

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

سال دهم، شماره ۳۸، تابستان ۱۳۹۹

شاپا چاپی: ۰۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

صص ۳۲-۹

الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی مبنا برای حل مسئله زمان‌بندی جريان کارگاهی با درنظر گرفتن هزینه انرژی تحت شرایط عدم قطعیت

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 نزدیک‌تر شدن مسئله به دنیای واقعی، مسئله تحت عدم قطعیت 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 می‌باید و برعکس. این تفاوت در سرعت به ایجاد مقادیر متفاوت و متصاد در تابع اهداف منجر می‌شود؛ بنابراین باید راهکاری پیشنهاد شود که علاوه بر ترتیب کار، سرعت دستگاه‌ها به عنوان متغیر تصمیم به صورت بهینه مشخص شوند. یک مدل ریاضی ارائه شده و پیس از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر شبیه‌سازی برای حل مسئله در بعد بزرگ استفاده شده است. بهزای هریار ارزیابی تابع هدف در الگوریتم از شبیه‌سازی استفاده شده است تا عدم قطعیت موجود در پارامتر زمان پردازش درنظر گرفته شود. با توجه به تصادفی بودن زمان پردازش، از مدل ارزش انتظاری برای مقابله با عدم قطعیت 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؛ عدم قطعیت.

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 صفر 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 از قبل تعیین شده است تا بتوان اهداف از پیش تعیین شده و مدنظر را برآورده کرد. این مسئله با بیش از دو ماشین در کلاس مسائل NP-hard [۱۷]. انرژی از مهم‌ترین منابع برای تولید ۳۸ محسوب می‌شود. بنا بر اعلام «آژانس بین‌المللی انرژی» (IEA)، صنعت مسئول استفاده درصد از کل مصرف انرژی در سال ۲۰۱۶ در جهان بوده است و نقش اساسی در تأثیرات محیطی دارد [۲۳].

از آنجاکه 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 به طور غیرمستقیم مصرف انرژی نیز کاهش می‌یابد و با توجه به تجدیدناپذیری‌بودن 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 آب‌وهایی، 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 راه کارهای مختلف، استفاده شود. تولید پایدار به معنای ارائه کالا و خدمات به نحوی است که باعث آلودگی نشود، از منابع و انرژی محافظت کند، از نظر اقتصادی شدنی باشد و برای مصرف کنندگان، کارگران و جامعه

1. International Energy Agency

امن و سالم باشد. تولید پایدار برای محیط‌زیست، جامعه، ارگان‌ها و کارمندان تماماً مزیت است. از آنجاکه در بین مسائل مطرح در مفاهیم نگهدارندگی، محیط‌زیست و بهخصوص منابع و انرژی از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردارند، بیشتر تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه در جهت بهبود ابزار و ماشین‌ها به منظور 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 از قبل شناخته شده (قطعی) است. در دنیای واقعی، مسائل همواره با عدم قطعیت مواجهه هستند. محیط‌های تولیدی در دنیای واقعی متحمل عدم قطعیت‌های بسیار و متفاوتی شامل تغییرات زمان پردازش، خرابی ماشین، تغییر در زمان‌های درسترس، سفارش‌های باعجله و متوقف شدن کارها می‌شوند. در نظر گرفتن عدم قطعیت باعث نزدیک شدن شرایط مسئله به شرایط واقعی و راه‌اندازی موققیت‌آمیز سیستم تولید می‌شود. این مسئله، انجیزه بررسی مسئله تحت عدم قطعیت 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 عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. در ادامه پس از معرفی بر مبانی نظری موضوع، به بیان مسئله و مدل‌سازی آن پرداخته خواهد شد. در ادامه با توصیف عدم قطعیت موجود در مسئله و نحوه برخورد با آن و با توجه به پیچیدگی مسئله، الگوریتم فرالبتکاری 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^(۱)، یک مدل ریاضی برای حداقل‌سازی کل هزینه تولیدات داخلی و خارجی شامل هزینه حمل و نقل و

1. Schulz

انرژی برای یک مسئله جریان کارگاهی ترکیبی در اندازه کوچک ارائه کرد. او از یک الگوریتم ژنتیک بر مبنای ماتریکس کدگذاری شده برای حل این مسئله بهره گرفت. از راه حل های این پژوهش می توان به استفاده از زمان های بیکاری اشاره کرد [۱۶]. ژای و همکاران (۲۰۱۷)، یک روش زمان بندی پویا برای حداقل سازی هزینه الکتریسیته مسئله جریان کارگاهی که از انرژی تجدیدپذیر توربین های بادی استفاده می کند، ارائه کردند. آن ها یک مدل ریاضی برای این مسئله ارائه دادند که در آن هزینه الکتریسیته و قدرت باد هر ساعت به روزرسانی می شود [۲۰]. مسمودی و همکاران (۲۰۱۶)، یک مسئله جریان کارگاهی ظرفیت دار را با ملاحظات انرژی با هدف حداقل سازی هزینه کل در نظر گرفتند. آن ها افق برنامه ریزی را به دوره های زمانی زیادی تقسیم کردند که هر یک از این دوره ها با طول زمان، تقاضای خروجی و قیمت الکتریسیته مشخص می شود. آن ها از دو الگوریتم رهاسازی و ثابت سازی برای حل مسئله استفاده کردند [۱].

گاهم و همکاران (۲۰۱۶)، پژوهش های گسترده ای درباره زمان بندی پایدار انجام دادند و پژوهشی مرسوری با موضوع «زمان بندی صرفه جو در انرژی در کارخانه های تولیدی: مرسور و چارچوبی برای پژوهش» منتشر کردند. هدف ارائه این پژوهش، بهبود یک چارچوب پژوهش برای رویکرد زمان بندی صرفه جو در انرژی بود [۸]. منصوری و همکاران (۲۰۱۶)، برای یک مسئله جریان کارگاهی دوماشینه یک مدل ریاضی عدد صحیح چندهدفه با زمان آماده سازی وابسته به توالی با دو هدف حداقل سازی زمان تکمیل و کل مصرف انرژی ارائه کردند. مسئله مورد بررسی آن ها قطعی بود. در پژوهش آن ها ماشین ها دارای سرعت پردازش مختلف بودند. برای حل، یک الگوریتم ابتکاری سازنده ارائه شد و دو حد بالا و پایین برای مسئله به دست آمد [۱۴].

