نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
ISSN: 2345-2269
سال چهارم، شماره هشتم، پاییز و زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۰۵-۱۱۷
www.ier.basu.ac.ir

مقایسه سه روش فراابتکاری برای کمینه نمودن زمان چرخه در مسئله زمانبندی جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با در نظر گرفتن اثر یادگیری

جواد بهنامیان[۱،*]، فاطمه دیانت[۲]

۱. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۵/۰۳/۲۱

پذیرش ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

کلمات کلیدی:

زمانبندی

جریان کارگاهی مختلط

اثر یادگیری

الگوریتم فراابتکاری

خلاصه

زمانبندی کارها در صنایعی که روند حرکت کارها بر روی ماشین‌ها به صورت دوره‌ای می‌باشد، همچون صنایعی که محصولات آنها فاسد شدنی نظیر صنایع غذایی و یا دارای طول عمر همانند مواد شیمیایی، رادیواکتیو و غیره هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا که این صنایع به دلیل محدودیت‌های زمانی و یا رقابت با سایر شرکت‌ها سعی در کمینه نمودن بازه زمانی انجام کارها دارند. از آنجا که غالباً محیط تولیدی این صنایع به صورت تولید جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای می‌باشد و اثر یادگیری اپراتور در سرعت تولید مشهود است، این پژوهش در نظر دارد که زمان چرخه بر روی هر ماشین را با وجود اثر یادگیری به کمک چینش فعالیت‌ها کمینه نماید. برای این منظور در روند این پژوهش، ابتدا تحقیقات پیشین در این حوزه مورد مطالعه قرار گرفت. سپس مدل ریاضی این مسأله نوشته و به دلیل آنکه ماهیت کمینه نمودن زمان انجام کارها در محیط تولید جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای، جزء مسائل سخت (NP-Hard) می‌باشد، برای حل این مسأله از سه روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت به دلیل ساختار جمعیتی آن، به‌طور میانگین نسبت به دو الگوریتم دیگر کارایی بهتری دارد.

۱- مقدمه

مسأله جریان کارگاهی مختلط شامل چندین مرحله و مراکز ماشینی می‌باشد که به‌صورت جریانی فعالیت می‌نمایند و در هر مرحله و مرکز ماشینی، ماشین‌هایی به‌صورت موازی قرار گرفته‌اند [۱]. تعداد ماشین‌ها در هر مرحله نیز می‌تواند متفاوت باشد. مسأله جریان کارگاهی مختلط در تعداد وسیعی از صنایع استفاده می‌شود که مثال‌های آن در تحقیقات گذشته دیده می‌شود. از استفاده آن در صنایع شیمیایی، پلیمر و پتروشیمی و متالوژی [۲]، تولیدات الکترونیکی، مدار چاپی، صنایع بسته‌بندی [۳]، بخش دارویی [۴]، صنایع اتوماتیک نظیر اتومبیل‌سازی [۵، ۶]، ساخت کانتینرهای شیشه‌ای [۷]، پردازش چوب، تولیدات کاشی و سرامیک و تولیدات گیاهی [۸]، مواد غذایی و آرایشی [۹]، صنایع نیمه هادی [۱۰،۱۱،۱۲] و تولیدات کابل [۱۳] می‌توان نام برد.

مسائل جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای دسته‌ای از مسائل جریان کارگاهی مختلط هستند که کارها به صورت چرخشی روی ماشین‌های هر مرحله قرار می‌گیرند [۱۴]. کاربرد اساسی سیاست دوره‌ای در صنایعی است که سعی در بهره‌برداری از منابع مشترک برای تولید انواع مختلفی از محصولات را دارند. این سیاست، راه حل قابل اطمینانی برای صنایعی است که می‌خواهند در دنیای رقابتی امروز مطابق با خواست مشتریان حرکت کنند. می‌توان در این رابطه به صنایعی که روند تولید محصولات آنها به صورت دوره‌ای بر روی

* نویسنده مسئول. جواد بهنامیان

تلفن: ۳۸۲۹۲۵۰۵-۰۸۱؛ پست الکترونیکی: behnamian@basu.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

ماشین‌ها تکرار می‌شود، اشاره نمود. همچون صنایعی با محصولات فاسدشدنی نظیر صنایع غذایی و یا دارای طول عمر همانند مواد شیمیایی، رادیواکتیو و غیره که به دلیل محدودیت‌های زمانی و یا رقابت با سایر شرکت‌ها سعی در کمینه نمودن بازه زمانی انجام کارها دارند.

از آنجا که اثر یادگیری اپراتور در سرعت تولید مشهود است و می‌تواند زمان خط تولید را تحت تأثیر قرار دهد، این پژوهش در نظر دارد که زمان چرخه بر روی هر ماشین را با وجود اثر یادگیری در محیط جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای به کمک چینش فعالیت‌ها کمینه نماید تا توانایی بیشتری در بیان شرایط واقعی محیط‌های تولیدی فراهم و عوامل انسانی را در امر زمانبندی دخیل کند.

در ادامه، تحقیقات پیشین صورت گرفته در این حوزه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس مدل ریاضی مختلط خطی عدد صحیح مربوط به این مسأله ارائه و به دلیل آنکه ماهیت کمینه نمودن زمان انجام کارها در محیط تولید جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با وجود اثر یادگیری، جزء مسائل سخت می‌باشد، برای حل این مسأله از سه روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت کمک گرفته می‌شود و نتایج عملکرد این الگوریتم‌ها نسبت به یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۲- مرور ادبیات

سطح هموار موجودی مواد [۱۵]، پیش‌بینی رفتار فروش، بهره‌وری بهتر ماشین‌ها، موجودی کمتر کار در حال پردازش، موجودی پایدار اجزای مونتاژ پایین‌دستی [۱۶] و سیاست کاربردی در سیستم‌های تولیدی منعطف نظیر سلول‌های روباتیکی، سیستم‌های تولید اتوماتیک و کامپیوترهای موازی که زمان راه‌اندازی آنها قابل صرف‌نظر می‌باشند [۱۷]، از مزایای سیاست دوره‌ای در زمانبندی می‌باشد.

اولین مطالعه در مورد مسائل دوره‌ای در حوزه زمانبندی به دهه ۱۹۶۰ میلادی به مقالات کونینگهام-گرین [۱۹,۱۸]، برمی‌گردد، زمانی که او مفهوم عملیات دوره‌ای و مدل ریاضی برای بهینه نمودن دوره چرخه را معرفی کرد. ویتروک [۲۰]، به بعضی حوزه‌های زمانبندی دوره‌ای به‌خصوص در سیستم‌های تولید بهنگام در تولیدی‌هایی که تلاش می‌کنند به سفارش‌های متنوع پاسخگو باشند و در ضمن در سر موقع تحویل داده بشوند و با کاهش زمان پردازش کارها نیز همراه باشند، اشاره نمود.

امروزه تمایل به سیاست دوره‌ای و کاربردهای آن در جوامع علمی و صنعتی دیده می‌شود [۲۱، ۲۲]. مطالعاتی در مورد سیاست دوره‌ای در کامپیوترها نیز انجام گردید [۲۳، ۲۴، ۲۵]. سیستم‌های روباتیکی به‌عنوان کاربرد اصلی زمانبندی دوره‌ای برشمرده می‌شوند [۲۶، ۲۷]. برای جزئیات بیشتر در حوزه زمانبندی دوره‌ای می‌توان به سایر مقالات در این زمینه مراجعه نمود [۲۸، ۲۹].

مسأله زمانبندی جریانی دوره‌ای توسط گریوز و همکاران [۳۰] برای اولین بار با ارائه الگوریتم ابتکاری برای کمینه نمودن دوره، انجام شد. بعد از آن برای مسأله جریانی دوره‌ای، ظرفیت بافرهای محدود نیز در نظر گرفته شد [۳۱، ۳۲، ۳۳].

مهمترین تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه زمانبندی دوره‌ای در مسائل کارگاهی در سال‌های اخیر توسط کمپمیر [۳۴] و نامبیار [۳۵] صورت گرفته است.

زمانبندی دوره‌ای جریان کارگاهی مختلط برای اولین بار توسط سلطانی و کریمی [۱۴]، انجام گرفت که به حل مدل زمانبندی جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با محدودیت‌های معرفی‌شده در مقاله به همراه بافرهای محدود و محدودیت‌های شایستگی ماشین‌ها، می‌پرداخت. در نظر گرفتن محدودیت شایستگی ماشین‌ها در زمانبندی در مسائلی که به صورت منظم و بدون تغییر لحاظ می‌شوند، می‌تواند کاربرد داشته باشد.

یک فرض رایج در مسأله برنامه‌ریزی و زمانبندی این است که زمان پردازش یک محصول ثابت و مستقل از جایگاهش در توالی عملیات است، برای مثال بیکر [۳۶] فرض می‌کند که زمان‌های پردازش، ثابت، مشخص و مستقل از توالی کارهاست. اما در بیشتر مواقع با تکرار یک کار، توانایی و مهارت و عملکرد کارگر (اپراتور) به‌طور پیوسته با گذشت زمان، افزایش و زمان پردازش کارها کاهش می‌یابد. این امر باعث بهبود مستمر عملکرد تسهیلات تولیدی (مخصوصاً نیروی انسانی) می‌شود و در ادبیات موضوع با نام اثر یادگیری شناخته می‌شود [۳۷].

