

حل مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر پویا به وسیله الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته

نسیم نهاوندی و محمد عباسیان

چکیده:

تحقیق حاضر، علاوه بر پارامترهای پویایی و انعطاف‌پذیری، چندمعیاره بودن تابع هدف را نیز در نظر می‌گیرد. مسائل زمان‌بندی ماهیتاً مسائلی پویای بوده و لحاظ نمودن انواع انعطاف‌پذیری‌ها در این قبیل مسائل، منجر به رفع مشکلات گلوگاهی، افزایش تولید، بهبود عملکرد سیستم و ایجاد مزیت رقابتی می‌شود. از سویی دیگر برای دستیابی به اهداف سازگار با فلسفه تولید بموقع و اهداف مدیریتی زنجیره تامین، اهداف زمان‌بندی در این مسأله حداکثر زمان تکمیل، متوسط زمان گردش کاری و متوسط دیرکرد قطعات در نظر گرفته شد. این اهداف بمنظور استفاده بهینه از منابع، کمینه کردن موجودی در گردش و تعهد بالا در مقابل مشتریان انتخاب شده و کنترل همزمان آنها منجر به بهبود عملکرد سیستم می‌شود. هدف از حل مسأله، یافتن بهترین مجموع وزنی است. پس از مدل‌سازی مسأله، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با کروموزوم‌های دوبعدی پویا، برای حل آن ارائه شد. پارامترهای کنترلی الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته، به طور دینامیک در طول اجرای الگوریتم و فرآیند بهینه‌سازی تغییر می‌کند که این عامل منجر به کاهش احتمال همگرایی زودرس می‌شود. نتایج حاصل و مقایسه آن با یک روش فرا ابتکاری، نشان‌دهنده بهبود بمیزان ۴۹۰٪، ۵۳۳٪ و ۴۶۰٪ در میانگین جواب‌های به دست آمده، به ترتیب برای سه سطح انعطاف‌پذیری جزئی، متوسط و کامل است.

کلمات کلیدی

زمان‌بندی چندهدفی،
انعطاف‌پذیری، پویایی،
الگوریتم ژنتیک،
تنظیم دینامیک پارامترهای کنترلی

عملکرد سازگار با این مفاهیم، به طور همزمان در طول مسأله کنترل شوند.

همچنین بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در سیستم‌های تولید، خصوصاً مسائل بهینه‌سازی زمان‌بندی در کارگاه، بسیار پیچیده بوده و حل آنها به وسیله تکنیک‌های بهینه‌سازی معمولی امکان‌پذیر نیست. در محیط‌های واقعی ساخت و تولید، مجموعه کارهایی که بایستی زمان‌بندی شوند؛ با گذشت زمان تغییر می‌یابند که این موضوع بیانگر پویایی مسائل زمان‌بندی است.

۱. مقدمه

در این مقاله، مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی در محیط کار کارگاهی پویا (MO-FDJSPM) مطالعه و بررسی شده است. در محیط‌های واقعی ساخت و تولید مسائل زمان‌بندی ماهیتاً مسائلی پویایی هستند. همچنین وجود انعطاف‌پذیری‌ها در مسائل زمان‌بندی راهکار مؤثری برای بهبود عملکرد سیستم به شمار می‌رود. از سویی دیگر برای دستیابی به اهداف سازگار با فلسفه تولید بموقع و اهداف مدیریتی زنجیره تامین بایستی معیارهای

تاریخ وصول: ۸۸/۳/۱

تاریخ تصویب: ۸۹/۴/۹

دکتر نسیم نهاوندی، 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

¹. Multi-Objective Flexible Dynamic Job-Shop with Parallel Machines

مسأله فرض بر این است که تنها یک مسیر پردازش برای هر کار وجود دارد که این به عدم انعطاف‌پذیری در سیستم تولیدی اشاره دارد. تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر حالت توسعه یافته مسأله کار کارگاهی است، که در آن هر عملیات توسط مجموعه‌ای از ماشین‌ها قابل پردازش می‌باشد. این مسأله برای اولین بار توسط بروکر و شلی مورد مطالعه قرار گرفت [۳]. با توجه به تعریف، مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر شامل دو زیر مسأله مسیریابی و زمان‌بندی عملیات می‌باشد [۴].

مسأله $FJSPM^1$ بسط دو مسأله تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر و ماشین‌های موازی است. در مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر، در هر مرحله از پردازش تنها یک ماشین وجود دارد ولی در مسأله $FJSPM$ مجموعه‌ای از ماشین‌های موازی در کنار هم در هر مرحله قرار می‌گیرند که هر یک توانایی پردازش عملیات تخصیص داده شده به آن مرحله را دارند بنابراین در هر مرحله مسیرهای متفاوتی برای پردازش یک کار می‌توان در نظر گرفت. از اهداف اصلی بکارگیری این انعطاف‌پذیری در محیط کارگاهی افزایش تولید، رفع مشکل گلوگاهی و استفاده از آن به صورت یک مزیت رقابتی در محیط‌های اقتصادی است.

اولین بار سو و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی و مطالعه مسأله $FJSPM$ با تابع هدف کمینه‌سازی ماکزیمم دیرکردها پرداخته‌اند [۵]. ریانس و همکاران (۱۹۹۸) مسأله جریان کارگاهی مختلط سه مرحله‌ای را با ساختار ویژه یک ماشین در مراحل اول و سوم و دو ماشین در مرحله دوم با هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها مورد بررسی قرار دادند [۶]. در همین سال نوویکی و اسموتنیکی، یک الگوریتم جستجوی ممنوع برای حل مسأله جریان کارگاهی با ماشین‌های موازی با هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل ارائه کرد [۷]. کیپرسز و کولاماس (۲۰۰۴) مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند و دسته‌ای از الگوریتم‌های ابتکاری موجود برای مسأله جریان کارگاهی را گسترش داده و نشان داده‌اند که الگوریتم ابتکاری مبتنی بر روش جمع برداری، به طور مجانبی بهینه است [۸]. لاو (۲۰۰۵) با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی به حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی چند مرحله‌ای با ماشین‌های موازی متفاوت پرداخت که در آن هدف کمینه‌سازی کل زمان جاری بود [۹]. کی‌پاریسیس و کلوما (۲۰۰۶) مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی یکنواخت را مورد مطالعه قرار دادند آنها هیوریستیک‌های موجود برای مسأله جریان کارگاهی را گسترش دادند و نشان دادند که هیوریستیک مبتنی بر روش جمع برداری، هنگامی که تعداد کارها بسیار زیاد باشد به طور مجانبی بهینه است [۱۰].

