نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۱، جلـــد ۲۲، بهـــار ۱۳۹۰
صفحـــه ۱۴-۲۶

IJIE نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر پویا با در نظر گرفتن محدودیت نگهداری و تعمیرات

نسیم نهاوندی* و محمّد عباسیان

کلمات کلیدی

کار کارگاهی پویای انعطاف‌پذیر،
زمانبندی چندهدفی،
نت، الگوریتم ژنتیک،
تنظیم دینامیکی پارامترهای کنترلی

چکیده:

در محیط‌های صنعتی واقعی، ممکن است ماشینی به دلایل مختلف (مانند نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه) در طول افق برنامه‌ریزی در دسترس نباشد. در تحقیق حاضر، محدودیت دسترسی به ماشین‌ها از نوع قطعی (تحت عنوان محدودیت نت) و در حالت دسترسی نامعین بررسی شده است. پس از مدل‌سازی مسأله، برای حل آن، الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته‌ای با کروموزوم‌های دوبعدی پویا که در آن برای حل زیرمسأله نت یک الگوریتم ابتکاری دیگری نیز پیشنهاد شده؛ ارائه شد. عملکرد الگوریتم پیشنهادی در دو حالت مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت اول عملکرد نسخه توسعه یافته از الگوریتم پیشنهادی، با یک روش تکاملی موجود در ادبیات مقایسه شد که برای سه سطح انعطاف پذیری جزئی، متوسط و کامل به ترتیب نشانگر ۳،۰۹٪ ، ۴،۵۹٪ و ۴،۵۵٪ بهبود در شاخص «بهترین جواب به دست آمده» و نیز ۴،۰۹٪ ، ۵،۳۳٪ و ۴،۶۰٪ بهبود در شاخص «میانگین جواب‌های به دست آمده» است. در حالت دوم نیز روش پیشنهادی بر اساس شاخص «میانگین تابع هدف» در حالت وجود یک، دو و سه فعالیت نت به ترتیب با میانگین ۴،۶۸٪، ۹،۴۸٪ و ۱۱،۷۵٪ افزایش، از عملکرد مطلوبی برخوردار است. نتایج محاسبات در هر دو حالت رجحان روش حل پیشنهادی را در زمینه‌های کیفیت جواب‌ها و سرعت همگرایی، نشان می‌دهد.

۱. مقدمه

در حالت کلی عدم دسترسی به ماشین شامل دو دسته تصادفی (نظیر خرابی یا از کار افتادگی ماشین) و قطعی (نظیر نت پیشگیرانه، تعمیرات اساسی و پیش-زمان‌بندی‌ها) است[۱]. مسألهMO-FDJSPM[2]، با محدودیت نت، یک مسأله بهینه‌سازی در فضای گسسته است. این مسأله بدلیل طبیعت غیرمحدب و غیرخطی، معمولاً دارای بهینه‌های محلی متعددی است[۲]. برای حل مسائل زمان‌بندی، عمدتاً از روش‌های فرا ابتکاری استفاده شده است. در این میان، الگوریتم‌ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته و به گمان برخی از محققین مسائل زمان‌بندی، این الگوریتم، رویکردی مناسب برای حل این دسته از مسائل بهینه‌سازی بشمار می‌رود[۳]. بررسی‌ها نشان می‌دهد یکی از معایب الگوریتم‌ژنتیک کلاسیک، خاصیت همگرایی زودرس و به دام افتادن در نقاط بهینه محلی است[۴]. هدف این مقاله، مدل‌سازی و ارائه روشی کارآمد برای حل مسأله MO-FDJSPM، با وجود محدودیت نت است. مسأله تحقیق علاوه بر درنظر گرفتن پویایی محیط ساخت و تولید و دارا بودن قابلیت انعطاف‌پذیری عملیات و انعطاف‌پذیری ناشی از ماشین‌های موازی و نیز چند معیاره بودن تابع هدف، دارای محدودیت نت است. مقاله حاضر در قالب شش بخش تهیه شده است. در این بخش به ذکر مقدمه پرداخته شد. در بخش دوم، به بررسی پیشینه تحقیق در دو زمینه محدودیت دسترسی به ماشین و بکارگیری الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله تحقیق، پرداخته می‌شود. در بخش سوم تعریف مسأله تحقیق و مدل‌سازی ریاضی آن بیان می‌شود. در بخش چهارم، روش حل پیشنهادی و نحوه تنظیم دینامیکی پارامترهای کنترلی آن، و نیز الگوریتم ابتکاری ارائه شده

تاریخ وصول: ۸۸/۱۲/۴
تاریخ تصویب: ۸۹/۸/۱۵

***نویسنده مسئول مقاله:** **دکتر نسیم نهاوندی**، استادیار بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس،
N_nahavandi@modares.ac.ir
محمّد عباسیان، کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس،
M.abbasian586@gmail.com

[2]. *Multi-Objective Flexible Dynamic Job- Shop with Parallel Machines*

Archive of SID

www.SID.ir

برای زیرمسأله نت تشریح می‌شود. طراحی آزمایش‌های عددی در بخش پنجم به تفکیک برای نشان دادن کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و نیز حل مسأله تحقیق با درنظر داشتن محدودیت نت بیان شده و سپس نتایج حاصل از آن به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی بررسی خواهد شد. در بخش ششم نتایج تحقیق و زمینه‌های مناسب جهت انجام تحقیقات آتی ذکر می‌شود.

۲. مرور ادبیات

۲-۱. مرور ادبیات در زمینه محدودیت دسترسی به ماشین

در محیط‌های صنعتی واقعی، ماشین می‌تواند به دلایلی مختلف در طول افق برنامه‌ریزی در دسترس نباشد. از جمله این دلایل می‌توان به خرابی و از کار افتادگی پیش‌بینی نشده، تعمیرات پیشگیرانه (نت پیشگیرانه) زمان‌بندی شده با مشخص بودن دوره عدم دسترسی به ماشین‌ها و تعمیرات اساسی اشاره نمود[۵ و ۶]. همچنین عدم دسترسی به ماشین‌ها ممکن است از پیش-زمان‌بندی‌ها ناشی شود[۷]. از اینرو در حالت کلی عدم دسترسی به ماشین شامل دو دسته عدم دسترسی تصادفی و قطعی است. در سال ۱۹۸۹ ادیری و همکارانش[۸] نشان دادند که مسئله زمان‌بندی تک‌ماشینه با مشخص بودن دوره عدم دسترسی به ماشین از نوع NP-hard است. حالت مجاز بودن انقطاع عملیات نیز بدین معنی است که امکان قطع کردن عملیات پردازش کار روی ماشین، به منظور انجام عملیاتی دیگر یا انجام فعالیت نت، وجود دارد و عملیات می‌تواند بدون هیچ جریمه ای بعداً ادامه یابد[۹]. در انقطاع جزئی عملیات در صورتی که کار در یک بازه زمانی معین انجام شود، انقطاع مجاز نیست ولی اگر در خارج از این بازه زمانی انجام شود، می‌تواند دارای انقطاع باشد[۱۰]. در رژیم ادامه پردازش جزئی کار (S-R)، هنگامی که ماشین در دسترس قرار گرفت، کار پردازش را به صورت جزئی (از میانه و نه از ابتدا) شروع می‌کند[۱۱]. مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی با دوره عدم دسترسی مختلف ماشین‌ها و امکان انقطاع عملیات اولین بار در سال ۱۹۸۴، توسط اشمیت[۱۲] مطرح شد. در سال ۱۹۹۹، مسأله تک ماشینه با دوره عدم دسترسی نامعین و رژیم تولید نوع S-R توسط کراواس و لی[۱۳] مورد مطالعه قرار گرفت. اشمیت[۱۴] در سال ۲۰۰۰، مجدداً دست بکار شد و در این مرحله مسائل زمان‌بندی تک ماشینه، ماشین‌های موازی و جریان کارگاهی با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها را توسعه داد. در سال ۲۰۰۱ ، بلازویچ و همکارانش[۱۵] مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی دو ماشینه را با امکان وجود چند دوره عدم دسترسی برای هر ماشین و رژیم تولید نوع R به کمک روش‌های ابتکاری حل نمودند. در سال ۲۰۰۲، ژی و وانگ[۱۶] مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر دو مرحله‌ای با وجود ماشین‌های موازی و در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رژیم تولید نوع R را ارائه کردند. چنگ و لیو[۱۷] در سال ۲۰۰۳، مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی با در نظر گرفتن عدم انتظار کار و اعمال محدودیت روی هر دو ماشین را ارائه نمودند. در سال ۲۰۰۵، کوبزین و استراسویچ[۱۸] مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی دو ماشینه با در نظر گرفتن عدم انتظار کار و اعمال محدودیت روی هر ماشین را ارائه نموده و آن را با کمک یک الگوریتم تقریبی حل کردند. در همان سال، ژی و وانگ[۱۹] نیز مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی با ماشین‌های موازی و در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رژیم تولید نوع R را ارائه کردند. در سال ۲۰۰۶، بریت[۲۰] مسأله زمان‌بندی تک ماشینه با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رژیم تولید نوع N-R را بیان کرد در سال ۲۰۰۶، لی و هو[۲۱] مسأله زمان‌بندی تک‌ماشینه با در نظر گرفتن اثر یادگیری و محدودیت دسترسی به ماشین‌ها با رژیم تولید نوع R و N-R را بیان کردند. ژربی و کمل[۲۲] در سال ۲۰۰۷، مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی با ماشین‌های چند منظوره و وجود محدودیت دسترسی به ماشین‌ها با رژیم تولید نوع R را ارائه نمودند. در سال ۲۰۱۰، ذگردی و رحیمی[۲۳]، مسأله زمان‌بندی تک هدفه با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رژیم تولید نوع N-R را مورد بررسی قرار داده و جهت حل آن، از الگوریتم ژنتیک کلاسیک بهره جستند.

