



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

نسیم نهادنده* و محمد عباسیان

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 مسئله، برای حل آن، الگوریتم ژنتیک توسعه یافته‌ای با کروموزوم‌های دوبعدی پویا که در آن برای حل زیرمسئله 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 مقابله شد که برای سه سطح انعطاف‌پذیری جزئی، متوسط و کامل به ترتیب نشانگر $\%3.9$, $\%4.59$ و $\%4.55$ بهبود در شاخص «بهترین جواب به دست آمده» و نیز $\%4.9$, $\%4.60$ و $\%5.33$ 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 $\%4.68$, $\%4.48$ و $\%4.75$ 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.

کلمات کلیدی

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

روش‌ها داشته و به گمان برخی از محققین مسائل زمانبندی، این الگوریتم، رویکردن مناسب برای حل این دسته از مسائل بهینه‌سازی بشمار می‌رود^[۳]. بررسی‌ها نشان می‌دهد یکی از معایب الگوریتم ژنتیک کلاسیک، خاصیت همگرایی زودرس و به دام افتادن در نقاط بهینه محلی است^[۴]. هدف این مقاله، مدل‌سازی و ارائه روشی کارآمد برای حل مسئله MO-FDJSPM² با وجود محدودیت نت است. مسئله 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 مسئله تحقیق، پرداخته می‌شود. در بخش سوم تعریف مسئله 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

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]. مسئله MO-FDJSPM²، با محدودیت نت، یک مسئله بهینه‌سازی در فضای گسسته است. این مسئله بدليل طبیعت غیرمحدد و غیرخطی، معمولاً دارای بهینه‌های محلی متعددی است^[۲]. برای حل مسائل زمانبندی، عمدها از روش‌های فراابتکاری استفاده شده است. در این میان، الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به سایر

تاریخ وصول: ۸/۱۲/۴

تاریخ تصویب: ۸/۸/۱۵

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر نسیم نهادنده، استادیار بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، N_nahavandi@modares.ac.ir

محمد عباسیان، کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس، M_abbasian586@gmail.com

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

مسئله 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] مسئله 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 مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی با ماشین‌های موازی و در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رزیم تولید نوع R را ارائه کردند. در سال ۲۰۰۶، بریت [۲۰] مسئله زمان‌بندی تک ماشینه با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رزیم تولید نوع N-R را بیان کرد در سال ۲۰۰۶، لی و هو [۲۱] مسئله زمان‌بندی تکماشینه با در نظر گرفتن اثر یادگیری و محدودیت دسترسی به ماشین‌ها با رزیم تولید نوع R-N را بیان کردند. ژربی و کمل [۲۲] در سال ۲۰۰۷، مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی با ماشین‌های چند منظوره و وجود محدودیت دسترسی به ماشین‌ها با رزیم تولید نوع R را ارائه نمودند. در سال ۲۰۱۰، ذگردی و رحیمی [۲۳]، مسئله زمان‌بندی تک هدفه با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رزیم 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 مسئله تحقیق

به طور کلی تحقیقات انجام شده درباره زمان‌بندی در محیط‌های پویا به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود. دسته اول بر اساس تئوری «Rolling Time Horizon» صفت و دسته دوم بر اساس تکنیک «S-R» می‌باشد [۲۴] و [۲۵]. در ادامه به مرور ادبیات الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله 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 تقطاعی 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 مسئله FJS ارائه کرد. FJS کاسم و همکاران [۲۹]، در سال ۲۰۰۲، برای اولین بار در سال ۱۹۹۹، مسئله چندهدفی مورد بررسی قرار دادند. در همین سال لی و همکاران [۳۰]، یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مشابه با FJS در زنجیره تامین ارائه کردند. در سال ۲۰۰۴، ژنگ و چن [۳۱]، یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مطالعه شده توسط کاسم و همکاران، ارائه کردند. در همین سال کرز و آسکین [۳۲] و [۳۳] برای حل مسئله FSPM، الگوریتم فرا ابتکاری RKGA را ارائه دادند. در سال ۲۰۰۷، هو و همکاران [۳۴]، برای حل مسئله FJSP با فرض

