مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۱ - ۳۰، شماره‌ی ۲، ص. ۱۰۱-۱۰۹

Original Article

بررسی استواری روش‌های فراابتکاری برای برنامه‌ریزی مسئله‌ی جریان کارگاهی انسدادی در حالت تصادفی

محمدرضا آل‌آقا * **(دانشجوی کارشناسی ارشد)**
محمد فضایلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
رضا بشیرزاده (استادیار)
رسول شفائی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

برنامه‌ی زمان‌بندی و توالی عملیات در مسائل برنامه‌ریزی تولید یکی از عوامل کلیدی در موفقیت سازمان‌های تولیدی است که باعث جلوگیری از انباشت سرمایه، تقلیل ضایعات، کاهش یا حذف بیکاری ماشین‌آلات و کاربرد بهینه‌ی آن‌ها و پاسخ‌گویی به‌موقع به سفارش‌های مشتریان می‌شود. در روش‌های استاندارد برنامه‌ریزی و زمان‌بندی فرض بر آن است که اجرای برنامه در یک شرایط قطعی و معین اتفاق می‌افتد؛ این فرض به‌دلیل تنوع منابع مورد نیاز و شرایط عدم قطعیت حاکم بر آن، فرض درست و عملی نیست. در چنین شرایطی بررسی استواری روش‌های حل به‌جای بهینه‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف اصلی این تحقیق حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی کارگاهی انسدادی در حالتی است که زمان پردازش کارها تغییرپذیر است. در این تحقیق هشت روش فراابتکاری برای حل مسئله‌ی مذکور مورد استفاده قرارگرفته است. از معیار «استواری بتا[1]» برای ارزیابی عملکرد روش‌های پیشنهادی در شرایط نامعین استفاده شده است. نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان‌دهنده‌ی استواری بالاتر روش ژنتیک با جست‌وجوی غیرهمزمان نسبت به سایر روش‌هاست.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی کارگاهی انسدادی، برنامه‌ریزی استوار، الگوریتم‌های فراابتکاری، برنامه‌ریزی در حالت تصادفی.

maleagha@ kntu.ac.ir
mohammad_1504@kntu.ac.ir
rbashirzadeh@kntu.ac.ir
shafaei@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به فراوانی کاربرد مسائل تولید کارگاهی، تحقیقات زیادی درخصوص مسائل تولید کارگاهی انجام شده است. در عمل، در بسیاری از کارخانجات تولیدی به‌دلیل جلوگیری از افت کیفیت فیزیکی و شیمیایی قطعات باید محدودیت ذخیره‌ی میانی را به‌شکل تعداد کار ذخیره شده بین دو ماشین یا زمان انتظار قطعات بین دو ماشین در نظر گرفت.[1] علی‌رغم بررسی کارهای صورت گرفته درخصوص مسائل جریان کارگاهی انسدادی،[2] محققین در تمامی مطالعات انجام شده شرایط را کاملاً قطعی و معین فرض کرده‌اند. چنان که می‌دانیم این فرض به‌دلیل وجود منابع مختلف ایجاد عدم قطعیت در تمامی شرایط صادق نیست.[3] به‌همین منظور، در این نوشتار مسئله‌ی تولید کارگاهی با ذخیره‌ی میانی صفر (انسدادی) در شرایط عدم قطعیت مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای مقابله با عدم قطعیت‌ها دو رویکرد کلی وجود دارد: در رویکرد اول، ارائه‌ی روشی مطلوب است که بتواند در شرایط عدم قطعیت به پاسخ استوارتری نایل آید؛ بدین معنا که خروجی روش نسبت به شرایط عدم قطعیت از حساسیت کم‌تری برخوردار باشد.[3] در رویکرد دوم، تمرکز بر کاهش عدم قطعیت است. برای مثال با اجرای مؤثر تعمیرات پیشگیرانه می‌توان تأثیر عدم قطعیت ناشی از خرابی ماشین را کاهش داد. در این مقاله رویکرد اول مد نظر است و عدم قطعیت در نظر گرفته شده مربوط به زمان انجام کارهاست.

هدف این تحقیق، توسعه‌ی روشی برای ساختن برنامه‌های پیشگیرانه[2] است. این برنامه باید از انعطاف کافی برای غلبه بر انحرافات محیطیِ برخط و کاهش تأثیر این انحرافات برخوردار باشد. به‌طور اخص، هدف از مدل بررسی شده در این تحقیق بیشینه‌سازی احتمال عدم عبور دامنه‌ی عملیات[3] از یک مقدار ثابت است. سپس آزمایشاتی به‌منظور اخذ یک برنامه‌ی استوار برای چندین مسئله‌ی جریان کارگاهی انسدادی[4] در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ انجام شده است. در ادامه، عملکرد هشت روش فراابتکاری مختلف برای حل مسائل انتخاب، و ضمن مقایسه‌ی عملکردشان با یکدیگر، استوار بودن آن‌ها نیز مقایسه شده است.

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۷/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۹، پذیرش ۱۳۹۲/۴/۱.

محققین مطالعات صورت‌گرفته در حوزه‌ی روش‌های مورد استفاده در زمان‌بندی کارها در حالت عدم قطعیت را مورد بررسی قرار داده‌اند.[۴و۵] به‌دلیل شرایط متغیر محیطی، برنامه‌های سطح کارگاهی برای تصمیم‌گیری در محیط پویا و تصادفی در مدت طولانی جواب‌گو نخواهند بود. به‌همین دلیل هر از چند گاهی باید به اصلاح برنامه‌ها پرداخت. در اینجا دو سؤال مطرح می‌شود: ۱. چه هنگامی برنامه‌ریزی صورت گیرد؟ ۲. چگونه برنامه‌ریزی صورت گیرد؟

پاسخ‌گویی به سؤال درخصوص زمان اجرای برنامه‌ریزی، پاسخ سیستم را به مسائل مختلف محیطی مشخص می‌کند. هرچه تعداد مراحل برنامه‌ریزی افزایش یابد، پاسخ‌گویی سیستم و درنتیجه هزینه‌ی سیستم نیز افزایش می‌یابد. برای تصمیم‌گیری درمورد برنامه‌ریزی روش‌های مختلفی وجود دارد: برنامه‌ریزی پیوسته، برنامه‌ریزی دوره‌یی، برنامه‌ریزی انطباقی[۵]، و روش‌های برنامه‌ریزی ترکیبی.