۲-۲. مرور ادبیات در زمینه بکارگیری الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله تحقیق

به طور کلی تحقیقات انجام شده درباره زمان‌بندی در محیط‌های پویا به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود. دسته اول بر اساس تئوری صف و دسته دوم بر اساس تکنیک «Rolling Time Horizon» می‌باشد[۲۴ و ۲۵]. در ادامه به مرور ادبیات الگوریتم‌ژنتیک برای حل مسأله تحقیق پرداخته شده است. در سال ۱۹۹۷، ژن و چنگ[۲۶] نشان دادند که در الگوریتم ژنتیک، بزرگتر گرفتن اندازه جمعیت اولیه، تعداد نسل‌ها و نرخ تقاطعی می‌تواند به بسط فضای جستجو و درنتیجه همگرایی سریع‌تر الگوریتم منتج شود. در سال ۱۹۹۹، براندیمارت[۲۷]، مسئله برنامه فرایند انعطاف‌پذیر با تابع هدف چندگانه را با یک الگوریتم بهینه‌سازی دقیق حل نمود. در همین سال، گدجاتی[۲۸]، یک رویکرد ترکیبی از روش‌های فرا ابتکاری بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله FJS ارائه کرد. کاسم و همکاران[۲۹]، در سال ۲۰۰۲، برای اولین بار مسأله FJS را در حالت چندهدفی مورد بررسی قرار دادند. در همین سال لی و همکاران[۳۰]، یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله مشابه با FJS در زنجیره تامین ارائه کردند. در سال ۲۰۰۴، ژنگ و جن[۳۱]، یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله مطالعه شده توسط کاسم و همکاران، ارائه کردند. در همین سال کرز و آسکین[۳۲ و ۳۳] برای حل مسأله FSPM، الگوریتم فرا ابتکاری RKGA را ارائه دادند. در سال ۲۰۰۷، هو و همکاران[۳۴]، برای حل مسئله FJSP با فرض

www.SID.ir

گردش مجدد کارها، اتکای بیش از حد الگوریتم‌های تکاملی به مکانیسم‌های ترکیب مجدد و انتخاب تصادفی را از عمده محدودیت‌های این روش عنوان کردند.

کولینر[۳۵] در استفاده از عملگرهای ژنتیک توصیه کرد که استفاده از عملگرهای دو یا چند نقطه برش نسبت به سایر عملگرها ارجحیت دارد. داقلی و سیستیسانچی[۳۶] یکی از عمده ایرادات وارد بر الگوریتم‌های ژنتیک کلاسیک را همگرایی زودرس و افتادن آنها در نقاط بهینه محلی عنوان کردند.

در سال ۲۰۰۹ نهاوندی و عباسیان[۳۷ و ۳۸] برای حل مسأله FDJSPM، الگوریتم ژنتیک ساده‌ای با کروموزوم دو بعدی ارائه کرده و برتری روش خود را نسبت به یک روش مشابه موجود در ادبیات نشان دادند. در همین سال امیری و همکاران [۳۹] برای تنظیم عملگرهای ژنتیک خود از یک طرح مرکب برای شبیه‌سازی رفتار کروموزم‌ها استفاده کردند. در همین سال مورینو و همکاران[۴۰] یک بازنمایی دودویی از کروموزوم‌های GEP را برای جواب‌های موجه پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۱۰، نهاوندی و عباسیان[۴۱] برای حل مسأله خود، الگوریتم ژنتیک با کروموزوم‌های دو بعدی پویا ارائه کردند. در همین سال ورما و همکاران[۴۲] در الگوریتم ژنتیک خود روشی موسوم به تکنیک محاسبه داده‌بر را پیشنهاد کردند.

بر اساس مطالعه جامعی که درخصوص پیشینه تحقیق انجام گرفت، هدف این مقاله، مدل‌سازی و حل مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر پویا با وجود محدودیت نت درنظر گرفته شد. در ادامه به بررسی مدل‌ریاضی مسأله پرداخته می‌شود.

۳. ارائه مدل ریاضی

۳-۱. تعریف مسأله

در تحقیق حاضر یک مدل ریاضی از نوع برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط برای مسأله مورد مطالعه ارائه شده است. در این مدل، به تعداد n کار و L مرحله پردازش وجود دارد که انجام هر کار در کارگاه پویا، به مجموعه‌ی عملیات مشخصی نیازمند است. کار i ام دارای o_i عملیات با توالی معین است. هر قطعه مانند قطعه iام، جهت پردازش در یک زمان غیر صفر r_i وارد کارگاه پویا می‌شود. ایستگاه کاری l ام دارای m_l ماشین موازی یکسان با سرعت‌های متفاوت است. عملیات o_{ik} توسط ماشین m_{lj} از مجموعه ماشین‌های در دسترس M_{ikl} و در ایستگاه کاری از پیش تعیین شده W_l، به مدت p_{iklj} واحد زمانی پردازش می‌شود. ماشین m_{lj} دارای R_{lj} فعالیت نت می‌باشد که می‌بایست در طول افق برنامه‌ریزی انجام شوند. همچنین فعالیت نت P_{Mljr} به مدت t_{ljr} واحد زمانی انجام شده و در پنجره زمانی مشخصی تکمیل می‌شود. در ادامه پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی و سپس مدل ریاضی مسأله ارائه خواهد شد.

۳-۲. مدل ریاضی مسأله

- **معرفی پارامترها**

o_i :	تعداد عملیات کار i ام
o_{ik}:	عملیات k ام از کار i ام
r_i :	زمان ورود قطعه i ام به کارگاه
W_l :	ایستگاه کاری l ام
m_l :	تعداد ماشین‌های موازی در ایستگاه کاری l ام
m_{lj} :	ماشین j ام از ایستگاه کاری l ام
p_{iklj} :	مدت زمان پردازش o_{ik} بر روی m_{lj}
$t_{m_{lj}}$:	زمان در دسترس بودن m_{lj}
R_{lj} :	تعداد فعالیت‌های نت بر روی m_{lj}
PM_{ljr} :	فعالیت نت r ام بر روی m_{lj}
t_{ljr} :	مدت زمان انجام PM_{ljr}
U^E_{ljr} :	زودترین زمان تکمیل PM_{ljr}
U^L_{ljr} :	دیرترین زمان تکمیل PM_{ljr}
$[U^E_{ljr}, U^L_{ljr}]$:	پنجره زمانی جهت تکمیل PM_{ljr}
M_{ikl} :	مجموعه ماشین‌های در دسترس برای پردازش عملیات o_{ik} در ایستگاه کاری l ام

- **معرفی متغیرهای تصمیم**

c_{ik} : زمان تکمیل o_{ik}

u_{ljr} : زمان تکمیل PM_{ljr}

$$v_{iklr} = \begin{cases} 1 & \text{اگر } o_{ik} \text{ پیش از } PM_{ljr} \text{ انجام شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$x_{iklj} = \begin{cases} 1 & \text{گر } o_{ik} \text{ جهت انجام } m_{lj} \text{ انتخاب شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$y_{ikhq} = \begin{cases} 1 & \text{گر } o_{ik} \text{ پیش ز } o_{hq} \text{ انجام شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

- **توابع هدف مسأله**

$$F = a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 \quad (۱)$$

$$F_1 = C_{\max} = Max\{C_i \mid i = 1,...,N\} \quad (۲)$$

$$F_2 = \overline{F} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \max\{C_i - r_i\} \quad (۳)$$

$$F_3 = \overline{T} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \max\{\beta_i (C_i - d_i), 0\} \quad (۴)$$