برای زیرمسئله نت تشریح می‌شود. طراحی آزمایش‌های عددی در بخش پنجم به تفکیک برای نشان دادن کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و نیز حل مسئله 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 دلایل 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 پیش‌زنمان‌بندی‌ها 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 بدين 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 جرمیه ای بعداً ادامه یابد [۹]. در انقطاع جزئی عملیات در صورتی که کار در یک بازه زمانی معین انجام شود، می‌تواند دارای نیست ولی اگر در خارج از این بازه زمانی انجام شود، می‌تواند دارای انقطاع باشد [۱۰]. در رزیم 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]. مسئله 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، مسئله تک ماشینه با دوره عدم دسترسی نامعین و رزیم تولید نوع S-R توسط کراوس 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 را با امکان وجود چند دوره عدم دسترسی برای هر ماشین و رزیم تولید نوع R به کمک روش‌های ابتکاری حل نمودند. در سال ۲۰۰۲، ژنگ و وانگ [۱۶] مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر دو مرحله‌ای با وجود ماشین‌های موازی و در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و رزیم تولید نوع R را ارائه کردند. چنگ و لیو [۱۷] در سال ۲۰۰۳،

۲-۳. مدل ریاضی مسئله

• 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_1	: ایستگاه کاری i ام
m_l	: تعداد ماشین‌های موازی در ایستگاه کاری i ام
m_{lj}	: ماشین j ام از ایستگاه کاری i ام
p_{ikl}	: مدت زمان پردازش O_{ik} بر روی O_{ikl}
$t_{m_{lj}}$: زمان در دسترس بودن m_{lj}
R_{lj}	: تعداد فعالیت‌های نت بر روی j
PM_{ljr}	: فعالیت نت i ام بر روی j
t_{ljr}	: مدت زمان انجام PM_{ljr}
U_{ljr}^E	: زودترین زمان تکمیل PM_{ljr}
U_{ljr}^L	: دیرترین زمان تکمیل PM_{ljr}
$[U_{ljr}^E, U_{ljr}^L]$: پنجه زمانی جهت تکمیل PM_{ljr}
M_{ikl}	: مجموعه ماشین‌های در دسترس برای پردازش
O_{ik}	: عملیات i در ایستگاه کاری 1 ام

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

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

در سال ۲۰۰۹ نهادوندی و عباسیان [۳۷] برای حل مسئله FDJSPM، الگوریتم زنتیک ساده‌ای با کروموزوم دو بعدی ارائه کرد 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 زنتیک خود از یک طرح مرکب برای شبیه‌سازی رفتار کروموزوم‌ها استفاده کردند. در همین سال مورینو و همکاران [۴۰] یک بازنمایی دودویی از کروموزوم‌های GEP را برای جواب‌های موجه پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۱۰، نهادوندی و عباسیان [۴۱] برای حل مسئله خود، الگوریتم زنتیک با کروموزوم‌های دو بعدی پویا ارائه کردند. در همین سال ورما و همکاران [۴۲] در الگوریتم زنتیک خود از 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 مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر پویا با وجود محدودیت نت در نظر گرفته شد. در ادامه به بررسی مدل ریاضی مسئله پرداخته می‌شود.

۳. ارائه مدل ریاضی

۱-۱. تعریف مسئله

در تحقیق حاضر یک مدل ریاضی از نوع برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله 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 i ام، جهت پردازش در یک زمان غیر صفر r_i وارد کارگاه پویا می‌شود. ایستگاه کاری 1 ام دارای m_1 ماشین موازی یکسان با سرعت‌های متفاوت است. عملیات O_{ik} توسط ماشین j از مجموعه ماشین‌های در دسترس M_{ikl} و در ایستگاه کاری از پیش تعیین شده W_1 ، به مدت p_{ikl} واحد زمانی پردازش می‌شود. ماشین j دارای R_{lj} فعالیت نت می‌باشد که می‌باشد در طول افق برنامه‌ریزی انجام شوند. همچنین فعالیت نت PM_{ljr} به مدت P_{ljr} واحد زمانی انجام شده و در پنجه زمانی مشخصی تکمیل می‌شود. در ادامه پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی و سپس مدل ریاضی مسئله ارائه خواهد شد.