در روش برنامه‌ریزی پیوسته پس از اتفاقات مهم مانند خرابی یک ماشین، یا ورود یک کار مهم برنامه به روز می‌شود.[۶] در برنامه‌ریزی دوره‌یی برنامه در دوره‌های ثابت و متغیر به‌روز می‌شود. در نمونه‌یی از برنامه‌ریزی دوره‌یی با در نظرگرفتن دوره‌های متغیر[۷] برنامه پس از وقوع درصد ثابت و مشخصی از آن به روز می‌شود. برنامه‌ریزی انطباقی روش دیگری است که در آن، برنامه‌ریزی مجدد هنگامی صورت می‌گیرد که مجموع تفاوت‌های عامل مشخصی از برنامه و حالت واقعی، از یک مرز مشخص یا از حد آستانه‌ی از پیش تعیین‌شده بیشتر باشد. در بررسی روش‌های برنامه‌ریزی ترکیبی نیز، یک روش برنامه‌ریزی مرکب از برنامه‌ریزی دوره‌یی و برنامه‌ریزی پیوسته ــ به نام روش حادثه‌محور[۶] ــ ارائه شد.[۸]

برای پاسخ‌گویی به سؤال دوم، روش‌های برنامه‌ریزی در حالت عدم قطعیت را در چهار دسته تقسیم‌بندی کرده‌اند:[۹]

۱. برنامه‌ریزی کاملاً واکنشی یا انفعالی[۷]؛

۲. برنامه‌ریزی پیش‌گویانه‌ی انفعالی[۸]؛

۳. برنامه‌ریزی کاملاً پیشگیرانه؛

۴. برنامه‌ریزی پیشگیرانه‌ی انفعالی[۹].

از برنامه‌ریزی نخست هنگامی استفاده می‌شود که میزان آشفتگی چشم‌گیر باشد یا اطلاعات بسیار دیر مشخص شوند و برنامه‌ریزی پیشگیرانه را غیر ممکن سازند. در این روش، از اطلاعات به‌روز شده با در نظرگرفتن حالت سیستم استفاده می‌شود، هیچ برنامه‌ی پیشگیرانه‌یی به سیستم داده نمی‌شود، تصمیم‌ها در آن واحد با قوانین مشخص گرفته می‌شود، و اطلاعات گام به گام در دسترس ما قرار می‌گیرد. به‌همین دلیل این نوع برنامه‌ریزی را برنامه‌ریزی آنلاین یا برخط می‌نامند.

در روش پیش‌گویانه‌ی انفعالی، ابتدا یک برنامه‌ی پیش‌گویانه بدون درنظر گرفتن انحرافات احتمالی پی‌ریزی می‌شود. سپس از یک برنامه‌ی انفعالی برای حفظ امکان‌پذیری برنامه و بهبود عملکرد این برنامه استفاده می‌شود.[۱۰] این نوع برنامه‌ریزی عدم قطعیت در برنامه را مستقیماً لحاظ نمی‌کند و تنها هنگامی که انحراف رخ دهد برنامه را تصحیح می‌کند. به‌عبارت دیگر برنامه‌ریزی انفعالی بهترین راه برای ابراز واکنش به انحراف رخ داده را می‌یابد.

در مرحله‌ی بعد، برنامه‌ریز باید تصمیم بگیرد که از کدام معیارهای عملکردی استفاده کند. در عمل از معیارهای سنتی همچون دامنه‌ی عملیات، زمان در جریان[۱۰] یا دیرکرد استفاده می‌شود، اما در شرایطی که محیط متغیر و پویاست معیارهای استواری[۱۱] و پایداری[۱۲] برای غلبه بر عدم قطعیت کاربرد دارد. برای این منظور ابتدا یک برنامه‌ریزی اولیه انجام می‌شود؛ براثر انحرافات موجود در محیط، این برنامه نیاز به اصلاح دارد تا امکان‌پذیری آن حفظ شود. بسته به میزان انحرافات محیطی، حتی ممکن است برنامه کاملاً با برنامه‌ی اولیه متفاوت باشد. معیارهای استواری و پایداری با این انحرافات سروکار دارند و تأثیر این انحرافات را در برنامه کمینه می‌کنند.

برنامه‌یی استوار است که بتواند در مقابله با شرایط احتمالی آماده باشد و کیفیت عملکردی خود را از دست ندهد. بنابراین در برنامه‌ریزی پیشگیرانه استواری عبارت است از قابلیت مقابله با عدم قطعیت، هنگامی که از استراتژی برنامه‌ریزی مجدد استفاده نشود. محققین معیارهای مختلفی برای بررسی استواری برنامه ارائه داده‌اند[۱۱] که واریانس معیارکارایی را کمینه می‌سازد. آنان استواری را «میزان تفاوت مقدار توابع هدف برنامه‌ریزی شده و واقعی» معرفی کرده‌اند و به‌عبارتی از نظر آنان، برنامه‌یی استوار است که عملکرد آن در مواجهه با انحرافات محیطی، تغییر چندانی نکند و بهینه بماند. در نمونه‌یی از این مطالعات،[۱۲] با درنظر نگرفتن تغییر زمان‌های پردازش برنامه‌ی بهینه ایجاد می‌شود، سپس تغییر بیشینه در زمان پردازش کارها به‌گونه‌یی بوده که این برنامه همچنان بهینه بماند. در مطالعه‌ی مذکور مقدار این تغییر بیشینه «شعاع پایداری» نامیده شده است؛ اگر شعاع پایداری پاسخ‌گوی تمام تغییرات ممکن زمان‌های پردازش باشد، برنامه استوار است؛ در غیر این صورت باید برای اقدام مقتضی تصمیم‌گیری کرد.

پژوهش‌گران معیارهای استواری را به دو دسته تقسیم کردند:[۱۲] ۱. معیارهای مبتنی بر عملکرد واقعی که فقط به عملکرد برنامه‌ی به‌وقوع پیوسته توجه می‌کنند؛ ۲. معیارهای پشیمانی‌محور[۱۳] که به تفاوت عملکرد برنامه‌ی به وقوع پیوسته و برنامه‌ی بهینه می‌پردازند. برای دسته‌ی اول (یعنی معیارهای مبتنی بر عملکرد واقعی) هفت معیار، و برای دسته‌ی دوم چهار معیار معرفی شده است. لازم به ذکر است که دسته‌ی دوم ــ یعنی معیارهای پشیمانی‌محور ــ هنگامی کاربرد دارند که با گذشت زمان و پیشرفت برنامه عدم قطعیت‌ها مشخص شود و بخواهیم برنامه‌ی فعلی را با برنامه‌ی بهینه که درصورت وجود اطلاعات قابل دسترس خواهد بود، مقایسه کنیم. در مطالعه‌ی یادشده همچنین شش معیار برای مسائل پایدار پیشنهاد شده است.

محققین دیگری اشاره کرده‌اند که این معیارها متضمن عدم عبور معیار کارایی از یک حد متعارف در حالت‌های مختلف احتمالی نیستند.[۱۳] لذا آنان معیار کارایی دیگری به‌نام «استواری بتا» در نظر گرفتند که عبارت بود از: بیشینه‌سازی احتمال عدم عبور معیار کارایی یک برنامه از حد مشخص غیر قابل قبول.