Archive of SID
www.SID.ir

- **محدودیت‌های مسأله**

$$(c_{ik}-c_{i,k-1})\geq p_{iklj}\cdot x_{iklj} \quad k=2,3,\ldots,o_i;\forall i,l,j \tag{۵}$$

$$\left(c_{ik}-c_{hq}-p_{iklj}\right)\cdot x_{iklj}\cdot x_{hqlj}\cdot\left(1-y_{ikhq}\right)\geq 0 \quad \forall\{i,h \mid i\neq h\},k,q,l,j \tag{۶}$$

$$\left(c_{hq}-c_{ik}-p_{hqlj}\right)\cdot x_{iklj}\cdot x_{hqlj}\cdot y_{ikhq}\geq 0 \quad \forall\{i,h \mid i\neq h\},k,q,l,j \tag{۷}$$

$$\left(c_{ik}-u_{ljr}-p_{iklj}-r_i\right)\cdot x_{iklj}\cdot(1-v_{iklj})\geq 0 \quad \forall i,k,l,j,r \tag{۸}$$

$$\left(u_{ljr}-c_{ik}-t_{ljr}-r_i\right)\cdot x_{iklj}\cdot v_{iklj}\geq 0 \quad \forall i,k,l,j,r \tag{۹}$$

$$\sum_{l=1}^{L}\sum_{j\in M_{ikl}} x_{iklj}=1 \quad \forall i,k \tag{۱۰}$$

$$U_{ljr}^{E}\leq u_{ljr}\leq U_{ljr}^{L} \quad \forall l,j,r \tag{۱۱}$$

$$c_{ik}\geq 0 \quad \forall i,k \tag{۱۲}$$

$$u_{ljr}\geq 0 \quad \forall l,j,r \tag{۱۳}$$

$$x_{iklj},y_{ikhq},v_{iklj}\in\{0,1\} \quad \forall\{i,h \mid i\neq h\},k,q,l,j,r \tag{۱۴}$$

۳-۵. شرح مدل

معادله (۱)، تابع هدف مسأله را که کمینه‌سازی مجموع وزنی توابع هدف حاصل از روابط (۲) تا (۴) با ضرایب معین a_3,a_2,a_1 است را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در سیستمهای ساخت و تولید واقعی، مقادیر ضرایب وزنی a_3,a_2,a_1 بایستی توسط خبرگان آن صنعت تعیین شود که ممکن است این مقادیر وزنی از یک محیط ساخت و تولید به محیط ساخت و تولید دیگر متفاوت باشند.

در تحقیق حاضر فرض می‌شود که همه این اهداف اولویت یکسانی را در سطح کارگاه دارند، بنابراین مقادیر a_3,a_2,a_1 را یکسان و برابر با مقدار فرضی $1/3$ در نظر خواهیم گرفت. جریمه هر واحد دیرکرد در تحویل قطعات را برای کلیه کارها برابر یک فرض می‌کنیم ($\beta_j=1$). نامعادلات (۵) تضمین می‌کند که مجموعه توالی عملیات‌کارها تداخل زمانی نداشته باشند، مجموعه محدودیت‌های (۶) و (۷) به طور همزمان تضمین می‌کنند که مجموعه عملیاتی که روی یک ماشین انجام می‌شوند، تداخل زمانی نداشته باشند. نامعادلات (۸) و (۹) بیانگر محدودیت عدم همزمان بودن انجام فعالیت‌های نت و عملیات کارهای مختلف بر روی یک ماشین هستند.

همچنین مجموعه این نامعادلات پویایی مسأله به دلیل متفاوت بودن زمان ورود کارها به کارگاه را نیز دربر می‌گیرند. معادله (۱۰) نشان می‌دهد که می‌بایست، یک ماشین از مجموعه ماشین‌های در دسترس جهت انجام هر عملیات انتخاب شود و نامعادله (۱۱) بیان می‌کند که فعالیت‌های نت می‌بایست در پنجره زمانی مشخصی تکمیل شوند.

۳-۶. پیچیدگی مسأله

از آنجاییکه مسأله FDJSP با انعطاف‌پذیری عملیات، قویاً Np-hard است[۲۹]. لذا مسأله MO-FDJSPM نیز با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری ناشی از ماشین‌های موازی در محیط ساخت و تولید پویا با درنظر کرفتن محدودیت نت نیز قویاً Np-hard خواهد بود.

۳-۷. رویکرد حل مسأله

مسأله اصلی تحقیق به سه زیرمسأله مسیریابی، تعیین توالی و زمان‌بندی نت تقسیم می‌شود. در تحقیق حاضر دو زیرمسأله مسیریابی و تعیین توالی به کمک الگوریتم ژنتیک (کلاسیک و توسعه‌یافته) حل می‌شوند و برای حل زیرمسأله زمان‌بندی نت از یک الگوریتم ابتکاری استفاده می‌شود.

۴. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

۴-۱. طراحی الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله (نمایش کروموزوم‌ها (کدینگ مسأله))

بازنمایی جواب‌های مسأله به شکل کروموزوم، اولین مرحله در حل مسائل بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک است[۴۳]. در طراحی کروموزم‌ها در نظر داشتن معیارهای همچون حداقل نیاز به فضا و زمان، حائز اهمیت است[۴۴]. مسأله MO-FDJSPM با درنظر گرفتن محدودیت نت، به دو زیرمسأله تخصیص و تعیین توالی عملیات تجزیه می‌شود. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نیز طوری طراحی شده است که بتواند به طور یکپارچه و همزمان هر دو زیرمسأله مذکور را حل کند. برای این منظور از یک کروموزوم دو بعدی استفاده می‌شود. در این بازنمایی، طول کروموزوم برابر تعداد کل عملیات کارهای موجود برای زمان‌بندی و عرض آن نیز برابر سه است. در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، رشته اول، دوم و سوم کروموزوم به ترتیب نمایانگر ایستگاه کاری، شماره ماشین و اولویت تخصیص یافته به هر عملیات را نشان می‌دهد. بنابراین هر جواب مسأله به صورت یک آرایه دو بعدی نمایش داده می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

۴-۱-۲. سایر فاکتورهای اصلی الگوریتم ژنتیک

تنظیم سایر فاکتورهای اصلی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی که شامل جمعیت اولیه، عملگر تقاطعی، عملگر جهش، رویه انتخاب، تابع برازندگی، استراتژی برخورد با محدودیتها و معیار توقف است؛ بدین صورت است که: در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به منظور اجتناب از همگرایی زودرس، از هیچ گونه روش ابتکاری برای تولید جمعیت اولیه استفاده نمی‌شود. در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی عملگر تقاطع مکان محور بر روی رشته تخصیص ماشین (رشته اول و دوم کروموزوم) و عملگر تقاطع RMX بر روی رشته توالی عملیات (رشته سوم کروموزوم) اعمال می‌شود. در این الگوریتم از فضای نمونه‌گیری توسعه یافته استفاده می‌شود. در مسائل بهینه‌سازی چندهدفی استفاده از تابع مجموع وزنی برای ارزیابی مقدار شایستگی جواب‌ها در الگوریتم ژنتیک یک روش متداول است. در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، رشته‌های تخصیص مسأله (مرحله و ماشین) همواره موجه خواهد بود. در رشته توالی عملیات این ساختار نیز، فقط امکان غیرموجه بودن محدودیت تقدم توالی بین عملیات‌های یک کار وجود دارد که با استفاده از روش اصلاحی (با مرتب سازی غیرنزولی توالی عملیات‌های هر کار) رفع خواهد شد.

۴-۱-۳. تنظیم پارامترها به صورت دینامیک

یکی از معایب الگوریتم‌های ژنتیک کلاسیک خاصیت همگرایی این روش است[۱۷]. در الگوریتم ژنتیک، دو عملگر ژنتیک کلاسیک (نرخ تقاطعی و جهش)، بر نحوه همگرایی مسأله رقابت می‌کنند. در حالی که به‌کارگیری عملگر جهش در جمعیت تنوع ایجاد می‌کند، عملگر تقاطعی جمعیت را مجبور به همگرا شدن می‌نماید[۱۹،۱۸]. با در نظر داشتن این واقعیت، در تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک همواره سعی می‌شود که تنظیمی بهینه برای احتمال کاربرد عملگرهای جهش و تقاطع یافت شود. از طرفی می‌دانیم که تعیین و به کار بردن مقادیر ثابت برای احتمال انجام عملگرهای جهش و تقاطع در اجرای الگوریتم ژنتیک، ممکن است مشکلاتی را در نسل‌های انتهایی الگوریتم ایجاد کند و باعث همگرایی زودرس الگوریتم شود. برای بهبود الگوریتم ژنتیک و نیز اجتناب از همگرایی زودرس، می‌توان از تکنیک «تغییر نرخ‌های تبادل و جهش در حین اجرای الگوریتم ژنتیک» استفاده کرد، به این صورت که بعد از تولید هر نسل جدید، با استفاده از داده‌های آماری، فاصله برازندگی اعضای جمعیت نسبت به برازندگی بهترین عضو آن سنجیده شود، در صورتی که تعداد زیادی از اعضاء جمعیت دارای برازندگی‌های نزدیک به برازندگی بهترین عضو باشند. در این شرایط ممکن است همگرایی زودرس رخ داده باشد، در این صورت به نظر می‌رسد کاهش احتمال مربوط به عملگر تقاطع و افزایش احتمال جهش می‌تواند الگوریتم را از نقاط بهینه محلی خارج کند. در عوض اگر تعداد زیادی از کروموزم‌ها دارای کیفیت دور از کیفیت بهترین فرد جمعیت باشند (تنوع زیاد)، در چنین وضعیتی نیز پیشرفت چندانی در بهبود جواب‌ها ایجاد نمی‌شود. زیرا فقط تعداد کمی از کروموزوم‌ها دارای کیفیت‌های خوب (برازندگی بالا) هستند و نرخ تقاطعی موجود به صورت موثر حل‌های خوب ایجاد نمی‌کند. برای رفع این مشکل نیز می‌توان نرخ جهش را کاهش داده و یا نرخ تقاطعی را افزایش داد. در این حالت در طراحی GA پیشنهادی سعی شده است برای یکبار مقادیر جهش سه برابر و مقدار تقاطع نیز ثلث شوند و در صورتی که این شرط نقض شود مجدداً مقادیر جهش و تقاطع به همان مقادیر اولیه مسأله تغییر می‌کنند.