از آنجا که مسائل کلاسیک زمانبندی برای محیط‌های چند ماشینه، محدود و ناکارآمد هستند، با تکامل این‌گونه مسائل از اوایل دهه ۱۹۹۰ مدل‌های نوینی در مسائل زمانبندی به وجود آمدند. از جمله مسأله زمانبندی با زمان‌های پردازش قابل‌کنترل، زمانبندی کارها با زمان‌های پردازش وابسته به زمان و زمانبندی کارها روی ماشین‌های چند منظوره که در مطالعه اوکولوفسکی و گاویجنویچ [۳۸] به آن اشاره شده است. بسیاری از محققین مانند بهلولی و ذگردی [۳۹] با بررسی برنامه زمانبندی تجربی و تئوری به این نتیجه رسیدند که زمان‌های پردازش کارها تراکم‌پذیرند. بیسکاپ [۴۰] عنوان می‌کند که یکی از رویکردها برای کاهش زمان پردازش کارها و در نظر گرفتن تراکم‌پذیری، استفاده از مبحث یادگیری است. رایت [۴۱] اولین کسی بود که به تحقیق در مورد مفهوم اثر یادگیری در چارچوب یک کار علمی پرداخت. او با استفاده از آزمایش‌های علمی در صنایع هواپیمایی، فرضیه مشهور ۸۰ درصد را مطرح کرد که "با دو برابر شدن خروجی تولید، زمان پردازش هر واحد، ۲۰ درصد کاهش می‌یابد." با توجه به محسوس بودن نقش نیروی انسانی در محیط‌های زمانبندی، تعداد عملیاتی که در آن احتمال وقوع یادگیری وجود داشته باشد زیاد است. بنابراین در نظر گرفتن یادگیری در محیط‌های زمانبندی، معقول به نظر می‌رسد. اولین بار بیسکاپ [۴۲] مفهوم اثر یادگیری را در مسائل زمانبندی به‌کار برد. این مفهوم پس از آن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت و امروزه پژوهش‌های متعددی در این زمینه به چاپ رسیده است و گواه آن

Archive of SID

www.SID.ir

رشد نمایی حجم مقالات ارائه شده در این حوزه می‌باشد که در مطالعه جانیاک و رودک [۴۳] و فخرزاد و علینژاد [۳۷] که اثر یادگیری در زمانبندی سیستم‌های ساخت کارگاهی انعطاف‌پذیر را مورد مطالعه قرار دادند، می‌توان دید. دژونگ با استفاده از نتایج مطالعات زمان‌سنجی، یک مدل یادگیری جدید و کاربردی برای تقریب میزان کاهش زمان پردازش کارها در تکرارهای آن، رابطه (۱) ارائه نمود.

$$p_{j,r} = p_j\left(D + \left(1 - D\right)r^{\alpha}\right) \qquad j \geq 1, r \leq n \qquad (1)$$

که در آن p_j زمان پردازش نرمال کار، $\alpha \leq 0$ شاخص یادگیری اثر یادگیری، D فاکتور تراکم‌ناپذیری و r موقعیت (جایگاه) کنونی کار (قطعه) در برنامه زمانبندی و یا همان تعداد دفعات تکرار است.

دژونگ برای کارهای اپراتور محور $D = 0.25$ و برای کارهای ماشین محور $D = 0.5$ را پیشنهاد داد. اوکولوفسکی و گاویجنویچ [۳۸] بر مبنای همین معادله، مدلی برای زمانبندی ماشین‌های موازی با هدف کمینه‌سازی دامنه عملیات ارائه و ادعا کردند که اولین کسانی هستند که مدل دژونگ را به عنوان اثر یادگیری در حیطه زمانبندی وارد کردند و برای آن ۲ الگوریتم حل دقیق به منظور مقایسه کارکرد ۲ حل ابتکاری ارائه نمودند. هر چند به نظر می‌رسد که قبل از آنها، بهلولی و ذگردی [۱۸] رابطه دژونگ را در نظر گرفته بودند.

موشیو [۴۴] و ونگ و همکاران [۴۵] به مسأله زمانبندی تک‌ماشینه با اثر یادگیری پرداخته است و نشان دادند که پیچیدگی حل مسأله زمانبندی تک‌ماشینه با وجود این فرضیات نیز، همچنان به‌صورت چندجمله‌ای می‌باشد. توکساری و گونر [۴۶] نیز مسأله ماشین‌های موازی با اثر یادگیری و خرابی را مورد مطالعه قرار دادند. ارن [۴۷] بیان نمود که در بعضی از محیط‌های صنعتی زمان راه‌اندازی و زمان جدا نمودن قطعه از دستگاه، آن‌قدر اهمیت دارند که بهتر است مستقل از زمان پردازش کارها در نظر گرفته شوند. برای مثال در محیط‌های اتوماتیک، این زمان‌ها متفاوت با توالی عملیات نیستند، اما هنگامی که فاکتور انسانی نیز وارد عمل می‌شود، به تعداد تکرارها، زمان انجام راه‌اندازی و جدا نمودن قطعه از دستگاه نیز کاهش می‌یابد. این مقاله دچار نواقصی بود که در مقاله‌ای از زو و یین [۴۸] تصحیح گردید. بهنامیان و زندیه [۴۹]، بهنامیان [۵۰] حل مسأله کمینه نمودن زودکرد و دیرکرد و هزینه به‌کارگیری کارگران در زمانبندی مسأله جریان کارگاهی مختلط با وجود اثر یادگیری و خرابی و زمان راه‌اندازی وابسته متوالی[1] و با فرض آنکه هرچه تعداد کارگر در هر مرحله بیشتر باشد، کار سریع‌تر انجام می‌شود، انجام دادند.

در پایان، با توجه به مطالعات انجام‌شده در حیطه‌های مختلف زمانبندی، می‌توان نتیجه گرفت که مسائل جریان کارگاهی مختلط جزء مسائل مهم و مشخص در توالی عملیات و زمانبندی است که تاکنون تحقیقی در مورد زمانبندی مسأله جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با در نظر گرفتن اثر یادگیری برای کمینه نمودن زمان چرخه بر روی هر ماشین صورت نپذیرفته است که به دلیل کاربردهای متعدد این مدل در صنایع مختلف، لزوم توجه و مطالعه در این حوزه آشکار می‌گردد.

۳- تعریف مسأله و مدلبندی

زمانبندی مسأله تصمیمی است که سعی می‌کند کارها را به‌گونه‌ای اختصاص دهد که تابع هدف بهینه شود. اولین مطالعه در این زمینه توسط جانسون [۵۱] انجام گرفت که بعد از آن مسائل مختلف زمانبندی با فرم‌های متنوع و با فرضیات و توابع هدف متفاوت در نظر گرفته‌شد.

در دنیای رقابتی امروز، هر شرکت که در فعالیت‌های تولیدی مشارکت دارد، می‌باید که برنامه‌ریزی و زمانبندی تولیدات خود را با تقاضای مشتری سازگار و منطبق کند. این واقعیت اساس ایجاد فلسفه تولید بهنگام را ایجاد می‌کند که تلاش دارد نیاز و سفارش مشتری را در میزان دقیق تقاضا شده در زودترین زمان ممکن فراهم آورد. بنابراین این نکته دلیل اصلی تغییر سیاست صنایعی با تنوع زیاد محصولات است که سعی می‌کنند سیاست تولیدشان را از دسته‌ای تک‌محصوله به‌سمت چندین نوع محصول عوض کنند. برای ایجاد این حرکت و برای کاهش کار در جریان، از سیاست‌های دوره‌ای (چرخشی) استفاده می‌شود.

مسأله جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای در حقیقت ترکیب ۲ مسأله جریان کارگاهی مختلط و زمانبندی دوره‌ای می‌باشد. نهایتاً هدف از حل مسأله زمانبندی، حداقل کردن زمان چرخه می‌باشد. متغیر زمان چرخه، بیشترین زمان ممکن بین ۲ تکرار موفق یک عملیات یا همان یک کار مشخص، بر روی یک ماشین تعریف می‌شود.

$$set\ N = \{1, 2, \dots, n\} \qquad (2)$$

$$set\ Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\} \qquad (3)$$

$$MPS = \left\{\frac{q_1}{r}, \frac{q_2}{r}, \dots, \frac{q_n}{r}\right\} \qquad (4)$$

$$NJ = \sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{r} \qquad (5)$$

رابطه (۲) تعداد انواع محصول، رابطه (۳) تقاضای هر محصول، رابطه (۴) کوچکترین بخش تولید می‌باشد که در حقیقت r ب.م.م (بزرگترین مقسوم‌علیه مشترک) مقادیر تقاضای محصولات می‌باشد. تعداد کار در هر دوره نیز از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

به‌طور مثال برای ۳ نوع محصول A، B، C با تقاضایی به‌ترتیب ۱۰۰، ۲۵۰ و ۱۵۰ واحد محصول، میزان r برابر ۵۰ و MPS هر کدام به‌ترتیب برابر ۲، ۵ و ۳ خواهد بود.