از طرفی دیگر لحاظ نمودن انواع انعطاف‌پذیری‌ها در این قبیل مسائل، منجر به رفع مشکلات گلوگاهی، افزایش تولید، بهبود عملکرد سیستم و ایجاد مزیت رقابتی می‌شود که البته در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در مسائل زمان‌بندی باعث افزایش پیچیدگی این دسته از مسائل می‌شود به طوری که حتی یافتن جوابهای بهینه تقریبی را نیز به طور چشمگیری برای این دسته از مسائل دشوار می‌کند [۱]. همچنین بسیاری از محققین علم زمان‌بندی طبیعت مسائل زمان‌بندی در محیط‌های ساخت و تولید را، در بیشتر موارد چند هدفی دانسته و اهداف اساسی زمان‌بندی در این محیط‌ها را «استفاده بهینه از منابع»، «کمینه کردن موجودی در گردش و سرعت بخشیدن به گردش کار» و «تعهد بالا در مقابل مشتریان و موعدهای تحویل» می‌دانند. از سویی دیگر به گمان برخی از محققین مسائل زمان‌بندی، الگوریتم ژنتیک، رویکردی مناسبی برای حل این دسته از مسائل بهینه‌سازی به شمار می‌رود [۲]. که البته یکی از ایرادات وارد بر الگوریتم‌های ژنتیک کلاسیک، همگرایی زودرس می‌باشد.

مسأله تحقیق علاوه بر در نظر گرفتن پویایی محیط ساخت و تولید (به سبب ورود کارها در یک زمان غیرصفر به کارگاه) و دارا بودن قابلیت انعطاف‌پذیری عملیات و انعطاف‌پذیری ناشی از ماشین‌های موازی دارای تابع هدف چندمعیاره برای دستیابی به اهدافی سازگار با فلسفه تولید بموقع و اهداف مدیریتی زنجیره تامین است. در این مقاله ضمن توسعه مسأله، الگوریتم ژنتیک خاصی نیز برای حل آن پیشنهاد شد که ساختار آن بر اساس ویژگی‌های مسأله $MO-FJSPM$ طراحی شده است. در الگوریتم پیشنهادی به منظور غلبه بر این محدودیت، از دو استراتژی استفاده شده است. استراتژی نخست سعی در افزایش تنوع جستجوی الگوریتم دارد. در استراتژی دوم سعی می‌شود جستجوی الگوریتم بشکلی هوشمند انجام گیرد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با یک روش فرا ابتکاری موجود در ادبیات، نشان‌دهنده کارایی آن است.

در ادامه، نخست به مرور ادبیات انعطاف‌پذیری ناشی از ماشین‌های موازی و سپس به تعریف مسأله و ارائه مدل ریاضی آن پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم، روش حل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، عملگرها و نحوه تنظیم دینامیکی پارامترهای کنترلی آن، تشریح می‌شود. در بخش پنجم نیز به انجام آزمون عملکرد الگوریتم پیشنهادی با یک روش مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیک موجود در ادبیات پرداخته خواهد شد.

۲. مرور ادبیات در زمینه کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با

ماشین‌های موازی

در مسأله کار کارگاهی کلاسیک، مسیر کارها ثابت و مشخص بوده و نیازی به وجود مسیر یکسانی برای همه کارها نمی‌باشد. در این

²Flexible Job-Shop with Parallel Machines

۳. ارائه مدل ریاضی

در این بخش پس از ارائه تعریفی از انعطاف پذیری، به بیان مسأله MO-FDJSPM، متغیرها و مجموعه‌های استفاده شده، پرداخته خواهد شد و در ادامه پس از ارائه مدل و نشان دادن NP-hard بودن مسأله، به این بخش پایان داده خواهد شد.

۳-۱. تعریف انعطاف پذیری

امروزه انعطاف پذیری ساخت و تولید، به صورت گسترده‌ای به عنوان یک عامل اساسی در رسیدن به مزیت رقابتی، شناخته شده است. واژه انعطاف پذیری ساخت و تولید، فقط به یک متغیر واحد اشاره نمی‌کند، بلکه به دسته عمومی از متغیرها اطلاق می‌شود. گروه‌بندی‌ها و تعاریف مختلفی برای انواع انعطاف پذیری در سیستم‌های ساخت و تولید ارائه شده است [۴، ۸، ۱۱ و ۱۲]. در سال ۲۰۰۷، تی و هو سه نوع انعطاف پذیری کلی، متوسط و جزئی را به صورت FJSP-100، FJSP-50 و FJSP-20 را در کار خود استفاده کردند. آنها عنوان کردند که انعطاف پذیری %C، به این معنی است که تمامی عملیات‌های کارهای مختلف، می‌توانند حداکثر توسط %C از کلیه ماشین‌های موجود در کارگاه پردازش شوند [۱۳].

۳-۲. تعریف مسأله

بسیاری از محققین علم زمان بندی همچون تکیندت و بیلوت طبیعت مسائل زمان بندی در محیط‌های ساخت و تولید را در بیشتر موارد چند هدفی می‌دانند [۱۱]. برای دستیابی به این اهداف لازم است معیارهای عملکرد مختلف سازگار با مفاهیم فوق، به طور همزمان در طول مسأله کنترل شوند. به طور کلی مسأله MO-FDJSPM به شکل زیر تعریف می‌شود: به تعداد n کار و m مرحله پردازش وجود دارد که انجام هر کار در کارگاه پویا به مجموعه عملیات مشخصی نیازمند است. هر قطعه مانند قطعه i ، جهت پردازش در کارگاه در یک زمان غیر صفر r_i وارد کارگاه پویا می‌شود. قطعه j شامل عملیات $\{o_{1,j}, o_{2,j}, \dots, o_{n_j,j}\}$ است که بدون از دست دادن کلیت مسأله می‌توان چنین فرض کرد که ترتیب انجام عملیات در کارگاه نیز، به همین صورت باشد.

تعداد عملیات لازم برای تکمیل هر کار می‌تواند کوچکتر یا مساوی تعداد مراحل پردازش در کارگاه باشد. در هر مرحله از پردازش مانند M_k بتعداد l_k نسخه از ماشین‌های موازی با سرعت‌های مختلف که هر یک توانایی پردازش عملیات تخصیص داده شده به آن مرحله را دارند وجود دارد و حداقل در یک ایستگاه کاری منقطع از کارگاه مقدار این پارامتر (l_k) بزرگتر از یک می‌باشد. هر عملیات حداقل توسط یکی از ایستگاه‌های کاری قابل پردازش می‌باشد و حداقل

یک عملیات وجود دارد بطوریکه در بیش از یک ایستگاه کاری قابل پردازش باشد (به دلیل وجود انعطاف پذیری عملیات در کارگاه). عملیات هر یک از کارهای موجود در کارگاه را حداکثر با یک ماشین در یک زمان می‌توان انجام داد.

طول زمان پردازش عملیات $O_{i,j}$ روی ماشینی با سرعت واحد ($S_{k,pm} = 1$) در مرحله k برابر $P_{pm, j, k}$ در نظر گرفته می‌شود که اگر پردازش این عملیات روی ماشینی با سرعت ($S_{k,pm} > 1$) انجام شود طول زمان پردازش عملیات مذکور به $P_{i,j,k} / S_{k,pm}$ کاهش خواهد یافت. فرض بر این است که تصمیم گیرنده اطلاعات کافی در مورد وزن اهداف یا اولویت آنها دارد.