۴-۲. الگوریتم ابتکاری جهت حل زیرمسأله نت در الگوریتم پیشنهادی

در سال ۲۰۱۰، ذگردی و رحیمی جهت حل زیر مسأله زمان‌بندی نت برای مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر، یک الگوریتم ابتکاری ارائه نمودند[۲۳]. در تحقیق حاضر، الگوریتم آنها جهت حل زیر مسأله زمان‌بندی نت و اعمال بر روی ماشین‌های موازی در حالت وجود بیش از یک فعالیت نت برای هر ماشین برای مسئله تحقیق با درنظر گرفتن پویایی کارها، توسعه داده شده است. گام‌های این الگوریتم ابتکاری به شرح زیر می‌باشند:

- **گام ۱:** فعالیت‌های نت کلیه ماشین‌های ایستگاه‌ها را در انتهای پنجره زمانی خود، به صورت $u_{ljr} = U_{ljr}^{L}$ زمان‌بندی کنید.
- **گام ۲:** عملیات کلیه کارها را بر اساس اولویت در توالی، به اولین ماشین در دسترس ایستگاه کاری از پیش تعیین شده، تخصیص دهید؛ این کار را تا رسیدن به نزدیک‌ترین پنجره زمانی انجام فعالیت نت هر ماشین ادامه دهید.
- **گام ۳:** در بازه زمانی انجام فعالیت نت، در صورت در دسترس بودن ماشین و امکان انجام عملیات پیش از فعالیت نت، عملیات را به ماشین مورد نظر تخصیص داده و به گام ۵ بروید؛ در غیر این‌صورت فعالیت نت را تا آنجا که امکان دارد به صورت $u_{ljr} = Max\left\{t_{m_{ij}} + t_{ljr}, U_{ljr}^{E}\right\}$ به سمت چپ جابه‌جا نموده و به ابتدای پنجره زمانی خود نزدیک کنید.
- **گام ۴:** در صورت در دسترس بودن ماشین و امکان انجام عملیات پس از فعالیت نت، عملیات را به ماشین تخصیص دهید.
- **گام ۵:** در صورتی که عملیات کلیه کارها زمان‌بندی شده‌اند به الگوریتم خاتمه دهید؛ در غیر این‌صورت به گام ۲ بازگردید.

در ادامه، به طراحی آزمایش‌های عددی در دو حالت کاملاً مجزا، جهت بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و حل مسأله تحقیق با وجود فرض نت پرداخته خواهد شد. در ابتدا برای بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، به مقایسه عملکرد آن با یک روش فرا ابتکاری موجود در ادبیات موسوم به روش فرا ابتکاری GP

www.SID.ir

که توسط تی و هوو (۲۰۰۷) برای حل مسأله MO-FJSP، با درنظر گرفتن انعطاف‌پذیری عملیات، ارائه شده است؛ خواهیم پرداخت. سپس با نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، در بخش بعدی به بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسأله تحقیق با وجود فرض نت خواهیم پرداخت. در این بخش نیز ارزیابی در دو حالت مجزا انجام خواهد شد.

در حالت نخست با درنظر داشتن این واقعیت که مسأله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر حالت ساده شده‌ای از مسأله تحقیق است که در آن تعداد دوره‌های عدم دسترسی برای ماشین‌ها صفر (R=0) می‌باشد؛ عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با روش فرا ابتکاری RKGA که توسط کرز و آسکین(۲۰۰۴) ارائه شده مقایسه می‌شود. سپس در حالت دوم، مسأله تحقیق با در نظر گرفتن یک، دو و سه فعالیت نت بر روی هر ماشین (R=1,2,3) مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل از آن به کمک شاخص مورد استفاده گائو و همکاران (۲۰۰۶) با حالت اول (R=0) مقایسه خواهد شد[۷].

۵. طراحی و اجرای آزمایش‌های عددی

۵-۱. طراحی آزمایش‌های عددی برای بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

در این بخش برای بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، به مقایسه عملکرد آن با روش فرا ابتکاری GP که توسط تی و هوو (۲۰۰۷) برای حل مسأله MO-FJSP، خواهیم پرداخت.

۵-۲. تولید داده‌های تصادفی

برای تولید داده‌های تصادفی یازده پارامتر مطابق با جدول (۱) از مسأله شناسایی شده است. درحالت کلی، همه ترکیبات این سطح تست خواهد شد. با توجه به جدول (۱) ملاحظه می‌شود که ۱۲ سناریوی آزمایشی وجود دارد که ۱۰ مجموعه داده برای هر کدام از ترکیبات کار و مرحله، تولید می‌شود. هر کدام از الگوریتمها با ۱۲۰ مجموعه داده تولید شده، اجرا شده‌اند.

جدول ۱. سطوح عوامل مسئله MO-FDJSPM

Parameter	Values	States
Flexibility	100%(FJSP-100) ; 50%(FJSP-50) ; 20%(FJSP-20) [1×m] ; [0.5×m] ; [0.2×m]	1
nJobs×nMachines	10×5,20×***5,50×5,20×10,50×10,100×10,50×15,100×15 and 200×15***	1
Processing time ($p_{i,j,k}$)	*U[(nMachines)/2,(nMachines) ×**2]***	1
$dev(p_{i,j,k}, p_{i,j,t})$	*5*	1
# of Operation	*U[m/2,m]*	1
Release Date (r_i)	*If nJobs* $\geq$ **50:U[0,40]; Otherwise, U[0,20]**	1
Tightness factor of Due Date (C)	1.2 (tight), 1.5(moderate), 2(loose)	3
Due Date (d_i)	$r_i + c \times \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}$	**1**
Machne distribution	***Constant*** ***Variable***	**2**
# of miachines (L_i)	**2 - n** **U[1,4] - U[1, n]**	**2**
Speed of machines	**U[1,3]**	**1**
Number of Scenarios		12

۵-۳. تنظیم پارامترها

بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات برای تنظیم پارامترها، نتایج آزمایشات به ترتیب بیانگر مقادیر ۲۰٪ ، ۰،۷، ۰،۰۲ و ۰،۰۲۵ برای پارامترهای (μ')، (p_c)، (p_{m1}) و (p_{m2}) می‌باشد.

۵-۴. روش انجام آزمایشات عددی

نخست الگوریتم‌های ارائه شده به زبان C++ کد شده و با یک کامپیوتر(Pentium IV (CPU 3 GHz, 1 GB of RAM در محیط Borland C++ 5.02 اجرا می‌شوند. هر کدام از الگوریتمها (GA پیشنهادی و GP) با همان ۱۲۰ مجموعه داده تولید شده، اجرا می‌شوند. برای مقایسه GA پیشنهادی با الگوریتم‌های GP موجود در ادبیات از مقادیر تابع مجموع وزنی استفاده می‌شود. پارامترهای جمع‌آوری شده از اجرای الگوریتم‌ها بطور خلاصه در جداول ۲ تا ۴ آمده است[۳۷].

۵-۵. نتایج آزمایش‌های عددی

الف. سطح انعطاف‌پذیری پایین

بررسی الگوریتم‌ها در این سطح مؤید این مطالب است که:

۱- GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف» در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ بترتیب با میانگین ۲،۶۵٪، ۳،۱۶٪ و ۵،۹۰٪ بهبود و در کل با میانگین ۳،۹۰٪ بهبود، برتری محسوسی نسبت به GP دارد.

Archive of SID
www.SID.ir

۲- «میانگین تابع هدف» بهترین معیار برای ارزیابی الگوریتم‌ها به نظر می‌رسد. GA پیشنهادی بر اساس این شاخص در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب با میانگین ۴،۳۴٪، ۳،۶۴٪ و ۵،۳۴٪ بهبود و در کل با میانگین ۴،۹۰٪ درصد بهبود، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GP دارد.

تنها نقطه قوت الگوریتم GP نسبت به GA پیشنهادی با توجه به نتایج جدول(۲) با درنظرگیری شاخص میانگین زمان حل در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مسأله نمایان می‌شود. البته بهبودهای صورت گرفته توسط GA پیشنهادی، زمان نسبتاً زیادی را که این الگوریتم نسبت به الگوریتم GP صرف پیدا کردن جواب می‌کند، را توجیه می‌نماید. البته با توجه به نتایج جدول(۲) ملاحظه می‌شود که در بدترین حالت GA پیشنهادی برای حل مسائل بزرگ ۸،۷۹ دقیقه زمان سپری کرده است.