• توابع هدف مسئله

$$F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 \quad (1)$$

$$F_1 = C_{\max} = \text{Max}\{C_i | i=1, \dots, N\} \quad (2)$$

$$F_2 = \bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max \{C_i - r_i\} \quad (3)$$

$$F_3 = \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max \{\beta_i (C_i - d_i), 0\} \quad (4)$$

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 بویایی مسئله 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 پنجه زمانی مشخصی تکمیل شوند.

۳-۳. پیچیدگی مسئله

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

۳-۴. رویکرد حل مسئله

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

۴. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

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

بازنمایی جواب‌های مسئله به شکل کروموزوم، اولین مرحله در حل مسائل بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک است [۴۳]. در طراحی کروموزوم‌ها در نظر داشتن معیارهای همچون حداقل نیاز به فضا و زمان، حائز اهمیت است [۴۴]. مسئله MO-FDJSPM با درنظر گرفتن محدودیت نت، به دو زیرمسئله تخصیص و تعیین توالی عملیات تجزیه می‌شود. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نیز طوری طراحی شده است که بتواند به طور یکپارچه و همزمان هر دو زیرمسئله 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 مسئله به صورت یک آرایه دو بعدی نمایش داده می‌شود.

۴-۱. محدودیتهای مسئله

$$(c_{ik} - c_{i,k-1}) \geq p_{iklj} \cdot x_{iklj} \quad k=2,3,\dots,q; \forall i,l,j \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & (c_{ik} - c_{hq} - p_{iklj}) \cdot x_{iklj} \cdot x_{hqlj} \cdot (1 - y_{ikhq}) \geq 0 \\ & \forall \{i,h \mid i \neq h\}, k, q, l, j \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & (c_{hq} - c_{ik} - p_{hqlj}) \cdot x_{iklj} \cdot x_{hqlj} \cdot y_{ikhq} \geq 0 \\ & \forall \{i,h \mid i \neq h\}, k, q, l, j \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (c_{ik} - u_{ljr} - p_{iklj} - r_i) \cdot x_{iklj} \cdot (1 - v_{iklj}) \geq 0 \\ & \forall i, k, l, j, r \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & (u_{ljr} - c_{ik} - t_{ljr} - r_i) \cdot x_{iklj} \cdot v_{iklj} \geq 0 \\ & \forall i, k, l, j, r \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j \in M_{ikl}} x_{iklj} = 1 \quad \forall i, k \quad (10)$$

$$U_{ljr}^E \leq u_{ljr} \leq U_{ljr}^L \quad \forall l, j, r \quad (11)$$

$$c_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (12)$$

$$u_{ljr} \geq 0 \quad \forall l, j, r \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & x_{iklj}, y_{ikhq}, v_{iklj} \in \{0,1\} \\ & \forall \{i,h \mid i \neq h\}, k, q, l, j, r \end{aligned} \quad (14)$$

۴-۵. شرح مدل

معادله (۱)،تابع هدف مسئله 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 باستی 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 $\frac{1}{3}$ در نظر خواهیم گرفت. جریمه هر واحد دیرکرد در تحويل قطعات را برای کلیه کارها برابر یک فرض می‌کنیم ($\beta_j = 1$). نامعادلات (۵) تضمین می‌کند که مجموعه توالی عملیات کارها تداخل زمانی نداشته باشند، مجموعه محدودیتهای (۶) و (۷) به طور همزمان تضمین می‌کنند که

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 مقدار جهش سه برابر و مقدار تقاطع نیز ثلث شوند و در صورتی که این شرط نقض شود مجددًا مقدار جهش و تقاطع به همان مقدار اولیه مسئله تغییر می‌کنند.

