۵ | ۸۲۸/۸۸۰۴۵۴۹ |
| ۳ | ۴۶۷/۳۷۵۳۳۳۳ | ۵۷۹/۳۵۴ | ۴۰۲/۳۵۵۱۲۸۱ | ۷۴۵/۴۴۹۹۰۳۳ |
| ۴ | ۴۸۲/۹۴۱۶۶۶۷ | ۵۷۰/۵۲۹۶۶۶۷ | ۴۸۳/۹۱۷۷۰۲۲ | ۶۳۶/۹۷۱۵۶۴۳ |

**نتایج عددی در ابعاد بزرگ.** در این زیربخش الگوریتم پیشنهادشده با الگوریتم زیرمسئله ژنتیک شبیه‌سازی مبنا برای مسئله، مقایسه خواهد شد. برای این مقایسات سه نمود در اندازه کوچک و متوسط و چهار نمود در اندازه بزرگ ایجاد شده است. همان‌طورکه گفته شد، بنچمارکی برای این مسئله موجود نیست و آزمایش‌ها به‌طور تصادفی ایجاد شده‌اند. لایه پارتوی به‌دست‌آمده از دو الگوریتم برای هر یک از نمودها توسط جواب‌های غیرمغلوب مشخص شده است. در شکل ۴، لایه پارتو و درواقع پراکندگی جواب‌های غیرمغلوب برای دو الگوریتم مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، الگوریتم ژنتیک تعداد زیادی از جواب‌های لایه پارتو را نتیجه می‌دهد که قدرت تصمیم‌گیرنده را در انتخاب بیشتر می‌کند؛ همچنین جواب‌های به‌دست‌آمده از این روش کیفیت بهتری دارند. در جدول ۷، معیارهای محاسبه‌شده برای ارزیابی دو الگوریتم نشان داده شده است. نتایج، عملکرد مناسب الگوریتم ارائه‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، لایه پارتو گسترده ایجادشده توسط الگوریتم انتخاب‌های بیشتری به تصمیم‌گیرنده می‌دهد. الگوریتم ارائه‌شده به‌طور هم‌زمان جواب‌های بهتری از هردو تابع هدف را ارائه می‌دهد.

*جدول ۷. نتایج عددی در ابعاد بزرگ*

| اندازه مسئله | | *MID* | | *SNS* | | *RAS* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کار | ماشین | GA | SPGA | GA | SPGA | GA | SPGA |
| ۶ | ۲ | ۱۸۹/۲۴۵ | ۱۸۱/۷۷ | ۱۳/۰۷۱۵ | ۳/۷۸۹۲۶ | ۰/۹۴۶۳۴ | ۰/۹۱۲۶ |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۶ | ۳ | ۲۸۲/۳۲۷ | ۲۹۵/۰۵۱ | ۳/۰۷۳۹۶ | ۵/۵۴۵۵۷ | ۱/۹۲۶۵۵ | ۱/۶۷۶۰۳ |
| ۶ | ۴ | ۴۰۸/۳۷۵ | ۴۱۳/۲۴۴ | ۱۴/۳۱۳۶ | ۶/۴۲۹۶۴ | ۲/۵۳۵۵۲ | ۲/۴۴۱۳۶ |
| ۳۰ | ۳ | ۱۲۷۴/۱۷ | ۱۲۷۰/۹۷ | ۶۳/۸۸۴۶ | ۱۲/۲۱۷ | ۱/۸۴۳۴۲ | ۱/۸۴۴۰۶ |
| ۳۰ | ۵ | ۲۱۸۰/۸ | ۲۲۲۶/۶۷ | ۶۱/۱۹۲۴ | ۱۸/۹۸۷۸ | ۳/۷۵۶۸۲ | ۳/۶۹۲۶۹ |
| ۳۰ | ۷ | ۲۹۷۲/۷۶ | ۳۱۴۰/۳۳ | ۴۷/۲۴۱ | ۱۶/۰۲۳۲ | ۴/۹۶۵۴۴ | ۵/۳۲۸۲۳ |
| ۱۰۰ | ۴ | ۵۳۸۳/۰۵ | ۵۶۲۸/۹۹ | ۲۰۹/۹۷۳ | ۵۲/۳۳۷۷ | ۳/۰۰۰۱۱ | ۲/۹۹۹۶۸ |
| ۱۰۰ | ۶ | ۵۳۱۳/۲۵ | ۸۵۲۶/۷۷ | ۱۱۸/۴۰۱ | ۴۲/۳۸۹۱ | ۴/۹۰۵۴۵ | ۴/۹۴۹۶ |
| ۱۰۰ | ۸ | ۱۱۴۲۴/۱ | ۱۱۵۵۸ | ۱۱۷/۰۹ | ۵۹/۷۶۲ | ۶/۹۸۱۹۶ | ۶/۸۵۵۳۳ |
| ۱۰۰ | ۱۰ | ۱۴۱۳۸/۲ | ۱۴۲۰۷/۶ | ۱۶۳/۷۷۳ | ۶۱/۴۷۹۲ | ۸/۵۷۸۴ | ۸/۴۲۲۸۴ |