ب. سطح انعطاف‌پذیری متوسط

بررسی الگوریتم‌ها در این سطح مؤید این مطالب است که:

۱. GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف» در هر سه بعد کوچک، متوسط و بزرگ و به تفکیک تعداد مراحل، به ترتیب با میانگین ۳،۸۸٪، ۳،۹۴٪ و ۵،۹۴٪ بهبود و در کل با میانگین ۴،۵۹٪ بهبود، کارایی خود را نسبت به الگوریتم GP نشان می دهد.

۲. GA پیشنهادی بر اساس شاخص«میانگین تابع هدف» در ابعاد مختلف به ترتیب با میانگین ۵،۵۹٪، ۴،۸۸٪ و ۵،۵۳٪ بهبود و در کل با میانگین ۵،۳۳٪ درصد بهبود، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GP دارد.

۳. در این سطح از انعطاف پذیری نیز مجدداً ملاحظه می شود که تنها نقطه قوت الگوریتم GP نسبت به روش GA پیشنهادی میانگین زمان حل در ابعاد مختلف از مسأله می‌باشد. بیشترین زمانی که GA پیشنهادی صرف یافتن جواب بهینه می کند با توجه به داده‌های جدول (۳) برابر ۸،۸۶ دقیقه می‌باشد. البته بهبودهای صورت گرفته توسط GA پیشنهادی، زمان زیادی که این الگوریتم نسبت به الگوریتم GP صرف یافتن جواب می‌کند را توجیه می‌نماید.

بنابراین این افزایش زمان با توجه به ابعاد مسأله و میزان بهبود صورت گرفته قابل توجیه می باشد.

جدول ۲. مقایسه نتایج عددی حاصل از اجرای GA پیشنهادی وGP برای مسئله FJSP-20

			تعداد ماشینها	5				10				15				میانگین
			تعداد کار	10	20	50	کل	20	50	100	کل	50	100	200	کل	کلیه ابعاد
الگوریتم ژنتیک پیشنهادی GA	تابع هدف	بهترین		12.53	20.40	43.34	12.53	105.68	300.32	549.04	105.68	542.72	1006.63	1754.17	542.72	**220.31**
		میانگین		16.90	21.24	56.09	31.41	115.66	305.47	561.87	327.67	542.50	1027.48	1804.64	1124.87	**494.65**
	میانگین زمان حل (ثانیه)			0.35	0.88	8.61	3.28	0.71	12.09	69.21	27.33	28.18	170.89	521.18	240.08	**90.23**
الگوریتم GP	تابع هدف	بهترین		12.12	21.35	46.53	12.12	105.26	315.23	578.82	105.26	580.82	1067.48	1854.89	580.82	**232.74**
		میانگین		16.51	23.33	59.93	33.26	116.02	322.01	594.38	344.13	598.38	1087.47	1906.42	1197.42	**524.94**
	میانگین زمان حل (ثانیه)			0.0200	0.0280	0.0350	0.0277	0.0200	0.0312	0.0412	0.0308	0.0230	0.0342	0.0538	0.0370	**0.0318**
نرخ بهبود	تابع هدف	بهترین		-3.35%	4.45%	6.84%	2.65%	-0.40%	4.73%	5.15%	3.16%	6.56%	5.70%	5.43%	5.90%	**3.90%**
		میانگین		-2.37%	8.98%	6.41%	4.34%	0.31%	5.14%	5.47%	3.64%	9.34%	5.52%	5.34%	6.73%	**4.90%**

جدول ۳. مقایسه نتایج عددی حاصل از اجرای GA پیشنهادی و GP برای مسئله FJSP-50

			تعداد ماشینها	5				10				15				میانگین
			تعداد کار	10	20	50	کل	20	50	100	کل	50	100	200	کل	کلیه ابعاد
الگوریتم ژنتیک GA پیشنهادی	تابع هدف	بهترین		10.75	21.20	53.09	10.75	94.20	227.31	514.93	94.20	443.29	781.86	1627.94	443.29	**182.75**
		میانگین		12.46	23.64	54.61	30.24	97.92	243.04	525.47	288.81	454.33	829.03	1686.45	989.94	**436.33**
	میانگین زمان حل (ثانیه)			0.36	0.90	8.78	3.34	0.72	12.33	70.59	27.88	28.74	174.31	531.60	244.88	**92.04**
الگوریتم GP	تابع هدف	بهترین		10.66	22.41	57.12	10.66	95.77	238.05	545.93	95.77	472.09	829.82	1731.01	472.09	**192.84**
		میانگین		12.32	26.05	59.79	32.72	100.84	257.73	559.23	305.93	484.95	865.01	1796.44	1048.80	**462.48**
	میانگین زمان حل (ثانیه)			0.0200	0.0280	0.0350	0.0277	0.0200	0.0312	0.0412	0.0308	0.0262	0.0374	0.0538	0.0391	**0.0325**
نرخ بهبود	تابع هدف	بهترین		-0.81%	5.40%	7.06%	3.88%	1.64%	4.51%	5.68%	3.94%	6.10%	5.78%	5.95%	5.94%	**4.59%**
		میانگین		-1.12%	9.24%	8.65%	5.59%	2.89%	5.70%	6.04%	4.88%	6.31%	4.16%	6.12%	5.53%	**5.33%**

Archive of SID
www.SID.ir

ج. سطح انعطاف‌پذیری بالا

بررسی الگوریتم‌ها در این سطح از مسأله مؤید این است که:

۱. GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف» در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب با میانگین ۳،۴۵٪، ۴،۰۹٪ و ۶،۱۲٪ بهبود و در کل با میانگین ۴،۵۵٪ بهبود، برتری محسوسی نسبت به GP دارد.

۲. «میانگین تابع هدف» بهترین معیار برای ارزیابی الگوریتم‌ها به نظر می‌رسد. GA پیشنهادی بر اساس این شاخص در ابعاد مختلف بترتیب با میانگین ۳،۷۸٪، ۴،۱۷٪ و ۵،۸۵٪ بهبود و در کل با میانگین ۴،۶۰٪ بهبود، عملکرد بهتری نسبت به GP دارد.

۳. در اینجا نیز تنها نقطه قوت الگوریتم تکاملی GP نسبت به GA پیشنهادی، با در نظر گرفتن شاخص میانگین زمان حل نمایان می‌شود. میانگین زمان حل نیز همانند حالت انعطاف پذیر پایین و متوسط، در این حالت نیز قابل قبول به نظر می‌رسد.

۵-۲. طراحی آزمایش‌های عددی برای حل مسأله تحقیق با وجود فرض نت

الف. روش مورد مقایسه

در این بخش عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در دو حالت ارزیابی خواهد شد. از آنجاییکه مسأله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر حالت ساده شده‌ای از مسأله تحقیق است که در آن تعداد دوره‌های عدم دسترسی برای ماشین‌ها صفر (R=0) می‌باشد. لذا در این حالت، عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با روش فرا ابتکاری RKGA *که توسط کرز و آسکین (۲۰۰۴)* ارائه شده مقایسه می‌شود.

در حالت دوم، مسأله تحقیق با در نظر گرفتن یک، دو و سه فعالیت نت بر روی هر ماشین (R=1,2,3) مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل به کمک شاخص مورد استفاده گائو و همکاران (۲۰۰۶) با حالت اول (R=0) مقایسه می‌شود[۷].

جدول ۴. مقایسه نتایج عددی حاصل از اجرای GA پیشنهادی و GP برای مسئله FJSP -100

		تعداد ماشینها	5				10				15				میانگین
		تعداد کار	10	20	50	کل	20	50	100	کل	50	100	200	کل	کلیه ابعاد
الگوریتم ژنتیک پیشنهادی GA	تابع هدف	بهترین	8.73	20.43	47.11	8.73	102.29	228.18	489.14	102.29	407.51	773.51	1529.05	407.51	**172.84**
		میانگین	12.99	22.34	51.05	28.79	105.05	243.42	511.18	286.55	412.27	803.21	1562.26	925.91	**413.75**
	میانگین زمان حل (ثانیه)		0.36	0.91	8.90	3.39	0.73	12.49	71.51	28.24	29.11	175.57	538.52	247.73	**93.12**
الگوریتم GP	تابع هدف	بهترین	8.61	21.76	49.96	8.61	102.93	242.00	519.92	102.93	432.37	816.40	1650.60	432.37	**181.30**
		میانگین	12.78	23.69	55.08	30.52	104.88	260.11	545.39	303.46	442.46	844.51	1659.08	982.02	**438.66**
	میانگین زمان حل (ثانیه)		0.0200	0.0305	0.0479	0.0328	0.0200	0.0608	0.0866	0.0558	0.0083	0.0900	0.1170	0.0718	**0.0535**
نرخ بهبود	تابع هدف	بهترین	-1.47%	6.11%	5.70%	3.45%	0.63%	5.71%	5.92%	4.09%	5.75%	5.25%	7.36%	6.12%	**4.55%**
		میانگین	-1.68%	5.70%	7.31%	3.78%	-0.17%	6.41%	6.27%	4.17%	6.82%	4.89%	5.84%	5.85%	**4.60%**