پژوهش‌گران دیگری با استفاده از نظریه‌ی فوق، مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی با n کار و M ماشین را با درنظرگرفتن تابع هدف بیشینه کردن احتمال کم‌تربودن زمان تکمیل کارها از زمان تکمیل مورد انتظار، حل کردند.[۱۴] آن‌ها برای به دست آوردن توزیع دامنه‌ی عملیات ($C_{\max}$) حجم وسیعی از تولید تکراری در نظر گرفته و با فرض تعداد زیاد کارها با استفاده از قضیه‌ی حد مرکزی توزیع دامنه‌ی عملیات را، جدا از توزیع زمان پردازش کارها، نرمال فرض کردند. این در حالی است که در این مسئله مشخص نیست با تغییر زمان پردازش کارها، مسیر بحرانی تغییر می‌کند یا خیر. چرا که در صورتی که مسیر بحرانی تغییرکند، نمی‌توان از قضیه‌ی حد مرکزی استفاده کرد (زیرا با تغییر مسیر بحرانی دامنه‌ی عملیات مجموع چند توزیع متغیر خواهد شد و دیگر فرض قضیه‌ی حد مرکزی صادق نیست). تابع هدف در این مسئله (با فرض نرمال بودن توزیع دامنه‌ی عملیات برنامه)، عبارت است از تفاوت مقدار پیش‌فرض (X) و دامنه‌ی عملیات برنامه ($C_{\max}$) تقسیم بر واریانس دامنه‌ی عملیات برنامه. برای حل این مسئله از یک الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. خلاصه‌ی مطالعات انجام شده در این زمینه در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که قطعی

جدول ۱. مرور ادبیات اجمالی کارهای انجام شده در حوزه برنامه‌ریزی کارگاهی در شرایط غیر قطعی.

طرح برنامه‌ریزی	تابع هدف	روش حل	محیط		منبع
			تصادفی/قطعی	پویا/ایستا	
پیشگیرانه	استواری بتا	روش‌های ابتکاری	تصادفی (تغییر زمان پردازش کارها)	ایستا	دانیلز[1] و همکاران (۱۹۹۵)
پیشگیرانه	استواری (تغییر تابع هدف نسبت به مقاله قبلی)	روش‌های ابتکاری	تصادفی (تغییر زمان پردازش کارها)	ایستا	دانیلز و کاریلو[2] (۱۹۹۷)
پیشگیرانه	استواری	الگوریتم ابتکاری لولر	تصادفی (تغییر زمان پردازش کارها، عدم قطعیت زمان تحویل)	ایستا	کاسپرسکی[3] (۲۰۰۵)
پیشگیرانه ـ انفعالی	ـــ کمینه کردن مجموع وزنی دیرکردها ـــ کمینه کردن دامنه عملیات	الگوریتم ژنتیک	تصادفی (خرابی ماشین و دیرکرد تحویل مواد اولیه)	ایستا	آلولو و پورتمن (۲۰۰۳)
پیشگیرانه	استواری	الگوریتم ژنتیک	تصادفی (تغییر زمان پردازش کارها)	ایستا	کیونگ لیو و همکاران (۲۰۱۱)

[1] Daniels [2] Carillo [3] Kasperski

بودن برنامه به‌معنای مشخص بودن تمامی کارها و پارامترهای آن است؛ همچنان که ایستایی برنامه به‌معنای مشخص بودن و در دسترس بودن تمامی کارها در ابتدای برنامه‌ریزی است.

چنان که در جدول ۱ نیز مشخص است، معیار استواری بتا در مقالات کم‌تر مورد بررسی قرارگرفته و تاکنون به مسئله‌ی تولید کارگاهی انسدادی با معیار استواری بتا پرداخته نشده است. بنابراین هدف از این تحقیق حل مسئله‌ی تولید کارگاهی انسدادی با معیار استواری بتا با استفاده از بهترین روش‌های فرابتکاری موجود ارائه شده در ادبیات برای مسائل کارگاهی است. در دنیای واقعی و به‌طور خاص در مسائل جریان کارگاهی، استفاده از معیار استواری بتا به ما اطمینان می‌دهد که دامنه عملیات مسئله در سطح احتمال تعیین شده از حد مشخصی بیشتر نخواهد بود. برای مثال با فرض سطح احتمال ۰٫۹ و دامنه‌ی عملیات مطلوب ۱۰۰، ما با رویکردی ریسک‌گریز به دنبال برنامه‌یی هستیم که در ۹۰٪ موارد دامنه‌ی عملیات کم‌تر از ۱۰۰ داشته باشد.

ساختار ادامه مقاله بدین صورت است: در بخش ۲ مسئله‌ی مورد بررسی تعریف شده و مدل مسئله ارائه می‌شود. در بخش ۳ روش‌های منتخب حل ابتکاری و فرابتکاری مورد استفاده برای حل مسئله‌ی مذکور معرفی می‌شود. در بخش ۴ نتایج حاصل از حل مسائل مختلف ارائه شده است. در نهایت در بخش ۵ به نتیجه‌گیری تحقیق و پیشنهادات برای تحقیقات آتی می‌پردازیم.

۲. تعریف مسئله

در مسئله‌ی تولید جریان کارگاهی مد نظر، ما به دنبال تعیین توالی یکسان n کار $\{j = 1, ..., n\}$ بر روی M ماشین موجود هستیم. فرض می‌شود که تمامی کارها از لحظه‌ی ابتدایی ($t = 0$) در دسترس‌اند و همچنین زمان آماده‌سازی کارها بر روی ماشین‌ها با زمان پردازش کارها در نظر گرفته شده است. از زمان جابه‌جایی کارها بین ماشین‌ها نیز صرف نظر شده است. در هر زمان هر ماشین قادر به انجام چند کار همزمان نیست و کارها نمی‌توانند بین دو ماشین در انتظار بمانند (انسدادی) و زمان تحویل تمامی کارها یکسان فرض می‌شود. اگر t_{ij} نشانگر زمان پردازش کار j روی ماشین i، C_{ij} زمان تکمیل کار j روی ماشین i، S_{ij} زمان شروع کار j روی ماشین i و $C_{\max}$ دامنه‌ی عملیات کارها باشد، مدل مسئله چنین بیان می‌شود:

$$\text{Objective} = \max[\text{Probability}(C_{\max} < X)] \quad (1)$$

$$C_{\max} = C_{n\,M} \quad (2)$$

$$C_{11} = t_{11} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \max\{C_{i(j-1)}, C_{(i-1)j}\} \quad 1 \le j \le n, \quad 1 \le i \le M \quad (4)$$

$$C_{ij} = \max\{S_{ij} + t_{ij}, C_{(i+1)(j-1)}\} \quad 1 \le j \le n, \quad 1 \le i < M \quad (5)$$

$$C_{Mj} = S_{Mj} + t_{Mj} \quad 1 \le j \le n \quad (6)$$

$$C_{i1} = S_{(i-1)1} + t_{i1} \quad 1 < i \le M \quad (7)$$

تصادفی بودن در زمان‌های پردازش مسئله باعث ایجاد انحراف‌هایی در دامنه‌ی عملیات می‌شود. به‌همین دلیل همواره ممکن است دامنه‌ی عملیات مسئله از زمان مطلوب تکمیل کارها بیشتر شود. بنابراین تابع هدفی که در این مسئله از آن بهره برده‌ایم، کمینه‌سازی این احتمال است که زمان تکمیل کارها از مقدار مشخص و از پیش تعیین شده‌ی X کم‌تر شود (رابطه‌ی۱).