$$set\ J = \{j_1, j_2, \dots, j_{NJ}\} \qquad (6)$$

$$set\ S = \{s_1, s_2, \dots, s_{NS}\} \qquad (7)$$

1. Sequence-Dependent Setup Times (SDST)

Arrive of SID

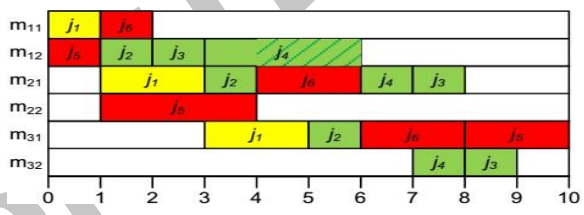
www.SID.ir

$$set\ M_s = \{m_1, m_2, \dots, m_{NM_s}\} \quad (۸)$$

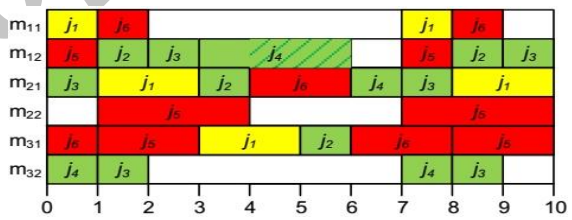
رابطه (۶) مجموعه کارها و رابطه (۷) مجموعه مراحل را نمایش می‌دهد. برای هر مرحله، مجموعه M_S که شامل NM_S عدد ماشین نشان داده در رابطه (۸) می‌باشد، وجود دارد که تعداد اعضای مجموعه M_S همانطور که در رابطه (۹) آمده است، باید بزرگتر مساوی یک باشد.

$$|M_S| \geq 1 \quad (۹)$$

برای تبیین بیشتر مسأله در شکل ۱، محور افقی نشان‌دهنده زمان، m_{uv}ها نشان‌دهنده ماشین vام در مرحله uام و jها نشان‌دهنده کارها و سفارشات می‌باشند. زمان هر چرخه برابر با ۷ و طول یک مجموعه کار که به‌صورت کوچکترین بخش مجموعه‌ای[1] تعریف می‌شود و عبارت است از کوچکترین مجموعه‌ای از بخش‌ها که می‌توانند تولید شوند، برابر با ۱۰ می‌باشد. در یک روند دوره‌ای، چیدمان کارها روی هر ماشین می‌باید به‌صورت شکل ۲ هر ۷ واحد زمانی، تکرار شود.



شکل (۱): (منبع: برگرفته از سلطانی و کریمی ۲۰۱۴)



شکل (۲): (منبع: برگرفته از سلطانی و کریمی ۲۰۱۴)

فرضیات مسأله بصورت زیر است

- همه ماشین‌ها در زمان صفر آماده هستند.
- خرابی در ماشین‌ها اجازه داده نمی‌شود.
- هر ماشین فقط حداکثر می‌تواند یک کار را در یک زمان مشخص انجام دهد.
- هر کار فقط حداکثر می‌تواند بر روی یک ماشین در یک زمان مشخص انجام شود.
- همه کارها مستقل هستند و تقدمی میان آن‌ها وجود ندارد.
- همه زمان‌های راه‌اندازی بی‌اهمیت هستند و یا در زمان خود پردازش، لحاظ شده‌اند.
- قطع پروسه عملیات اجازه داده نمی‌شود.

متغیرها و پارامترهای مسأله بصورت زیر است.

CT_1	زمان چرخه در اولین چرخه (دوره)
CT_r	زمان چرخه r امین چرخه (با تأثیر یادگیری)
p_i^t	زمان پردازش کار i ام در مرحله t ام در اولین چرخه
p_{ir}^t	زمان پردازش کار i ام در مرحله t ام بعد r امین تکرار (با تأثیر یادگیری) در اولین چرخه
C_i	زمان اتمام کار i ام
C_i^t	زمان اتمام کار i ام در مرحله t ام
x_{ij}^t	مقدار یک اگر کار i ام بر روی ماشین j ام در t امین مرحله قرار گیرد و صفر در غیر این‌صورت
m^t	تعداد ماشین‌های مرحله t ام
g	تعداد کل مراحل
n	تعداد کل کارها
L	عدد بزرگ مثبت

با توجه به مطالب فوق می‌توان مدل را به صورت زیر، فرموله‌بندی نمود.

$$Min\ CT \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j=1}^{m^t} x_{ij}^t = 1 \quad for\ i = 1,2,\dots,n,\ \ t = 1,2,\dots,g \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^t \geq 1 \quad for\ j = 1,\dots,m^t \quad t = 1,\dots,g \quad (۱۲)$$

$$C_i^{t+1} - C_i^t + L(1 - x_{ij}^{t+1}) \geq p_{ir}^{t+1} \quad (۱۳)$$
$$for\ j = 1,2,\dots,m^t \quad t = 1,2,\dots,g \quad i = 1,2,\dots,n$$

$$C_i \geq \sum_{t=1}^{g} p_{ir}^t \quad fori = 1,2,\dots,n \quad (۱۴)$$

$$C_i^1 - C_\cdot^1 \leq M^1 p_{ir}^1 \quad for\ i = 1,2,\dots,n \quad (۱۵)$$

$$C_i^t - C_i^{t-1} \leq M^t p_{ir}^t \quad (۱۶)$$
$$for\ t = 1,2,\dots,g \quad i = 1,2,\dots,n$$

$$C_i^t \geq C_\cdot^t \quad for\ t = 1,2,\dots,g \quad i = 1,2,\dots,n \quad (۱۷)$$

$$CT \geq C_i^t - C_{i'}^{t-1} - M(2 - x_{ij}^t - x_{i'j}^t) \quad (۱۸)$$
$$for\ j = 1,2,\dots,m^t \quad t = 1,2,\dots,g \quad i,i' = 1,2,\dots,n$$

$$M^1 = \sum_{i=1}^{n} p_{ir}^1 \quad (۱۹)$$

$$M^t = M^{t-1} + \sum_{i=1}^{n} p_{ir}^t \quad for\ t = 1,2,\dots,g \quad (۲۰)$$

$$p^t{}_{ir} = p^t{}_i \left(D + (1 - D) r^\alpha\right) \quad j \geq 1, r \leq n \quad (۲۱)$$
$$for\ i = 1,2,\dots,n\ \ t = 1,2,\dots g$$

$$x_{ij}^t \in \{0,1\} \quad (۲۲)$$
$$for\ j = 1,2,\dots,m^t \quad t = 1,2,\dots,g \quad i = 1,2,\dots,n$$

$$C_i^t \geq 0\ for\ t = 1,2,\dots,g \quad i = 1,2,\dots,n \quad (۲۳)$$

معادله (۱۰) و محدودیت (۱۸) تابع هدف مسأله را که کمینه نمودن زمان انجام کارها بر روی هر ماشین می‌باشد را نمایش می‌دهد. معادله (۱۱) بیان می‌کند که یک کار مشخص در یک مرحله مشخص، تنها روی یک ماشین قرار می‌گیرد. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که در یک مرحله مشخص و روی یک ماشین مشخص، در صورتی که تعداد کارها از تعداد ماشین‌ها بیشتر باشد، مساوی یا

1. Minimal Part Set (MPS)

Archive of SID

www.SID.ir

بیشتر از یک کار قرار می‌گیرد. محدودیت (۱۳) نیز زمان اتمام کار در مرحله بعدی را بزرگتر و یا مساوی زمان اتمام کار در مرحله قبل به علاوه زمان پردازش آن کار در مرحله بعدی می‌داند. محدودیت (۱۴) نیز زمان اتمام کارها را بزرگتر و یا مساوی مجموع زمان‌های پردازش آن کار در مراحل مختلف قرار می‌دهد. محدودیت‌های (۱۵-۱۷) بازه‌هایی برای زمان اتمام کارها مشخص می‌نمایند. محدودیت (۱۹) و (۲۰) دو حد بالای زمان اتمام را شبیه حد بالای معرفی‌شده توسط ریوس مرکادو و بارد [۵۲] (معادلات (۲۵) و (۲۴)) نمایش می‌دهد که به دلیل فرض نمودن زمان‌های راه‌اندازی صفر در این مسأله به صورت محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) درآمده‌اند.

$$M^{1} = \sum_{i=1}^{n} (p_{ir}^{1} + \max_{k\in\{0,1,\dots,n\}} s_{ki}^{1}) \quad (۲۴)$$

$$M^{t} = M^{t-1} + \sum_{i=1}^{n} (p_{ir}^{t} + \max_{k\in\{0,1,\dots,n\}} s_{ki}^{t}) \quad (۲۵)$$

محدودیت (۲۱) زمان انجام هر کار در هر مرحله را با توجه به اثر یادگیری بیان می‌دارد. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) نیز بازه متغیرهای مسأله را معادل‌سازی می‌نمایند.