جدول ۵. سطوح عوامل برای اجرای GA

عوامل	سطوح عوامل			
تعداد کارها	۳۰ – ۱۰۰			۶
توزیع ماشین‌ها	ثابت	متغیر	ثابت	متغیر
تعداد ماشین‌ها	۲ - ۱۰	$U(۱,۴) - U(۱,۱۰)$	۲ - ۶	$U(۱,۲) - U(۱,۶)$
تعداد مراحل	۲ – ۴ – ۸			
زمانهای پردازش	$U(۵۰,۷۰) - U(۲۰,۱۰۰)$			
سرعت پردازش ماشین‌ها	$U(۱,۳)$			

ب. تولید داده‌های تصادفی

بمنظور تولید داده‌های تصادفی، نخست شش پارامتر مطابق جدول (۵) شناسایی می‌شود. بطوریکه برای پنج پارامتر نخست از کرز و آسکین (۲۰۰۴) و برای سرعت پردازش ماشین‌ها مشابه نهاوندی و عباسیان (۲۰۰۹) توزیع U(۱و۳) در نظر گرفته می‌شود. افزون بر پارامترهای جدول ۱، تعداد چهار حالت دیگر بشرح صفر، یک، دو و سه فعالیت نت بر روی هر ماشین (R=1,2,3) درنظر گرفته شده است. در حالت کلی، همه ترکیبات این سطوح تست خواهد شد. جهت انجام آزمایش‌های عددی، تعداد ۲۸۸ سناریو امکان‌پذیر وجود دارد که از هر سناریو تعداد ۱۰ مثال تولید شده است. بنابراین در مجموع تعداد ۲۸۸۰ اجرا در آزمایش‌های عددی وجود دارد. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به زبان C++ کدنویسی شده و هر کدام

Archive of SID
www.SID.ir

از این دو الگوریتم با همان ۲۸۸ مجموعه داده تولید شده، اجرا می‌شوند.

ج. تنظیم پارامترها

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقادیر تعداد کروموزوم‌ها، نرخ تقاطعی، احتمال جهش برای رشته تخصیص، احتمال جهش برای تعیین توالی به ترتیب مقادیر ۲۰٪ ، ۰،۷، ۰،۰۲ و ۰،۰۴ است.

د. نتایج آزمایش‌های عددی

در مرحله نخست، کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در حالت عدم وجود فعالیت نت بر روی ماشین‌ها (R=0) با روش فراابتکاری RKGA مقایسه شده است. همانگونه که در جدول ۶، ملاحظه می‌شود، روش پیشنهادی با توجه به شاخص «میانگین تابع هدف» در ابعاد مختلف به ترتیب با میانگین ۱،۳۳٪، ۱،۳۸٪ و ۲،۱۲٪ بهبود و در کل با میانگین ۱،۶۱٪ بهبود، عملکرد بهتری نسبت به RKGA دارد. همچنین الگوریتم ژنتیک ارائه شده بر اساس شاخص کمترین مقدار تابع هدف در کل با میانگین ۰،۹۴٪ بهبود، و با توجه به شاخص میانگین تابع هدف در کل با میانگین ۶۸ بار و در مجموع با ۶۰۹ بار (از ۷۲۰ اجرا) یا ۸۴،۵۸٪ بهبود از RKGA کاراتر است.

در مرحله دوم تاثیر اعمال محدودیت نت بر عملکرد روش حل ارائه شده به ترتیب با در نظر گرفتن تعداد یک ، دو و سه فعالیت نت بر روی هر ماشین(R=1,2,3) بررسی شده و نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با حالت عدم وجود فعالیت نت مقایسه می‌شود. در این حالت کارایی روش حل پیشنهادی به کمک شاخص «حداکثر مدت زمان انجام فعالیت‌های نت بر روی ماشین‌ها» که توسط گائو و همکاران[۷] در سال ۲۰۰۶، جهت حل مسأله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با یک دوره عدم دسترسی برای هر ماشین ارائه شده بود، بررسی می‌شود. همانگونه که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود، متوسط میزان افزایش میانگین تابع هدف در مقایسه با مجموع حداکثر مدت زمان انجام فعالیت‌های نت در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ، دارای مقادیر کمتری است. پس با توجه به نتایج محاسبات، این امر دلالت بر ناچیز بودن افزایش تابع هدف داشته و کارا بودن روش ترکیبی را نشان می‌دهد.

بنابراین روش حل پیشنهادی بر اساس شاخص میانگین تابع هدف در ابعاد مختلف به ترتیب با میانگین ۶،۱۵٪، ۵،۸۵٪ و ۲،۰۲٪ افزایش و در کل با میانگین ۴،۶۸٪ درصد افزایش، عملکرد مناسبی دارد. همچنین با در نظر گرفتن شاخص میانگین زمان حل، تفاوت چندانی بین وجود یک فعالیت نت در مقایسه با حالت عدم وجود فعالیت نت ملاحظه نمی‌شود. در مقایسه حالت عدم وجود فعالیت نت با حالت وجود دو و سه فعالیت نت، با توجه به جداول ۸ و ۹، ملاحظه می‌شود که متوسط میزان افزایش میانگین تابع هدف در مقایسه با مجموع حداکثر مدت زمان انجام فعالیت‌های نت، کارایی روش ترکیبی را تأیید می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن میانگین زمان حل تفاوت چندانی بین وجود دو و سه فعالیت نت در مقایسه با حالت عدم وجود فعالیت نت ملاحظه نمی‌شود. با توجه به نتایج، روش پیشنهادی بر اساس شاخص میانگین تابع هدف در حالت وجود یک، دو و سه فعالیت نت به ترتیب با میانگین ۴،۶۸٪، ۹،۴۸٪ و ۱۱،۷۵٪ افزایش از عملکرد مطلوبی برخوردار است.

جدول ۶. مقایسه نتایج آزمایش‌های الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و روش RKGA

ابعاد مسئله	تعداد کار	تعداد مراحل	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی (R=0)			روش RKGA		میزان بهبود (درصد)			تعداد دفعات بهبود		درصد دفعات بهبود	
			کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین حل زمان (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	کمترین تابع هدف	میانگین حل زمان (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف
کوچک	6	2	119	207.33	0.10	122	211.45	1.95%	2.46%	0.04	66	65	81.25%	78.75%
		4	244	319.73	0.25	236	318.17	-0.49%	-3.39%	0.04	48	60	57.50%	72.50%
		8	479	562.70	0.99	491	577.38	2.54%	2.44%	0.05	74	71	90.00%	86.25%
	میانگین بعد کوچک		**280.67**	**363.25**	**0.45**	**283.00**	**369.00**	**1.33%**	**0.50%**	**0.04**	**63**	**65**	**76.25%**	**79.17%**
متوسط	30	2	223	807.30	1.31	218	809.31	0.25%	-2.29%	0.28	57	62	68.75%	76.25%
		4	304	901.13	3.44	313	905.22	0.45%	2.88%	0.25	78	71	96.25%	86.25%
		8	553	1183.16	18.23	556	1225.13	3.43%	0.54%	0.24	65	71	77.50%	96.25%
	میانگین بعد متوسط		**360.00**	**963.86**	**7.66**	**362.33**	**979.89**	**1.38%**	**0.37%**	**0.26**	**67**	**68**	**80.83%**	**86.25%**
بزرگ	100	2	605	2754.29	11.53	622	2762.17	0.29%	2.73%	1.67	78	59	95.00%	71.25%
		4	701	2833.54	37.26	702	2935.18	3.46%	0.14%	2.53	60	75	73.75%	91.25%
		8	963	3630.34	242.47	992	3727.26	2.60%	2.92%	2.93	69	75	85.00%	93.75%
	میانگین بعد بزرگ		**756.33**	**3072.72**	**97.09**	**772.00**	**3141.54**	**2.12%**	**1.93%**	**2.38**	**69**	**70**	**84.58%**	**85.42%**
	میانگین کلیه ابعاد		**465.67**	**1466.61**	**35.06**	**472.44**	**1496.81**	**1.61%**	**0.94%**	**0.89**	**66**	**68**	**80.56%**	**83.61%**
	کل تعداد دفعات بهبود										**595**	**609**		
	درصد کل دفعات بهبود										**82.64%**	**84.58%**		

× **در جدول فوق اعداد منفی نشان دهنده برتری روش RKGA می باشند.**

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۷. مقایسه نتایج آزمایش‌های الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در حالت R=0 با R=1