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

در سال ۲۰۱۰، ذکردهی و رحیمی جهت حل زیرمسئله زمان‌بندی نت برای مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر، یک الگوریتم ابتکاری ارائه نمودند [۲۳]. در تحقیق حاضر، الگوریتم آنها جهت حل زیرمسئله زمان‌بندی نت و اعمال بر روی ماشین‌های موادی 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 پنجوه زمانی خود، به صورت $U_{l_{jr}}^L \cup U_{l_{jr}}^U$ 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 این صورت فعالیت نت را تا آنجا که امکان دارد به صورت $\{U_{l_{jr}}^E, t_{m_j} + t_{l_{jr}}\} = Max$ به سمت چپ جایه‌جا 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 این صورت به گام ۲ بازگردید. در ادامه، به طراحی آزمایش‌های عددی در دو حالت کاملاً مجزاء، جهت بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و حل مسئله 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

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 مسئله (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 غیرنرولی 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 مسئله رقابت می‌کنند. در حالی که به کارگیری عملگر جهش در جمعیت نوع ایجاد می‌کند، عملگر تقاطعی جمعیت را مجبور به همگرا شدن می‌نماید [۱۸، ۱۹]. با در نظر داشتن این واقعیت، در تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک همواره سعی می‌شود که تنظیمی بهینه برای احتمال کاربرد عملگرهای جهش و تقاطع یافته شود. از طرفی می‌دانیم که تعیین و به کار بردن مقدار 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 بهمود 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 کروموزوم‌ها دارای کیفیت دور از کیفیت بهترین فرد

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 مسئله MO-FJSP، خواهیم پرداخت.

۵-۲. تولید داده‌های تصادفی

برای تولید داده‌های تصادفی یازده پارامتر مطابق با جدول (۱) از مسئله شناسایی شده است. در حالت 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.

که توسط تی و هوو (۲۰۰۷) برای حل مسئله 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 مسئله 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 مسئله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر حالت ساده شده‌ای از مسئله 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، مسئله 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].

جدول ۱. سطوح عوامل مسئله MO-FDJSPM

Parameter	Values	States	
Flexibility	100% (FJSP-100) ; 50% (FJSP-50) ; 20% (FJSP-20) [1xm] ; [0.5xm] ; [0.2xm]	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 ($p_{i,j,k}$)	$U[(nMachines)/2, (nMachines) \times 2]$	1	
$dev(p_{i,j,k}, p_{i,j,l})$	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)	$r_i + c \times \sum_{j=1}^n p_{ij}$	1	
Machine distribution	Constant 2 - n	Variable $U[1, 4] - U[1, n]$	2 2
# of machines (L_i)			
Speed of machines	$U[1, 3]$	1	
Number of Scenarios		12	

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].

۵-۳. 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٪/۳,۹۰٪ و ٪/۵,۹۰ بهبود و در کل با میانگین٪/۳,۹۰ بهبود، برتری محسوسی نسبت به GP دارد.

۳-۵. تنظیم پارامترها

بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات برای تنظیم پارامترها، نتایج آزمایشات به ترتیب بیانگر مقادیر٪/۰,۰۷٪/۰,۰۲٪/۰,۰۲۵٪ برای پارامترهای (μ_c, p_{m1}, p_{m2}) می‌باشد.

۴-۴. روش انجام آزمایشات عددی

نخست الگوریتم‌های ارائه شده به زبان C++ کد شده و با یک کامپیوتر (CPU 3 GHz, 1 GB of RAM) در Pentium IV محیط Borland C++ 5.02 اجرا می‌شوند. هر کدام از الگوریتمها GA پیشنهادی و GP (GP) با همان ۱۲۰ مجموعه داده تولید شده، اجرا می‌شوند. برای مقایسه GA پیشنهادی با الگوریتم‌های GP

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 می‌دهد.

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 انعطاف‌پذیری نیز مجددًا ملاحظه می‌شود که تنها نقطه قوت الگوریتم GP نسبت به روش GA پیشنهادی میانگین زمان حل در ابعاد مختلف از مسئله می‌باشد. بیشترین زمانی که GA پیشنهادی صرف یافتن جواب بهینه می‌کند 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 مسئله و میزان بهبود صورت گرفته قابل توجیه می‌باشد.