برای حل این مسئله ضروری است که در مقالاتی همچون مطالعه بهنامیان و زندیه [۴۹] و بهنامیان [۵۰]، فرض می‌شود که بیشتر از یک ماشین در هر مرحله محیط جریان کارگاهی مختلط وجود دارد، لذا هر کاری می‌تواند به هر یک از ماشین‌های آن اختصاص یابد. در نتیجه هر ماشین می‌تواند تعداد متفاوتی از کار را داشته باشد که همین امر سبب می‌شود که میزان متفاوتی از یادگیری را نیز دارا داشته باشد و زمان پردازش کار، به صورت رابطه (۲۶) در نظر گرفته می‌شود:

$$p_{ir}^{t} = p_{i}^{t} \times (r_{i}^{t})^{\propto t} \quad (۲۶)$$

آنچه که در این فرض نهفته‌است، آن می‌باشد که کارها می‌بایست با یکدیگر همخوانی داشته باشند و به‌عبارتی هم‌جنس باشند که با تکرار کارها بر روی یک ماشین، اثر یادگیری آن ماشین زیادتر شود. حال اگر فرض شود که کارها هیچ سنخیتی با یکدیگر نداشته باشند، اصولاً یادگیری ماشین (اپراتور) با تعداد کارهای ناهمگون بالاتر نمی‌رود. در این مطالعه فرض می‌شود که اثر یادگیری برای تمامی کارها اتفاق می‌افتد. لذا در این مدلسازی، هم هدف کمینه نمودن مدت زمان انجام کارها در یک دوره با اثر یادگیری و هم اعمال اثر یادگیری در دوره‌های انجام شده می‌باشد. در حقیقت زیاد شدن اثر یادگیری که در اکثر مسائل جریان کارگاهی مختلط با انجام هر کار اتفاق می‌افتد، در مسائل جریان کارگاهی مختلط چرخشی با انجام هر چرخه نیز اتفاق خواهد افتاد. همه کارها نیز می‌باید مراحل را به‌ترتیب از پیش تعیین‌شده، با یک روند طی کنند. یک کار مشخص، برای طی نمودن اولین دوره کار، برای اولین بار از مرحله اول، برای اولین بار از مرحله دوم و به همین ترتیب برای اولین بار از مرحله n ام گذر می‌کند. از آنجا که ماشین‌های هر مرحله متفاوت با یکدیگر هستند، لذا یادگیری دوره‌ای بر روی اولین دوره برای هیچ کاری صورت نمی‌گیرد. از دومین دوره به بعد، به دلیل آنکه کارها قبلاً از آن مراحل گذر نموده‌اند، اثر یادگیری دوره‌ای نیز اتفاق می‌افتد. بنابراین هدف ابتدا کمینه نمودن زمان انجام یک دوره می‌باشد، بعد از آن به دلیل آنکه تمامی کارها در دوره‌های بعدی با اثر یادگیری دوره‌ای مواجه می‌شوند، زمان پردازش کارها در دوره‌های بعدی نیز از رابطه (۲۷) (رابطه دژونگ) به‌دست خواهد آمد.

$$CT_r = CT_1\left(D + \left(1 - D\right) r^{\alpha}\right) \quad j \geq 1, r \leq n \quad (۲۷)$$

در نتیجه، کل زمان انجام کارها در تمام دوره‌ها برابر با رابطه (۲۸) است.

$$\begin{aligned} CT_{TOTAL} &= \sum_{h=1}^{r} CT_h = CT_1\left(D + \left(1 - D\right) 1^{\alpha}\right) + \\ &CT_1\left(D + \left(1 - D\right) 2^{\alpha}\right) + \cdots \\ &+CT_1\left(D + \left(1 - D\right) (r-1)^{\alpha}\right) \\ &+CT_1\left(D + \left(1 - D\right) r^{\alpha}\right) \\ &= r \times D \times CT_1 + \left(1 - D\right) \times CT_1 \times \sum_{h=1}^{r} h^{\alpha} \end{aligned} \quad (۲۸)$$

که r ب.م.م تقاضـــای محصـولات یا کـارهای سفارش داده شده و $\alpha \leq 0$ می‌باشد.

۴- پیچیدگی مسأله و حل با روش‌های فراابتکاری

گوپتا و تانک [۵۳] اثبات کردند که مسأله جریانی منعطف حتی با وجود ۲ مرحله به‌گونه‌ای که در یکی از مراحل تنها یک ماشین باشد، جزء مسائل سخت می‌باشد. بسیار طبیعی است که هر چه تعداد مراحل بیشتر شود به پیچیدگی مسأله می‌افزاید. از آنجا که مسأله جریان کارگاهی مختلط یک حالت عمومی جریانی منعطف می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مسأله جریان کارگاهی مختلط نیز جزء مسائل سخت می‌باشد. در سوی دیگر، مک کورمیک و رائو [۲۸] اثبات نمودند که حداقل نمودن زمان چرخه در مسائل زمانبندی دوره‌ای به سختی و پیچیدگی حداقل نمودن زمان تولید(زمان سیکل) در همان مسأله ولی با سیاست غیر دوره‌ای[1] می‌باشد. سلطانی و کریمی [۱۴] برای مسأله جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای بدون فرض در نظر گرفتن اثر یادگیری، ادعا نمودند که برای نمود ۵ کار و ۵ مرحله و ۳ ماشین در هر مرحله، بعد از ۲۰۰۰۰ ثانیه با نرم‌افزار CPLEX بسته ۱۰.۱ توانسته است حتی به جواب‌شدنی هم برسد. با توجه به این مطالب، مسأله این مقاله نیز جزء مسائل سخت می‌باشد و استفاده از فراابتکاری برای حل آن مناسب است.

در اینجا سه الگوریتم ژنتیک [۵۴]، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید [۵۵] و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت توسعه داده شده در این تحقیق، برای حل استفاده شده است. در اصل این پژوهش قصد دارد کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت را که هم خاصیت جمعیت‌محور الگوریتم ژنتیک و هم خاصیت فرار از بهینگی‌های محلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را دارد، نیز مورد بررسی قرار دهد. الگوریتم‌های نام برده، با نرم‌افزار ۲۰۱۰

1. Non Cyclic

Arhive of SID

www.SID.ir

MATLABاجرا و حل شده است. برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها، از نتایج حاصل از روش حل دقیق به کمک نرم‌افزار CPLEX بسته ۱۲.۶ استفاده شده است. تمامی محاسبات مربوط به این پژوهش در یک کامپیوتر شخصی با ویندوز هفت ۶۴ بیتی با پردازنده Intel core i7 با سرعت پردازنده ۲.۷ GHz و حافظه ۴ گیگابایت انجام شده است.

۴-۱- روش کدگذاری

اولین قدم برای کد کردن یک مسأله این است که بتوان یک جواب از مسأله را بیان نمود. در این روش ابتکاری کدگذاری، ابتدا برای هر مرحله به تعداد مجموع کارها و ماشین‌های هر مرحله منهای یک $(n+m-۱)$ اعداد تصادفی تولید می‌شود. سپس این اعداد تصادفی، مرتب‌شده و ترتیب هر یک به دست می‌آید، حال مجموعه‌ای تصادفی از اعداد یک تا تعداد مجموع کارها و ماشین‌های هر مرحله منهای یک، وجود دارد که اگر، ضرب در عبارتی که اگر کوچکتر یا مساوی تعداد کارها بود، شود، دسته‌هایی از اعداد به‌دست می‌آید که با صفرهایی از هم جدا شده‌اند. هر دسته نشان‌دهنده یک ماشین و اعداد درون آن، نشان از کارهایی است که قرار است روی آن ماشین با همان توالی چیده شود.

برای مثال در جدول (۱) اگر در مرحله‌ای ۵ کار و ۲ ماشین موازی وجود داشته باشد، اعداد تصادفی بین ۰ تا ۱، به تعداد= ۱ − ۲ + ۵ ۶ عدد تولید می‌گردد، سپس این اعداد به‌ترتیب صعودی مرتب می‌شوند و جایگاهشان در زنجیره مشخص می‌گردد. به‌ازای اعداد بزرگتر از تعداد کارها، صفر قرار داده می‌شود، نهایتاً توزیع کارها بر روی ماشین‌ها به این صورت خواهد بود که کارهای ۵ و ۲ بر روی ماشین ۱ و کار ۱ و ۴ و ۳ بر روی ماشین ۲ به‌ترتیب قرار می‌گیرند. بعد از قرارگیری اولین کار بر روی هر ماشین، اثر یادگیری بر روی زمان انجام کارهای بعدی روی همان ماشین، اعمال می‌شود.

جدول (۱): نحوه تخصیص کارها به ماشین‌های هر مرحله

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
اعداد تصادفی بین ۰ و ۱	۰.۶۹	۰.۳۱	۰.۹۵	۰.۰۳۴	۰.۴۳	۰.۳۸
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۲	۶	۱	۴	۳
ترتیب کارها	۵	۲	۰	۱	۴	۳

کروموزوم معرفی‌شده، یک کروموزوم جزئی برای نمایش یک جواب‌شدنی برای چینش کارها بر روی ماشین‌های یک مرحله مشخص می‌باشد. برای تولید کروموزوم اصلی این مسأله، ابتدا کروموزومی به اندازه مجموع طول کروموزوم‌های هر مرحله، ایجاد می‌شود، سپس در هر مرحله، بخشی از کروموزوم اصلی به عنوان کروموزوم جزئی به‌اندازه مجموع کارها و ماشین‌های هر مرحله منهای یک، جدا می‌شود و قرارگیری کارها بر روی ماشین‌های آن مرحله مشخص می‌گردد و این کار برای هر مرحله انجام می‌شود تا کارها به کل ماشین‌های تمامی مراحل، تخصیص یابند و بعد از آن، میزان تابع هدف محاسبه می‌گردد و طبق چارچوب منطقی هر الگوریتم فراابتکاری، با تغییرات کروموزوم همچون جهش و تقاطع و ...، سعی در بهبود نتایج می‌شود.