تانگ و همکاران (۲۰۱۶)^۳، به زمان بندی پویای صرفه جو در انرژی برای مسئله جریان کارگاهی انعطاف پذیر با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی بهبود یافته تجمع ذرات پرداختند. ایده آن ها برای انرژی تقسیم بندی مصرف انرژی در سه زمان پردازش، شروع و آمادگی بود؛ به طوری که زمان آمادگی کاهش یابد [۱۸]. دینگ و همکاران (۲۰۱۶)، مسئله قطعی زمان بندی جریان کارگاهی جایگشتی را با اهداف حداقل سازی اثرات کربن و بیشترین زمان تکمیل بررسی کردند. در این پژوهش، ماشین ها دارای سرعت و قدرت متفاوت هستند که موجب ایجاد میزان متغیری از کربن و زمان تکمیل می شوند. این پژوهشگران برای حل مسئله مطرح شده یک الگوریتم چندهدفه NAH و همچنین یک الگوریتم چندهدفه تغییر یافته جست و جوی 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.

زانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۴)، یک فرمول‌بندی ریاضی با اهدف متضاد حداقل‌سازی زمان درگردش و هزینه برق و اثرات کربن برای مسئله جریان کارگاهی ارائه دادند. آن‌ها از تعریفهای زمان مصرف به نحوی که توان تولیدی به خطر نیقتد، استفاده کردند. مسئله در حالت قطعی بررسی شده است [۲۲]. لو و همکاران^۲ (۲۰۱۳)، در پژوهشی با عنوان «زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی با هدف اصلی بهبود کارایی تولید و درنظرگرفتن هزینه الکتریسیته مصرفی ماشین»، از تعریفی 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 مروء مبانی نظری در موضوع زمان‌بندی با درنظرگرفتن انرژی در جدول ۱، آمده است.

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

| شماره مقاله | مدل تولیدی | تابع هدف‌ها | رویکرد انرژی | روش حل | توضیحات |
|----------------|------------------------------|--|---------------------|--|-------------------|
| [۱۶] | جریان کارگاهی ترکیبی | کاهش تمام هزینه‌های تولید شامل هزینه انرژی و حمل و نقل | تغیر زمان تولید | فرابتکاری ژنتیک بر مبانی ماتریس گُشده | |
| [۲۰] | جریان کارگاهی | هزینه انرژی | تغیر زمان تولید | یک رویکرد پویای زمان‌بندی | |
| [۱۵] | جریان کارگاهی ظرفیت‌دار | هزینه انرژی + نگهداری + آمده‌سازی | تغیر زمان تولید | - الگوریتم رهاسازی - ثبت‌سازی و ژنتیک | |
| [۱۴] | جریان کارگاهی دوماشینه | بیشترین زمان تکمیل + مصرف انرژی | تغیر سرعت پردازش | ابتكاری سازنده | |
| [۱۸] | جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر | بیشترین زمان تکمیل + مصرف انرژی | کاهش زمان بیکاری | فرابتکاری ترقی‌یافته مسئله پویا | |
| [۵] | جریان کارگاهی | بیشترین زمان تکمیل + خروج کربن دی‌اکسید | تغیر سرعت پردازش | فرابتکاری جست‌وجو حریصانه + ابتکاری | |
| [۲۲] | جریان کارگاهی | هزینه انرژی + کربن دی‌اکسید + زمان در گردش | تغیر زمان تولید | تعزیز زمان حل مدل دقیق | تعزیز زمان صرف |
| [۱۳] | جریان کارگاهی ترکیبی | بیشترین زمان تکمیل + مصرف انرژی | تغیر زمان تولید | فرابتکاری کلونی مورچگان | تعزیز زمان صرف |

زمان‌بندی احتمالی. عدم قطعیت 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^۱ (۲۰۱۷)، یک الگوریتم شبیه‌سازی - ابتکاری ارائه کردند که اصول تصادفی‌سازی و تکنیک‌های شبیه‌سازی را به‌منظور حداقل کردن زمان تکمیل موردانظر از یک مسئله جریان کارگاهی به کار می‌گیرد. در این پژوهش زمان پردازش و زمان موتناز متفیرها تصادفی هستند [۹]. فرامینان و گونزالس^۲ (۲۰۱۵)، به بررسی مباحثی اساسی درباره تخمین بیشترین زمان تکمیل موردانظر برای یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی پرداختند. زمان پردازش در پژوهش آنها از توزیع لاغ نرمال پیروی می‌کند و میانگین توزیع لاغ نرمال از توزیع یکنواخت گرفته شده است. مسئله پژوهش آن‌ها تنها دارای یک هدف بیشترین زمان تکمیل موردانظر بود [۷]. وانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۵)، یک الگوریتم ترکیبی مؤثر تخمین توزیع دومرحله‌ای شبیه‌سازی مبنای 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 موردانظر بود. این الگوریتم از یک مدل شبیه‌سازی دومرحله‌ای و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک نیز استفاده می‌کند [۱۹]. جوان و همکاران^۴ (۲۰۱۴)، یک الگوریتم شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای حل مسئله جریان کارگاهی جایگشتی با زمان پردازش احتمالی ارائه کردند که ترکیبی از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و فرآبتكاری جستجوی محلی تکرارشونده بود. تنها تابع هدف مدنظر آن‌ها برای این مسئله بیشترین زمان تکمیل موردانظر 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^۵ (۲۰۱۲)، یک مسئله جریان کارگاهی و توزیع عمومی زمان پردازش را در نظر گرفتند. زمان پردازش دارای میانگین و واریانس مشخص شده‌ای است و زمان‌های پردازش به صورت مستقل از یک خانواده توزیع احتمالی پیروی می‌کنند. سه روش ابتکاری سازنده ارائه شده است که این روش‌ها از ابتکاری‌های CDS و NAH و قوانین جانسون و تالوار پیروی می‌کنند [۲].

