

تعیین اندازه انباشته و زمان بندی همزمان در محیط تولیدی جریان کارگاهی هیبرید با محدودیت منابع

سحر فلاح صنمی^۱، رضا رمضانیان^{۲*}، محسن شفیعی نیک آبادی^۳

۱. کارشناس ارشد رشته مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه سمنان

۲. استادیار رشته مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استادیار رشته مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه سمنان

(تاریخ دریافت ۹۳/۱۱/۱۲ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۵/۰۲/۱۳ - تاریخ تصویب ۹۵/۰۵/۱۱)

چکیده

هدف این پژوهش، مطالعه سیستم‌های تولیدی چندمحصولی و چنددوره‌ای در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر است، به طوری که اندازه انباشته و زمان بندی در آن به صورت همزمان و یکپارچه تعیین می‌شود. در این زمینه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جدید برای فرموله کردن مسئله پیشنهاد می‌شود. تابع هدف شامل هزینه‌های تولید، موجودی و تأمین خارجی است. در صورت برآورده نشدن تقاضای مشتریان باید این تقاضاها از طریق تأمین کنندگان خارجی با قیمتی بالاتر تأمین شود. با توجه به پیچیدگی محاسباتی زیاد مسئله مورد مطالعه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی گروه ذرات و رقابت استعماری برای حل پیشنهاد می‌شود. ابتدا الگوریتم‌ها برای حل مثال‌های تولید شده تصادفی با اندازه‌های مختلف استفاده می‌شود و سپس با معرفی مطالعه موردی صنعت کاشی، الگوریتم‌های مورد نظر برای حل آن نیز استفاده می‌شود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد الگوریتم‌های حل قابلیت رسیدن به جواب با کیفیت خوب در زمان معقول را دارند و برای مسئله ما الگوریتم رقابت استعماری، عملکرد محاسباتی بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO)، الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، تعیین اندازه انباشته و زمان بندی همزمان، سیستم تولید جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، محدودیت ظرفیت ماشین، مدل سازی ریاضی.

مقدمه

ارائه کرده‌اند. پس از ارائه این پژوهش پایه‌ای، محققان تلاش‌های زیادی برای مدل سازی و ارائه راه‌حل‌های کارا برای محیط‌های توسعه یافته مسئله تعیین اندازه انباشته انجام داده‌اند. گوپتا و مگنوسان [۲] برای مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان بندی محدودیت دار تک‌ماشینه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه کردند. آلمادا-لوا و همکاران [۳] دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط برای CLSP با هزینه‌ها/ زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی پیشنهاد کردند. جیمز و آلمادا-لوا [۴] روش ابتکاری ترکیبی الگوریتم فرا ابتکاری جست‌وجوی همسایگی و برنامه‌ریزی عدد صحیح را که به صورت تکرار شونده است، برای حل CLSP در حالت تک‌ماشینی و ماشین‌های موازی ارائه کردند.

هر سازمان برای ادامه بقای خود به ارائه خدمات با کیفیت بالا و قیمت پایین نیاز دارد. بی‌توجهی به هریک از این پارامترها، سازمان را از حیطة رقابت خارج می‌کند و سازمان توان ادامه حیات خود را از دست می‌دهد. از عوامل مؤثر بر کیفیت و قیمت ارائه خدمات و کالا، تعیین میزان تولید و همچنین زمان تولید ارائه آن خدمات است. شرکت‌ها باید سفارش‌های مشتریان را به موقع برآورده کنند و اگر سفارش‌ها به موقع برآورده نشود، سود از بین می‌رود. به منظور نیل به این هدف، باید زمان بندی صورت گیرد.

واگنر و ویتین [۱] اولین و مهم‌ترین الگوریتم تعیین اندازه انباشته اقتصادی را مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا برای تعیین اندازه انباشته تک‌محصولی بدون محدودیت ظرفیت

از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات برای حل مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه در یک سیستم تولیدی جریان کارگاهی استفاده کرده‌اند. آن‌ها برای دستیابی به جواب‌های پایدارتر از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم استفاده شده بهره گرفته‌اند. بابایی و همکاران [۱۶] مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه در یک سیستم جریان کارگاهی با راه‌اندازی وابسته به توالی، انتقال راه‌اندازی و کمبود را مطالعه کردند. اوروتیا و همکاران [۱۷] و ولوسویچ و همکاران [۱۷] مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه چندمحصولی، چنددوره‌ای و چندمنبعی را در محیط کارگاهی بررسی کردند و از روش حل ابتکاری ترتیبی برای دو بخش تصمیم‌گیری بهره بردند.

در این پژوهش، مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی هم‌زمان در سیستم تولیدی چندمحصولی و چنددوره‌ای در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع در نظر گرفته می‌شود و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جدید با رویکرد ظرف زمانی بزرگ، برای فرموله کردن آن پیشنهاد می‌شود که قابلیت برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی را به صورت هم‌زمان دارد. با توجه به پیچیدگی محاسباتی بالای مسئله، برای حل الگوریتم‌های PSO و ICA پیشنهاد شد.