رابطه‌ی ۲ نشانگر زمان تکمیل کارها یا دامنه‌ی عملیات، رابطه‌ی ۳ نشانگر زمان تکمیل کار اول، رابطه‌ی ۴ نشانگر زمان شروع کارها، و رابطه‌ی ۵ نشانگر زمان تکمیل کارهاست. این روابط بیان می‌دارند که کار j روی ماشین i زمانی می‌تواند شروع شود که کار $j-1$ روی ماشین i تکمیل و پردازش کار j روی ماشین $i-1$ به پایان رسیده باشد. رابطه‌ی ۶ و ۷ نیز به‌ترتیب مربوط به آخرین ماشین و اولین کار است.

۳. روش حل پیشنهادی

روش‌های متعددی برای حل مسئله‌ی جریان‌کارگاهی جایگشتی[۱۴] در شرایط مختلف ارائه شده است. از بین روش‌های حل موجود در مرور ادبیات، چند روش انتخاب شده و متناسب با مسئله‌ی بالا بومی‌سازی شده است. قبل از توضیح مختصر هریک از این الگوریتم‌ها لازم است به فرضیات مشابه در تمامی الگوریتم‌ها اشاره کنیم.

- برای در نظرگرفتن تغییرپذیری زمان فعالیت‌ها در مسئله با احتساب میانگین و واریانس زمان پردازش کارها و با استفاده از توزیع نرمال، ۸۰ حالت از زمان پردازش کارها به‌صورت تصادفی تولید و ذخیره می‌شود.
- مقدار واریانس زمان پردازش کارها به‌طور تصادفی بین ۱ و ۱/۹ زمان پردازش کارها تغییر می‌کند.
- مقدار X با توجه به توالی کارها و میانگین زمان هر کار بر هر ماشین تعیین می‌شود.
- برای هر جواب شدنی، ۴۰ بار مقدار دامنه‌ی عملیات به‌ازای ۴۰ زمان متفاوت، که به‌طور تصادفی از بین ۸۰ زمان فوق انتخاب شده، برای فعالیت‌ها محاسبه می‌شود و با توجه به مقادیر محاسبه شده میزان استواری محاسبه می‌شود.

برای حل مسئله‌ی مطرح شده‌ی فوق با بررسی‌های انجام شده هفت روش مختلف فرابتکاری موفق موجود در ادبیات انتخاب شد. درنهایت با تطبیق این روش‌های فرابتکاری با مسئله‌ی مورد نظر اقدام به حل مسئله کردیم.

۱.۳. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

اولین روش کار ارائه شده مربوط به سال ۲۰۱۱ است[۱۴] که مطابق آنچه که در قسمت مرور ادبیات بیان شد، طی آن یک روش الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌ی برنامه‌ریزی جریان کارگاهی M مرحله‌یی توسعه داده شده است. در این الگوریتم برای انتخاب والدین از یک انتخاب رقابتی[۱۵] استفاده شده است؛ بدین معنا که احتمال انتخاب والدینی که تابع برازش بالاتری دارند بیشتر است. پس از انتخاب والدین دو عملگر تقاطع[۱۶] و جهش[۱۷] روی والدین صورت می‌پذیرد. عملگر تقاطع انتخابی، تقاطع نگاهدارنده[۱۸] و عملگر جهش، جهش جایگزینی[۱۹] است. همچنین درصورتی نسل جدید تولید شده جایگزین والدین‌شان می‌شوند که نسل جدید تابع برازش مناسب‌تری داشته باشد.

۴. روش ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبریدی پیشنهادی

۱.۴. الگوریتم ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید[۲۰] پیشنهادی

این الگوریتم برای مسئله‌ی جریان کارگاهی جایگشتی با محدودیت نگه‌داری و تعمیرات براساس شرایط[۲۱] و خرابی ماشین‌آلات و معیار کمینه‌سازی متوسط دامنه‌ی عملیات ارائه شد.[۱۵] انتخاب والدین برای تقاطع با دو سازوکار «چرخه‌ی رولت[۲۲]» و «انتخاب یکنواخت[۲۳]» صورت می‌گیرد. عملگرهای مورد استفاده برای تقاطع و جهش، تقاطع دونقطه‌یی[۲۴] و جایگذاری[۲۵] است. ساختارهای مختلف ایجاد جواب همسایگی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت ساختار تعویض برای ایجاد جواب همسایگی انتخاب شده است. معیار ارزیابی پذیرش یا عدم پذیرش جواب‌های بد، همان معیار ارائه شده توسط کاوچی[۲۶] است.[۱۶]

$$P(\Delta E, T) = \frac{T}{(T^2 + \Delta E^2)}$$

T دمای حال حاضر؛ ΔE تفاوت مقدار تابع هدف فعلی و بهترین مقدار تابع هدف؛ $P(\Delta E, T)$ احتمال پذیرش یک جواب بد زمان‌بندی سردشدن[۲۷] نمایی با به‌کارگیری فرمول $T_i = \alpha \times T_{i-1}$ است.

۱.۱.۴. تولید دوباره‌ی جمعیت[۲۸]

اگر فرزندان تولید شده در جمعیت فعلی وجود داشته باشند یک جواب تصادفی تولید شده و جایگزین جواب تکراری می‌شود. این جواب تصادفی به‌وسیله‌ی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهبود یافته و جایگزین بدترین جواب موجود در جمعیت می‌شود. برای انجام جهش یک والد با چرخه‌ی رولت انتخاب شده و پس از انجام جهش با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهبود داده می‌شود. فرزند ایجاد شده جایگزین والد خود می‌شود و این فرایند آنقدر تکرار می‌شود تا شرایط خاتمه مشاهده شود.

۲.۴. الگوریتم ترکیبی جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبرید[۲۹] پیشنهادی

الگوریتم ترکیبی جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبرید اولین بار توسط لین، برای مسئله‌ی جریان کارگاهی غیرجایگشتی ارائه شد.[۱۷] او نشان داد که عملکرد این الگوریتم ترکیبی بهتر از عملکرد هریک از این الگوریتم‌ها به‌تنهایی است. این الگوریتم برای مسئله‌ی جریان کارگاهی جایگشتی با محدودیت نگه‌داری و تعمیرات براساس شرایط و کاهش متوسط دامنه‌ی عملیات ارائه شد.[۱۸] جواب اولیه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. ایجاد جواب همسایگی با انتخاب یکی از ساختارهای تعویض، جایگذاری، جایگذاری انسدادی[۳۰] به‌صورت تصادفی است. در این الگوریتم با به‌کارگیری شرایط معرفی شده[۱۹] امکان خارج کردن یک حرکت از لیست ممنوعه[۳۱] و ایجاد جواب همسایگی از آن به‌شرط بهتر بودن تابع هدف آن نسبت به مقادیر مشاهده شده تاکنون وجود دارد. با هر بار کاهش دما لیست ممنوعه‌ی جدیدی ایجاد می‌شود که اندازه‌ی آن متغیر تصادفی یکنواختی بین ۷ تا ۱۰۰ است. با هر بار ایجاد لیست ممنوعه الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه اجرا شده و با تمام شدن آن دما کاهش می‌یابد. با رسیدن به دمای انجماد جواب به دست آمده به‌عنوان جواب اولیه‌ی الگوریتم در نظرگرفته شده و الگوریتم دوباره از ابتدا اجرا می‌شود. این تکرار N بار انجام می‌شود تا این پارامتر تنظیم شود. زمان‌بندی سرد شدن با تابع نمایی معیار ارزیابی جواب‌های بد پلتزمن[۳۲] است.