لیفووق و همکاران^۶ (۲۰۰۷)، برای نخستین بار مسئله زمان‌بندی احتمالی چندهدفه را بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها زمان‌های پردازش احتمالی و دارای توزیع احتمال نرمال، لاغ نرمال، یکنواخت، نمایی و حالتی که توزیع هر ماشین با دیگری متفاوت باشد، بودند. دو هدف «حداقل‌سازی بیشترین زمان تکمیل» و «تأثیرگذاری» مدنظر قرار گرفت. آن‌ها سه روش 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. Liefoghe, A. et al.

است، ارائه کردند [۱۲]. گورگاند و همکاران^۱ (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 چیمن - کلموگروف و زنجیره مارکوفی برای محاسبه بیشترین زمان تکمیل موردنظر ارائه کردند. این طرح با فرآیندهایی بر اساس انجام 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

| مقاله | تولیدی | مدل | شماره | تابع | هدفها | مسنله، توزیع آن | پارامتر تصادفی | رویکرد | واجهه | روش حل | توضیحات |
|-------------------------|------------------|---------|-------------------------|---|---|---|------------------|----------|-----------------------|---|---------------------------------|
| مقاله | تکمیل | کارگاهی | جریان | بیشترین زمان | زمان پردازش و زمان موردنظر | زمان پردازش زمان | با عدم احتمالی | تابع هدف | قطعیت | | |
| بیشترین زمان کارگاهی | جریان کارگاهی | [۹] | بیشترین زمان کارگاهی | زمان پردازش لاغ نرمال | زمان پردازش و زمان موردنظر | زمان پردازش زمان | با دستاویز | مدار | با دستاویز | الگوریتم شبیه‌سازی- ابتکاری | |
| بیشترین زمان کارگاهی | جریان کارگاهی | [۷] | بیشترین زمان کارگاهی | زمان پردازش نرمال | زمان پردازش نرمال | زمان پردازش نرمال | با دستاویز | مدار | با دستاویز | تخمین زمان‌بندی | ابتکاری، شبیه‌سازی |
| بیشترین زمان کارگاهی | جریان کارگاهی | [۱۹] | بیشترین زمان کارگاهی | زمان پردازش نرمال | زمان پردازش نرمال | زمان پردازش نرمال | با دستاویز | مدار | با دستاویز | تخمین توزیع | فرآیندهای شبیه‌سازی |
| بیشترین زمان کارگاهی | جریان کارگاهی | [۱۱] | بیشترین زمان کارگاهی | زمان پردازش (تفاوت در زمان پردازش هر ماشین) | زمان پردازش (تفاوت در زمان پردازش هر ماشین) | زمان پردازش (تفاوت در زمان پردازش هر ماشین) | با دستاویز | مدار | با دستاویز | فرآیندهای شبیه‌سازی | جستجو محلي تکرارشونده |
| بیشترین زمان کارگاهی | جریان کارگاهی | [۲] | بیشترین زمان کارگاهی | زمان پردازش توزیع عومومی | زمان پردازش توزیع عومومی | زمان پردازش توزیع عومومی | با دستاویز | مدار | با دستاویز | بر مبنای NAH و تالوار و جانسون | سه ابتکاری، نمونه‌گیری |
| بیشترین زمان کارگاهی | جریان کارگاهی | [۱۲] | بیشترین زمان کارگاهی | زمان پردازش نمایی، نرمال، لاغ نرمال و یکنواخت با توزیع هر ماشین متفاوت | زمان پردازش نمایی، نرمال، لاغ نرمال و یکنواخت با توزیع هر ماشین متفاوت | زمان پردازش نمایی، نرمال، لاغ نرمال و یکنواخت با توزیع هر ماشین متفاوت | با دستاویز | مدار | با دستاویز | الگوریتم تکاملی شاخص مبنای فرآیندهای | سه ابتکاری متفاوت بر مبنا |
| بیشترین زمان کارگاهی | جریان کارگاهی | [۱۰] | بیشترین زمان کارگاهی | زمان پردازش نمایی | زمان پردازش نمایی | زمان پردازش نمایی | روابط موردنظر | مدار | ترکیب دقیق مارکوفی | بی و بازخیره با فرآیندهای میانی محدود | |

1. Gourgand, M. et al.

بررسی پژوهش‌های ذکر شده نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی هم‌زمان به بررسی زمان‌بندی احتمالی با درنظرداشتن معیارهای پایداری نپرداخته است. در پژوهش حاضر، مسئله جریان کارگاهی با هدف حداقل کردن 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 عدم قطعیت در مسائل باعث صورت گرفتن 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 به طوری که 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 عدم قطعیت هستند و از توزیع یکنواخت پیروی می‌کنند [۱۹، ۲]. در مدل ارائه شده 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 بر عکس. درواقع سرعت مختلف موجب تغییرات متضاد توابع هدف می‌شود. مسئله موردنظر با نماد $Fm \mid perm \mid E(C \text{ max}), E(EC)$ نشان داده می‌شود.

مفهوم مدل

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

اندیس ها $i, h = 1, \dots, m$: اندیس ماشین. $j = 1, \dots, n$: اندیس کار. $k = 1, \dots, n$: اندیس موقعیت یک نقطه در توالی. $s = 1, 2, 3$: اندیس سرعت.**پارامترها** m : تعداد ماشین‌ها. n : تعداد کارها. \tilde{P}_{ij} : زمان پردازش کار j روی ماشین i . v_s : سرعت پردازش (به ترتیب برای اندیس‌های $3, 2, 1 = s$ 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** θ_i : زمان بیکاری روی ماشین i . c_{ik} : زمان تکمیل k امین کار پردازش شده روی ماشین i . s_{ik} : زمان شروع k امین کار پردازش شده 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 این صورت صفر است.**مدل مسئله**

$$\min E(C \max) \quad (1)$$

$$\min E(EC) \quad (2)$$

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

$$c_{ik} \geq c_{i-1,k} + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^3 \frac{\tilde{p}_{ij}}{v_s} x_{ijks}, i \in \{2, \dots, m\}, k \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

$$c_{ik} \geq c_{i,k-1} + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^3 \frac{\tilde{p}_{ij}}{v_s} x_{ijks}, i \in \{1, \dots, m\}, k \in \{2, \dots, n\} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^3 x_{ijks} = 1, \forall i, \forall j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^3 x_{ijks} = 1, \forall i, \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^3 x_{ijks} = \sum_{s=1}^3 x_{hjks}, \forall i, \forall h, \forall j, \forall k \quad (8)$$

$$C \max \geq c_{mn} \quad (9)$$

$$\theta_i = C \max - \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^3 \frac{\tilde{p}_{ij}}{v_s} x_{ijks}, \forall i \quad (10)$$

$$EC = u(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^3 \sum_{k=1}^n \frac{e_{is} \tilde{p}_{ij} x_{ijks}}{v_s} + \sum_{i=1}^m f_i \theta_i) \quad (11)$$

$$\theta_i \geq 0, c_{ik} \geq 0, s_{ik} \geq 0, EC \geq 0, C \max \geq 0, x_{ijks} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