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 مسئله 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 مطلب است که:

۱. GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف» در هر سه بعد کوچک، متوسط و بزرگ و به تفکیک تعداد

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

میانگین کلیه ابعاد	15						10						5						تعداد ماشینها	
	کل	200	100	50	کل	100	50	20	کل	50	20	10	کار	تعداد کار	تعداد ماشینها	تعداد کار	تعداد ماشینها			
220.31	542.72	1754.17	1006.63	542.72	105.68	549.04	300.32	105.68	12.53	43.34	20.40	12.53	تایع	تایع	۶۹	۶۹	۶۹			
494.65	1124.87	1804.64	1027.48	542.50	327.67	561.87	305.47	115.66	31.41	56.09	21.24	16.90	هدف	هدف	۴۹	۴۹	۴۹			
90.23	240.08	521.18	170.89	28.18	27.33	69.21	12.09	0.71	3.28	8.61	0.88	0.35	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)	۲۳	۲۳	۲۳			
232.74	580.82	1854.89	1067.48	580.82	105.26	578.82	315.23	105.26	12.12	46.53	21.35	12.12	تایع	تایع	۴۹	۴۹	۴۹			
524.94	1197.42	1906.42	1087.47	598.38	344.13	594.38	322.01	116.02	33.26	59.93	23.33	16.51	هدف	هدف	۴۹	۴۹	۴۹			
0.0318	0.0370	0.0538	0.0342	0.0230	0.0308	0.0412	0.0312	0.0200	0.0277	0.0350	0.0280	0.0200	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)	۲۳	۲۳	۲۳			
3.90%	5.90%	5.43%	5.70%	6.56%	3.16%	5.15%	4.73%	-0.40%	2.65%	6.84%	4.45%	-3.35%	تایع	تایع	۴۳	۴۳	۴۳			
4.90%	6.73%	5.34%	5.52%	9.34%	3.64%	5.47%	5.14%	0.31%	4.34%	6.41%	8.98%	-2.37%	هدف	هدف	۴۳	۴۳	۴۳			

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

میانگین کلیه ابعاد	15						10						5						تعداد ماشینها	
	کل	200	100	50	کل	100	50	20	کل	50	20	10	کار	تعداد کار	تعداد ماشینها	تعداد کار	تعداد ماشینها			
182.75	443.29	1627.94	781.86	443.29	94.20	514.93	227.31	94.20	10.75	53.09	21.20	10.75	تایع	تایع	۶۹	۶۹	۶۹			
436.33	989.94	1686.45	829.03	454.33	288.81	525.47	243.04	97.92	30.24	54.61	23.64	12.46	هدف	هدف	۴۹	۴۹	۴۹			
92.04	244.88	531.60	174.31	28.74	27.88	70.59	12.33	0.72	3.34	8.78	0.90	0.36	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)	۲۳	۲۳	۲۳			
192.84	472.09	1731.01	829.82	472.09	95.77	545.93	238.05	95.77	10.66	57.12	22.41	10.66	تایع	تایع	۴۹	۴۹	۴۹			
462.48	1048.80	1796.44	865.01	484.95	305.93	559.23	257.73	100.84	32.72	59.79	26.05	12.32	هدف	هدف	۴۹	۴۹	۴۹			
0.0325	0.0391	0.0538	0.0374	0.0262	0.0308	0.0412	0.0312	0.0200	0.0277	0.0350	0.0280	0.0200	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)	۲۳	۲۳	۲۳			
4.59%	5.94%	5.95%	5.78%	6.10%	3.94%	5.68%	4.51%	1.64%	3.88%	7.06%	5.40%	-0.81%	تایع	تایع	۴۳	۴۳	۴۳			
5.33%	5.53%	6.12%	4.16%	6.31%	4.88%	6.04%	5.70%	2.89%	5.59%	8.65%	9.24%	-1.12%	هدف	هدف	۴۳	۴۳	۴۳			

۵-۲. طراحی آزمایش‌های عددی برای حل مسئله تحقیق با

وجود فرض نت

الف. روش مورد مقایسه

در این بخش عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در دو حالت ارزیابی خواهد شد. از آنجاییکه مسئله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر حالت ساده شدهای از مسئله 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، مسئله 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].