هدف از حل مسأله یافتن بهترین مجموع وزنی اهداف مسأله و ارائه آن به تصمیم گیرنده با این مفروضات است: هر ماشین در هر لحظه تنها می‌تواند یک عملیات را پردازش کند. هر کار در هر لحظه تنها می‌تواند بوسیله یک ماشین پردازش شود. همه ماشینها از زمان صفر در دسترس هستند و خراب نمی‌شوند. قطع کردن عملیات مجاز نیست و زمانهای پردازش عملیات قطعی و معلوم است. زمانهای آماده سازی بین عملیات ناچیز است یا شامل زمانهای پردازش می‌شود و زمان حمل و نقل قابل چشم پوشی است. بعضی از این فرضها در کاربرد غیر واقعی بوده و تنها برای ساده تر شدن مدل و امکان پذیری آن در نظر گرفته شده است.

۳-۳. تعریف متغیرها و مجموعه‌ها

$j = 1, \dots, m$: شاخص عملیات هر قطعه ورودی به کارگاه،

$i = 1, \dots, n$: شاخص کار،

$k = 1, \dots, m$: شاخص مرحله،

M_k : k امین مرحله پردازش،

n_i : تعداد عملیات‌های کار i ام،

r_i : $M_{k,r}$: r امین ماشین موازی مرحله k ام،

r_i : زمان ورود قطعه i ام به کارگاه،

$o_{i,j}$: j امین عملیات کار i ام،

$S_{k,r}$: سرعت ماشین $M_{k,r}$ ،

$St_{i,j}$: مرحله پردازش عملیات $O_{i,j}$ ،

$P_{i,j}$: زمان پردازش عملیات $O_{i,j}$ روی ماشینی با سرعت واحد،

l_k : تعداد ماشینهای موازی در مرحله k ام،

$L_{\max}$: ماکزیمم l_k ها،

pm : شاخص ماشین‌های موازی در ایستگاه‌های کاری،

$c_{i,j}$: زودترین زمان تکمیل عملیات،

$o_{i,j}$: $o_{i,j}^{(i,j)}$: زمان پایان عملیات $O_{i,j}$ روی ماشین $M_{k,pm}$ ،

۳-۴. مدل ریاضی

۳-۴-۱. تعریف توابع هدف مسأله

$$F = F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 \quad (۱)$$

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

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

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

$a_k^{(i,j)} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ اگر ماشین‌های k امین مرحله جزء ماشین‌های

علی‌البدل برای $O_{i,j}$ باشد برابر ۱، در غیر اینصورت برابر صفر.

$X_{k,pm}^{(i,j)} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ اگر عملیات $O_{i,j}$ روی ماشین $M_{k,pm}$ پردازش

شود برابر ۱، در غیر اینصورت برابر صفر.

$R_{k,pm}^{(i,j)(p,q)} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ اگر عملیات $O_{a,b}$ زودتر از عملیات $O_{i,j}$ روی

ماشین $M_{k,pm}$ صورت پذیرد برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴-۲. محدودیت‌های مسأله

$$Ft_{k,pm}^{(i,j+1)} - Ft_{k',pm'}^{(i,j)} + L \times (1 - a_k^{(i,j+1)} \times X_{k,pm}^{(i,j+1)}) \geq P_{i,j+1,k} / S_{k,pm} \quad (۵)$$

$$\forall j: 1 \leq i \leq n; \forall i: 1 \leq j \leq (n_i - 1);$$

$$\forall k, k': 1 \leq k, k' \leq m;$$

$$\forall pm, pm': 1 \leq pm, pm' \leq l_k;$$

$$Ft_{k,pm}^{(i,j)} - Ft_{k,pm}^{(p,q)} \times X_{k,pm}^{(i,j)} + L \times R_{k,pm}^{(i,j)(p,q)} \geq X_{k,pm}^{(i,j)} \times P_{i,j,k} / S_{k,pm} \quad (۶)$$

$$\forall i, q: i = 1, \dots, n-1 \text{ و } q = i+1, \dots, n$$

$$\forall i: 1 \leq j \leq n_j; \forall p: 1 \leq p \leq n_q;$$

$$\forall k: 1 \leq k \leq m;$$

$$\forall pm: 1 \leq pm \leq l_k;$$

$$Ft_{k,pm}^{(p,q)} - Ft_{k,pm}^{(i,j)} \times X_{k,pm}^{(p,q)} + L \times (1 - R_{k,pm}^{(i,j)(p,q)}) \geq X_{k,pm}^{(p,q)} \times P_{p,q,k} / S_{k,pm} \quad (۷)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{pm=1}^{l_k} a_k^{(i,j)} \times X_{k,pm}^{(i,j)} = 1 \quad (۸)$$

$$\forall j: 1 \leq i \leq n;$$

$$\forall i: 1 \leq j \leq n_j;$$

$$X_{k,pm}^{(i,j)} \leq a_k^{(i,j)} \quad (۹)$$

$$\forall j: 1 \leq i \leq n; \forall i: 1 \leq j \leq n_j;$$

$$\forall k: 1 \leq k \leq m;$$

$$\forall pm: 1 \leq pm \leq l_k;$$

$$Ft_{k,pm}^{(i,j)} \leq L \times X_{k,pm}^{(i,j)} \quad (۱۰)$$

$$\forall j: 1 \leq i \leq n; \forall i: 1 \leq j \leq n_j;$$

$$\forall k: 1 \leq k \leq m;$$

$$\forall pm: 1 \leq pm \leq l_k;$$

$$C_i \geq \sum_{k=1}^m \sum_{pm=1}^{l_k} Ft_{k,pm}^{(i,n_j)} \quad (۱۱)$$

$$\forall j: 1 \leq i \leq n;$$

$$Ft_{k,pm}^{(i,1)} \geq X_{k,pm}^{(i,1)} \times P_{i,1,k} / S_{k,pm} + r_i \quad (۱۲)$$

$$\forall j: 1 \leq i \leq n;$$

$$\forall k: 1 \leq k \leq m;$$

$$\forall pm: 1 \leq pm \leq l_k;$$

۳-۵. شرح مدل

رابطه (۱) تابع هدف اصلی مسأله MO-FDJSPM، که کمینه‌سازی مجموع وزنی سه تابع هدف حاصل از روابط (۲) تا (۴) با ضرایب معین a_1, a_2, a_3 می‌باشد را نشان می‌دهد. 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 عملیات‌های کارها 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. معادلات (۸) و نامعادلات (۹) متضمن این هستند که هر عملیات از یک کار تنها می‌تواند به یکی از ماشین‌های علی‌البدل ممکن تخصیص یابد.

نامعادلات (۱۰) نیز بیان می‌کنند که اگر هیچ کدام از ماشین‌های مرحله k ام به عملیات $O_{i,j}$ اختصاص داده نشود زمان تکمیل این عملیات روی تمامی ماشین‌های این مرحله بایستی صفر در نظر گرفته شود. چون توابع هدف مسأله، بر اساس معیاری عادی از زمان تکمیل کارها هستند، بنابراین در نامعادلات (۱۱) حداکثر زمان تکمیل کارها محاسبه می‌شود. برای اینکه زمان تکمیل اولین عملیات کارها، بزرگتر یا مساوی طول زمان پردازش آن عملیات، بعلاوه زمان حضور کار مذکور در کارگاه باشد مجموعه نامعادلات (۱۲) در مدل آورده شده است.