۴-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از مشهورترین و پرکاربردترین روش‌ها برای حل مسائل گوناگون و به‌خصوص مدل‌های زمانبندی است. مفهوم الگوریتم ژنتیک برای اولین بار توسط جان هلند در دانشگاه میشیگان آن اربور، مطرح شد. پس از آن، وی و دانشجویانش به گسترش این الگوریتم پرداختند. این الگوریتم جزء دسته الگوریتم‌های جستجوی تصادفی قرار داشته و برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده با مدل‌هایی با فضای جستجوی ناشناخته، مناسب است. الگوریتم ژنتیک شامل یک سری گام‌ها و اجزای مهم است که اگر به خوبی تعریف نشده باشد، در یافتن جواب مناسب مسأله ناتوان خواهد بود. برخی از این اجزا عبارتند از: نحوه نمایش جواب شدنی، ایجاد جواب اولیه، محاسبه تابع برازندگی، عملگرها و معیار توقف که در ادامه توضیح داده خواهند شد. پس از مشخص شدن نحوه کدگذاری جواب‌های مسأله، در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، ابتدا ۱۰۰ کروموزوم به‌عنوان جمعیت و نسل اولیه و به صورت تصادفی تولید می‌گردد. مرحله بعد، ایجاد دومین نسل از جامعه بر اساس نسل فعلی است که با استفاده از عملگرهای ژنتیک صورت می‌گیرد. این عملگرها عبارتند از: انتخاب، تقاطع و جهش.

عملگر انتخاب، عملگری است که وظیفه انتخاب مناسب‌ترین کروموزوم‌ها را از میان نسل فعلی برای تشکیل نسل آینده به عهده دارد. هدف اصلی عملگر انتخاب، مضاعف کردن جواب‌های خوب و حذف جواب‌های بد در یک جمعیت با ثابت نگه داشتن اندازه جمعیت است. فرآیند انتخاب باید به‌گونه‌ای باشد که مناسب‌ترین کروموزوم‌ها انتخاب شوند. با این کار حتی ضعیف‌ترین عناصر هم شانس انتخاب داشته و از گرفتار شدن در جواب‌های محلی و بهینگی زودرس جلوگیری می‌شود. در این پژوهش، برای تشکیل نسل جدید از میان کروموزوم‌های نسل جاری، از تکنیک‌های انتخاب چرخ رولت، انتخاب تورنومنت و انتخاب تصادفی استفاده شده است. ایجاد جواب‌های جدید با استفاده از عملگرهای تقاطع و جهش صورت می‌گیرد. عملگر تقاطع، عملگری است که برای تولید فرزند از بین کروموزوم‌های موجود در استخر جفت‌گیری استفاده می‌شود. برخی عملگرهای تقاطع مشهور برای اعداد دودویی عبارتند از تقاطع یک‌نقطه‌ای، دو نقطه‌ای، چند نقطه‌ای و ترتیب‌محور و عملگر تقاطع برای اعداد حقیقی نیز موجود می‌باشد. عملگر جهش نیز با یک احتمال مشخص p_m، محتوای یک یا چند ژن کروموزوم را تغییر داده و باعث ایجاد تنوع در جمعیت می‌شود. این عملگر مانع از همگرایی زودرس شده و احتمال گیر افتادن در جواب‌های بهینه محلی را کاهش می‌دهد.

در این پژوهش کروموزوم‌هایی به‌عنوان فرزند به تعداد ۸۰ درصد کل جمعیت، حاصل از تقاطع، کروموزوم‌های دیگری نیز به‌عنوان

Archive of SID

www.SID.ir

فرزند به تعداد ۳۰ درصد کل جمعیت حاصل از جهش، تولید می‌شوند. در نهایت مجموعه‌ای از کروموزوم‌های جمعیت اولیه، فرزندان تقاطع‌یافته و فرزندان جهش‌یافته به‌دست می‌آید که مقدار تابع هدف برای هر یک محاسبه می‌شود و مقادیر توابع هدف آنها به‌ترتیب صعودی مرتب می‌شوند، آنگاه آن کروموزوم‌هایی که از میزان تابع هدف کمتری برخوردار بودند، به عنوان جمعیت مرحله بعدی به تعداد ۱۰۰ کروموزوم انتخاب می‌شوند. معیار توقف رسیدن به تعداد ثابتی از نسل‌هاست. معیار توقف می‌تواند عدم بهبود تابع هدف در تعداد مشخصی از تکرارهای الگوریتم نیز باشد.

۴-۲-۱- تقاطع

در این مسأله، کروموزوم‌ها به‌صورت اعداد حقیقی در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه، عملیات تقاطع نیز بر روی آنها می‌باید از نوع تقاطع برای اعداد حقیقی تعریف شود. در این حالت به طول کروموزوم، یک رشته اعداد بین بازه بیشترین و کمترین عدد مجاز کروموزوم، تولید می‌شود که برای تولید هر عدد کروموزوم اول ناشی از تقاطع، عدد متناظر به آن رشته در کروموزوم اول و مکمل عدد متناظر در رشته نیز در کروموزوم دوم ضرب می‌شود. کروموزوم دوم نیز به همین نحو ایجاد می‌شود. یعنی هر عدد کروموزوم دوم ناشی از تقاطع، عدد متناظر به آن رشته در کروموزوم دوم و مکمل عدد متناظر در رشته نیز در کروموزوم اول ضرب می‌شود. در مثال جدول۲، این روند آمده است.

جدول (۲): تقاطع در الگوریتم ژنتیک

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
کروموزوم ۱	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۴۹	۰.۴۵	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۳	۲	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۳	۲	۴
کروموزوم ۲	۰.۴۲	۰.۰۵	۰.۹۰	۰.۹۴	۰.۴۹	۰.۴۸
ترتیب اعداد تصادفی	۲	۱	۵	۶	۴	۳
ترتیب کارها	۲	۱	۵	۰	۴	۳
کروموزوم جدید ۱	۰.۵۳	۰.۷۶	۰.۶۵	۰.۹۱	۰.۴۶	۰.۵۴
ترتیب اعداد تصادفی	۲	۵	۴	۶	۱	۳
ترتیب کارها	۲	۵	۴	۰	۱	۳
کروموزوم جدید ۲	۰.۶۶	۰.۰۹	۰.۴۴	۰.۵۲	۰.۴۸	۰.۵۹
ترتیب اعداد تصادفی	۶	۱	۲	۴	۳	۵
ترتیب کارها	۰	۱	۲	۴	۳	۵
مقدار آلفا	۰.۳۱۴	۰.۹۴۷	۰.۳۵۲	۰.۰۶۷	۰.۷۵	۰.۳۵۳

۴-۲-۲- جهش

در این مسأله، کروموزوم‌ها به‌صورت اعداد حقیقی در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه، عملیات جهش نیز بر روی آنها می‌باید از نوع جهش برای اعداد حقیقی تعریف شود. با توجه به میزان مشخص‌شده برای تعداد عناصر جهش‌یافته، تعدادی از اعداد کروموزوم به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و در آن اعداد هر بار به‌اندازه تصادفی، تغییر پیدا می‌شود. در مثال جدول ۳، این روند آورده شده است.

جدول (۳): جهش تقاطع در الگوریتم ژنتیک

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
کروموزوم ۱	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۴۹	۰.۴۵	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۳	۲	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۳	۲	۴
کروموزوم جدید ۱	۰.۷۷	۰.۶۸	۰.۱۹	۰.۴۹	۰.۳۴	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۶	۵	۱	۳	۲	۴
ترتیب کارها	۰	۵	۱	۳	۲	۴

۴-۳- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

تکنیک شبیه‌سازی تبرید یک روش تکراری، احتمالی، روش جستجوی همسایگی‌محور بر اساس پدیده شبیه‌سازی نرم شدن و خنک شدن فلز و استراتژی حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد. این روش از ایده پروسه فیزیکی گرما دادن به یک جسم و سپس خنک شدن تدریجی آن، به‌منظور شکل‌گیری ساختار کریستال‌های محکم ناشی می‌شود. این پروسه با کم شدن تدریجی دمای اولیه در مراحل مختلف، شبیه‌سازی می‌شود تا سیستم به یک نقطه تعادل برسد و بعد از آن دیگر تغییری اتفاق نمی‌افتد.

مواردی که در کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مؤثر است، دمای اولیه، میزان خنک شدن و دمای نهایی می‌باشد. در این الگوریتم، یک عضو اولیه تولید می‌شود سپس عضوی دیگر از آن تولید می‌شود، اگر عضو کنونی بهتر از عضو اولیه باشد و یا از جواب اولیه بدتر باشد اما در آستانه مورد پذیرش قرار گیرد، عضو جاری، جایگزین عضو اولیه می‌شود و در غیر این صورت، همان جواب اولیه در جای خود باقی می‌ماند، در اتمام هر مرحله، دما به روز می‌شود. هر چه دما بالاتر باشد، آستانه مورد قبول برای پذیرش جواب‌های بدتر نیز وسیع‌تر است که رفته رفته که دما کاهش می‌یابد، سبب می‌شود دامنه مورد پذیرش کوچک‌تر شود. این آستانه مورد پذیرش سبب فرار از بهینگی‌های محلی می‌شود.

۴-۳-۱- همسایگی در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

در این مسأله، کروموزوم‌ها به‌صورت اعداد حقیقی در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه، عملیات حرکت در فضای حل نیز بر روی آنها می‌باید از نوع حرکت برای اعداد حقیقی تعریف شود. با توجه به میزان مشخص‌شده برای تغییر، تعدادی از اعداد کروموزوم به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و در آن اعداد هر بار به‌اندازه تصادفی، تغییر پیدا می‌شود. در جدول ۴، این روند آورده شده است.