$$P(\Delta E, T) = e^{\frac{-\Delta E}{T}}$$

۳.۴. الگوریتم ژنتیک با جست‌وجوی محلی غیر همزمان[۳۳] پیشنهادی

این الگوریتم برای مسئله‌ی جریان کارگاهی جایگشتی با معیار کمینه‌سازی مجموع زمان در جریان ارائه شد.[۲۰] انتخاب والدین برای تقاطع به‌صورت انتخاب یکنواخت انجام می‌گیرد. پس از انتخاب دو والد با جست‌وجوی محلی غیر همزمان بهبود داده شده و پس از بهبود تقاطع با عملگر تقاطع دونقطه‌یی دوبل[۳۴]، فرزندان تولید شده با جست‌وجوی محلی غیر همزمان بهبود داده می‌شود. در نهایت با مقایسه‌ی والدین و فرزندان بهبود یافته، جایگزینی برای تولید جمعیت جدید صورت می‌گیرد. در الگوریتم جست‌وجوی محلی غیرهمزمان ابتدا جواب با عملگر جایگذاری بهبود داده می‌شود. اگر بهبود ایجاد شد تغییرات ثبت می‌شود و اگر بهبودی با این عملگر

حاصل نشد از عملگر تعویض برای بهبود استفاده می‌شود. با اولین بهبود حاصل شده تغییرات ثبت، و دوباره عملگر جایگذاری برای بهبود اجرا می‌شود. اگر توسط هیچ‌کدام از این دو عملگر بهبودی حاصل نشد، تکرار جست‌وجوی محلی خاتمه یافته است. تعداد تکرارهای این عملگر جست‌وجو قبل از تقاطع عددی تصادفی کمینه و بیشینه تعداد تکرارهای ممکن و بعد از تقاطع بیشینه تعداد تکرارهای ممکن است.

۴.۴. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جمعیت‌محور[۳۵] پیشنهادی

این الگوریتم برای مسئله‌ی زمان‌بندی جریان کارگاهی با معیار کمینه‌سازی دامنه‌ی عملیات ارائه شد.[۲۱] تفاوت اصلی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید در جست‌وجوی چند نقطه به‌صورت موازی و همزمان به‌جای جست‌وجو در یک نقطه است. این الگوریتم با یک جمعیت اولیه‌ی تصادفی شروع به جست‌وجو می‌کند. جواب همسایگی با عملگر تعویض به دست می‌آید. معیار ارزیابی پذیرش یا عدم پذیرش جواب‌های پلتزمن است. برای کاهش دما از تابع ارائه شده توسط لوندی استفاده شده است.[۲۲] این تابع در دمای بالا سریع، ولی در دمای پایین آهسته سرد می‌شود.

$$T_i = \frac{T_{i-1}}{1 + \beta T_{i-1}}$$

پس از هربار کاهش دما کسری از جمعیت با یک ساختار جست‌وجوی محلی بهبود داده می‌شود. این ساختار ابتدا کار اول و دوم را مطابق با ساختار NEH[۲۳] در توالی قرار می‌دهد. بین کارهای باقی‌مانده، دو کار به‌صورت تصادفی انتخاب شده و موقعیت آنها تعویض می‌شود؛ چنانچه بهبودی ایجاد شد تغییرات ثبت می‌شود. این فرایند P بار تکرار می‌شود. P و β باید درکنار سایر پارامترهای این الگوریتم تنظیم شود.

۵.۴. الگوریتم جست‌وجوی حریصانه‌ی مکرر پیشنهادی

این الگوریتم برای مسئله‌ی جریان کارگاهی جایگشتی ارائه شد.[۲۴] اساس کار این روش تخریب و بازسازی توالی کارها برای رسیدن به جواب بهتر است. ایده‌ی اصلی برای بازسازی توالی کارها از روش NEH گرفته شده است. توالی به دست آمده از روش NEH به‌عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. در مرحله‌ی بعد بعضی از کارها به‌صورت تصادفی از جواب انتخاب حذف شده و در یک حافظه‌ی موقت ذخیره می‌شود. تعداد کارهایی که باید از توالی حذف و دوباره زمان‌بندی شوند جزء پارامترهای این مسئله است که باید تنظیم شود. کارهای باقی‌مانده در توالی اصلی باید مطابق توالی قبل از حذف کارها، در کنار یکدیگر قرار بگیرند. در مرحله‌ی بعد یکی از کارهای در حافظه‌ی موقت به‌صورت تصادفی انتخاب و از حافظه حذف می‌شود. کار انتخاب شده با بکارگیری الگوریتم NEH زمان بندی می‌شود. این کار آن‌قدر تکرار می‌شود تا حافظه‌ی موقت خالی شود؛ تعداد تکرارهای این فرایند باید تنظیم شود. برای فرار از دام بهینه‌ی محلی از فرمول ارائه شده توسط پلتزمن برای پذیرش جواب‌های بد در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است.

۶.۴. الگوریتم مورچگان پیشنهادی

دو روش دیگر استخراج شده از مطالعات محققین[۲۵] عبارت است از: روش الگوریتم مورچگان به‌نام الگوریتم کمینه ـ بیشینه‌ی اصلاح شده‌ی مورچگان[۳۶] و روش پیشنهادی الگوریتم مورچگان[۳۷]. ویژگی اساسی این دو روش این است که در هر تکرار تنها یک مورچه شکل گرفته و پس از آن فرومون‌ها اصلاح می‌شود. این دو روش جواب اولیه‌ی خود را از روش NEH می‌گیرند و فرومون‌ها را به‌روزرسانی می‌کنند. در روش اول (M-MMAS) ابتدا فرومون بیشینه و کمینه محاسبه می‌شود و پس از آن با استفاده از ماتریس T یا همان ماتریس فرومون‌ها، از ابتدا شروع به چینش کارها می‌شود. این جواب اولیه ۳ بار در معرض الگوریتم جست‌وجوی محلی کارمحور[۳۸] گذاشته می‌شود تا جواب بهتری حاصل شود. در نهایت پس از تکمیل کروموزوم، به‌روزرسانی فرومون‌ها، براساس نرخ تبخیر در نظر گرفته شده و میزان فرومون به‌جای مانده در اثر یک گشت کامل این مورچه، انجام می‌شود.