محدودیت‌های اول و دوم تابع هدف مسئله، حداقل‌سازی مقدار موردنظر بیشترین زمان تکمیل و کل هزینه انرژی است را نشان می‌دهند. محدودیت سوم، زمان تکمیل اولین کار پردازش شده بر روی اولین ماشین را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های چهارم و پنجم، زمان تکمیل سایر کارهای پردازش شده بر روی باقی ماشین‌ها را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های 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. از آنجاکه جمع دو طرف تساوی یک خواهد شد، به ازای 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 ($1/2$)، نرمال ($1/8$) و کند ($0/8$)، میزان مصرف انرژی ماشین (برای هر سه ماشین) در حالت بیکاری $0/5$ و عامل هزینه $1/0$ و اطلاعات زیر، حل شده است.

| جدول ۱. میزان مصرف انرژی در حالت پردازش با سرعت s | | | |
|---|-------|-------|----------|
| $s=3$ | $s=2$ | $s=1$ | $e(i,s)$ |
| $0/6$ | $0/9$ | $1/2$ | $i=1$ |
| $0/7$ | 1 | $1/3$ | $i=2$ |
| $0/5$ | $0/8$ | 1 | $i=3$ |

جدول ۲. زمان پردازش کار روی ماشین با تابع یکنواخت ($25, 20, 20$)

| $j=10$ | $j=9$ | $j=8$ | $j=7$ | $j=6$ | $j=5$ | $j=4$ | $j=3$ | $j=2$ | $j=1$ | $p(i,j)$ |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $24/132$ | $22/697$ | $20/49$ | $21/265$ | $20/193$ | $22/50.8$ | $22/264$ | $22/159$ | $22/931$ | $22/64$ | $i=1$ |
| $20/110$ | $20/80.7$ | $22/0.83$ | $22/0.18$ | $22/0.02$ | $20/789$ | $22/236$ | $21/523$ | $21/110$ | $20/550$ | $i=2$ |
| $21/686$ | $22/299$ | $22/491$ | $21/156$ | $22/871$ | $22/699$ | $22/698$ | $22/350$ | $22/241$ | $22/796$ | $i=3$ |

خروجی گمز با زمان اجرا $0/031$ ثانیه به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 z1 &= Cmax = 315/285, z2 = TEC = 651/871 \\
 x(1, 1, 7, 3) &= x(1, 2, 5, 3) = x(1, 3, 8, 3) = x(1, 4, 2, 1) = x(1, 5, 6, 3) = x(1.6.3.2) = x(1, 7, 4, 1) = x(1, 8, 1, 2) = x(1, 9, 9, 3) = x(1, 10, 10, 3) = x(2, 1, 7, 3) = x(2, 2, 5, 2) = x(2, 3, 8, 2) = x(2, 4, 2, 3) = x(2, 5, 6, 3) = x(2.6.3.3) = x(2, 7, 4, 1) = x(2, 8, 1, 3) = x(2, 9, 9, 2) = x(2, 10, 10, 3) = \\
 x(3, 1, 7, 3) &= x(3, 2, 5, 3) = x(3, 3, 8, 3) = x(3, 4, 2, 1) = x(3, 5, 6, 1) = x(3.6.3.3) = \\
 x(3, 7, 4, 3) &= x(3, 8, 1, 3) = x(3, 9, 9, 1) = x(3, 10, 10, 1) = 1
 \end{aligned}$$

عدم قطعیت، دلیل و نحوه برخورد با آن. در اغلب مسائل بهینه‌سازی کمیت‌هایی 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 عدم قطعیت برنامه‌ریزی احتمالی و برنامه‌ریزی پویا هستند. برنامه‌ریزی پویا زمانی قابل استفاده است که مسئله قابلیت تجزیه به زیرمسائل را داشته باشد. این زیر مسائل مستقل از هم نیستند. رویکرد این پژوهش برای درنظر گرفتن عدم قطعیت، برنامه‌ریزی احتمالی است.

برنامه‌ریزی احتمالی ابتدا با پژوهش دانتزیگ^۱(۱۹۵۵)، با عنوان برنامه‌ریزی خطی تحت عدم قطعیت 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 تصادفی اند 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 به خوبی 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 در نظر 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 به کار 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 قابل تحلیل 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. به طور کلی از مزیت تمام روش‌های گفته شده 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 – model) 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 به صورت آشکاری مفهوم زمان را در برمی‌گیرند. مسئله بررسی شده در این پژوهش از این نوع می‌باشد. برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای و چند مرحله‌ای 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.

از پیش تعیین شده‌ای از مشاهدات پارامترهای تصادفی مدل، محدودیت‌ها نقض نمی‌شوند. مدل‌ها می‌توانند دارای تابع هدفی از نوع امید ریاضی، واریانس یا احتمالی باشند. مدل ارائه شده 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 مسئله NP-hard است، به طور قطع مسئله درنظر گرفتن توابع هدف چندگانه باعث پیچیده‌تر شدن آن هم خواهد شد. پیچیدگی دیگر مسئله به عدم قطعیت آن بازمی‌گردد. عدم قطعیت پیچیدگی‌ای است که هنگام تعریف و مدل‌سازی مسئله وارد می‌شود و باید از رویکردی برای ازبین بردن آن استفاده کرد. با توجه به تمام پیچیدگی‌های موجود در ذات مسئله مورد بررسی، حل آن به صورت بهینه در ابعاد بزرگ در زمان معقول غیرممکن بوده و درنتیجه در ادامه برای حل آن یک الگوریتم فراابتکاری توسعه داده خواهد شد.

الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی مبنا. در این بخش یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله موردنظر ارائه می‌شود. پژوهشگران برای حل این گونه مسائل از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌کنند. از میان روش‌های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک به دلیل 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 قابل تطبیقی 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 راه حل 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 قابل جستجو؛
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 تعیین شده شامل:
 - a. تقاطع
 - b. جهش
 - c. انتخاب؛
۷. ذخیره بهترین جواب نسل جدید به عنوان یکی از جواب‌های لایه پارتو با وزن تعیین شده در گام ۳؛
۸. تکرار گام‌های ۴ تا ۸ تا رسیدن به تعداد از قبل تعیین شده جواب‌های لایه پارتو.

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

نحوه کدکردن کروموزوم‌ها. هر کروموزوم به یکی از افراد جمعیت اشاره دارد و نشان‌دهنده یک راه حل در فضای حل است. برای کارآمدی الگوریتم باید رابطه یک به یکی بین راه حل کدشده و کروموزوم برقرار باشد؛ به این معنا که هر راه حل تنها می‌تواند به یک کروموزوم اشاره داشته باشد و برعکس. در الگوریتم ژنتیک هر کروموزوم (راه حل) توسط کُدی نمایش داده می‌شود. کُد باید به‌گونه‌ای طراحی شود تا برخی از محدودیت‌های مسئله را ارضاء کند. در کُد ارائه شده این پژوهش، محدودیت‌های مربوط به ساختار جواب مانند توالی و تخصیص سرعت ارضاء شده است. نحوه کُدکردن در مسئله موردنظر این پژوهش به‌نحوی که برای الگوریتم قابل پردازش 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 وغیره. 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 گذکردن 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 راه حل با توجه به ویژگی‌های مدل به مقادیر مشخصی از تابع اهداف منجر می‌شود. در الگوریتم ژنتیک نیز هر کروموزوم (راه حل) نشان‌دهنده یک نقطه در فضای جواب است. چگونگی بهدست آوردن این جواب به مدل، محدودیت و پارامترهای مسئله بستگی دارد. نحوه بهدست آوردن این مقدار با استفاده از تابعی که در مسائل حداکثرسازی به برازنده‌گی 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 گذکردن ارضا شده و سایر محدودیت‌هایی که به بهدست آوردن تابع اهداف منجر می‌شوند در تابع هزینه بر طرف 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 قابل توجه یافتن جواب‌های بهینه پارتو است. تاکنون روش‌های متعددی مانند جمع وزنی، روش محدودیت، روش الپی متريک و غیره پیشنهاد شده است. روش جمع وزنی به علت سادگی در استفاده و اینکه با تغییرات مناسب وزن‌ها قادر به بهدست آوردن تمامی جواب‌های موجود در لایه پارتو است، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در الگوریتم حاضر نیز از روش جمع وزنی برای بهدست آوردن جواب‌های غیرمغلوب استفاده شد.

در پژوهش حاضر پارامتر زمان پردازش دارای عدم قطعیت است و از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. همان‌طور که گفته شد، رویکردهای مختلفی مانند تبدیل به قطعی، تعریف سناریو، شبیه‌سازی و غیره برای عدم قطعیت وجود دارد که در این پژوهش برای مواجهه با آن و در نظر گرفتن تأثیرات آن بر جواب از رویکرد شبیه‌سازی در حل مسئله استفاده شده است به این صورت که بهارای هر بار ارزیابی تابع هدف، مسئله با ۱۰۰ زمان پردازش تصادفی مختلف از توزیع یکنواخت حل می‌شود و میانگین توابع اهداف به دست آمده به عنوان جواب نهایی ارزیابی مدنظر قرار می‌گیرد. در واقع ۱۰۰ سناریوی تصادفی آزمایش می‌شود. به علت زمان بربودن حل و تعداد ارزیابی زیاد در تولید لایه‌ی پارتو از تعداد ۱۰۰ شبیه‌سازی استفاده شده است و در واقع هر جواب به دست آمده 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 راه حل‌های موجود در جهت یافتن راه حل بهتر به کار می‌رود. روش‌های مختلفی برای تقاطع در مبانی نظری موجود است. در پژوهش حاضر از تقاطع تک نقطه‌ای بر روی دو والد تصادفی انتخاب شده و تولید دو فرزند جدید استفاده شده است.

عملگر جهش. جهش به معنای ایجاد ساختارهای جدید در جمعیت به منظور 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 تعیین 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.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 2 | 1 | 4 | 3 |
| 2 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 4 | 2 | 1 | 5 | 3 |
| 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |

شکل ۱. عملگر جهش

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

نحوه برخورد با جواب‌های نشدنی. لزوماً جواب‌ها بعد از به کارگیری 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 به هم ریختن این توالی و درنتیجه غیرموجه شدن جواب شود. سایر سطرهای ماتریس سرعت پردازش هر کار بر هر ماشین را نشان می‌دهد و با عملگر تقاطع مشکلی در موجه بودن جواب به وجود نمی‌آید؛ همچنین عملگر جهش به دلیل ساختار گُذگاری جواب، همواره جوابی موجه را نتیجه می‌دهد. به عنوان 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 ناهمانگی 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 موجه بودن جواب حاصل از عملگر حفظ خواهد شد.

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

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

| | | | | |
|---|---|---|----|---|
| ۵ | ۲ | ۳ | ۰۱ | ۴ |
| ۲ | ۳ | ۲ | ۱ | ۳ |
| ۱ | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ |

| | | | | |
|---|---|----|---|---|
| ۲ | ۱ | ۰۵ | ۴ | ۳ |
| ۳ | ۱ | ۲ | ۳ | ۲ |
| ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ |

شکل ۲. عملگر تقاطع و تعمیر خروجی حاصل از آن

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش بعد از معرفی چند شاخص معنبر در زمینه بهینه‌سازی چنددهدفه، 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 زیر جمعیت استفاده شده است که این الگوریتم برای نخستین بار توسط چانگ و همکاران (۲۰۰۵)، برای حل یک زمان‌بندی ماشین‌های موازی چنددهدفه استفاده شد که در اینجا برای مسئله موردنرسی در این پژوهش تطبیق داده شده است [۳].