جدول (۴): تعریف همسایگی در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
کروموزوم۱	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۴۹	۰.۴۵	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۳	۲	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۳	۲	۴
کروموزوم جدید ۱	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۳۰	۰.۴۵	۰.۶۱
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۲	۳	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۲	۳	۴

Archive of SID

www.SID.ir

۴-۴- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت

این الگوریتم نیز همانند الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌باشد با این تفاوت که در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت، ابتدا چندین عنصر همانند جمعیت اولیه تولید می‌شوند و سپس هر عنصر، همسایگی‌هایی تولید می‌نماید، سپس کل همسایگی‌های تولید شده به صورت صعودی مرتب می‌شوند و به‌ترتیب، از بالای آن به تعداد جمعیت اولیه انتخاب و با جمعیت اولیه، دو به دو مقایسه می‌شوند و بهترین‌ها انتخاب می‌گردند. این مقایسه و انتخاب نیز از منطق الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، پیروی می‌کند. به این صورت که اگر در مقایسه، جواب جدید بهتر باشد و یا جواب جدید بدتر باشد ولی در آستانه پذیرش قرار گیرد، جواب جدید، جایگزین جواب قبلی می‌شود و در غیر این صورت، همان جواب قبلی در جای خود و به‌عنوان عضوی از جمعیت برای مرحله بعدی باقی می‌ماند. در هر مرحله نیز، دما به‌روزرسانی می‌گردد.

۴-۴-۱- همسایگی در الگوریتم جمعیت‌محور

در این مسأله، کروموزوم‌ها به‌صورت اعداد حقیقی در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه، عملیات حرکت در فضای حل نیز بر روی آنها می‌باید از نوع حرکت برای اعداد حقیقی تعریف شود. با توجه به میزان مشخص‌شده برای تغییر، تعدادی از اعداد کروموزوم به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و در آن اعداد هر بار به‌اندازه تصادفی، تغییر پیدا می‌شود. در شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت، برای هر کروموزوم، تعدادی همسایگی با همین روش تولید می‌شوند. در مثال جدول ۵، این روند آورده شده است.

۵- نتایج عددی، تجزیه و تحلیل داده‌ها

با تغییر داده‌های مسأله، مدل قادر است که برای هر تعداد کار و هر تعداد مرحله مورد نظر با هر تعداد ماشین در داخل هر مرحله به همراه زمان‌های اجرای کارها در مراحل مختلف، مسأله را حل نماید. این مسأله برای نمودهای مختلف با کمک الگوریتم‌های نام‌برده شده، حل گردید. نتیجه قرارگیری کارها بر روی ماشین‌های هر مرحله، زمان هر چرخه و طول یک مجموعه کار که به صورت کوچکترین بخش مجموعه‌ای تعریف می‌شود و عبارت است از کوچکترین مجموعه‌ای از بخش‌ها که می‌توانند تولید شوند، در حل با روش ژنتیک، برای ۱۰۰ جمعیت و در طول ۲۰۰۰ تکرار با احتمال تقاطع ۰.۸ و احتمال جهش ۰.۳، در حل با روش شبیه‌سازی تبرید، برای ۴۰۰۰ تکرار و ۱۰ زیر تکرار و در حل با روش شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت، برای ۴۰۰۰ تکرار، ۱۰ زیر تکرار، ۳ عضو و تولید ۵ همسایگی توسط هر عضو در ادامه آورده می‌شود. لازم به ذکر است که هدف مدل، کمینه نمودن زمان هر چرخه بر روی ماشین‌ها می‌باشد. در ادامه مقایسه بین نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها در جدول (۶) آمده است.

میانگین و حدود تغییرات جواب‌های حاصل از ۳ الگوریتم به‌کار گرفته‌شده در مسأله جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با اثر یادگیری در شکل ۳ آمده است.

نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت نسبت به دو الگوریتم دیگر، بهتر عمل می‌کند و واریانس جواب‌های تولیدی آن نیز نسبت به دو الگوریتم دیگر، کمتر می‌باشد. می‌توان این نتایج را به دلیل ساختار جمعیت محور و فرار از بهینگی‌های محلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت دانست. زیرا که در این الگوریتم، ابتدا چندین عنصر همانند جمعیت اولیه تولید می‌شوند و سپس هر عنصر، همسایگی‌هایی تولید می‌نماید، سپس کل همسایگی‌های تولیدشده توسط اعضای جمعیت مرتب می‌شوند و به‌تعداد جمعیت اولیه با جمعیت اولیه مقایسه می‌شوند و بهترین‌ها انتخاب می‌گردند. این مقایسه و انتخاب نیز از منطق الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، پیروی می‌کند. بعد از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت، به طور میانگین، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و سپس الگوریتم ژنتیک از لحاظ کارکرد و کیفیت جواب قرار می‌گیرند که البته تفاوت زیادی بین میانگین نتایج حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک وجود ندارد.

جدول (۵): تعریف همسایگی در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

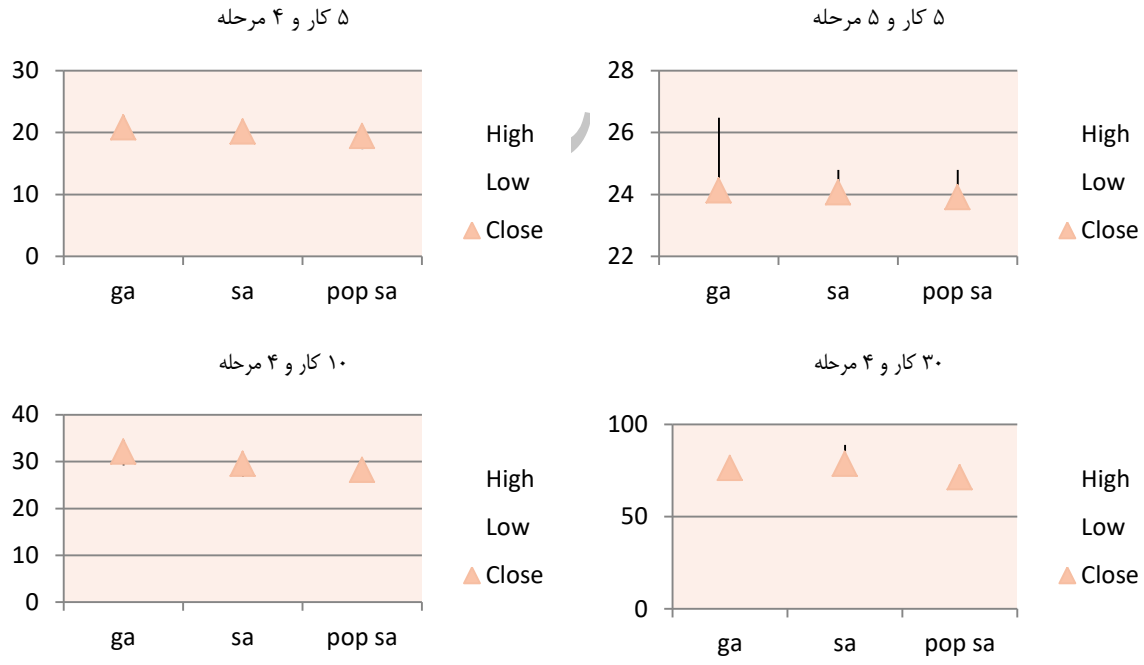
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
کروموزوم۱	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۴۹	۰.۴۵	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۳	۲	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۳	۲	۴
کروموزوم جدید ۱	۰.۷۱	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۴۹	۰.۵۰	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۲	۳	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۲	۳	۴
کروموزوم جدید ۲	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۳۸	۰.۵۵	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۲	۳	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۲	۳	۴
کروموزوم جدید ۳	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۲۷	۰.۴۹	۰.۵۹	۰.۶۵
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۲	۳	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۲	۳	۴
کروموزوم جدید ۴	۰.۷۷	۰.۹۱	۰.۱۹	۰.۴۹	۰.۴۵	۰.۶۹
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۳	۲	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۳	۲	۴
کروموزوم جدید ۵	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۱۹	۰.۳۹	۰.۴۵	۰.۵۳
ترتیب اعداد تصادفی	۵	۶	۱	۲	۳	۴
ترتیب کارها	۵	۰	۱	۲	۳	۴