تفاوت روش دوم (PACO) با روش اول (M-MMAS) در مقدار اولیه‌ی فرومون‌ها، عدم وجود مقادیر کمینه و بیشینه برای فرومون‌ها، و نحوه‌ی به‌روزرسانی فرومون‌هاست که باعث شده تا روش دوم عملکرد متفاوتی نسبت به روش اول داشته باشد.

۵. تنظیم پارامتر

عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری و فرابتکاری تا حد زیادی متأثر از پارامترهای آن الگوریتم است و این پارامترها در الگوریتم‌های متفاوت یکسان نیست. پارامترهای مؤثر در عملکرد الگوریتم‌های استفاده شده در این مقاله و سطوح بررسی شده برای هریک از آن‌ها در جدول ۲ ذکر شده است. لازم به ذکر است که برای رسیدن به سطح بهینه‌ی عملکرد الگوریتم‌ها، بهترین ترکیب سطوح پارامترها باید تعیین شود. به‌همین دلیل برای بررسی عملکرد ترکیب سطوح مختلف پارامترها، از طرح آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است. شاخص‌های عملکردی در اینجا زمان اجرای الگوریتم و دامنه‌ی عملیات است که شاخص هرکدام از شاخص‌های عملکردی به‌صورت جداگانه محاسبه شده و در نهایت متوسط وزنی شاخص‌ها محاسبه و سطح بهینه انتخاب شده است.

۶. نتایج عددی

در این بخش برای مقایسه‌ی میزان استواری هشت روش منتخب موجود در ادبیات، به بیان یک مثال عددی و حل این مثال با این هشت روش، و نهایتاً مقایسه‌ی نتایج استواری و میزان میانگین دامنه‌ی عملیات برنامه‌ی خروجی می‌پردازیم.

برای تعیین مقدار X که مبنای مقایسه برای تعیین میزان استواری است از جواب الگوریتم جست‌وجوی حریصانه با در نظرگرفتن میانگین زمان فعالیت‌ها، به‌عنوان زمان انجام کارها در مسائل با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. جواب این روش حدود باریک‌تری را نسبت به روش NEH که کیونگ لیو برای مسئله‌ی جریان کارگاهی جایگشتی به کار گرفت ایجاد می‌کند. برای تولید مسئله‌ی نمونه، مسائل به سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ دسته‌بندی شده است. در جدول ۳ اندازه این مسائل و مقدار X برای هر دسته نمایان است.

زمان پردازش کارها برای این مسائل به‌طور تصادفی در بازه ۱ تا ۹۹ تولید شده است. این الگوریتم‌ها با نرم‌افزار متلب کد شده و در سیستمی با پردازشگر ۲٫۶ گیگا هرتز و حافظه‌ی RAM ۲ گیگابایت با ۵ بار تکرار حل شده است. نتایج حاصله از حیث مقدار تابع برازش و متوسط دامنه‌ی عملیات به‌ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۲. سطوح پارامتری الگوریتم‌های ارائه شده.

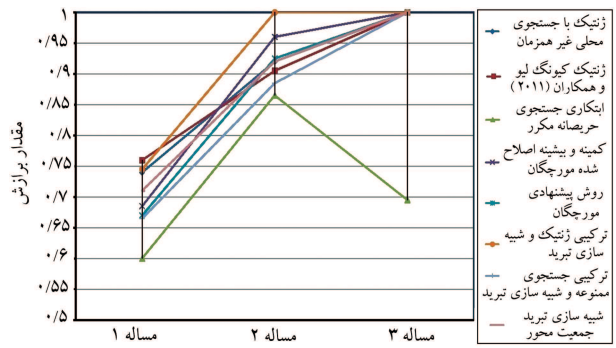
ردیف	الگوریتم	پارامتر	سطوح پارامتر			سطح بهینه
۱	الگوریتم ژنتیک	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۴۰
		نرخ جهش	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۳
		نرخ تقاطع	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۶
۲	روش ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبریدی	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۲۰
		نرخ جهش	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۵
		نرخ تقاطع	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۲
		دمای اولیه	۱۰	۲۰	۳۰	۱۰
		دمای توقف	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۱
		نرخ سرد شدن	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۵
۳	الگوریتم ترکیبی جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبرید	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۲۰
		دمای اولیه	۱۰	۲۰	۳۰	۱۰
		دمای توقف	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۹
		نرخ سرد شدن	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۳
۴	الگوریتم ژنتیک با جست‌وجوی محلی غیر همزمان	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۴۰
		نرخ تقاطع	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۶
		تعداد تکرار داخلی جست‌وجوی محلی	۳	۴	۵	۳
۵	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جمعیت محور	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۲۰
		دمای اولیه	۱۰	۲۰	۳۰	۳۰
		دمای توقف	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۱
		نرخ سرد شدن	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۳
		احتمال جایگزینی جواب بهبود نیافته با جواب موجود	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱
۶	الگوریتم جست‌وجوی حریصانه مکرر	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۶۰
		نرخ جست‌وجوی داخلی	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۳
۷	روش پیشنهادی الگوریتم مورچگان	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۴۰
		نرخ تبخیر	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵
۸	الگوریتم کمینه ـ بیشینه‌ی اصلاح شده‌ی مورچگان	اندازه نمونه	۲۰	۴۰	۶۰	۴۰
		نرخ تبخیر	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵

جدول ۳. اندازه مسائل تولید شده و مقادیر X.

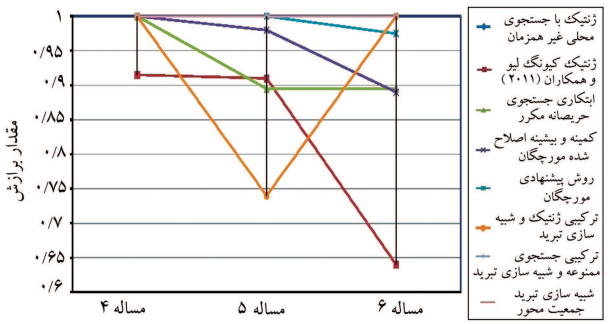
شماره مسئله	سایز مسئله		مقدار X	نوع مسئله
	m	n		
۱	۳	۵	۳۳۰	کوچک
۲	۴	۴	۲۱۷	
۳	۵	۶	۵۷۶	
۴	۷	۱۰	۹۲۷	متوسط
۵	۹	۱۵	۱۴۳۰	
۶	۱۲	۲۰	۱۹۵۸	
۷	۲۰	۷۰	۶۵۶۳	بزرگ
۸	۳۰	۶۰	۶۳۸۲	
۹	۲۵	۹۰	۸۴۸۳	

برای بررسی تفاوت عملکرد الگوریتم‌ها و تحلیل آماری نتایج، آنالیز واریانس دوطرفه در سطح اطمینان ۹۵٪ روی مقادیر حاصل از تابع برازش روش‌های حل متفاوت انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری در جدول ۶ نشان‌گر مردود شدن فرض یکسان بودن عملکرد روش‌های حل متفاوت است.