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

MID (میانگین فاصله‌ی ایده‌آل): نزدیکی جواب پارتول و نقطه‌ی ایده‌آل (۰ و ۱) 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 بدست آورد:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n}, c_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2} \quad (13)$$

SNS: گسترده‌گی جواب‌های غیر مغلوب را نشان می‌دهد. بالا بودن این معیار، کارایی الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MID - c_i)^2}{n-1}} \quad (14)$$

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

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{1i} - F_i}{F_i} \right) + \left(\frac{f_{2i} - F_i}{F_i} \right)}{n}, F_i = \min \{f_{1i}, f_{2i}\} \quad (15)$$

1. Chang, P. C. et al.

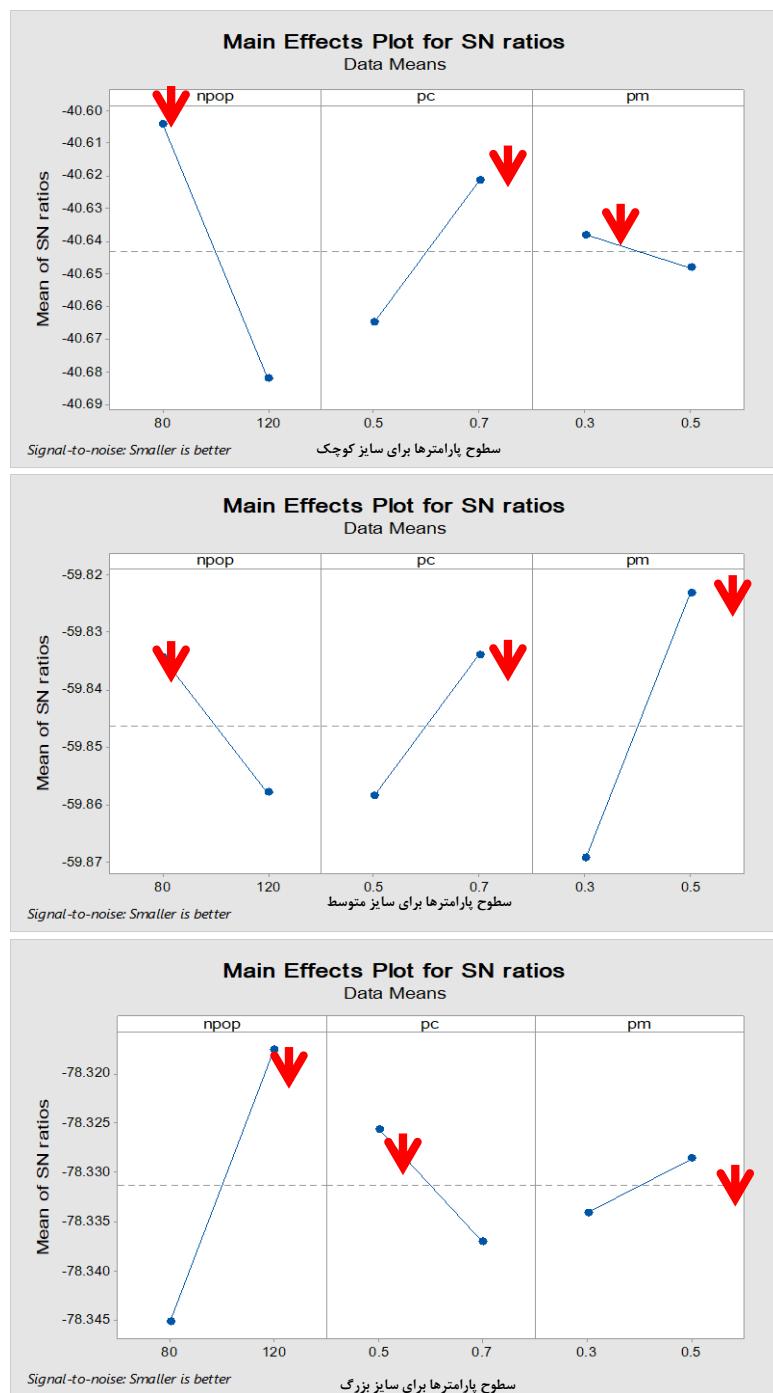
تنظیم پارامترهای الگوریتم. برای اینکه الگوریتم جواب‌های خوبی ارائه دهد، لازم است تا پارامترهای آن آزمایش شود و مقادیری از آن‌ها که جواب‌های بهتری ایجاد می‌کنند، انتخاب شوند. پارامترهای الگوریتم ارائه شده و همچنین سطوح موردنظر آن‌ها در جدول ۴، نشان داده است. به این منظور در اینجا هشت آزمایش با فرض $e_{i1} = 1.2, e_{i2} = 0.9, e_{i3} = 0.5 \forall i$ و $f_i = 0.5 \forall i$ برای سه اندازه کوچک، بزرگ و متوسط به طور تصادفی ایجاد و اجرا شد و نتایج حاصل از صد جواب به دست آمده 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 به ترتیب 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 n_{pop} 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 جمیت (n_{pop}) | ۸۰-۱۲۰ |
| نرخ تقاضه (pc) | ۰/۰-۷/۵ |
| نرخ جهش (pm) | ۰/۰-۵/۳ |