Arhive of SID

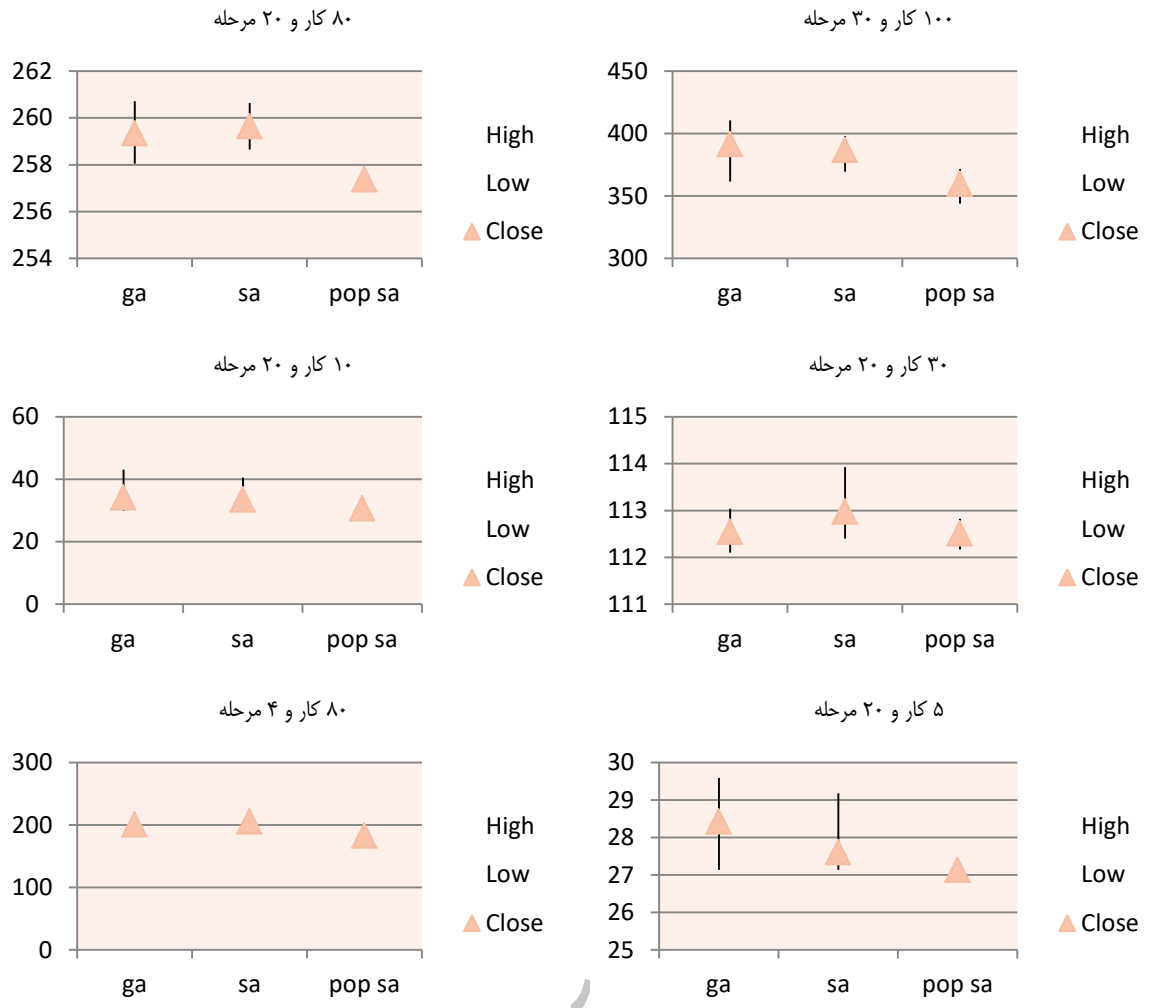
www.SID.ir

جدول (۶): مقایسه جواب‌های الگوریتم‌های تقریبی مورد نظر با یکدیگر در نمودهای کوچک تا بزرگ مسأله جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای

	تعداد کار	تعداد مراحل	تعداد ماشین‌های هر مرحله	میانگین جواب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت	میانگین جواب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید	میانگین جواب الگوریتم ژنتیک	CPLEX
مسائل سایز کوچک	۳	۳	۲.۲.۲	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵
	۳	۳	۳.۳.۳	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵	۲۲.۴۸۲۲۰۲۲۵
	۳	۳	۲.۳.۱	۵۴.۷۱۹۰۵۸۳۹	۵۴.۷۱۹۰۵۸۳۹	۵۴.۷۱۹۰۵۸۳۹	۵۴.۷۱۹۰۵۸۳۹
	۴	۴	۲.۳.۳.۲	۳۲.۵۵۹۸۷۱۹۲	۳۲.۵۵۹۸۷۱۹۲	۳۲.۵۵۹۸۷۱۹۲	۳۲.۵۵۹۸۷۱۹۲
	۴	۴	۳.۳.۳.۳	۲۰.۸۹۶۴۴۰۴۵	۲۰.۸۹۶۴۴۰۴۵	۲۰.۸۹۶۴۴۰۴۵	۲۰.۸۹۶۴۴۰۴۵
مسائل سایز بزرگ	۵	۵	۳.۳.۳.۳.۳	۲۳.۹۰۸۴۱۴۸۳	۲۴.۰۶۶۶۲۰۹	۲۴.۱۲۷۷۸۶۰۷	-
	۵	۴	۵.۳.۳.۲	۱۹.۴۱۴۹۶۳۵۹	۲۰.۱۳۳۸۱۱۳۴	۲۰.۸۳۵۱۸۱۱۱	-
	۱۰	۴	۵.۳.۳.۲	۲۸.۱۷۴۷۶۳۷	۲۹.۵۲۴۰۸۱۶۷	۳۲.۰۹۹۶۹۴۸۹	-
	۳۰	۴	۵.۳.۳.۲	۷۱.۲۲۷۷۴۵۱۲	۷۸.۵۵۱۷۱۴۰۱	۷۶.۲۱۷۹۳۵۰۵	-
	۸۰	۴	۵.۳.۳.۲	۱۸۲.۸۴۴۲۵۹۷	۲۰۵.۱۵۲۹۹۹۲	۲۰۰.۶۲۳۵۰۹۵	-
	۵	۲۰	{۳.۴.۳.۴.۳.۴. ...}	۲۷.۱۳۷۴۴۴۸۰	۲۷.۶۰۵۸۱۲۴۸	۲۸.۴۱۹۷۰۵۵۸	-
	۱۰	۲۰	{۳.۴.۳.۴.۳.۴. ...}	۳۰.۶۷۰۷۳۸۱۲	۳۳.۴۶۶۵۹۱۵۳	۳۴.۰۹۹۲۸۲۳۵	-
	۳۰	۲۰	{۳.۴.۳.۴.۳.۴. ...}	۱۱۲.۵۰۵۵۶	۱۱۲.۹۷۵۳۸۶۱	۱۱۲.۵۴۳۷۳۴۷	-
	۸۰	۲۰	{۳.۴.۳.۴.۳.۴. ...}	۲۵۷.۳۶۷۸۱۳۶	۲۵۹.۶۴۵۲۲۶	۲۵۹.۳۴۴۱۰۸۳	-
	۱۰۰	۳۰	{۳.۲.۵.۴.۳.۲.۵.۴. ...}	۳۵۹.۶۰۲۱۶۰۱	۳۸۶.۹۰۷۳۷۰۷	۳۹۱.۴۶۵۹۹۲۳	-



www.SID.ir



شکل (۳): میانگین و حدود تغییرات جواب‌های حاصل از ۳ الگوریتم به کار گرفته‌شده در مسائل جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با اثر یادگیری

۶- نتیجه‌گیری و مطالعات آتی

در این مطالعه، مسأله کمینه نمودن زمان انجام کارها در صنایعی با محصولات فاسد شدنی و یا دارای دوره عمر در محیط زمانبندی جریان کارگاهی دوره‌ای، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا مدل ریاضی مختلط خطی عدد صحیح مربوط به آن، نوشته شد و از آنجا که زمانبندی در محیط جریان کارگاهی مختلط، جزء مسائل سخت محسوب می‌شود، برای حل آن از سه روش فراابتکاری ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت بهره گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که به‌طور میانگین، نتایج حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت بهتر از دو الگوریتم دیگر می‌باشد که این برتری را می‌توان ناشی از ساختار جمعیت محور و فرار از بهینگی‌های محلی برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مبتنی بر جمعیت و ساختار جمعیت محور الگوریتم ژنتیک در مقابل ساختار تک‌عنصره الگوریتم شبیه‌سازی تبرید دانست. در پژوهش‌های آینده می‌توان مطالعه با توابع هدف دیگر در محیط جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای (چرخشی) و یا برای مثال کمینه نمودن زمان دوره به همراه کمینه نمودن هزینه‌های زودکرد و دیرکرد (چندهدفه) برای این مسأله به‌عنوان حوزه‌هایی که هنوز فعالیتی در آن انجام نشدن است، پیشنهاد گردد.

مراجع

[1] Elmaghraby, S.E., Kanoub, R.E. (1997). “Production control in hybrid flowshops: an example from textile manufacturing”, A. Artiba and S.E. Elmaghraby, eds. The planning and scheduling of production systems, Chapman and Hall, 163-198.

[2] Salvador, M.S. (1973). “A solution to a special class of flow shop scheduling problems”, S.E. Elmaghraby, ed. Symposium on the theory of scheduling and its applications, Berlin, Springer, 83-91.

[3] Adler, L., et al. (1993). “A scheduling support system for the packaging industry”, Operations Research, 41(4): 641-648.