در ادامه، مسئله مورد بررسی تعریف و مدل ریاضی پیشنهادی با جزئیات کامل تشریح می‌شود. پس از آن، جزئیات روش‌های حل فرا ابتکاری PSO و ICA فراهم می‌آید. سپس طرح آزمایش شامل تولید داده‌ها و نتایج محاسباتی و همچنین مطالعه موردی ارائه می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری‌ها در بخش پایانی برای خلاصه کردن نوآوری‌های پژوهش و پیشنهادهای آتی مطرح می‌شود.

مدل‌سازی مسئله

در این زیربخش مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پیشنهادی برای مسئله ارائه می‌شود.

فرضیات، پارامترها و متغیرهای تصمیم

فرض‌های اصلی در مراحل مدل‌سازی و تحلیل پژوهش پیش رو به صورت زیر است:

- هر محصول به تعدادی عملیات نیازمند است که روی

بوشکول و همکاران [۵] مرور کاملی بر تحقیقات چهار دهه اخیر در مورد مسئله تعیین اندازه انباشته پویا محدودیت‌دار را ارائه کردند. آن‌ها در پژوهش مروری خود روی مسئله تعیین اندازه انباشته چندسطحی با محدودیت (MLCLSP)^۱ تمرکز کردند.

MLCLSP یک مدل با ظرف زمانی بزرگ است. مسائل تعیین اندازه انباشته در محیط تولیدی چندسطحی با ظرف زمانی کوچک شامل مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی گسسته (MLDLSP)^۲ [۶]، مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی متناسب (MLPLSP)^۳ [۷] و مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی جامع (MLGLSP)^۴ [۸] است. مدل‌های MLDLSP و MLPLSP امکان تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی را به صورت هم‌زمان دارند، اما تعداد محصولات که در هر دوره امکان تولید دارند محدود است. در نتیجه، MLGLSP که فاندل و استمن-هگن [۸] آن را پیشنهاد دادند، با استفاده از یکپارچه کردن مزایای دو حالت قبل، بر پایه تجزیه دوره‌های بزرگ‌تر به تعداد ثابت دوره‌های کوچک‌تر مسئله را مدل‌سازی می‌کند.

محمدی و همکاران [۹، ۱۰] مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی چندسطحی با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی را در نظر گرفتند و مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای مدل‌سازی مسئله ارائه دادند که برای هر دوره به تعداد محصولات راه‌اندازی در نظر می‌گیرد. مدل‌سازی آن‌ها تصمیم مدل پیشنهادی کلارک و کلارک [۱۱] است. محمدی و همکاران [۱۲] از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل پیشنهادی خود برای مسئله بهره بردند.

رمضانیان و همکاران [۱۳] مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی را برای محیط چندمرحله‌ای با محدودیت ظرفیت در حالتی در نظر گرفتند که محدودیت دسترسی‌نداشتن به ماشین وجود دارد. آن‌ها یک مدل MIP را برای لحاظ کردن فرضیه جدید پیشنهاد دادند. آن‌ها از سه رویکرد ابتکاری بر پایه MIP برای حل مسئله در حالت غیرجایگشتی و جایگشتی استفاده کردند. رمضانیان و همکاران [۱۴] در زمینه مدل‌سازی و حل مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه با شرط عملی جدید، همپوشانی در عملیات، در یک سیستم تولیدی چند مرحله‌ای پژوهشی انجام دادند. رمضانیان و همکاران [۱۵]

<p>موجودی برای محصول z در آغاز افق برنامه ریزی</p> <p>عدد ثابت بزرگ</p> <p>متغیرهای تصمیم</p> <p>مقدار محصول z تولیدشده در دوره t (اندازه انباشته)</p> <p>میزان موجودی برای محصول z در انتهای دوره t</p> <p>مقدار محصول z تأمین شده به صورت خارجی در دوره t (اندازه انباشته)</p> <p>زمان شروع پردازش محصول z روی ماشین m در مرحله s در دوره t</p> <p>زمان خاتمه پردازش محصول z روی ماشین m در مرحله s در دوره t</p> <p>متغیر باینری (=1، اگر محصول z در دوره t تولید شود، در غیر این صورت 0)</p> <p>متغیر باینری (=1، اگر محصول z برای پردازش به ماشین m در مرحله s در دوره t تخصیص یابد، در غیر این صورت 0)</p> <p>متغیر راه اندازی (=1، اگر عملیات راه اندازی روی ماشین m در مرحله s در دوره t از محصول i به محصول z انجام پذیرد، در غیر این صورت 0)</p>	<p>I_{j0}</p> <p>BigM</p> <p>X_{jt}</p> <p>I_{jt}</p> <p>XE_{jt}</p> <p>SO_{smjt}</p> <p>CO_{smjt}</p> <p>Z_{jt}</p> <p>Q_{smjt}</p> <p>Y_{smijt}</p>	<p>مراکز کاری سری پردازش می شوند.</p> <ul style="list-style-type: none"> ماشین ها نمی توانند در یک زمان بیش از یک عملیات را انجام دهند. همچنین، در هر زمان هر محصول فقط روی یک ماشین پردازش می شود. تقاضای محصولات نهایی شناخته شده است. ماشین آلات همیشه در دسترس اند. موجودی در کارگاه مجاز است و در صورت بیشتر بودن تقاضا، از طریق قرارداد جنبی تأمین می شود و هزینه های آن ها برای محصولات مشخص است. 	<p>پارامترها</p> <p>T تعداد دوره ها (افق برنامه ریزی) $t = 1, 2, \dots, T$</p> <p>N تعداد محصولات مختلف $i, j = 1, 2, \dots, N$</p> <p>S تعداد مراحل تولید $s = 1, 2, \dots, S$</p> <p>n_s تعداد ماشین های موازی در مرحله s</p> <p>C_{smt} ظرفیت در دسترس برای ماشین m در مرحله s در دوره t</p> <p>d_{jt} تقاضا برای آیتم z در پایان دوره t</p> <p>b_{smjt} ظرفیت مورد نیاز برای تولید یک واحد از آیتم z روی ماشین m در مرحله s در دوره t</p> <p>P_{jsmt} هزینه پردازش یک واحد محصول z در مرحله s روی ماشین m در دوره t</p> <p>h_{jt} هزینه نگهداری یک واحد محصول z در دوره t</p> <p>CE_{jt} هزینه تأمین خارجی یک واحد محصول z در دوره t</p>
---	--	--	---

مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط

مدل ریاضی با جزئیات کامل ارائه می شود.

$$Min TC = \sum_{j=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^{n_s} \sum_{t=1}^T P_{jsmt} \cdot X_{jt} + \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T h_{jt} \cdot I_{jt} + \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T CE_{jt} \cdot XE_{jt} \tag{1}$$

s.t.

$$I_{j(t-1)} + X_{jt} - I_{jt} + XE_{jt} = d_{jt} \quad \forall j, t \tag{2}$$

$$X_{jt} \leq bigM \cdot Z_{jt} \quad \forall j, t \tag{3}$$

$$\sum_{m=1}^{n_s} Q_{smjt} = Z_{jt} \quad \forall s, j, t \tag{4}$$

$$CO_{smjt} \leq C_{smt} \quad \forall s, m, j, t \tag{5}$$

$$\sum_{m=1}^{n_s} CO_{smjt} \cdot Q_{smjt} = \sum_{m=1}^{n_s} SO_{smjt} \cdot Q_{smjt} + \sum_{m=1}^{n_s} b_{smjt} \cdot X_{jt} \cdot Q_{smjt} \quad \forall s, j, t \tag{6}$$

$$\sum_{m=1}^{n_s} SO_{smjt} \cdot Q_{smjt} \geq \sum_{m=1}^{n_s} CO_{(s-1)mjt} \cdot Q_{(s-1)mjt} \quad \forall j, t, s = 2, \dots, S \quad (7)$$

$$SO_{smjt} \cdot Q_{smjt} \geq CO_{smjt} \cdot Q_{smjt} - bigM \cdot (1 - Y_{smjt}) \quad \forall s, m, i, j, t, i \neq j \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N Y_{smijt} \geq \sum_{j=1}^N Q_{smjt} - 1 \quad \forall s, j, t \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N Y_{smijt} \leq Q_{smjt} \quad \forall s, m, j, t \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N Y_{smijt} \leq Q_{smjt} \quad \forall s, m, j, t \quad (11)$$

$$I_{j0} = I_{inv} \quad \forall j \quad (12)$$

$$X_{jt}, I_{jt}, SO_{smjt}, CO_{smjt} \geq 0 \quad \forall s, m, j, t \quad (13)$$

$$Y_{smijt}, Z_{jst} = \{0, 1\} \quad \forall s, m, i, j, t \quad (14)$$

محصولات موردنظر است. محدودیت ۱۲ بیان می‌کند موجودی اولیه در ابتدای افق برنامه‌ریزی برابر با مقادیر ابتدایی باشد.

روش‌های حل پیشنهادی

الگوریتم‌های فرا ابتکاری، روش‌های عملی‌تر برای حل مسئله بهینه‌سازی ترکیبی در زمانی است که پیدا کردن یک جواب دقیق برای آن دشوار است و به تلاش‌های محاسباتی نیاز زیادی وجود دارد [۱۹].

• الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

پیشینه روش PSO

اِبهرات و کِندی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO)^۵ را برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ مطرح کردند [۲۰]. PSO یک الگوریتم جست‌وجوی بر پایه جمعیت است. شبیه‌سازی جست‌وجوی پرندگان برای غذا نشان می‌دهد اعضای گروه برای پیدا کردن غذا، سرعت خود را از طریق دو فاکتور بهترین تجربه خود و بهترین تجربه تمامی اعضای دیگر تعیین می‌کنند [۲۱]. هر ذره حرکت خود را براساس دانش خود و همسایگان تنظیم می‌کند. شی و اِبهرات این دو قسمت را به ترتیب جزء ادراکی و جزء اجتماعی نامیدند [۲۲].