ابعاد مسئله	تعداد کار	تعداد مراحل	روش پیشنهادی در حالت *R=0*			روش پیشنهادی در حالت *R=1*				میزان افزایش (درصد)		شاخص کارایی الگوریتم ابتکاری نت	
			کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میزان افزایش میانگین تابع هدف	مجموع حداکثرمدت زمان انجام فعالیت های نت	
کوچک	6	2	119	207.33	0.10	123	224.21	0.13	3.25%	7.53%	14.31	116	14.305
		4	244	319.73	0.25	270	344.17	0.36	9.63%	7.10%	27.76	119	27.7625
		8	479	562.70	0.99	507	585.12	1.21	5.52%	3.83%	51.65	119	51.65
		میانگین بعد کوچک	**280.67**	**363.25**	**0.45**	**300.00**	**384.50**	**0.57**	**6.13%**	**6.15%**	**31.24**	**118**	31.23917
متوسط	30	2	223	807.30	1.31	254	857.43	1.77	12.20%	5.85%	39.93	118	39.93
		4	304	901.13	3.44	383	962.88	3.63	20.63%	6.41%	78.71	119	78.705
		8	553	1183.16	18.23	623	1249.18	21.78	11.24%	5.28%	100.41	117	100.4125
		میانگین بعد متوسط	**360.00**	**963.86**	**7.66**	**420.00**	**1023.16**	**9.06**	**14.69%**	**5.85%**	**73.02**	**118**	73.01583
بزرگ	100	2	605	2754.29	11.53	715	2855.61	13.06	15.38%	3.55%	116.82	117	116.8225
		4	701	2833.54	37.26	821	2890.68	41.21	14.62%	1.98%	119.44	119	119.4425
		8	963	3630.34	242.47	1125	3650.31	252.45	14.40%	0.55%	119.95	120	119.9475
		میانگین بعد بزرگ	**756.33**	**3072.72**	**97.09**	**887.00**	**3132.20**	**102.24**	**14.80%**	**2.02%**	**118.74**	**119**	118.7375
		میانگین کلیه ابعاد	**465.67**	**1466.61**	**35.06**	**535.67**	**1513.29**	**37.29**	**11.87%**	**4.68%**	**74.33**	**118**	74.33083

جدول ۸. مقایسه نتایج آزمایش‌های الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در حالت R=0 با R=2

ابعاد مسئله	تعداد کار	تعداد مراحل	روش پیشنهادی در حالت *R=0*			روش پیشنهادی در حالت *R=2*				میزان افزایش (درصد)		شاخص کارایی الگوریتم ابتکاری نت	
			کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میزان افزایش میانگین تابع هدف	مجموع حداکثرمدت زمان انجام فعالیت های نت	
کوچک	6	2	119	207.33	0.10	124	225.10	0.13	4.03%	7.90%	44.78	236	44.78
		4	244	319.73	0.25	265	362.98	0.36	7.92%	11.91%	58.24	234	58.24
		8	479	562.70	0.99	516	608.15	1.22	7.17%	7.47%	40.25	233	40.25
		میانگین بعد کوچک	**280.67**	**363.25**	**0.45**	**301.67**	**398.74**	**0.57**	**6.38%**	**9.09%**	**47.75**	**234**	
متوسط	30	2	223	807.30	1.31	312	912.80	1.74	28.53%	11.56%	131.30	237	
		4	304	901.13	3.44	407	984.43	3.65	25.31%	8.46%	78.26	234	
		8	553	1183.16	18.23	617	1376.08	21.92	10.37%	14.02%	207.31	240	
		میانگین بعد متوسط	**360.00**	**963.86**	**7.66**	**445.33**	**1091.10**	**9.10**	**21.40%**	**11.35%**	**138.96**	**237**	
بزرگ	100	2	605	2754.29	11.53	734	2994.43	13.01	17.57%	8.02%	237.64	237	
		4	701	2833.54	37.26	797	3128.18	41.27	12.05%	9.42%	236.94	236	
		8	963	3630.34	242.47	1120	3886.47	252.61	14.02%	6.59%	236.11	239	
		میانگین بعد بزرگ	**756.33**	**3072.72**	**97.09**	**883.67**	**3336.36**	**102.30**	**14.55%**	**8.01%**	**236.90**	**237**	
		میانگین کلیه ابعاد	**465.67**	**1466.61**	**35.06**	**543.56**	**1608.73**	**37.32**	**14.11%**	**9.48%**	**141.20**	**236**	

www.SID.ir

جدول ۹. مقایسه نتایج آزمایش‌های الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در حالت R=0 با R=3

ابعاد مسئله	تعداد کار	تعداد مراحل	روش پیشنهادی در حالت *R=0*			روش پیشنهادی در حالت *R=3*			میزان افزایش (درصد)		شاخص کارایی الگوریتم ابتکاری نت	
			کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میزان افزایش میانگین تابع هدف	مجموع حداکثرمدت زمان انجام فعالیت های نت
کوچک	6	2	119	207.33	0.10	124	236.23	0.13	4.03%	12.23%	0.81	1
		4	244	319.73	0.25	275	366.45	0.31	11.27%	12.75%	0.58	1
		8	479	562.70	0.99	509	619.15	1.04	5.89%	9.12%	0.90	1
	میانگین بعد کوچک		**280.67**	**363.25**	**0.45**	**302.67**	**407.28**	**0.49**	**7.07%**	**11.37%**	**0.76**	**1**
متوسط	30	2	223	807.30	1.31	316	888.75	1.49	29.43%	9.16%	0.69	1
		4	304	901.13	3.44	412	1102.93	3.93	26.21%	18.30%	0.96	1
		8	553	1183.16	18.23	625	1357.73	21.44	11.52%	12.86%	0.78	1
	میانگین بعد متوسط		**360.00**	**963.86**	**7.66**	**451.00**	**1116.47**	**8.95**	**22.39%**	**13.44%**	**0.81**	**1**
بزرگ	100	2	605	2754.29	11.53	727	3116.39	14.49	16.78%	11.62%	0.95	1
		4	701	2833.54	37.26	805	3230.75	40.46	12.92%	12.29%	0.74	1
		8	963	3630.34	242.47	1115	3921.23	253.01	13.63%	7.42%	0.85	1
	میانگین بعد بزرگ		**756.33**	**3072.72**	**97.09**	**882.33**	**3422.79**	**102.65**	**14.44%**	**10.44%**	**0.85**	**1**
	میانگین کلیه ابعاد		**465.67**	**1466.61**	**35.06**	**545.33**	**1648.84**	**37.37**	**14.63%**	**11.75%**	**0.81**	**1**

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مسأله ترکیبی از زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی در محیط کار کارگاهی پویا(MO-FDJSPM[1]) و محدودیت نت برای ماشین‌ها معرفی شد. در ادامه برای حل مسأله الگوریتم ژنتیکی پیشنهاد شد که ساختار آن بر اساس ویژگی‌های مسأله MO-FDJSPM، طراحی شده است که در آن، یک الگوریتم ابتکاری دیگر نیز بمنظور حل زیرمسأله نت پیشنهاد شد. با توجه به معایب الگوریتم ژنتیک کلاسیک، الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته‌ای پیشنهاد شد که پارامترهای کنترلی آن به طور دینامیک در طول فرآیند بهینه‌سازی تغییر می‌کند. طراحی آزمایش‌های عددی در دو بخش مجزا و بمنظور سنجش کارایی الگوریتم پیشنهادی و نیز سنجش کارایی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسأله تحقیق با وجود فرض نت، صورت گرفت. نتایج حاصل از این توسعه نشانگر سرعت و کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در حل مسأله تحقیق در مقایسه با مدل کلاسیک الگوریتم است. در این مرحله، عملکرد نسخه توسعه یافته از الگوریتم پیشنهادی، با یک روش تکاملی موجود در ادبیات مورد مقایسه قرار گرفت. که برای سه سطح انعطاف‌پذیری جزئی، متوسط و کامل به ترتیب نشانگر ۳،۰۹٪ ، ۴،۵۹٪ و ۴،۵۵٪ بهبود در شاخص «بهترین جواب به دست آمده» و نیز ۴،۰۹٪ ، ۵،۳۳٪ و ۴،۶۰٪ بهبود در شاخص «میانگین جواب‌های به دست آمده» را داشت. در مرحله بعد برای سنجش کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسأله تحقیق با وجود فرض نت، اثربخشی و کارایی نسخه توسعه‌یافته از الگوریتم پیشنهادی در دو حالت مجزا ارزیابی شد. در حالت اول، روش ارائه شده در حالت عدم انجام فعالیت نت بر روی ماشین‌ها (R=0) با روش فرا ابتکاری RKGA، مقایسه و نشان داده شد روش پیشنهادی جهت حل مسأله تحقیق از RKGA کاراتر است. در حالت دوم، مسأله تحقیق به ترتیب با در نظر گرفتن تعداد یک، دو و سه فعالیت نت بر روی هر ماشین (R=1,2,3) به کمک نسخه توسعه‌یافته از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی حل و نتایج حاصل از آن با حالت اول (R=0) مقایسه شد. در این حالت متوسط میزان افزایش میانگین تابع هدف در مقایسه با شاخص مجموع حداکثر مدت زمان انجام فعالیت‌های نت دارای مقادیر کمتری بود. این امر نشان دهنده تاثیر اندک وجود فعالیت نت در کیفیت جواب بوده و کارایی روش ترکیبی پیشنهادی را نشان می‌دهد. از جمله مسیرهای آتی تحقیق، وجود پنجره‌های زمانی نرم جهت نت، اعمال همزمان محدودیت دسترسی به صورت قطعی و تصادفی و افزایش کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری بصورت ترکیبی می‌باشد.