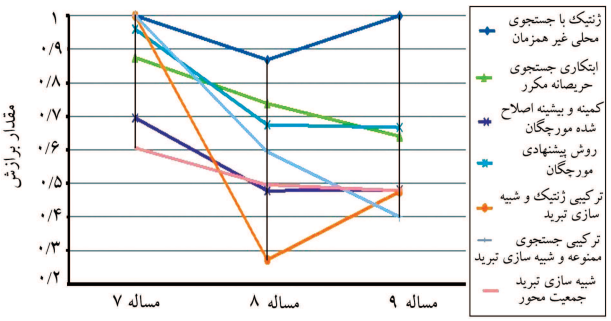
چنان که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در مسائل کوچک به غیر از الگوریتم جست‌وجوی حریصانه، با افزایش شماره‌ی مسئله عملکرد الگوریتم‌ها بهبود یافته است. همچنین در دسته مسائل کوچک می‌توان گفت در مجموع الگوریتم ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است. مطابق شکل ۲ عملکرد روش‌های حل ذکر شده برای مسائل متوسط است، چنان که مشخص است به غیر از الگوریتم‌های ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای مسئله‌ی ۵ و ژنتیک با جست‌وجوی محلی غیر همزمان برای مسئله‌ی ۶ سایر الگوریتم‌ها برای مسائل متوسط عملکرد خوبی داشته‌اند. برای مقایسه‌ی دقیق‌تر الگوریتم‌ها در این مورد می‌توان مقایسه‌ی متوسط دامنه‌ی عملیات برای جواب استوار هر الگوریتم را در اولویت بعدی قرار دارد. با استناد به شکل ۳ می‌توان گفت الگوریتم ژنتیک با جست‌وجوی محلی غیر همزمان برای مسائل بزرگ نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته است. همچنین یادآور می‌شود که براساس نتایج محاسباتی الگوریتم ژنتیک کیونگ لیو و همکاران برای مسائل بزرگ قابلیت رسیدن به جواب‌های استوار را ندارد.



شکل ۱. نمودار برازش مسائل با اندازه کوچک.



شکل ۲. نمودار برازش برای مسائل با اندازه متوسط



شکل ۳. نمودار برازش برای مسائل با اندازه بزرگ.

جدول ۴. نتایج تابع برازش برای مسائل مختلف.

	شماره مسئله								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
ژنتیک با جست‌وجوی محلی غیر همزمان	۰٫۷۴	۰٫۹۲	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۸۷	۱٫۰۰
ژنتیک کیونگ لیو و همکاران (۲۰۱۱)	۰٫۷۶	۰٫۹۱	۱٫۰۰	۰٫۹۲	۰٫۹۱	۰٫۶۴	--	--	—
الگوریتم جست‌وجوی حریصانه مکرر	۰٫۶۰	۰٫۸۷	۰٫۷۰	۱٫۰۰	۰٫۹۰	۰٫۹۰	۰٫۸۸	۰٫۷۴	۰٫۶۴
کمینه ـ بیشینه اصلاح شده مورچگان	۰٫۶۹	۰٫۹۶	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۸	۰٫۸۹	۰٫۷۰	۰٫۴۸	۰٫۴۸
پیشنهادی مورچگان	۰٫۶۷	۰٫۹۳	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۸	۰٫۹۶	۰٫۶۷	۰٫۶۷
ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید	۰٫۷۵	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۷۴	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۲۷	۰٫۴۸
ترکیبی جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبرید	۰٫۶۷	۰٫۸۹	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۵۹	۰٫۴۰
شبیه‌سازی تبرید جمعیت محور	۰٫۷۱	۰٫۹۲	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۶۱	۰٫۵۰	۰٫۴۸

جدول ۵. متوسط دامنه عملیات برای جواب استوار هر الگوریتم.

	شماره مسئله								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
ژنتیک با جست‌وجوی محلی غیر همزمان	۳۲۸٫۲۰	۲۱۲٫۵۹	۵۶۰٫۰۱	۹۲۴٫۵۹	۱۴۰۴٫۹۹	۱۹۴۰٫۸۱	۶۵۶۰٫۰۰	۶۳۵۱٫۴۷	۸۴۴۹٫۴۰
ژنتیک کیونگ لیو و همکاران (۲۰۱۱)	۳۲۷٫۲۳	۲۱۲٫۴۲	۵۵۹٫۴۱	۹۰۶٫۴۳	۱۴۱۴٫۵۲	۱۸۷۳٫۴۴	–	–	–
الگوریتم جست‌وجوی حریصانه مکرر	۳۲۸٫۵۹	۲۱۲٫۹۳	۵۷۰٫۲۷	۸۹۲٫۹۵	۱۴۰۱٫۸۷	۱۹۲۸٫۹۱	۶۵۳۰٫۶۳	۶۳۵۶٫۲۴	۸۵۵۸٫۱۵
کمینه ـ بیشینه اصلاح شده مورچگان	۳۲۸٫۹۶	۲۱۲٫۶۲	۵۶۰٫۱۲	۸۹۸٫۲۶	۱۴۱۱٫۵۶	۱۹۴۰٫۶۸	۶۵۶۲٫۲۲	۶۴۶۶٫۸۳	۸۵۰۳٫۵۳
پیشنهادی مورچگان	۳۲۸٫۱۶	۲۱۲٫۳۸	۵۶۴٫۵۸	۸۹۸٫۲۰	۱۳۹۶٫۶۲	۱۹۳۸٫۵۹	۶۵۳۱٫۹۱	۶۳۶۲٫۶۷	۸۴۵۵٫۷۱
ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید	۳۲۷٫۷۹	۲۸۱٫۴۱	۵۵۸٫۶۳	۹۰۰٫۸۸	۱۴۲۵٫۸۰	۱۹۲۳٫۵۱	۶۴۹۵٫۴۳	۶۶۵۷٫۶۷	۸۶۷۰٫۹۱
ترکیبی جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبرید	۳۲۸٫۹۹	۲۱۲٫۳۲	۵۵۹٫۳۳	۸۹۱٫۱۳	۱۳۹۸٫۲۷	۱۹۲۳٫۸۶	۶۵۱۲٫۷۰	۶۳۷۲٫۹۲	۸۸۴۶٫۳۶
شبیه‌سازی تبرید جمعیت محور	۳۲۸٫۰۰	۲۱۲٫۳۱	۵۶۰٫۹۴	۸۹۱٫۴۹	۱۴۰۳٫۵۶	۱۹۲۶٫۴۲	۶۶۱۱٫۶۷	۶۴۰۵٫۷۶	۸۵۰۳٫۳۵

جدول ۶. جدول آنالیز واریانس تابع برازش الگوریتم‌ها.