تابع هدف ۱ حداقل کردن هزینه‌های تولید، نگهداری و تأمین خارجی را در نظر می‌گیرد. محدودیت ۲ محدودیت بالانس جریان برای تأمین کردن تقاضاست. محدودیت ۳ رابطه بین تولید برنامه‌ریزی شده و متغیر باینری را تعریف می‌کند که نشان می‌دهد محصول z در دوره t تولید می‌شود یا خیر. محدودیت ۴، تخصیص محصولات تولیدشده به ماشین‌های موجود در هر مرحله تولید را تعیین می‌کند. محدودیت ۵، محدودیت ظرفیت برای هر ماشین است. محدودیت ۶ رابطه بین زمان شروع و زمان تکمیل پردازش برای محصولات تولیدی برنامه‌ریزی شده در هر مرحله تولید در هر دوره است. محدودیت ۷ مجبور می‌کند زمان شروع پردازش z از ماشین محصول برنامه‌ریزی شده زمانی رخ دهد که پردازش این محصول روی مرحله تولیدی قبل خاتمه یافته باشد. محدودیت ۸ موجب می‌شود زمان شروع پردازش یک کار روی ماشین تخصیص یافته در یک مرحله تولیدی مشخص، پس از تکمیل شدن محصول قرار گرفته در موقعیت قبل آن روی همان ماشین در مرحله تولیدی موردنظر رخ دهد. محدودیت‌های ۹-۱۱ توالی محصولات در محیط تولیدی جریان کارگاهی هیبرید را تعیین می‌کنند. طبق محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱، اگر محصولات مشخصی به ماشین m در مرحله s در دوره t تخصیص یافته باشد، توالی عملیات بر روی ماشین مورد نظر شامل

الگوریتم PSO استفاده شده

○ طرح نمایش جواب

ساختار کلی نمایش جواب استفاده شده برای راه اندازی PSO در شکل ۱ مشاهده می شود. در این ساختار، I و II به ترتیب اندازه انباشته و زمان بندی محصولات را نشان می دهند. مقدار هر ژن در بخش I نشان دهنده میزان محصولات تولیدی (x_{jt}) یا همان اندازه انباشته محصول j برای دوره t است. توالی کارها در هر دوره برای محیط

جریان کارگاهی هیبرید، در هر سطر بخش II شکل ۱ نشان داده می شود، به طوری که $P_{[j]t}$ بیان می کند در دوره t کدام محصول باید در اولویت j قرار گیرد. همان طور که فرض شد، ماشین های موجود در هر مرحله برای مسئله مورد مطالعه، یکسان اند؛ بنابراین، با در نظر گرفتن ترتیب کارهای قرار گرفته در هر دوره، در هر مرحله، ماشینی که زودتر در دسترس باشد برای تخصیص، انتخاب و تعیین می شود.

x_{11}	x_{12}	...	x_{1T}	$P_{[1]2}$	$P_{[2]2}$...	$P_{[N]2}$
x_{21}	x_{22}	...	x_{2T}	$P_{[2]2}$	$P_{[N]2}$...	$P_{[1]2}$
\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
x_{N1}	x_{N2}		x_{NT}	$P_{[1]T}$	$P_{[2]T}$...	$P_{[N]T}$
I				II			

شکل ۱. طرح نمایش جواب برای مسئله

محصول انتخاب شده به صورت تصادفی در یک موقعیت تصادفی جاسازی می شود. اپراتور معکوس (InvO) در جواب جاری محصولات بین دو موقعیت انتخاب شده به صورت تصادفی، معکوس می شوند.

○ شرط توقف

الگوریتم PSO تا زمانی که شرط توقف تأمین شود ادامه می یابد. در این تحقیق، تعداد تکرار (NI) از قبل تعیین شده برای شرط توقف استفاده می شود. رویه PSO در شکل ۲ مشاهده می شود.

انتخاب مناسب پارامترها نقش مهمی در کارایی روش های فرا ابتکاری دارند. تست های اولیه نشان می دهد سطوح ۲۰۰، ۲۵، ۴، ۱، w_{max} ۵ درصد، ۱ و ۱ به ترتیب برای فاکتورهای تعداد تکرار، تعداد ذرات، حد بالای سرعت، حد بالای وزن اینرسی، حد پایین وزن اینرسی، ضریب جزء ادراکی و جزء اجتماعی، نتایج بهتری را تولید می کند.

○ جمعیت اولیه

برای تولید بخش I جمعیت اولیه، یک جواب برابر با مقدار تقاضاها قرار می گیرد و باقی جمعیت به صورت تصادفی تولید می شود. توالی اولیه جواب ها نیز با استفاده از عملگرهای کوتاه ترین زمان پردازش تعدیل شده (MSPT)، طولانی ترین زمان پردازش تعدیل شده (MLPT) و تصادفی تولید می شود [۲۳]. برای استفاده از SPT، LPT و تصادفی به منظور تولید توالی های اولیه، زمان پردازش کل محصول روی تمام ماشین ها با لحاظ کردن اندازه انباشته، زمان تولید مورد نیاز در نظر گرفته می شود.

○ همسایگی برای زمان بندی

در روش PSO، برای تولید یک جواب جدید از جواب جاری برای بخش II، سه ساختار همسایگی متفاوت استفاده می شود. اپراتور تعویض (SO) در جواب جاری موقعیت دو محصول انتخاب شده به صورت تصادفی با یکدیگر تعویض می شوند. اپراتور جاسازی (InsO) در جواب جاری یک

الگوریتم PSO

جمعیت اولیه، اندازه انباشته (x) و توالی (Seq) محصولات تولید و پارامترهای الگوریتم تنظیم شوند.
انجام بده.