مراجع

[1] Brandimarte, P., "*Routing and Scheduling in a Flexible Job Shop by Taboo Search*", Annals of Operations Research, 41, 1993, pp. 157–183.

[2] Tay, J.C., Wibowo, D., *"An Effective Chromosome Representation for Evolving Flexible Job-Shop Scheduling*", Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2004.

[3] Tay, J.C., Ho, N.B., "*Evolving Dispatching Rules Using Genetic Programming for Solving Multi-Objective Flexible Job-Shop Problems*", Computer & Industrial engineering, 2007, Available from <www.elsevier.com>.

[4] Kim, Y.K., Park, K., Ko, J., "*A Symbiotic Evolutionary Algorithm for the Integration of Process Planning and*

Archive of SID
www.SID.ir

[5] Allaoui, H., Artiba, A., *"Integrating Simulation and Optimization to Schedule a Hybrid Flow Shop with Maintenance Constraints*". Computers & Industrial Engineering, 47: 2004, 431–450.

[6] Allaoui, H., Artiba, A., *"Scheduling Two-Stage Hybrid Flow Shop with Availability Constraints*". Computers & Operations Research, 33: 2004, 1399-1419.

[7] Gao, J., Gen, M., Sun, L. "*Scheduling Jobs and Maintenances in Flexible Job Shop with a Hybrid genetic Algorithm"*, Journal of Intelligent Manufacturing. 17, 2006, pp. 493–507.

[8] Adiri, I., Bruno, J., Frostig, E., Rinnooy-Kan, A.H.G., *"Single Machine Flow-Time Scheduling with a Single Breakdown*", Acta Informatica. 26, 1989, pp. 679-696.

[9] Aggoune, R., Portmann, M.C., "*Flow Shop Scheduling Problem with Limited Machine Availability a Heuristic Approach*". Int. J. Production Economics, 99: 2005, 4–15.

[10] Gharbi, A., Haouari, M., *"Optimal Parallel Machines Scheduling with Availability Constraints*". Discrete Applied Mathematics, 148: 2005, 63 – 87.

[11] Lee, C.Y., "*Two-Machine Flowshop Scheduling with Availability Constraints*". European Journal of Operational Research, 114: 1997, 420-429.

[12] Schmidt, G., *"Scheduling on Semi-Identical Processors*", Zeitschrift fur Operations Research. 28, 1984, pp. 153-162.

[13] Graves, S., *"A Review of Production Scheduling*". Operations Research, 29: 1999, 646-675.

[14] Schmidt, G. "*Scheduling with Limited Machine Availability"*, European Journal of Operational Research. 121, 2000, pp. 1–15.

[15] Blazewicz, J., Pesch, E., Sterna, M., "*The Disjunctive Graph Machine Representation of the Job Shop Scheduling Problem".* European Journal of Operational Research, 127: 2000, 317-331.

[16] Xie, J., Wang, X., "*Branch and Bound Algorithm for Flexible Flowshop with Limited Machine Availability*", Asian Information Science Life. 1, 2002, pp. 241-248.

[17] Cheng, T.C.E., Liu, Z., "*Approximability of Two-Machine Flow shop Scheduling with Availability Constraints"*, Operations Research Letters. 31, 2003, pp. 319–322.

[18] Kubzin, M.A., Strusevich, V.A., "*Two-Machine Flow Shop No-Wait Scheduling with Machine Maintenance*", A Quarterly Journal of Operations Research. 3, 2005, pp. 303–313.

[19] Xie, J., Wang, X., "*Complexity and Algorithms for Two-Stage Flexible Flow Shop Scheduling with Availability Constraints*", Computers and Mathematics with Applications. 50, 2005, pp. 1629-1638.

[20] Breit, J., "*Improved Approximation for Non-Preemptive Single Machine Flow-Time Scheduling with an Availability Constraint*", European Journal of Operational Research, 2006, pp. 1-9 .

[21] Wu, C.C., Lee, W.C., *"A Note on Single-Machine Scheduling with Learning Effect and an Availability Constraint*", Int. J. Advance Manufacturing Technology, 2006.

[22] Zribi, N., Kamel, A.E., Borne, P. "*Minimizing the Makespan for the MPM Job-Shop with Availability Constraints",* Int. Journal of Production Economics, 2007, pp. 1-10.

[23] Zegordi, H., Rahimi, M., *"Job Shop Scheduling With Maintenance Constraint"*, Journal of Sharif, 46, 2010, pp. 131-137.

[24] Bruker, P., Jurisch, B., Sievers, B., *"Discrete Applied Mathematics",* 49, 1994, pp. 107-127.

[25] Carlier, J., Pinson, E., Management Science, 35, 1989, pp. 164-176.

[26] Gen, M., Cheng, R., *"Genetic Algorithms and Engineering Design*", John Wiley & Sons, 1997.

[27] Brandimarte, P., *"Theory and Methodology, Exploiting Process Plan Flexibility in Production Scheduling: A Multi-Objective Approach*", European Journal of Operational Research, 114, 1999, pp. 59-71.

[28] Ghedjati, F., "*Genetic Algorithms for the Job-Shop Scheduling Problem with Unrelated Parallel Constraints: Heuristic Mixing Method Machines and Precedence*", Computer & Industrial Engineering, 37, 1999, pp. 39-42.

[29] Kacem, I., Hammadi, S., Borne, P., *"Approach by Localization and Multi objective Evolutionary Optimization for Flexible Job-Shap Scheduling Problems*", IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 32(1), 2002, pp. 1–13.

[30] Lee, Y.H., Jeong, C.S., Moon, C., *"Advanced Planning and Scheduling with Outsourcing in Manufacturing Supply Chain*", Computer & Industrial Engineering, 43, 2002, pp. 351-374.

[31] Gen, M., Cheng, R., "*Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*", Addition-Wesley, Reading, MA, 2004.

[32] Kurz, M.E., Askin, R.G., "*Scheduling Flexible Flow-Lines with Sequence-Dependent Setup Times"*, European Journal of Operational Research, 159, 2004, pp. 66-82.

[33] Kurz, M.E., Askin, R.G., *"Comparing Scheduling Rules for Flexible Flow-Lines*", Int. J. Production Economics, 85, 2003, pp. 371-388.

[34] Ho, N.B., Tay, J.C., Lai, E. *"An Effective Architecture for Learning and Evolving Flexible Job Shop Schedules*", European Journal of Operational Research, 179, 2007, pp. 316–333.

Archive of SID

www.SID.ir

[35] Reeves Coline, R., "*Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*", John Wiley & Sons, 1993.

[36] Dagli, C.H., Sittisathanchai, S., *"Genetic Neurons-Scheduler: a New Approach for Job Shop Scheduling*", International Journal of Production Economics, 41, 1995, pp. 135-145.

[37] Abbasian, M., Nahavandi, N., *"Minimization Flow Time in a Flexible Dynamic Job Shop with Parallel Machines"*, Tehran, Tarbiat Modares University, Engineering Department of Industrial Engineering, Master of Science Thesis, 2009.

[38] Abbasian, M., Nahavandi, N., *"Minimization Flow Time in a Flexible Dynamic Job Shop with Parallel Machines*", Journal of Sharif, in press, 2010.

[39] Amiri, M., Jamshidi, S.F., Sadeghiani J.S. *"A Genetic Algorithm Approach for Statistical Multi-Response Models Optimization: A Case Study*", Journal of Science & Technology, 49, pp. 131-137, 2009, Available from <www.google.com>.

[40] Moreno-Torres, J.G., Llora, X., Goldberg, D.E., "*Binary Representation in Gene Expression Programming: Towards a Better Scalability*", IlliGAL Report No. 2009003, 2009, Available from <www.google.com>.

[41] Abbasian, M., Nahavandi, N., "*Solving Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem with Parallel Machines",* International Journal of Industrial Engineering of Production Research, in press, 2010.

[42] Verma, A., Llora, X., Venkataraman, S., Goldberg, D.E., Campbell, R.H., "*Scaling eCGA Model Building via Data-Intensive Computing*", IlliGAL Report No. 2010001, 2010.

[43] Jansen, K., "*Approximation Algorithms for Flexible Job Shop Problems*", International Journal of Foundations of Computer Science, 2001.

[44] Low, C., "*Simulated Annealing Heuristic for Flow Shop Scheduling Problem with Unrelated Parallel Machines",* Computer & operation Research, 32, 2005, pp. 2013-2025.

Archive of SID

www.SID.ir