۳-۶. پیچیدگی مسأله

مسأله MO-FDJSPM، توسعه یافته مدل تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری ناشی از ماشین‌های موازی می‌باشد و در نتیجه همه پیچیدگی‌ها و سختی‌های آن را نیز به همراه خواهد داشت. در نظر داشتن تنها فقط انعطاف‌پذیری عملیات در این مسائل، حتی پیچیدگی یافتن جوابهای بهینه تقریبی را نیز به طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۱]. از آنجایی که مسأله تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با انعطاف‌پذیری عملیات، خود قویاً Np-hard است [۱۳]. لذا مسأله MO-FDJSPM نیز با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری ناشی از ماشین‌های موازی قویاً Np-hard خواهد بود.

۳-۷. رویکرد حل مسأله

هدف از حل مسأله MO-FDJSPM، یافتن بهترین مجموع وزنی و ارائه آن به تصمیم‌گیرنده است. در تحقیق حاضر سعی شده است از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک در طراحی روشی مناسب برای حل این مسأله استفاده شود. در بخش بعدی به ترتیب ساختار الگوریتم ژنتیک پیشنهادی معرفی خواهد شد.

۴. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

۴-۱. طراحی الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله

در این بخش برای حل مسأله، یک الگوریتم ژنتیک ارائه خواهد شد تا در زمان معقول بتواند به جواب خوبی از مسأله دست پیدا کند. شکل ۱، رویه کلی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی را نشان می‌دهد.

رویه الگوریتم ژنتیک پیشنهادی:

- ۱- شروع
- ۲- شاخص شمارنده جمعیت (t) را برابر صفر قرار بده؛
- ۳- اولین کروموزوم دوبعدی پویا را طراحی کن؛
- ۴- تا زمانی که شرط توقف برقرار نشده، ادامه بده؛
- ۵- فرزند $C(t)$ را با اعمال ترکیب مجدد از والد $P(t)$ تولید کن؛
- ۶- مقدار برازندگی فرزند $C(t)$ را حساب کن؛
- ۷- از بین فرزند $C(t)$ و والد $P(t)$ ، $P(t+1)$ را تعیین کن؛
- ۸- یک واحد به t اضافه کرده و دوباره شرط حط ۴ را تست کن؛
- ۹- پایان (شرط ۴)
- ۱۰- پایان (کل الگوریتم)

شکل ۱. رویه کلی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

۴-۱-۱. نمایش کروموزومها (کدینگ مسأله)

اولین مرحله در حل مسائل بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک، بازنمایی جواب‌های مسأله به شکل کروموزوم است [۱۴]. مسأله MO-FDJSPM به دو زیرمسأله تخصیص و تعیین توالی عملیات تجزیه می‌شود. الگوریتم ژنتیک ارائه شده 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 در نظر گرفته شده است. بنابراین هر جواب مسأله به صورت یک آرایه دو بعدی نمایش داده می‌شود. این روش مشابه روش لی و همکاران (۲۰۰۲) است که البته در آن به دلیل وجود ماشین‌های موازی در هر ایستگاه، رشته تخصیص به صورت دو رشته مجزا و شامل رشته تخصیص ایستگاه کاری و نیز رشته تخصیص ماشین در نظر گرفته شده است [۱۵].

در الگوریتم ژنتیک ارائه شده، رشته اول کروموزوم مشخص کننده ایستگاه کاری پردازش کننده عملیات مورد نظر و نیز رشته دوم شماره ماشینی را که در ایستگاه کاری مورد نظر عملیات مربوطه را پردازش خواهد کرد، مشخص می‌کند. رشته سوم این بازنمایی نیز اولویت تخصیص یافته به هر عملیات را نشان می‌دهد. هر عنصر سطر سوم همواره عددی بین یک و تعداد کل عملیات کارها، است با این ویژگی که اولویت دو عملیات نمی‌تواند یکسان باشد. لذا همواره جواب مسأله موجه خواهد بود. بنابراین در این طراحی هیچ وقت با کروموزوم ناموجه مواجه نمی‌شویم.

۴-۱-۲. سایر فاکتورهای اصلی الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به منظور اجتناب از همگرایی زودرس، از هیچ گونه روش ابتکاری برای تولید جمعیت اولیه استفاده نمی‌شود. در این الگوریتم از دو عملگر تقاطعی مکان محور و عملگر تقاطعی بخشی-نگاشته^۱ (و یا RMX) به صورت ترکیبی و با نرخ p_c استفاده شده است. عملگر تقاطع مکان محور بر روی رشته تخصیص ماشین (رشته اول و دوم کروموزم) و عملگر تقاطع RMX بر روی رشته توالی عملیات (رشته سوم کروموزم) اعمال می‌شوند. همچنین به خاطر ساختار ویژه مسأله و کروموزوم پیشنهاد شده، یک عملگر جهشی ابتکاری بر مبنای عملگر وارونگی خطی و یک قاعده ابتکاری پایه‌ریزی شده است به طوری که این عملگر با دو نرخ جهشی متفاوت کار می‌کند و برای زیرمسأله تخصیص از قاعده ابتکاری ارائه شده عملگر جهش، با نرخ جهشی (p_m) و برای زیرمسأله تعیین توالی عملیات از عملگر وارونگی، با نرخ جهشی (p_m) استفاده می‌کند. اگر کروموزوم در ابتدا شدنی باشد پس از اعمال عملگر جهش وارونگی خطی و نیز پس از مرتب کردن رشته سوم بر اساس روند صعودی بین کاری، کروموزوم حاصل نیز شدنی خواهد بود. در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، از فضای نمونه‌گیری توسعه یافته استفاده می‌شود. مکانیزم نمونه‌گیری نیز برای تشکیل نسل‌های بعدی ترکیبی از روش نخبه‌گزینی و نیز چرخ رولت خواهد بود. همچنین جهت ارزیابی کروموزوم‌ها از تابع برازندگی استفاده می‌شود. این تابع در اکثر مسائل بهینه‌سازی همان تابع هدف مسأله است. در مسائل بهینه‌سازی چندهدفی استفاده از تابع مجموع وزنی برای ارزیابی مقدار شایستگی جواب‌ها در الگوریتم ژنتیک یک روش متداول است. گائو و همکاران (۲۰۰۷) معتقدند که در حل مسائل زمان‌بندی چند معیاره با الگوریتم ژنتیک، به دلیل وجود مقیاس‌های متفاوت از دامنه تغییرات هر یک از توابع هدف (به سبب دامنه تغییرات سایر پارامترهای مسأله) در محاسبه تابع برازندگی مسائل چندهدفی با در نظر گرفتن مجموع وزنی این اهداف، بهتر است در ابتدا این مقادیر در طول جمعیت نرمال شده و سپس مجموع وزنی آنها، از ترکیب مقادیر نرمال شده این توابع محاسبه شود [۱۶]. در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، طراحی کروموزوم و انتخاب عملگرهای آن به روشی صورت گرفته که کمترین مشکل در برخورد با محدودیت‌ها و تولید کروموزوم غیرموجه ایجاد شود. بدین صورت که در این ساختار، رشته‌های تخصیص مسأله همواره موجه خواهد بود. در رشته توالی عملیات نیز، فقط امکان غیرموجه بودن محدودیت تقدم توالی بین عملیات‌های یک کار وجود دارد که با استفاده از روش اصلاحی (با مرتب‌سازی غیرنزولی توالی عملیات‌های هر کار در رشته توالی عملیات) حل خواهد شد. الگوریتم بعد از رسیدن به max_gen تکرار متوقف می‌شود.