برای هر ذره i

ارزیابی برازندگی ذره

تعیین P_i^{k+1} (pbest)

$$P_i^{k+1} = \begin{cases} p_i^k & \text{if } f(X_i^{k+1}) \geq f(p_i^k) \\ X_i^{k+1} & \text{if } f(X_i^{k+1}) < f(p_i^k) \end{cases}$$

پایان

تعیین g_i^{k+1} (gbest)

$$g_i^{k+1} = \arg \min_i f(p_i^k)$$

برای هر ذره i

به روزرسانی سرعت با استفاده از رابطه

$$V_i^{k+1} = w.V_i^k + c_1.r_1(p_i^k - X_i^k) + c_2.r_2(g_i^k - X_i^k)$$

به روزرسانی مکان ذره با استفاده از رابطه

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}$$

تولید همسایه Seqⁿ برای Seq

استفاده از ساختار همسایگی منتخب از SO، InsO و InvO برای تولید

Seqⁿ

پایان

تا زمانی که معیار توقف تأمین نشده است.

ثبت بهترین جواب پیدا شده.

شکل ۲. رویه الگوریتم PSO

• الگوریتم رقابت استعماری

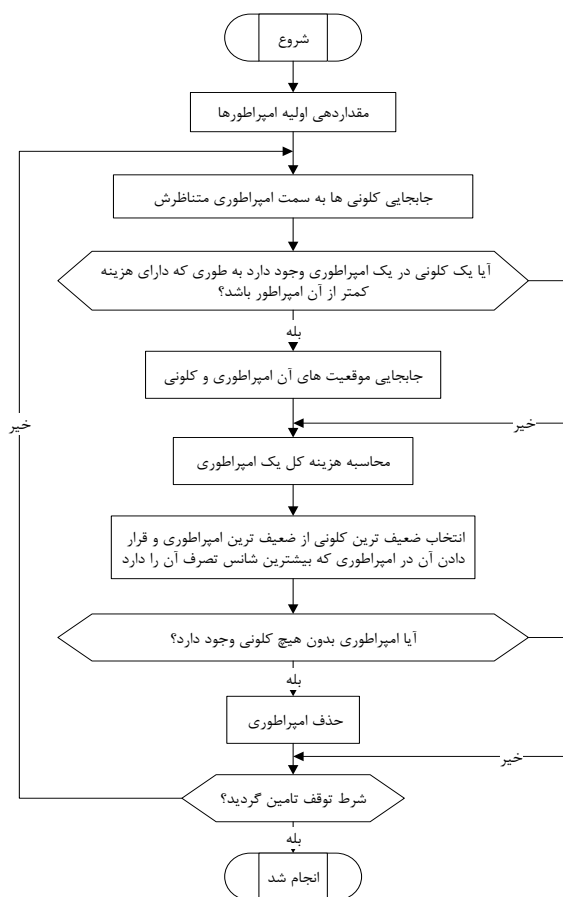
پیشینه الگوریتم ICA

الگوریتم فرا ابتکاری رقابت استعماری (ICA) یک روش محاسباتی تکاملی مبتنی بر جمعیت جواب هاست. الگوریتم رقابت استعماری مانند سایر الگوریتم های جمعیت محور، ابزار بهینه سازی است که انواع مختلفی از مسائل بهینه سازی را حل می کند. این الگوریتم از جدیدترین روش های فرا ابتکاری است که آتشیز گرگری و لوکاس [۲۴] آن را براساس تحولات سیاسی و اجتماعی در سال ۲۰۰۷ توسعه دادند. شکل ۳ فلوجارت الگوریتم پیشنهادی ICA را نشان می دهد.

الگوریتم ICA پیاده سازی شده

○ تولید جمعیت کشورهای اولیه

الگوریتم با تولید کشورهای اولیه به صورت تصادفی آغاز می شود. به منظور شروع به کار الگوریتم تعداد Ncountry جمعیت اولیه به شکل تصادفی تولید می شود. هزینه یک کشور با استفاده از تابع هدف f محاسبه می شود. این تابع در مدل ما همان هزینه های تولیدی کل است. قوی ترین کشورها، کشورهای استعمارگر انتخاب می شوند. N_{imp} تا از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) استعمارگر انتخاب می شود. کشورهای



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی ICA

○ جابه جایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور مستعمره، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از موقعیت کشور استعمارگر برسند. در این حالت، کشور استعمارگر و مستعمره جای خود را با یکدیگر عوض می کنند.

○ قدرت کل یک امپراتوری

قدرت یک امپراتوری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$TC_n = \cos t(\text{imperialist}_n) + \xi \text{mean}\{\cos t(\text{colonies of empire}_n)\} \quad (18)$$

که در آن TC_n هزینه کل امپراتوری n ام و ξ عددی مثبت بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می شود.

باقیمانده (به تعداد $N_{col} = N_{country} - N_{imp}$) کشورهای مستعمره را تشکیل می دهند که هر یک از آن ها به یک استعمارگر تعلق دارد. برای تقسیم مستعمرات در بین استعمارگرها، با داشتن هزینه همه استعمارگرها، هزینه نرمالیزه آن ها با فرمول زیر محاسبه می شود.

$$C_n = \max_i c_i - c_n \quad (15)$$

که در آن c_n هزینه استعمارگر n ام، $\max\{c_i\}$ بیشترین هزینه استعمارگرها و C_n هزینه نرمالیزه شده استعمارگر n ام است. هر امپریالیستی که هزینه بیشتری داشته باشد - که امپریالیست ضعیف تری است - هزینه نرمالیزه کمتری دارد. با داشتن هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه هر استعمارگر به صورت زیر محاسبه می شود و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره بین امپراتورها تقسیم می شوند.