	درجه آزادی	SS	MS	F	P
الگوریتم	۷	۵٫۴۳۰۰	۰٫۷۷۵۷۱۲	۴٫۶۴	٫۰۰۰
مسائل	۸	۷٫۸۸۲۸	۰٫۹۸۵۳۵۱	۵٫۸۹	٫۰۰۰
تبادلات	۵۶	۱۶٫۸۹۶۹	۰٫۳۰۱۷۳۰	۱٫۸۰	۰٫۰۰۱
خطا	۲۸۸	۴۸٫۱۸۳۱	۰٫۱۶۷۳۰۲		
مجموع	۳۵۹	۷۸٫۳۹۲۸			

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار برای اولین بار مسئله‌ی جریان کارگاهی انسدادی با معیار بیشینه‌سازی «استواری بتا» در دامنه‌ی عملیات مورد بررسی قرار گرفت. برای حل این مسئله از هشت روش ابتکاری و فرااابتکاری موجود در ادبیات استفاده شده است. کارایی این روش‌ها با معیار استواری در حل مسائل با اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که برای اندازه‌های مختلف مسئله، الگوریتم‌های متفاوتی استوارترین جواب را به ما ارائه می‌کنند ولی در مجموع می‌توان گفت که روش ژنتیک با جست‌وجوی غیرهمزمان از استواری بالایی برخوردار است.

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی مسائل جریان کارگاهی استواری بتا صورت نگرفته، و پژوهش‌های آتی در این زمینه می‌تواند بررسی مسئله‌ی مطرح شده در این تحقیق با محدودیت‌های بیشتر برای نزدیک‌تر شدن مسئله به دنیای واقعی، در نظر گرفتن بتا استواری سایر معیارهای عملکردی یا بررسی این مسئله با عدم قطعیت در سایر پارامترها مانند تقاضای مشتریان، قیمت‌ها و... باشد.

پانوشت‌ها

1. β-robust
2. proactive
3. makespan
4. blocking
5. adaptive scheduling
6. event driven
7. reactive
8. predictive-reactive
9. proactive-reactive
10. flowtime
11. robustness
12. stability
13. regret based
14. permutation flow shop
15. tournament selection
16. crossover
17. mutation
18. precedence preservative crossover (PPX)
19. swap crossover
20. hybrid genetic and simulated annealing algorithm
21. condition-based maintenance
22. Roulette wheel
23. uniform selection
24. two point cross over
25. insertion
26. Cauchy
27. cooling schedule
28. population reproduction
29. hybrid tabu search and simulated annealing algorithm
30. block insertion
31. tabu list
32. Poltzman
33. asynchronous genetic local search algorithm
34. twice two point cross over
35. population based simulated anealing
36. M-MMAS
37. PACO
38. job-index-based local search

منابع (References)

1. Grabowski, J. and Pempera, J. "The permutation flow shop problem with blocking. A tabu search approach", *International Journal of Management Science Omega*, **35**, pp. 302-311 (2007).
2. Hall, N.G. and Sriskandarajah, C. "A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process", *Operations Research*, **44**, pp. 510-25 (1996).
3. Shafaei, R. and Brunn, P. "A framework to integrate job releasing, routing and scheduling functions to create a robust predictive schedule", *European Journal of Production Research*, **38**(1), pp. 85-99 (2000).
4. Herroelen, W. and Leus, R. "Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials", *European Journal of Operational Research*, **165**(2), pp. 289-306 (2005).
5. Davenport, A.J. and Beck, J.C. "A survey of techniques for scheduling with uncertainty", Unpublished manuscript (2000), Available from http://www.eil.utoronto.ca/profiles/chris/chris.papers.html.
6. Raman, N., Rachamadugu, R.V. and Talbot, B. "Real-time scheduling of an automated manufacturing center", *European Journal of Operations Research*, **40**, pp. 222-242 (1989).
7. Sabuncuoglu, I. and Karabuk, S. "Rescheduling frequency in an FMS with uncertain processing times and unreliable machines", *Journal of Manufacturing Systems*, **18**(4) pp. 1-16 (1999).
8. Yamamoto, M. and Nof, S.Y. "Scheduling/rescheduling in a manufacturing operating system environment", *International Journal of Production Research*, **23**(4), pp. 705-72 (1985).
9. Aloulou, M.A. and Portmann, M.-C. "An efficient proactive reactive scheduling approach to hedge against shop floor disturbances", In *Multidisciplinary Scheduling: Theory and Applications 1st International Conference*, MISTA '03, Nottingham, UK, (13-15 August 2003).
10. Vieira, G.E., Herrmann, J.W. and Lin, E. "Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies and methods", *Journal of Scheduling*, **6**, pp. 39-62 (2003).
11. Sabuncuoglu, I. and Goren, S. "Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research", *Int. J. Computer Integr Manuf*, **22**(2), pp. 138-157 (2009).
12. Sotskov, Y., Sotskova, N.Y. and Werner, F. "Stability of an optimal schedule in a job shop", *Omega: the International Journal of Management Science*, **25**(4), pp. 397-414 (1997).
13. Wu, C.W., Brown, K.N. and Beck, J.C. "Scheduling with uncertain durations: Modeling â-robust scheduling with constraints", *Comput Oper Res*, **36**, pp. 2348-2356 (2009).
14. Liu, Q., Ullah, S. and Zhang, C. "An improved genetic algorithm for robust permutation flowshop scheduling", *Int J Adv Manuf Technol*, **56**, pp. 345-354 (2011).
15. Safari, E. and Sadjadi, S.J. "A hybrid method for flowshops scheduling with condition-based maintenance constraint and machines breakdown", *Expert Systems with Applications*, **38**, pp. 2020-2029 (2011).
16. Ogbu, F.A. and Smith, D.K. "The application of the simulated annealing algorithm to the solution of the $n = m = C_{\max}$ flow shop problem", *Computers and Operations Research,* **17**, pp. 243-253 (1989).
17. Lin, S.W. and Ying, K.C. "Applying a hybrid simulated annealingand tabu search approach to non-permutation flow shop scheduling problems", *Int J Prod Res*, **47**, pp. 1411-1424 (2008).
18. Safari, E., Sadjadi, S.J. and Shahanaghi, K. "Scheduling flowshops with condition-based maintenance constraint to minimize expected makespan", *Int J Adv Manuf Technol,* **46**, pp. 757-767 (2010).
19. Glover, F. "A user's guide tabu search", *Ann Oper Res*, **41**, pp. 3-28 (1993).
20. Xu, X., Xu, Z. and Gu, X. "An asynchronous genetic local search algorithm for the permutation flowshop scheduling problem with total flowtime minimization", *Expect Systems with Appl.*, **38**, pp. 7970-7979 (2011).
21. Nearchou, A.C. "A novel metaheuristic approach for the flow shop scheduling problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **17**, pp. 289-300 (2004).
22. Lundy, M. and Mees, A. "Convergence of an annealing algorithm", *Mathematical Programming*, **34**, pp. 111-124 (1986).
23. Nawaz, M., Enscore Jr., E.E. and Ham, I. "A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flowshop sequencing problem", *OMEGA*, **11**, pp. 91-95 (1983).
24. Ruiz, R. and Stutzle, T. "A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, **177**, pp. 2033-2049 (2007).
25. Rajendran, C. and Ziegler, H. "Ant-colony algorithms for permutation flow shop scheduling to minimize makespan/total flowtime of jobs", *Discrete Optimization*, **155**, pp. 426-438 (2004).