^۱. Partial Mapped

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 به کارگیری 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 احتمالات کاربرد عملگرهای جهش و تقاطع (با استفاده از روش‌های همچون تکنیک‌های شبیه‌سازی) یافته 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 تباد 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 اعضا 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 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 دو برابر و مقدار تقاطع نیز نصف شوند و در صورتی که این شرط نقض شود مجدداً مقادیر جهش و تقاطع به همان مقادیر اولیه مسأله تغییر می‌کنند.

۵. طراحی آزمایش‌های عددی

۵-۱. تولید مسائل تصادفی

برای تولید مسائل تصادفی یازده پارامتر مطابق با جدول (۱) از مسأله شناسایی شده است که برای توزیع هشت پارامتر نخست از داده‌های تی و هوو (۲۰۰۷) و برای سایر پارامترها از داده‌های کرز و آسکین (۲۰۰۴) استفاده می‌شود [۲۱، ۲۰، ۱۳].

موعد تحویل کارها بر اساس رابطه‌ای که توسط بیکر (۱۹۸۴) با استفاده از روش TWK-method معرفی شده است، تولید

$$\frac{\sum_{n(f(o_{ij}))} p_{i,j,k}}{n(f(o_{ij}))} \quad (13)$$

$$\overline{p_{ij}} = \frac{\sum_{k=1}^m a_k^{(i,j)} \times [\sum_{pm=1}^{l_k} p_{i,j,k} / S_{k,pm}]}{\sum_{k=1}^m a_k^{(i,j)} \times l_k} \quad (1\text{f})$$

که در آن $a_k^{(i,j)}$ متغیر صفر و یکی است که اگر ماشین‌های k امین مرحله پردازش جز ماشین‌های علی‌البدل ممکن برای O_{ij} باشد برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر خواهد بود. $S_{k,pm}$ و l_k نیز به ترتیب سرعت ماشین $M_{k,pm}$ و تعداد ماشین‌های موازی در ایستگاه کاری k ام را نشان می‌دهند. برای ساده‌تر شدن محاسبات جریمه هر واحد دیرکرد برای همه قطعات مساوی واحد فرض می‌شود.

می‌شود [۱۲]. پارامتر c در این رابطه، شاخص «سختی موعده تحویل» می‌باشد، که هر چه قدر مقدار این پارامتر برای کاری بیشتر باشد، نشانگر ضعیف بودن موعده تحویل کار مربوطه خواهد بود. در حالت کلی، همه ترکیبات این سطح تست 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. تی و هوو (۲۰۰۷) برای تطبیق این فرمول با مسأله MO-FJSP با انعطاف‌پذیری عملیات خود، پارامتر زمان پردازش $P_{i,j}$ را در رابطه پیشنهادی بیکر (۱۹۸۴) با پارامتر $P_{i,j}$ پیشنهادی خود که از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود، جایگزین کردند. که در این رابطه $n(f(o_{ij}))$ نشانگر تعداد مراحل کاری منعطف برای انجام عملیات‌های کار نام می‌باشد. ما نیز برای سازگاری این فرمول با مسأله تحقیق MO-FDJSP رابطه (۱۴) را پیشنهاد و از آن استفاده می‌کنیم.

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
<i>dev</i> ($p_{i,j,k}, p_{i,j,t}$)	:	5	1
# of Operation	:	U[m/2,m]	1
Release Date (r_i)	:	If nJobs ≥ 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)	:	$r_i + c \times \sum_{j=1}^{n_j} p_{ij}$	1
Machine distribution	:	Constant Variable	2
# of machines (L_i)	:	2 - n U[1,4] - U[1, n]	2
Speed of machines	:	U[1,3]	1
Number of Scenarios	:		12

متوسط تابع هدف وزنی برای هر دسته مسأله، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای جمع‌آوری شده از اجرای الگوریتم‌ها بطور خلاصه در جدول ۲، تا ۴ آمده است [۲۲].

۳-۵. تنظیم پارامترهای GA پیشنهادی

سطوح مختلف پارامترها، تأثیر زیادی بر کیفیت جواب‌های بدست آمده از الگوریتم ژنتیک دارد و ترکیبهای مختلف مقادیر پارامترها، جوابهای متفاوتی را از الگوریتم می‌دهد. به منظور انجام شبیه‌سازی جهت تنظیم پارامترهای GA، تعداد ۱۲ سناریو امکان‌پذیر آزمایش شده و از هر سناریو تعداد پنج مثال تولید می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بهترین مقادیر به دست آمده برای پارامترهای الگوریتم پیشنهادی عبارتند از:

۲-۵. 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^1 پیشنهادی با الگوریتم GP^2 موجود در ادبیات از مقادیر تابع مجموع وزنی استفاده می‌شود. لذا برای ارزیابی کیفیت جواب به دست آمده از الگوریتم‌ها GA و GP، از معیارهای: بهترین مقدار به دست آمده برای تابع هدف وزنی و

¹ Genetic Algorithm² Genetic Programming

GA پیشنهادی بر اساس این شاخص در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب با میانگین 5.59% ، 4.88% و 5.53% بهبود و در کل با میانگین 5.33% 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 کوچک، متوسط و بزرگ از مسأله می باشد. بیشترین زمانی که GA پیشنهادی صرف یافتن جواب بهینه می کند با توجه به داده های جدول (۳) برابر 8.86 دقیقه می باشد. البته در اینجا نیز بهبودهای صورت گرفته توسط GA پیشنهادی، زمان زیادی که این الگوریتم نسبت به الگوریتم GP صرف یافتن جواب می کند را توجیه می نماید. بنابراین این افزایش زمان با توجه به ابعاد مسأله و میزان بهبود صورت گرفته قابل توجیه است.

۳-۶. سطح انعطاف پذیری بالا

بررسی الگوریتم ها در سطح انعطاف پذیری کامل مسأله مؤید این مطلب است که:

۱. GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف کمینه سازی حداکثر مجموع وزنی معیارهای عملکرد مسأله» برای ۵ اجرای هر یک از سناریوهای مسأله، در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ و به تفکیک تعداد مراحل، به ترتیب با میانگین 3.45% ، 4.09% و 6.12% بهبود و در کل با میانگین 4.55% بهبود، برتری محسوسی نسبت به الگوریتم GP دارد.