$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^N C_i} \right| \quad (16)$$

تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست از طریق رابطه زیر محاسبه می شود.

$$NC_n = \text{round}\{P_n \cdot N_{col}\} \quad (17)$$

که در آن NC_n ، تعداد مستعمرات امپراتوری n ام و N_{col} نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود است.

○ سیاست جذب (همسان سازی)

سیاست همسان سازی انتخاب شده برای بخش I و همچنین بخش II، استفاده از ادغام دو نقطه ای بین امپراتور مورد نظر و کلونی انتخاب شده است. پس از تغییر زمان بندی، با توجه به ماشین های مشابه در هر مرحله، تخصیص محصولات به ماشین ها براساس زودترین زمان در دسترس ماشین انجام می گیرد.

○ سیاست انقلاب

برای بخش I یعنی تعیین اندازه انباشته، مقداری تصادفی از تقاضا با احتمال مساوی به بخش I اضافه یا از آن کسر می شود. دقت شود اگر مقدار اندازه انباشته تغییر کرده منفی شود با صفر جایگزین می شود. برای انجام دادن سیاست انقلاب برای بخش II (زمان بندی)، سه ساختار همسایگی متفاوت اپراتور تعویض (SO)، اپراتور جاسازی (InsO) و اپراتور معکوس (InvO) استفاده می شود. در این مرحله، نرخ با عنوان نرخ انقلاب در نظر گرفته می شود.

نتایج محاسباتی

در این بخش، عملکرد روش‌های حل پیشنهادی در پیداکردن جواب‌های با کیفیت خوب ارزیابی می‌شود. بدین منظور، ده مسئله تولید شده به صورت تصادفی با اندازه‌های مختلف کوچک و متوسط و بزرگ انتخاب می‌شوند. برای هر اندازه مسئله پنج مثال به صورت تصادفی تولید می‌شود و متوسط نتایج به منزله معیار ثبت می‌شود. پارامترهای مورد نیاز از توزیع‌های یکنواخت زیر مشابه محمدی و همکاران (۲۰۱۱) و رضانیان و همکاران (۲۰۱۳ا) استخراج می‌شود.

$b_{smjt} \approx U(1.5, 2)$, $d_{jt} \approx U(0, 180)$, $h_{jt} \approx U(0.2, 0.4)$, $p_{jsmt} \approx U(1.5, 2)$, $CE_{jt} \approx U(5, 10)$ and $C_{smt} \approx U(a, b)$, $a=200N+100(s-1)$, $b=200N+200(s-1)$.

مدل دقیق پیشنهادی به کمک نرم‌افزار GAMS کدنویسی و حل شد. همچنین، الگوریتم‌های فرا ابتکاری PSO و ICA پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB R2011a کدنویسی شد و تمام تست‌ها روی کامپیوتری با ویژگی‌های Intel Core i3، پردازشگر 2.53 GHz و حافظه موقت 4 GB اجرا شد.

نتایج حل دقیق و روش‌های فرا ابتکاری PSO و ICA در جدول ۱ مشاهده می‌شود. طبق جدول ۱، الگوریتم‌های PSO و ICA برای مسائل با اندازه کوچک قابلیت دستیابی به جواب بهینه را دارند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، میانگین تابع هدف حاصل از الگوریتم ICA پیشنهادی از میانگین تابع هدف حاصل از روش PSO کمتر است؛ بنابراین، روش فرا ابتکاری ICA پیشنهادی برای این مسئله عملکرد بهتری دارد و همچنین این عملکرد بهتر نیز در زمان کوتاه‌تری به دست می‌آید.

• مطالعه موردی سیستم تولیدی صنایع کاشی

صنایع کاشی مرتبط با تولید محصولات سرامیکی از خاک رس است. در سال‌های اخیر، تنوع محصولات افزایش و اندازه دسته کاهش یافته است؛ بنابراین، برنامه‌ریزی تولید از نظر پیچیدگی و هزینه، سخت‌تر و دشوارتر شده است. مطالعه موردی از یک مطالعه موردی واقعی در رساله ریانه [۲۵] الهام گرفته شده است.

○ رقابت استعماری

در تکرار الگوریتم یکی از ضعیف‌ترین مستعمرات ضعیف‌ترین امپراتوری انتخاب می‌شود و برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی میان سایر امپراتوری‌ها ایجاد می‌شود. بدین ترتیب، قوی‌ترین امپراتوری لزوماً مستعمرات مذکور را تصاحب نمی‌کنند، بلکه امپراتوری‌های قوی‌تر احتمال تصاحب بیشتری دارند. به این منظور، هزینه نرمالیزه کشورهای استعمارگر با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$NTC_n = \max\{TC_i\} - TC_n \quad (19)$$

در این رابطه TC_n هزینه کل امپراتوری n ام و NTC_n نیز هزینه کل نرمالیزه شده آن است. هر یک که TC_n کمتری داشته باشد NTC_n بیشتری دارد. NTC_n معادل هزینه کل یک امپراتوری و NTC_n معادل قدرت کل آن است. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره مورد نظر از سوی هر امپراتوری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{pn} = \left| \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \right| \quad (20)$$

خوش‌شانس‌ترین امپراتوری از طریق چرخه رولت انتخاب می‌شود و مستعمره به آن تخصیص می‌یابد.