ج. سطح انعطاف‌پذیری بالا

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

۱. GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف» در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب با میانگین ۰,۳,۴۵٪ در ۱۲,۴۰,۹٪ و ۴,۵۵٪ بهبود و در کل با میانگین ۰,۴۵٪ 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 ۰,۳,۷۸٪، ۰,۴,۱۷٪ و ۰,۵,۸۵٪ بهبود و در کل با میانگین ۰,۴۶٪ 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 انعطاف‌پذیر پایین و متوسط، در این حالت نیز قابل قبول به نظر می‌رسد.

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

میانگین کلیه ابعاد	15						10						5						تعداد ماشینها			
	کل	200	100	50	کل	100	50	20	کل	50	20	10	تعداد کار	تایع هدف	بهترین میانگین	میانگین زمان حل (ثانیه)	تایع هدف	بهترین میانگین	میانگین زمان حل (ثانیه)	تایع هدف	بهترین میانگین	میانگین زمان حل (ثانیه)
172.84	407.51	1529.05	773.51	407.51	102.29	489.14	228.18	102.29	8.73	47.11	20.43	8.73	۱۰	۰,۳	۰,۴۵	۰,۳	۰,۴	۰,۴۵	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴
413.75	925.91	1562.26	803.21	412.27	286.55	511.18	243.42	105.05	28.79	51.05	22.34	12.99	۱۰	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴
93.12	247.73	538.52	175.57	29.11	28.24	71.51	12.49	0.73	3.39	8.90	0.91	0.36	۱۰	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳
181.30	432.37	1650.60	816.40	432.37	102.93	519.92	242.00	102.93	8.61	49.96	21.76	8.61	۱۰	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴
438.66	982.02	1659.08	844.51	442.46	303.46	545.39	260.11	104.88	30.52	55.08	23.69	12.78	۱۰	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴
0.0535	0.0718	0.1170	0.0900	0.0083	0.0558	0.0866	0.0608	0.0200	0.0328	0.0479	0.0305	0.0200	۱۰	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳
4.55%	6.12%	7.36%	5.25%	5.75%	4.09%	5.92%	5.71%	0.63%	3.45%	5.70%	6.11%	-1.47%	۱۰	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴
4.60%	5.85%	5.84%	4.89%	6.82%	4.17%	6.27%	6.41%	-0.17%	3.78%	7.31%	5.70%	-1.68%	۱۰	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۰,۴

ب. تولید داده‌های تصادفی

بنمنظور 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 نهادنی و عباسیان (۲۰۰۹) توزیع (۱و۳) U 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 ستاریو امکان‌پذیر وجود دارد که از هر ستاریو 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

جدول ۵. سطوح عوامل برای اجرای GA

عوامل		سطوح عوامل	
تعداد کارها	۳۰ - ۱۰۰	۶	۰,۳ - ۰,۴
توزیع ماشین‌ها	ثابت	متغیر	ثابت
تعداد ماشین‌ها	$U(1,1) - U(1,6)$	$2 - 6$	$U(1,10) - U(1,4)$
تعداد مراحل	۲ - ۴ - ۸		
زمانهای پردازش	$U(20,70) - U(50,100)$		
سرعت پردازش ماشین‌ها	$U(1,3)$		

همکاران [۷] در سال ۲۰۰۶، جهت حل مسئله 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 حداقل 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 ۱۵,۶٪، ۸,۵٪ و ۲,۰٪ افزایش و در کل با میانگین ۴,۶٪ 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 حداقل 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 ۴,۶٪، ۹,۴٪ و ۱۱,۷٪ افزایش از عملکرد مطلوبی برخوردار است.

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، ۷، ۰، ۰۲ و ۰,۰۴ است.