جدول ۵. نتایج آزمایش‌ها برای تنظیم پارامترها

| ردیف | اندازه بزرگ | | | اندازه متوسط | | | اندازه کوچک | | |
|------|-------------|----------|----------|--------------|----------|-----------|-------------|----------|----------|
| | RAS | SNS | MID | RAS | SNS | MID | RAS | SNS | MID |
| ۱ | ۸/۸۳۴۷ | ۱۷۲/۹۵۸۲ | ۱۴۳۲۰/۱۹ | ۲/۸۱۰۳۲۹ | ۸۲/۶۹۴۹۵ | ۱۷۰۰/۵۶۴ | ۰/۸۲۶۰۰۳ | ۱۳/۱۲۹۵۲ | ۱۸۶/۴۴۵۴ |
| ۲ | ۸/۸۹۷۲ | ۱۹۳/۹۶۶۶ | ۱۴۲۲۳/۸۴ | ۲/۸۲۲۶۴۲ | ۸۸/۳۷۹۹۲ | ۱۷۰۱/۸۲۳ | ۰/۷۹۷۱۷۹ | ۱۲/۷۷۴۶۱ | ۱۸۴/۹۴۹ |
| ۳ | ۸/۸۴۳۸ | ۱۵۳/۶۲۳۹ | ۱۴۳۰۶/۴۲ | ۲/۸۱۱۴۹۱ | ۸۹/۳۴۱۹۷ | ۱۷۰۱/۵۱۸ | ۰/۷۷۳۳۵۱ | ۱۲/۳۴۵۸۷ | ۱۸۴/۵۲۳۶ |
| ۴ | ۸/۹۱۷۴ | ۱۷۹/۱۲۶۵ | ۱۴۳۱۳/۴۳ | ۲/۷۷۹۱۷ | ۸۵/۱۵۰۹۱ | ۱۶۹۳/۴۸ | ۰/۸۵۶۲۹۹ | ۱۳/۳۹۱۹۲ | ۱۸۶/۴۹۵۳ |
| ۵ | ۸/۷۰۴۷ | ۱۷۱/۲۹۳۵ | ۱۴۲۴۸/۸۷ | ۲/۹۲۹۸۲۹ | ۹۲/۹۳۶۸۹ | ۱۷۱۴/۷۴۹ | ۰/۹۰۱۸۶۳ | ۱۲/۷۴۴۱۱ | ۱۸۷/۷۶۴۵ |
| ۶ | ۸/۷۶۲۲ | ۱۵۹/۷۹۵۱ | ۱۴۲۴۲/۲۷ | ۲/۸۲۰۳۵۶ | ۹۴/۸۹۶۵۷ | ۱۶۹۹/-۰۸۴ | ۰/۹۲۲۴۴ | ۱۳/۷۴۲۵۲ | ۱۸۸/۵۰۳۲ |
| ۷ | ۸/۹۰۵۸ | ۱۸۱/۶۹۰۹ | ۱۴۳۱۵/۴۵ | ۲/۸۹۴۲۰۳ | ۹۱/۳۱۴۵۹ | ۱۷۰۷/۸۱۲ | ۰/۸۶۰۳۴۱ | ۱۲/۸۴۲۸ | ۱۸۶/۵۰۰۶ |
| ۸ | ۸/۸۶۶۳ | ۲۱۶/۰۱۱۷ | ۱۴۲۷۴/۹۶ | ۲/۸۰۷۴۴۱ | ۸۴/۸۲۳۰۸ | ۱۶۹۴/۲۰۸ | ۰/۸۳۸۹۹۴ | ۱۴/۱۲۴۸۱ | ۱۸۶/۴۳۴۵ |



شکل ۳. تعیین سطوح پارامتر به روش تاگوچی

نتایج عددی در ابعاد کوچک. به منظور اعتبارسنجی الگوریتم، جواب‌های به دست آمده از آن با حل دقیق در ابعاد کوچک مقایسه شده است. جدول ۶، قسمتی از جواب‌های به دست آمده را نشان می‌دهد. در مورد حل دقیق تمامی جواب‌های غالب به دست آمده گزارش شده است (ردیف‌ها نشان‌دهنده تعداد جواب‌های به دست آمده از حل دقیق است؛ ولی به علت زمان بر بودن تنها بعضی از جواب‌های به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم توانایی به دست آوردن جواب بهینه را در صورت دادن زمان کافی برای حل دارد و همگرا است.

جدول ۶. نتایج عددی در ابعاد کوچک

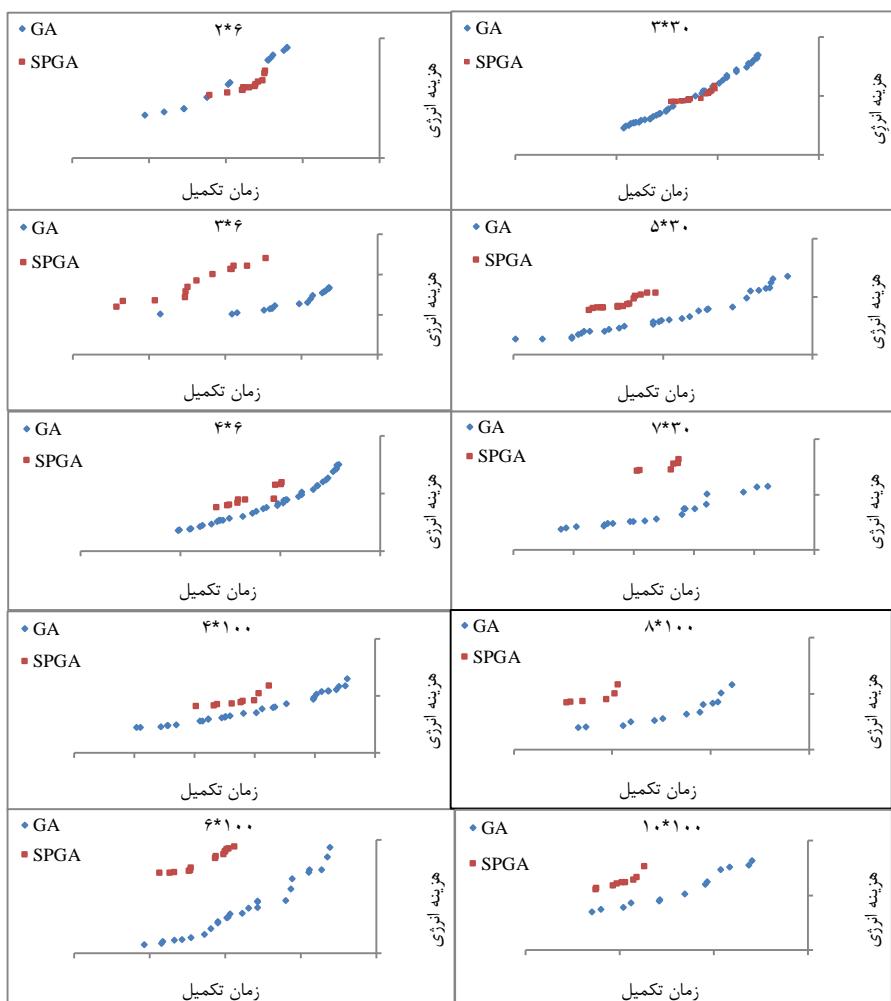
| مسئله | گمز | | الگوریتم پیشنهادی | |
|-------|--------------|--------------|-------------------|--------------|
| | تابع هدف اول | تابع هدف دوم | تابع هدف اول | تابع هدف دوم |
| ۱ | ۹۰۵/۸۷۹۹۹۱۷ | ۳۲۱/۹۶۱۱۵ | ۹۱۷/۲۸۵ | ۳۳۲/۳۶۶۳۳۳ |
| ۲ | ۸۲۸/۸۸۰۴۵۴۹ | ۳۶۴/۵۷۸۳۱۵ | ۵۹۰/۰۵۳۶۳۳۳ | ۴۵۶/۸۷۷ |
| ۳ | ۷۴۵/۴۴۹۹۰۳۳ | ۴۰۲/۳۵۵۱۲۸۱ | ۵۷۹/۳۵۴ | ۴۶۷/۳۷۵۳۳۳ |
| ۴ | ۶۳۶/۹۷۱۵۶۴۳ | ۴۸۳/۹۱۷۷۰۲۲ | ۵۷۰/۰۵۲۹۶۶۶۷ | ۴۸۲/۹۴۱۶۶۶۷ |