○ سقوط امپراتوری‌های ضعیف

در جریان رقابت‌های استعماری، امپراتوری‌های ضعیف به تدریج سقوط می‌کنند و مستعمرات آن‌ها به دست امپراتوری‌های قوی‌تر می‌افتد. در این روش، هر امپراتوری که مستعمره‌ای برایش باقی نماند از هم فرو می‌پاشد.

○ معیار توقف

الگوریتم متوقف می‌شود اگر فقط یک امپراتوری باقی بماند یا تکرارها به تعداد مشخصی برسد.

انتخاب مناسب پارامترها نقش مهمی در کارایی روش‌های فرا ابتکاری دارند. تست‌های اولیه نشان می‌دهد سطوح ۵۰، ۲۵، ۶، ۲ و ۰/۲ به ترتیب برای فاکتورهای تعداد تکرار، تعداد کشورها، تعداد امپراتورها، بتا و نرخ انقلاب، نتایج بهتری را تولید می‌کند.

محصول در تمام دوره‌ها یکسان است. زمان‌های پردازش و هزینه‌های تولید به ترتیب در جدول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. ظرفیت ماشین‌آلات در هر دوره در تمام مراحل ۲۴۰۰۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود.

• نتایج محاسباتی مطالعه موردی با روش حل PSO

در این زیر بخش، با استفاده از روش حل PSO تشریح شده در مبحث قبل، مسئله مطالعه موردی صنعت کاشی اشاره شده در زیربخش قبل حل می‌شود. نتایج در جدول‌های ۵ تا ۸ خلاصه می‌شود. زمان حل مسئله مورد نظر ۴۷۹ ثانیه است. در جدول ۵، اندازه انباشته (میزان تولید) برای هر محصول در هر دوره نشان داده می‌شود. همچنین، سطح موجودی و میزان کالایی که باید برای تأمین تقاضای مشتریان به صورت خارجی تأمین شود در این جدول خلاصه می‌شود. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، با توجه به هزینه زیاد تأمین خارجی سهم بیشتر تقاضای مشتریان از طریق استفاده از حداکثر ظرفیت تولید داخلی تأمین شده است.

همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده می‌شود، هرچه هزینه تأمین خارجی کاهش می‌یابد، تولیدکننده به سمت تأمین تقاضا با استفاده از تأمین خارجی پیش می‌رود و هرچه هزینه تأمین خارجی بیشتر می‌شود، تولیدکننده بهتر است تقاضا را با استفاده از تولید تأمین کند.

در جدول ۷، حداکثر زمان تکمیل کارها در دوره‌های ۱-۵ نشان داده می‌شود. با توجه به اینکه ظرفیت در دسترس برای تمام ماشین‌آلات ۲۴۰۰۰ واحد زمانی است، برنامه تولید حاصل از الگوریتم حل برای تمام دوره‌ها شدنی است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، روش حل استفاده شده می‌کوشد تا حد ممکن از ظرفیت در دسترس ماشین‌آلات (۲۴۰۰۰) استفاده کند که در دوره پنجم از ظرفیت در دسترس ماشین‌آلات بیشترین استفاده صورت پذیرفته است. جدول ۸ هزینه‌های کل برنامه تولید تعیین شده و همچنین به تفکیک هزینه‌های تولید، موجودی و تأمین خارجی را نشان می‌دهد.

بررسی اجمالی سیستم تولید صنایع کاشی

طبق شکل ۴، طرح سیستم تولید کاشی به صورت یک محیط جریان کارگاهی هیبریدی چهار مرحله‌ای، مرحله اول پرس (A)، مرحله دوم خط لعاب کاری (B)، بافر میانی (C)، مرحله سوم پخت در کوره (D) و مرحله چهارم مرتب‌سازی و بسته‌بندی (E) خلاصه می‌شود. در صنایع کاشی، مواد خام خاک رس است که از قبل در یک آسیاب کوبیده می‌شود. خاک رس در پرس جایی که کاشی ساخته می‌شود قرار می‌گیرد. سپس کاشی از طریق نقاله منتقل می‌شود. ماشین‌های مختلف در طول نقاله وجود دارند که فعالیت‌های مختلفی را وقتی که یک کاشی از میان آن‌ها می‌گذرد، روی آن انجام می‌دهند. برخی از این ماشین‌ها رنگ (در تصویر با مربع‌های کوچک)، افزودنی خاک ریز مخصوص (در تصویر با دایره‌های کوچک) یا لعاب (مینا) (در تصویر با مربع‌های دوتایی کوچک) را روی قطعات پرس شده قرار می‌دهند. این محصولات ظاهر فیزیکی نهایی کاشی‌ها را تولید می‌کنند. وقتی قطعات به انتهای خط می‌رسند، یک بارکننده آن‌ها را در وسیله هدایت‌شونده خودکار قرار می‌دهد که قطعات را به بافر میانی (C) انتقال می‌دهد. محصولات درون کوره‌های بزرگ (D) جایی که کاشی‌ها با درجه حرارت حدود ۱۵۰۰ درجه سلسیوس پخته می‌شوند، بارگذاری می‌شوند. پس از پخت، قطعات از کوره تخلیه می‌شود و به یک بافر میانی دیگر (C) منتقل می‌شوند. مرحله آخر یک مرکز کاری است که محصولات در آن با استفاده از ماشین‌های اتوماتیک و کانوایر (E) بسته‌بندی و بسته‌بندی می‌شوند (ریانه، ۱۹۹۸؛ رمضانیان، ۱۳۹۲).