*شکل ۴. مقایسه ۷ به پارتو دو الگوریتم در نمودهای مختلف*

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مسائل زمان‌بندی در هر دو شاخه مدیریت تولید و بهینه‌سازی از اهمیت زیادی برخوردار است. زمان‌بندی با تخصیص منابع به فعالیت‌ها سروکاردارد؛ به‌طوری که هدف بهینه‌سازی یک یا چند معیار عملکرد است [۶]. در پژوهش حاضر یک مدل ریاضی برای مسئله جریان کارگاهی سبز با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت ارائه شده است. مسئله موردنظر دارای دو تابع هدف حداقل‌سازی بیشترین زمان تکمیل و هزینه انرژی است. مصرف انرژی ارتباط مستقیمی با هزینه انرژی دارد؛ بنابراین با بهینه‌سازی هدف مرتبط با معیار پایداری هم‌زمان اقدام به کاهش هزینه انرژی و مصرف انرژی شده است. در مسئله مدنظر، ماشین‌ها برای پردازش کارها می‌توانند از سه سرعت آرام، متوسط و کُند استفاده کنند که تخصیص هر یک از این سرعت‌ها به تغییر در زمان تکمیل کارها و همچنین مصرف انرژی و درنتیجه هزینه انرژی منجر می‌شود. پارامتر زمان پردازش کارها بر روی ماشین‌ها دارای عدم‌قطعیت است و از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. با هر بار راه‌اندازی برنامه زمان‌های پردازش مقادیر مختلفی به خود می‌گیرد و این تغییر در زمان‌ها موجب می‌شود تا تابع هدف‌ها نیز هر بار مقادیر مختلف داشته باشد و درواقع تابع اهداف نیز مانند یک متغیر در دنیای واقعی عمل کند؛ بنابراین از رویکرد مقدار موردانتظار در مدل‌سازی استفاده شده است. برای حل این مسئله، یک الگوریتم ژنتیک با رویکرد شبیه‌سازی ارائه شده و درنهایت عملکرد آن ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادشده عملکرد مطلوبی دارد. گستردگی جواب‌های به‌دست‌آمده و همچنین بهبود هر دو تابع هدف در جواب‌ها نشان‌دهنده عملکرد درست الگوریتم است که موجب کاهش مصرف و درنتیجه هزینه انرژی و زمان تکمیل می‌شود. کاهش هزینه‌های تولید یکی از اهدافی است که صنایع همواره در نظر دارند. مسئله انرژی از موضوع‌های حیاتی و مهم در سطح بین‌المللی است و همچنین لزوم درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در مسائل، به‌علاوه شکاف طبقاتی موجود در این مسئله باعث به‌وجودآمدن زمینه پژوهشی جدید شده است.

در ادامه برای تکمیل این پژوهش موضوع‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

ـ توزیع‌های احتمال دیگری نیز سنجیده شود؛

ـ از رویکردهای دیگری مانند مدیریت زمان پردازش و بیکاری ماشین‌ها برای مسئله‌ی هزینه استفاده شود ؛

ـ درنظرگرفتن سایر مدل‌های تولیدی مانند تولید کارگاهی و استفاده از سایر فراابتکاری‌ها و مقایسه عملکردها.