[4] Guinet, A.G.P., Solomon, M. (1996). “Scheduling

Archive
www.SID.ir

[18] Cuninghame-Green, RA. (1960). "Process synchronisation in a steelworks- a problem of feasibility", Proceedings of the 2nd international conference on operational research, 323-328.
[19] Cuninghame-Green, RA. (1962). "Describing industrial processes with interference and approximating their steady-state behavior", Operational Research Society, 13(1): 95-100.
[20] Wittrock, RJ. (1985). "Scheduling algorithms for flexible flow lines", IBM Journal of Research and Development, 29(4): 401-412.
[21] Hall, NG. (1999). "Operations research techniques for robotic system planning, design, control and analysis", Handbook of Industrial Robotics, John Wiley, 543-577.
[22] Pinedo, M. (2008). "Scheduling: theory, algorithms and systems", Springer.
[23] Hanen, C., Munier, A. (1995). "A Study of Cyclic Scheduling Problem on Parallel Processors", Discrete Applied Mathematics, 57(2): 167-192.
[24] Hanen, C., Munier, A. (1995). "Cyclic scheduling on parallel processors: an overview, Scheduling Theory and its Applications", IEEE Computer Science Press, 194-226.
[25] Kats, V., Levner, E. (2003). "Polynomial algorithms for periodic scheduling of tasks on parallel processors", Pract Appl Parallel Comput: Adv Comput Theory Pract, 12: 363-370.
[26] Dawande, M., Geismar, HN., Sethi, SP., Sriskandarajah, C. (2005). "Sequencing and scheduling in robotic cells: recent developments", Journal of Scheduling, 8(5): 387-426.
[27] Dawande, MW., Geismar, HN., Sethi, SP. (2007). "Throughput optimization in robotic cells", Springer.
[28] McCormick, ST., Rao, US. (1994). "Some complexity results in cyclic scheduling", Math Comput Model, 20(2):107–122.
[29] Levner, E., Katz, V., De Pablo, DAL. (2007). "Cyclic scheduling in robotic cells: an extension of basic models in machine scheduling theory", Multiprocessor Scheduling 1.
[30] Grave's, SC., Meal, HC., Stefek, D., Zeghmi, AH. (1983). "Scheduling of reentrant flow shops", Journal of Operations Management, 3(4):197-207.
[31] McCormick, ST., Pinedo, ML., Wolf, B. (1986). "Sequencing in a flexible assembly line with blocking to minimize cycle time", Proc. 2nd ORSA/TIMS Conf. on Flexible Manufacturing Systems, 15(1): 227–267.
[32] McCormick, ST., Pinedo, ML., Shenker, S., Wolf, B. (1989). "Sequencing in an assembly line with blocking to minimize cycle time", Operational Research ,37(6): 925–935.
[33] Hanen, C. (1994). "Study of a NP-hard cyclic scheduling problem: the recurrent job-shop", European Journal of Operational Research, hybrid flowshops to minimize maximum tardiness or maximum completion time", International Journal of Production Research, 34(6): 1643-1654.
[5] Agnetis, A. (1997). "Scheduling of flexible flow lines in an automobile assembly plant", European Journal of Operational Research, 97(2): 348-362.
[6] Paul, R.J. (1979). "A production scheduling problem in the glass-container industry", Operation Research, 22: 290-302.
[7] Leon, V.J., Ramamoorthy, B. (1997). "An adaptable problem-space based search method for flexible flow line scheduling", IIE Transactions, 29(22): 115–126.
[8] Riane, F. (1998). "Scheduling hybrid flowshops: algorithms and applications", Thesis (PhD), Faculty's Universities Catholiques de Mons, Wallonia, Belgium.
[9] Moursli, O., Pochet, Y. (2000). "A branch-and-bound algorithm for the hybrid flow shop", International Journal of Production Economics, 64(1–3): 113-125.
[10] Quadt, D., Kuhn, H. (2005). "A conceptual framework for lot-sizing and scheduling of flexible flow lines", International Journal of Production Research, 43(11): 2291-2308.
[11] Herrmann J.W., Lee, C.-Y. (1992). "Three-machine look-ahead scheduling problems", Research Report, Dept. of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, 92-23.
[12] Lee, C.-Y., Herrmann, J.W. (1993). "A three-machine scheduling problem with look-behind characteristics", Research Report, Dept. of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, 93-11.
[13] Narasimhan S.L., Panwalker. S.S. (1984). "Scheduling in a two-stage manufacturing process", International Journal of Production Research, 22: 555-564.
[14] Soltani, S. Abolfazl, Karimi, B. (2014). "Cyclic hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers and machine eligibility constraints", International Journal of Advanced Manufacturing, Springer, DOI 10.1007/s00170-014-6343-0.
[15] Karabati S., Kouvelis P. (1996). "Cyclic scheduling in flow lines: modeling observations, effective heuristics and a cycle time minimization procedure", Naval Res Logist (NRL), 43(2): 211-231.
[16] Song JS, Lee TE. (1998). "Petri net modeling and scheduling for cyclic job shops with blocking". Computers & Industrial Engineering, 34(2): 281-295.
[17] Levner E., Kats V., López A., De Pablo, D., Cheng TCE. (2010), "Complexity of cyclic scheduling problems: a state-of-the-art survey", Computers & Industrial Engineering, 59(2): 352-361.

Archive of SID

www.SID.ir

72(1): 82–101.
[34] Kampmeyer, T. (2006). "Cyclic scheduling problems, PhD thesis, University of Osnabrueck", Germany.
[35] Nambiar, AN. (2007). "Mathematical formulation and scheduling heuristics for cyclic permutation flow-shops", PhD dissertation, Ohio University.
[36] Baker, K. R. (1974). "Introduction to sequencing and scheduling", John Wiley & Sons.
[۳۷] فخرزاد، محمدباقر، علی‌نژاد، اسماعیل (۱۳۹۲). برنامه‌ریزی و زمانبندی پیشرفته با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم‌های ساخت کارگاهی انعطاف‌پذیر، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱(۱): ۱۳-۲۴.
[38] Okolowski, D., Gawiejnowicz, S. (2010). "Exact and heuristic algorithms for parallel-machine scheduling with DeJong's learning effect", Computers & Industrial Engineering 59: 272–279.
[۳۹] ذگردی، سید حسام‌الدین، بهلولی، احسان (۱۳۸۸). زمانبندی گروهی با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم تولید سلولی، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۰(۲): ۴۵-۵۶.
[40] Biskup, D. A. (2008). "State-of-the-art review on scheduling with learning effects", European Journal of Operational Research, 188: 315–329.
[41] Wright, T.P. (1936). "Factors affecting the cost of airplanes", Journal of Aeronautical Sciences, 3: 122–128.
[42] Biskup, D. (1999). "Single-machine scheduling with learning considerations, European Journal of Operational Research", 115: 173-178.
[43] Janiak, A., Rudek, R. (2008). "A new approach to the learning effect: Beyond the learning curve restrictions", Computers & Operations Research, 35: 3727-3736.
[44] Mosheiov, Gur. (2000). "Scheduling problem with a learning effect", European Journal of Operational Research, 132: 687-693.
[45] Wang, Ji-Bo, Huang, Xue., Wang, Xiao-Yuan., Yin, Na., Wang, Li-Yan. (2009). "Learning effect and deteriorating jobs in the single machine scheduling problems", Applied Mathematical Modelling. 33: 3848-3853.
[46] Toksari, M., Duran, Güner Ertan. (2008). "Minimizing the earliness/tardiness costs on parallel machine with learning effects and deteriorating jobs: a mixed nonlinear integer programming approach", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38:801–808. DOI 10.1007/s00170-007-1128-3.
[47] Eren, Tamer. (2008). "A bicriteria parallel machine scheduling with a learning effect of setup and removal times", Applied Mathematical Modelling. 33: 1141–1150.
[48] Xu, Dehua., Yin, Yunqiang. (2011). "Comments on A bicriteria parallel machine scheduling with a learning effect of setup and removal times", Applied Mathematical Modelling, 35: 3648-3650.
[49] Behnamian, J., Zandieh, M. (2012). "Earliness and Tardiness Minimizing on a Realistic Hybrid Flow shop Scheduling with Learning Effect by Advanced Metaheuristic", Arabian Journal for Science and Engineering, 38:1229-1242.
[50] Behnamian, J. (2014). "Scheduling and worker assignment problems on hybrid flow shop with cost-related objective function", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 1 0.1007/s00170-014-5960-y.
[51] Johnson, SM. (1954). "Optimal two and three stage production schedules with setup times included", Naval Res Logist Q, 1(1): 61–68.
[52] Ríos-Mercado, R.Z., Bard, J.F. (1998). "Computational experience with a branch-and-cut algorithm for flowshop scheduling with setups", Computers & Operations Research, 25(5): 351-366.
[53] Gupta, J.N.D., Tunc, E.A. (1991). "Schedules for a two stage hybrid flow shop with parallel machines at the second stage", International Journal of Production Research, 29(7): 1489-1502.
[54] Ruiz, R., Maroto, C. (2006). "A genetic algorithm for hybrid flow shops with sequence dependent setup times and machine eligibility", European Journal of Operational Research, 169(3): 781–800.
[55] Yaurima, V., Burtseva, L., Tchernykh, A. (2009). "Hybrid flowshop with unrelated machines, sequence-dependent setup time, availability constraints and limited buffers", Computers & Industrial Engineering Journal, 56(4): 1452–146

Archive of SID

www.SID.ir

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Autumn and Winter 2017, Volume 4, No. 8, pp. 105-117
www.ier.basu.ac.ir

Comparison between Three Metaheuristic Algorithms for Minimizing Cycle Time in Cyclic Hybrid Flow Shop Scheduling with Learning Effect

J. Behnamian[1,*], F. Dianat[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 10 June 2016
Accepted 17 November 2016

***Keywords*:**

Scheduling
Hybrid flow shop
Learning effect
Metaheuristic algorithm

ABSTRACT

Jobs scheduling in industries with cyclic procedure on machines, such as perishable products (food industries) or products with a limited lifetime (chemicals, radio actives, etc), is very important. Due to time limitation or competition with other companies, these industries try to minimize the cycle time of jobs processing. Since most productive environments of the industries are cyclic hybrid flow shop and operator's learning effect is obvious in speed of productions, the aim of this study is to minimize cycle time of each machine with learning effect by consequence of jobs. After proposing a mathematical model and since the cyclic hybrid flow shop environment is NP-hard, three metaheuristics, i.e., genetic algorithm, simulated annealing algorithm and population based simulated annealing algorithm, have been proposed for solving this problem. Results show that on average, population based simulated annealing algorithm due to its population-based structure has a better performance in comparison to other algorithms.

Archive of SID

[*] Corresponding author. Javad Behnamian
Tel.: 081-38292505; *E-mail address:* *behnamian@basu.ac.ir*

www.SID.ir