۲. شاخص «میانگین تابع هدف» برای ۵ اجرای هر یک از سناریوهای مسأله، بهترین معیار برای ارزیابی الگوریتم ها به نظر می رسد. همانگونه که در جدول (۴) نیز ملاحظه می شود، GA پیشنهادی بر اساس این شاخص در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب با میانگین 3.78% ، 4.17% و 5.85% بهبود و در کل با میانگین 4.60% درصد بهبود، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GP دارد.

۳. در اینجا نیز تنها نقطه قوت الگوریتم تکاملی GP نسبت به GA پیشنهادی با در نظر گرفتن شاخص میانگین زمان حل در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ نمایان می شود. میانگین زمان حل نیز همانند حالت انعطاف پذیر کامل و متوسط، قابل قبول به نظر می رسد.

در نمودار ۱، تفاضل میانگین توابع هدف الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با روش فراابتکاری GP برای سطوح مختلف انعطاف پذیری و نیز ابعاد مختلف مسئله مورد مقایسه قرار گرفته اند. که نشان دهنده بهبود برای ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ می باشد و مؤید این مطلب است که برای سطوح مختلف انعطاف پذیری، با افزایش ابعاد مسأله، میزان بهبود روش پیشنهادی نسبت به روش فراابتکاری GP موجود در ادبیات افزایش می یابد.

تعداد کروموزوم ها در تکنیک نخبه گزینی (Best)، برابر ۲۰، احتمال جهش برای رشته تخصیص (P_{m1})، برابر ۰.۳۵، احتمال جهش برای رشته تعیین توالی (p_{m2}) برابر ۰.۰۳۰ و نرخ تقاطعی (p_c) برابر ۰.۴ می باشد [۲۲].

۶. نتایج آزمایش ها

۶-۱. سطح انعطاف پذیری پایین

بررسی الگوریتم ها در این سطح با توجه به نتایج جدول (۲)، مؤید این مطلب است که:

۱- GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف کمینه سازی حداکثر مجموع وزنی معیارهای عملکرد مسأله» برای ۵ اجرای هر یک از سناریوهای مسأله، در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ و به تفکیک تعداد مراحل، به ترتیب با میانگین 2.65% ، 3.16% و 5.90% بهبود و در کل با میانگین 3.90% بهبود، برتری محسوسی نسبت به الگوریتم GP دارد.

۲- «میانگین تابع هدف» برای ۵ اجرای هر یک از سناریوهای مسأله، بهترین معیار برای ارزیابی عملکرد الگوریتم ها به نظر می رسد. همانگونه که در جدول (۲) نیز ملاحظه می شود، GA پیشنهادی بر اساس این شاخص در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب با میانگین 4.34% ، 3.64% و 5.34% بهبود و در کل با میانگین 4.90% درصد بهبود، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GP دارد.

۳- تنها نقطه قوت الگوریتم GP نسبت به GA پیشنهادی با توجه به نتایج جدول (۲) با در نظر گرفتن شاخص میانگین زمان حل در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مسأله نمایان می شود. البته بهبودهای صورت گرفته توسط GA پیشنهادی، زمان نسبتاً زیادی را که این الگوریتم نسبت به الگوریتم GP صرف پیدا کردن جواب می کند، را توجیه می نماید. همچنین با توجه به نتایج جدول (۲) ملاحظه می شود که در بدترین حالت GA پیشنهادی برای حل مسائل بزرگ 8.79 دقیقه زمان سپری کرده است.

۶-۲. سطح انعطاف پذیری متوسط

بررسی الگوریتم ها در این سطح با توجه به نتایج جدول (۳)، مؤید این مطلب است که:

۱. GA پیشنهادی بر اساس شاخص «کمترین مقدار تابع هدف کمینه سازی حداکثر مجموع وزنی معیارهای عملکرد مسأله» برای ۵ اجرای هر یک از سناریوهای مسأله، در هر سه بعد کوچک، متوسط و بزرگ و به تفکیک تعداد مراحل، به ترتیب با میانگین 3.88% ، 3.94% و 5.94% بهبود و در کل با میانگین 4.59% بهبود، کارایی خود را نسبت به الگوریتم GP نشان می دهد.

۲. «میانگین تابع هدف» بهترین معیار برای ارزیابی الگوریتم ها به نظر می رسد. همانگونه که در جدول (۳) نیز ملاحظه می شود،

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

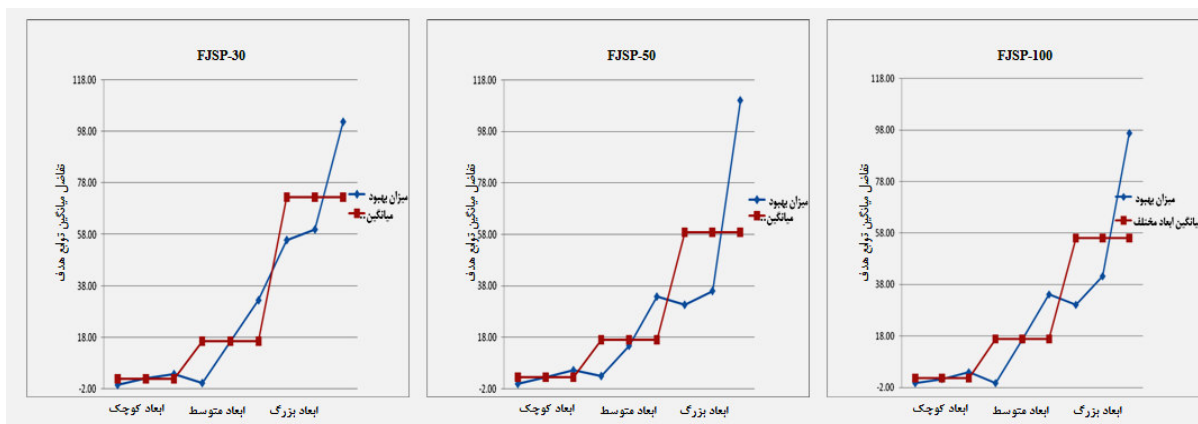
میانگین کلیه ابعاد	۱۵				۱۰				۵				تعداد ماشینها	
	کل	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	کل	۱۰۰	۵۰	۲۰	کل	۵۰	۲۰	۱۰	تعداد کار	تابع هدف
۲۲۰.۳۱	۵۴۲.۷۳	۱۷۵۴.۱۷	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳
۴۹۴.۶۵	۱۱۲۴.۸۷	۱۸۰۴.۶۴	۱۰۲۷.۴۸	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳
۹۰.۲۳	۲۴۰.۰۸	۵۲۱.۱۸	۱۷۰.۸۹	۲۸۱.۱۸	۲۷۳.۳۲	۶۹۲.۲۱	۱۲۰.۰۹	۰.۷۱	۳۰۳.۸	۸۶۱	۰.۸۸	۰.۳۵	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۲۲۲.۷۴	۵۸۰.۸۲	۱۸۵۴.۸۹	۱۰۶۷.۴۸	۵۸۰.۸۲	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳	۱۰۰۰.۶۳	۵۴۲.۷۳
۵۲۴.۹۴	۱۱۹۷.۲۲	۱۹۰۶.۴۲	۱۰۸۷.۴۷	۵۹۸.۳۸	۲۲۲.۱۳	۵۹۴.۳۸	۳۲۲.۰۱	۱۱۶.۰۲	۳۳۳.۶	۵۹۹.۳	۲۳.۳۳	۱۶.۵۱	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۰.۳۱۸	۰.۳۷	۰.۵۳۸	۰.۳۴۲	۰.۳۳۰	۰.۳۰۸	۰.۴۱۲	۰.۳۱۲	۰.۳۰۰	۰.۳۷۷	۰.۳۵۰	۰.۳۸۰	۰.۳۰۰	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۳.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪
۴.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪	۶.۹۰٪