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. همان‌طور که گفته شد، بنچمارکی برای این مسئله موجود نیست و آزمایش‌ها به طور تصادفی ایجاد شده‌اند. لایه پارتوفی به دست آمده از دو الگوریتم برای هر یک از نمودها توسط جواب‌های غیرمغلوب مشخص شده است. در شکل ۴، لایه پارتوفی و درواقع پراکندگی جواب‌های غیرمغلوب برای دو الگوریتم مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، الگوریتم ژنتیک تعداد زیادی از جواب‌های لایه پارتوفی را نتیجه می‌دهد که قدرت تصمیم‌گیرنده را در انتخاب بیشتر می‌کند؛ همچنین جواب‌های به دست آمده از این روش کیفیت بهتری دارند. در جدول ۷، معیارهای محاسبه شده برای ارزیابی دو الگوریتم نشان داده شده است. نتایج، عملکرد مناسب الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، لایه پارتوفی گسترده ایجاد شده توسط الگوریتم انتخاب‌های بیشتری به تصمیم‌گیرنده می‌دهد. الگوریتم ارائه شده به طور همزمان جواب‌های بهتری از هر دو تابع هدف را ارائه می‌دهد.

جدول ۷. نتایج عددی در ابعاد بزرگ

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

| | | | | | | | |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|----|-----|
| ۱/۶۷۶۰۳ | ۱/۹۲۶۵۵ | ۵/۵۴۸۵۷ | ۳/۰۷۳۹۶ | ۲۹۵/۰۵۱ | ۲۸۲/۳۲۷ | ۳ | ۶ |
| ۲/۴۴۱۳۶ | ۲/۵۳۵۵۲ | ۶/۴۲۹۶۴ | ۱۴/۳۱۳۶ | ۴۱۳/۲۴۴ | ۴۰۸/۳۷۵ | ۴ | ۶ |
| ۱/۸۴۴۰۶ | ۱/۸۴۳۴۲ | ۱۲/۲۱۷ | ۶۳/۸۸۴۶ | ۱۲۷۰/۹۷ | ۱۲۷۴/۱۷ | ۳ | ۳۰ |
| ۳/۶۹۲۶۹ | ۳/۷۵۶۸۲ | ۱۸/۹۸۷۸ | ۶۱/۱۹۲۴ | ۲۲۲۶/۶۷ | ۲۱۸۰/۸ | ۵ | ۳۰ |
| ۵/۳۲۸۲۳ | ۴/۹۶۵۴۴ | ۱۶/۰۲۲۲ | ۴۷/۲۴۱ | ۳۱۴۰/۳۳ | ۲۹۷۲/۷۶ | ۷ | ۳۰ |
| ۲/۹۹۹۶۸ | ۳/۰۰۰۱۱ | ۵۲/۳۳۷۷ | ۲۰۹/۹۷۳ | ۵۶۲۸/۹۹ | ۵۳۸۳/۰۵ | ۴ | ۱۰۰ |
| ۴/۹۴۹۶ | ۴/۹۰۰۵۴۵ | ۴۲/۳۸۹۱ | ۱۱۸/۴۰۱ | ۸۵۲۶/۷۷ | ۵۳۱۳/۲۵ | ۶ | ۱۰۰ |
| ۶/۸۵۰۳۳ | ۶/۹۸۱۹۶ | ۵۹/۷۶۲ | ۱۱۷/۰۹ | ۱۱۵۸۸ | ۱۱۴۲۴/۱ | ۸ | ۱۰۰ |
| ۸/۴۲۲۸۴ | ۸/۵۷۸۴ | ۶۱/۴۷۹۲ | ۱۶۳/۷۷۳ | ۱۴۲۰۷/۶ | ۱۴۱۳۸/۲ | ۱۰ | ۱۰۰ |



شکل ۳. مقایسه لایه 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 سروکاردار؛ به طوری که هدف بهینه‌سازی یک یا چند معیار عملکرد است [۶]. در پژوهش حاضر یک مدل ریاضی برای مسئله جریان کارگاهی سبز با درنظر گرفتن عدم قطعیت ارائه شده است. مسئله مورد نظر دارای دوتابع هدف حداقل سازی 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 عدم قطعیت 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 موردنظر از مدل سازی 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 به دست آمده و همچنین بهبود هر دوتابع هدف در جواب‌ها نشان دهنده 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 درنظر گرفتن عدم قطعیت در مسائل، به علاوه شکاف طبقاتی موجود در این مسئله باعث به وجود آمدن زمینه پژوهشی جدید شده است.

در ادامه برای تکمیل این پژوهش موضوع‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

- توزیع‌های احتمال دیگری نیز سنجیده شود؛

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

- درنظر گرفتن سایر مدل‌های تولیدی مانند تولید کارگاهی و استفاده از سایر فرآیندهای همچنین 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 in manufacturing companies: A review and 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. Liefoghe, 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, pages 2655–2667*.
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. *CIRP 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.

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