د. نتایج آزمایش‌های عددی

در مرحله نخست، کارایی الگوریتم زنتیک پیشنهادی در حالت عدم وجود فعالیت نت بر روی ماشین‌ها ($R=0$) با روش فراتکاری 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 ۳,۳٪، ۱,۳٪ و ۲,۱٪ در کل با میانگین ۶,۱٪ بهبود، عملکرد بهتری نسبت به RKGA دارد. همچنین الگوریتم زنتیک ارائه شده بر اساس شاخص کمترین مقدار تابع هدف در کل با میانگین ۶۸ بار و در مجموع به شاخص میانگین تابع هدف در کل با میانگین ۶۸ بار و در مجموع ۶۰,۹ بار (از ۷۲۰ اجرا) یا ۸۴,۵٪ بهبود از RKGA کارتر 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 «حداقل مدت زمان انجام فعالیتهای نت بر روی ماشین‌ها» که توسط گافو و

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

میانگین تابع هدف	کمترین تابع هدف	درصد دفعات بهبود		تعداد دفعات بهبود		میزان بهبود (درصد)	RKGA	روش		الگوریتم زنتیک پیشنهادی ($R=0$)		تعداد مراحل	تعداد کار	تعداد مسئله
		میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف			میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف			
78.75%	81.25%	65	66	1.95%	2.46%	0.04	211.45	122	0.10	207.33	119	2		
72.50%	57.50%	60	48	-0.49%	-3.39%	0.04	318.17	236	0.25	319.73	244	4	6	۱
86.25%	90.00%	71	74	2.54%	2.44%	0.05	577.38	491	0.99	562.70	479	8		
79.17%	76.25%	65	63	1.33%	0.50%	0.04	369.00	283.00	0.45	363.25	280.67			میانگین بعد کوچک
76.25%	68.75%	62	57	0.25%	-2.29%	0.28	809.31	218	1.31	807.30	223	2		
86.25%	96.25%	71	78	0.45%	2.88%	0.25	905.22	313	3.44	901.13	304	4	30	۲
96.25%	77.50%	71	65	3.43%	0.54%	0.24	1225.13	556	18.23	1183.16	553	8		
86.25%	80.83%	68	67	1.38%	0.37%	0.26	979.89	362.33	7.66	963.86	360.00			میانگین بعد متوسط
71.25%	95.00%	59	78	0.29%	2.73%	1.67	2762.17	622	11.53	2754.29	605	2		
91.25%	73.75%	75	60	3.46%	0.14%	2.53	2935.18	702	37.26	2833.54	701	4	100	۲
93.75%	85.00%	75	69	2.60%	2.92%	2.93	3727.26	992	242.47	3630.34	963	8		
85.42%	84.58%	70	69	2.12%	1.93%	2.38	3141.54	772.00	97.09	3072.72	756.33			میانگین بعد بزرگ
83.61%	80.56%	68	66	1.61%	0.94%	0.89	1496.81	472.44	35.06	1466.61	465.67			
		609	595											میانگین کلیه ابعاد
		84.58%	82.64%											کل تعداد دفعات بهبود
														درصد کل دفعات بهبود

× در جدول فوق اعداد منفی نشان دهنده برتری روش RKGA می‌باشد.

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

	شاخص کارایی الگوریتم ابتکاری نت	میزان افزایش				روش پیشنهادی در حالت $R=I$				روش پیشنهادی در حالت $R=0$				تعداد کار	تعداد مراحل	ابعاد مسئله
		مجموع حداکثرمدت زمان انجام فعالیت های نت		میزان افزایش	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	کمترین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین تابع هدف	کمترین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)	کمترین تابع هدف	میانگین زمان حل (ثانیه)			
		میزان افزایش	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف	میانگین تابع هدف			
116	14.305	116	14.31	7.53%	3.25%	0.13	224.21	123	0.10	207.33	119	2				
119	27.7625	119	27.76	7.10%	9.63%	0.36	344.17	270	0.25	319.73	244	4	6	کوچک		
119	51.65	119	51.65	3.83%	5.52%	1.21	585.12	507	0.99	562.70	479	8		متوسط		
118	31.23917	118	31.24	6.15%	6.13%	0.57	384.50	300.00	0.45	363.25	280.67			میانگین بعد کوچک		
118	39.93	118	39.93	5.85%	12.20%	1.77	857.43	254	1.31	807.30	223	2				
119	78.705	119	78.71	6.41%	20.63%	3.63	962.88	383	3.44	901.13	304	4	30	متوسط		
117	100.4125	117	100.41	5.28%	11.24%	21.78	1249.18	623	18.23	1183.16	553	8				
118	73.01583	118	73.02	5.85%	14.69%	9.06	1023.16	420.00	7.66	963.86	360.00			میانگین بعد متوسط		
117	116.8225	117	116.82	3.55%	15.38%	13.06	2855.61	715	11.53	2754.29	605	2				
119	119.4425	119	119.44	1.98%	14.62%	41.21	2890.68	821	37.26	2833.54	701	4	100	متوسط		
120	119.9475	120	119.95	0.55%	14.40%	252.45	3650.31	1125	242.47	3630.34	963	8				
118.6667	118.7375	119	118.74	2.02%	14.80%	102.24	3132.20	887.00	97.09	3072.72	756.33			میانگین بعد بزرگ		
118.2222	74.33083	118	74.33	4.68%	11.87%	37.29	1513.29	535.67	35.06	1466.61	465.67			میانگین کلیه ابعاد		