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

میانگین کلیه ابعاد	۱۵				۱۰				۵				تعداد ماشینها	
	کل	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	کل	۱۰۰	۵۰	۲۰	کل	۵۰	۲۰	۱۰	تعداد کار	تابع هدف
۱۸۲.۷۵	۴۴۳.۲۹	۱۶۲۷.۹۴	۷۸۱.۸۶	۴۴۳.۲۹	۹۴.۲۰	۵۱۹۳.۳۱	۲۲۷.۳۱	۹۴.۲۰	۱۰.۷۵	۵۳۰.۹	۲۱.۲۰	۱۰.۷۵	۱۰.۷۵	۱۰.۷۵
۴۲۶.۳۳	۹۸۹.۴۴	۱۶۸۶.۴۵	۸۲۹.۰۳	۴۵۴.۳۳	۲۸۸.۱۱	۵۲۵.۴۷	۲۴۴.۰۴	۹۷.۹۲	۳۰.۳۴	۵۴۶.۱	۲۳.۶۴	۱۲.۴۶	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۹۲.۰۴	۲۴۴.۸۸	۵۳۱.۶۰	۱۷۴.۳۱	۲۸۷.۴	۲۷۸.۸	۷۰.۵۹	۱۲.۳۳	۰.۷۲	۳.۳۴	۸.۷۸	۰.۹۰	۰.۳۶	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۱۹۲.۸۴	۴۷۲.۰۹	۱۷۳۱.۰۱	۸۲۹.۸۲	۴۷۲.۰۹	۹۵.۷۷	۵۴۵.۹۳	۲۳۸.۰۵	۹۵.۷۷	۱۰.۶۶	۵۷.۱۲	۲۲.۴۱	۱۰.۶۶	۱۰.۶۶	۱۰.۶۶
۴۶۲.۴۸	۱۰۴۸.۸۰	۱۷۹۶.۴۴	۸۶۵.۰۱	۴۸۴.۹۵	۳۰.۵۹۳	۵۵۹.۳۳	۲۵۷.۷۳	۱۰.۰۸۴	۳۲.۷۲	۵۹.۷۹	۲۶.۰۵	۱۲.۳۲	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۰.۳۲۵	۰.۳۲۱	۰.۵۳۸	۰.۳۲۴	۰.۳۲۲	۰.۳۰۸	۰.۴۱۲	۰.۳۱۲	۰.۳۰۰	۰.۳۷۷	۰.۳۵۰	۰.۳۸۰	۰.۳۰۰	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۴.۵۹٪	۵.۹۴٪	۵.۹۵٪	۵.۹۸٪	۶.۱۰٪	۳.۹۴٪	۵.۹۸٪	۴.۵۱٪	۱.۶۴٪	۳.۸۸٪	۷.۰۶٪	۵.۴۰٪	۰.۸۱٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪
۵.۳۳٪	۵.۵۳٪	۶.۱۳٪	۶.۱۶٪	۶.۳۱٪	۴.۸۸٪	۶.۰۳٪	۵.۷۰٪	۳.۸۹٪	۵.۵۹٪	۸.۶۵٪	۹.۲۳٪	۰.۱۳٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪

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

میانگین کلیه ابعاد	۱۵				۱۰				۵				تعداد ماشینها	
	کل	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	کل	۱۰۰	۵۰	۲۰	کل	۵۰	۲۰	۱۰	تعداد کار	تابع هدف
۱۷۲.۸۴	۴۰۷.۵۱	۱۵۲۹.۰۵	۷۷۲.۵۱	۴۰۷.۵۱	۱۰۲.۲۹	۴۸۹.۱۴	۲۳۸.۱۸	۱۰۲.۲۹	۸.۷۳	۴۷.۱۱	۲۰.۴۳	۸.۷۳	۸.۷۳	۸.۷۳
۴۱۳.۷۵	۹۲۵.۹۱	۱۵۶۲.۳۶	۸۰۳.۲۱	۴۱۳.۷۵	۲۸۶.۵۵	۵۱۱.۱۸	۲۴۴.۴۲	۱۰۵.۰۵	۲۸.۷۹	۵۱.۰۵	۲۲.۳۴	۱۲.۹۹	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۹۳.۱۲	۲۴۷.۷۳	۵۳۸.۵۲	۱۷۵.۵۷	۲۹.۱۱	۲۸.۲۴	۷۱.۵۱	۱۲.۴۹	۰.۷۳	۳.۳۹	۸.۹۰	۰.۹۱	۰.۳۶	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۱۸۱.۳۰	۴۲۲.۳۷	۱۶۵۰.۶۰	۸۱۶.۴۰	۴۲۲.۳۷	۱۰۲.۲۹	۵۱۹.۹۳	۲۴۴.۰۰	۱۰۲.۲۹	۸.۶۱	۴۹.۹۶	۲۱.۷۶	۸.۶۱	۸.۶۱	۸.۶۱
۴۳۸.۶۶	۹۸۲.۰۲	۱۶۵۹.۰۸	۸۴۴.۵۱	۴۴۲.۶۶	۳۰۲.۴۶	۵۴۵.۳۹	۲۶۰.۱۱	۱۰۴.۸۸	۳۰.۵۲	۵۵.۰۸	۲۳.۶۹	۱۲.۷۸	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۰.۵۳۵	۰.۷۱۸	۰.۱۱۷۰	۰.۰۹۰۰	۰.۰۸۳	۰.۰۵۵۸	۰.۰۸۶۶	۰.۰۶۰۸	۰.۰۳۰۰	۰.۰۳۳۸	۰.۰۴۹۹	۰.۰۳۰۵	۰.۰۳۰۰	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین زمان حل (ثانیه)
۴.۵۵٪	۶.۱۳٪	۷.۳۶٪	۵.۲۵٪	۵.۷۵٪	۳.۰۹٪	۵.۹۲٪	۵.۷۱٪	۰.۶۳٪	۳.۴۵٪	۵.۷۰٪	۶.۱۱٪	۰.۴۷٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪
۴.۶۰٪	۵.۸۵٪	۵.۸۴٪	۴.۸۹٪	۶.۸۲٪	۴.۱۷٪	۶.۲۷٪	۶.۴۱٪	۰.۱۷٪	۳.۷۸٪	۷.۳۱٪	۵.۷۰٪	۰.۱۶٪	۵.۹۰٪	۵.۹۰٪