## منابع


1. Alam Tabriz, A. Roghanian, E. & Hoseinzadeh, M. (2012). Design and optimization of reverse logistics network under uncertainty using genetic algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective, 1*, 61-89. (In Persian).
2. Baker, K.R., Altheimer, D. (2012). Heuristic solution methods for the stochastic flow shop problem. *European Journal of Operational Research, 216(1)*, 172-177.
3. Chang, P.C., Chen, S.H., & Lin, K.L. (2005). Two-phase sub population genetic algorithm for parallel machine-scheduling problem. *Expert Systems with Applications, 29,* 705-712.
4. Dantzig, G.B. (1955). Linear Programming under Uncertainty. *Management Science, 1,* 197-206.
5. Ding, J.Y., Song, S., & Wu, C. (2016). Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research, 248,* 758-771.
6. Fatahi, P. Mohamadi, E. & Daneshamoz, F. (2019). Solve Multi-Objective Jobshop Scheduling Problem with One Step of Assembly and Considering the Flow of Cargo. *Journal of Industrial Management Perspective, 9(33),* 61-86. (In Persian).
7. Framinan, J.M., P-Gonzalez, P. (2015). On heuristic solutions for the stochastic flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research, 246(2),* 413-420.
8. Gahm, C., Denz, F., Dirr, M., & Tuma, A. (2016). Energy-efficient scheduling inmanufacturing companies: A reviewand research framework. *European Journal of Operational Research, 248,* 744–757.
9. Gonzalez-Neira, E. M., Ferone, D., Hatami, S. & Juan, A. (2017). A biased-randomized simheuristic for the distributed assembly permutation flowshop problem with stochastic processing times. *Simulation Modelling Practice and Theory, 79,* 23–36.
10. Gourgand, M., Grangeon, N., & Norre, S. (2005). Markovian analysis for performance evaluation and scheduling in m machine stochastic flow-shop with buffers of any capacity. *European Journal of Operational Research, 161(1),* 126-147.
11. Juan, A.A., Barrios, B.B., Vallada, E., Riera, D., & Jorba, J. (2014). Asimheuristic algorithm for solving the permutation flow shop problem with stochastic processing times. *Simulation Modeling Practice and Theory, 46,* 101-117.
12. Liefooghe, A., Basseur, M., Jourdan, L., & Talbi, E. (2007). Combinatorial Optimization of Stochastic Multi-Objective Problems: An Application to the Flow-Shop Scheduling Problem. *EMO 2007, LNCS 4403,* 457-471.
13. Luo, H., Du, B., Huang, G.Q., Chen, H., Li, X. (2013). Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost. *International Journal of Production Economics, 146,* 423-439.
14. Mansouri, S.A., Aktas, E., & Besikci, U. (2016). Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption. *European Journal of Operational Research, 248,* 772-788.
15. Masmoudi, O., Yalaoui, A., Ouazene, Y., & Chehade, H. (2016). Solving a capacitated flow-shop problem with minimizing total energy costs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 90, pages2655–2667.*
16. Schulz, S. (2018). A genetic algorithm to solve the hybrid flow shop scheduling problem with subcontracting options and energy cost consideration. *SAT 2018, AISC 854,* 263–273.

17. Tanaev, V., Sotskov, Yuri, N., & Strusevich, V.A. (2012). Scheduling Theory: Multi-Stage Systems. *Springer Science & Business Media*.
18. Tang, D., Dai, M., Salido, M.A., & Giret, A. (2016). Energy-efficient dynamic scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization. *Computers in Industry, 81*, 82–95.
19. Wang, K., Choi, S.H., & Lu, H. (2015). A hybrid estimation of distribution algorithm for simulation-based scheduling in a stochastic permutation flowshop. *Computers and Industrial Engineering, 90,* 186-196.
20. Zhai, Y., Biel K, Zhao, F., &Sutherland, J. (2017). Dynamic scheduling of a flow shop with on-site wind generation for energy cost reduction under real time electricity pricing. CIR*P Annals - Volume 66, Issue 1, Pages 41-44*.
21. Zandieh, M. & Fotovat, A. (2015). Flowshop scheduling system with limitation of machine access and learning effect based on a hybrid model. *Journal of Industrial Management Perspective, 1*, 41-58. (In Persian).
22. Zhang, H., Zhao, F., Fang, K., & Sutherland, J.W. (2014). Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 63,* 37-40.
23. https://www.iea.org/tcep/industry, Available at February 2017.