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

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

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

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

روش فرا ابتکاری RKGA، مقایسه و نشان داده شد روش پیشنهادی جهت حل مسئله تحقیق از RKGA کاراتر است. در حالت دوم، مسئله 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 توسعه یافته 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 انگشتی 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

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مسئله ترکیبی از زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی در محیط کار کارگاهی پویا (MO-FDJSPM¹) و محدودیت نت برای ماشین‌ها معرفی شد. در ادامه برای حل مسئله الگوریتم ژنتیکی پیشنهاد شد که ساختار آن بر اساس ویژگی‌های مسئله MO-FDJSPM طراحی شده است که در آن، یک الگوریتم ابتکاری دیگر نیز بمنظور حل زیرمسئله نت پیشنهاد شد. با توجه به معایب الگوریتم ژنتیک کلاسیک، الگوریتم ژنتیک توسعه یافته‌ای 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 مسئله تحقیق با وجود فرض نت، صورت گرفت. نتایج حاصل از این توسعه نشانگر سرعت و کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله 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 ۰٪، ۴٪ و ۵٪ بهبود در شاخص «بهترین جواب به دست آمده» و نیز ۴٪، ۳٪ و ۰٪ بهبود در شاخص «میانگین جواب‌های به دست آمده» را داشت. در مرحله بعد برای سنجش کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسئله تحقیق با وجود فرض نت، اثربخشی و کارایی نسخه توسعه یافته 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

- [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", Addison-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.
- [35] Job Shop Scheduling", Computers & Operations Research, 30, 2004, pp. 1151-1171.
- [36] Allaoui, H., Artiba, A., "Integrating Simulation and Optimization to Schedule a Hybrid Flow Shop with Maintenance Constraints". Computers & Industrial Engineering, 47: 2004, 431-450.
- [37] Allaoui, H., Artiba, A., "Scheduling Two-Stage Hybrid Flow Shop with Availability Constraints". Computers & Operations Research, 33: 2004, 1399-1419.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Aggoune, R., Portmann, M.C., "Flow Shop Scheduling Problem with Limited Machine Availability a Heuristic Approach". Int. J. Production Economics, 99: 2005, 4-15.
- [41] Gharbi, A., Haouari, M., "Optimal Parallel Machines Scheduling with Availability Constraints". Discrete Applied Mathematics, 148: 2005, 63 - 87.
- [42] Lee, C.Y., "Two-Machine Flowshop Scheduling with Availability Constraints". European Journal of Operational Research, 114: 1997, 420-429.
- [43] Schmidt, G., "Scheduling on Semi-Identical Processors", Zeitschrift fur Operations Research. 28, 1984, pp. 153-162.
- [44] Graves, S., "A Review of Production Scheduling". Operations Research, 29: 1999, 646-675.
- [45] Schmidt, G. "Scheduling with Limited Machine Availability", European Journal of Operational Research. 121, 2000, pp. 1-15.
- [46] 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.
- [47] Xie, J., Wang, X., "Branch and Bound Algorithm for Flexible Flowshop with Limited Machine Availability", Asian Information Science Life. 1, 2002, pp. 241-248.
- [48] Cheng, T.C.E., Liu, Z., "Approximability of Two-Machine Flow shop Scheduling with Availability Constraints", Operations Research Letters. 31, 2003, pp. 319-322.
- [49] 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.
- [50] 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.

- [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.