نمودار ۱. مقایسه تفاضل میانگین توابع هدف با روش فراابتکاری GP برای سه سطح انعطاف پذیری

- [2] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithm in Search: Optimization and Machine Learning*, 1989.
- [3] Xia, W., Wu, Z., "An Effective Hybrid Optimization Approach for Multi-Objective flexible Job-Shop Scheduling Problems", *Computers & Industrial Engineering*, 48, 2005, pp. 409-425.
- [4] Srich, C.A., Armentano, V.A., Laguna, M., "Tardiness Minimization in a Flexible Job Shop: A Tabu Search Approach, *Journal of Intelligent Manufacturing*", 15, 2004, pp. 103-115.
- [5] Su, L.H., Chang, P.C., Lee, E.S., "A Heuristic for Scheduling General Job Shops to Minimize Maximum Lateness", *Mathl. Comput. Modelling*, 27, 1998, pp. 1-15.
- [6] Riane, F., Artiba, A., Elmaghraby, S.E., "A Hybrid Three-Stage Flowshop Problem: Efficient Heuristics to Minimize Makespan", *European Journal of Operational Research*, 109, 1998, pp. 321-329.
- [7] Nowicki, E., Smutnicki, C., "The Flow Shop with Parallel Machines: A Tabu Search Approach, *European Journal of Operational Research*", 106, 1998, pp. 226-253.
- [8] Kyriasis G.J., Koulamas C., "A Note on Weighted Completion Time Minimization in a Flexible Flow Shop", *Operations Research Letters*, 29, 2004, pp. 5-11.
- [9] Low, C., "Simulated Annealing Heuristic for Flow Shop Scheduling Problem with Unrelated Parallel Machines", *Computer & operation Research*, 32, 2005, pp. 2013-2025.
- [10] Kyriasis, G.J., Koulamas, C., "Flexible Flow Shop Scheduling with Uniform Parallel Machines", *European Journal of Operational Research*, 168, 2006, pp. 985-997.
- [11] Tkindt, V., Billaut J.C., "Multicriteria Scheduling Theory", *models and algorithms*, Springer, 2002.
- [12] Baker, K.R., *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley & sons, 1974.
- [13] 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>.
- [14] Park, B.J., Choi, H.R., Kim, H.S., "A Hybrid Genetic Algorithm for the Job Shop Scheduling Problems", *Computer & Industrial Engineering*, 45, 2003, pp. 597-613.
- [15] 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.
- [16] Gao J., Gen M., Sun L., "Scheduling Jobs and Maintenances in Flexible Job Shop with a Hybrid Genetic Algorithm", *J Intelligent Manufacturing*, 17, 2007, pp. 493-507.

۷. نتیجه‌گیری

در مسائل زمان‌بندی واقعی، وجود انعطاف‌پذیری ناشی از ماشین‌های موازی در کنار انعطاف‌پذیری عملیات، راهکار مؤثری برای بهبود عملکرد سیستم به شمار می‌رود. در این مقاله، مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی در محیط کار کارگاهی پویا مطالعه و بررسی شد. با در نظر گرفتن پارامترهای مسأله، تحلیل ریاضی مدل با استفاده از روش‌های متعارف، بسیار مشکل و یا غیرعملی می‌شود؛ لذا برای حل مسأله از قابلیت‌های الگوریتم‌های فرا ابتکاری و از جمله الگوریتم ژنتیک - که کاربرد ویژه‌ای در حل مسائل مربوط به زمان و زمان‌بندی دارد- استفاده شد. با توجه به اینکه یکی از معایب الگوریتم‌های ژنتیک کلاسیک، خاصیت همگرایی زودرس این روش‌هاست؛ استفاده از تکنیک‌هایی که به وسیله آن الگوریتم بتواند در فرآیند جستجو از دانش مدل استفاده کرده و به صورت هوشمند، از افتادن در نقاط بهینه محلی اجتناب ورزد، باعث افزایش کارایی آن در جستجوی فضای جواب و یافتن جواب‌های بهینه می‌شود. بدین منظور از یک الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته که پارامترهای کنترلی آن به طور دینامیک در طول فرآیند بهینه‌سازی تغییر می‌نماید، استفاده شد. سپس عملکرد نگارش 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 ۳.۹٪، ۴.۵۹٪ و ۴.۵۵٪ بهبود در شاخص بهترین جواب به دست آمده و نیز ۴.۹٪، ۵.۳۳٪ و ۴.۶۰٪ بهبود در شاخص میانگین جواب‌های به دست آمده را دارد. نتایج این توسعه می‌تواند به تأیید نظریه **no-free lunch** که در آن عنوان می‌شود «استفاده از دانش مدل می‌تواند به فرآیند جستجو کمک کرده و جواب‌های بهتری را برای مسأله به دست آورد» کمک می‌کند. از جمله مسیرهای آتی تحقیق، افزایش کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری به منظور استفاده هر چه بیشتر از دانش مدل در یافتن جواب‌های بهینه و نیز اجتناب از گیر افتادن در نقاط بهینه محلی در ضمن کاهش زمان اجرا می‌باشد. از طرفی می‌توان با در نظر گرفتن سایر فرض‌ها، در مدل‌سازی و حل مسائل زمان‌بندی (فرض‌های هم‌زمانی انجام عملیات یک کار، پردازش دسته‌ای عملیات توسط ماشین‌ها، زمان‌های آماده‌سازی ماشین‌ها، خرابی ماشین‌ها، در نظر گرفتن موعد تحویل، افزایش انعطاف‌پذیری، زمان‌های پردازش احتمالی و فازی و ...) این مسائل را به مدل‌های واقعی نزدیکتر نمود تا با بهینه‌سازی سایر معیارهای زمان‌بندی، نتایج حاصل از حل این مسائل در محیط‌های عملی تولید نیز قابل استفاده باشد.

مراجع

- [1] Pinedo, M., "Planning and Scheduling in Manufacturing and Services", Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, 2005.

- [17] Dagli, C.H., Sittisathanchai, S., "Genetic Neuro-Scheduler: a New Approach for Job Shop Scheduling", International Journal of Production Economics, 41, 1995, pp. 135-145.
- [18] Zhang, H., Gen, M., *Multistage-Based Genetic Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problem*, 2002, pp. 223-232.
- [19] Tay, J.C., Wibowo, D., "An Effective Chromosome Representation for Evolving Flexible Job-Shop Scheduling", Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2004.
- [20] 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.
- [21] Kurz, M.E., Askin, R.G., "Comparing Scheduling Rules for Flexible Flow Lines", Int. J. Production Economics, 85, 2003, pp. 371-388.
- [22] Abbasian, M., Nahavandi, N., "Minimization Flow Time in a Flexible Dynamic Job Shop with Parallel Machines", Tehran, Tarbiat Modares Univesity, Engineering Department of Industrial Engineering, Master of Science Thesis, 2008.