داده‌های مطالعه موردی تعدیل شده

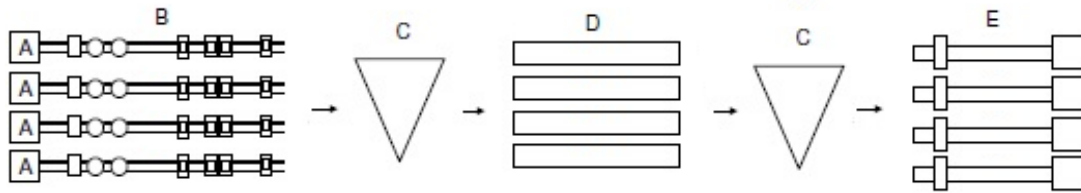
جدول ۲ تقاضا برای ۱۵ محصول که باید در طول ۵ دوره تأمین شوند و همچنین هزینه نگهداری، هزینه تأمین خارجی محصولات و موجودی اولیه در ابتدای افق برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، هزینه‌های نگهداری و تأمین خارجی هر

جدول ۱. مقایسه نتایج برای مسائل (۱۰^۳)

مسئله	اندازه مسئله (N.S.n _S .T)	حل دقیق		روش PSO		روش ICA	
		مقدار هدف	زمان حل (s)	مقدار هدف	زمان حل (s)	مقدار هدف	زمان حل (s)
۱	۲,۲,۲,۲	۵۹۵	۲,۵۴	۵۹۵	۸,۷۸	۵۹۵	۶,۰۸
۲	۳,۳,۲,۳	۸۴۴۹	۱۱,۳۵	۸۴۹۳	۱۶,۶۷	۸۴۴۹,۳	۱۱,۱۵
۳	۵,۳,۲,۳	---	---	۱۵۳۳۳	۲۷,۲۸	۱۰,۷۸۸	۲۵,۱۳
۴	۵,۵,۲,۵	---	---	۴۳۶۲۲	۵۱,۷۵	۳۷۲۱۲	۳۵,۷۱
۵	۷,۵,۲,۵	---	---	۵۹۸۴۰	۹۰,۴۰	۴۱۰۴۸	۷۵,۵۱
۶	۱۰,۵,۲,۵	---	---	۸۴۴۰۰	۱۹۱۵۶	۵۸۳۹۱	۱۳۷,۳۴
۷	۱۰,۷,۲,۷	---	---	۱۵۸۴۶۶	۱۹۵,۷۳	۱۰,۹۳۵۰	۱۵۶,۵۳
۸	۱۰,۱۰,۲,۱۰	---	---	۳۳۵۲۱۰	۲۴۴,۶۱	۲۱۱۹۳۰	۲۱۲,۹۸
۹	۱۰,۱۰,۲,۱۵	---	---	۶۹۸۳۸۰	۵۰۰,۷۹	۴۸۳۸۴۰	۳۴۲,۵۰
۱۰	۱۵,۱۰,۲,۱۰	---	---	۵۱۰۸۸۰	۷۶۵,۲۰	۳۷۲۴۰۰	۴۹۲,۵۲
میانگین		---	---	۱۹۱۹۳۷,۷	۲۰۵,۷۴	۱۳۳۴۰۰,۳	۱۴۹,۴۴

جدول ۲. داده‌های تقاضای محصولات، هزینه موجودی، هزینه تأمین خارجی و موجودی اولیه

محصول (i)	تقاضا d_{jt}					هزینه موجودی h_j	هزینه تأمین خارجی CE_j	موجودی اولیه I_{j0}
	دوره (t)							
	۱	۲	۳	۴	۵			
۱	۸۰۰	۲۲۵	۳۶۰	۲۶۲	۳۲۰	۶۷	۳۸۴	۸۰
۲	۲۴۵	۱۷۰	۲۷۰	۳۰۰	۲۴۰	۶۵	۳۷۰	۱۲۰
۳	۲۷۰	۱۹۰	۳۰۰	۲۶۰	۲۷۰	۶۸	۳۹۰	۸۰
۴	۲۸۵	۳۰۰	۳۲۰	۳۰۰	۲۸۰	۷۰	۳۹۸	۱۵۰
۵	۲۸۰	۴۶۵	۲۶۵	۱۴۰	۲۷۰	۶۶	۳۷۴	۱۲۰
۶	۲۷۰	۲۵۰	۲۴۵	۱۳۵	۲۷۰	۶۴	۳۶۴	۸۰
۷	۲۵۰	۱۸۰	۲۰۰	۱۵۵	۲۵۰	۷۹	۴۴۸	۱۰۰
۸	۲۳۵	۲۰۰	۱۹۵	۱۷۶	۲۴۵	۶۶	۳۷۸	۱۱۰
۹	۲۲۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۵۰	۲۲۰	۱۰۲	۵۸۰	۱۴۰
۱۰	۲۶۵	۳۳۰	۳۱۰	۴۱۵	۱۹۰	۶۷	۳۸۲	۲۵۰
۱۱	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۲۰	۱۴۵	۱۰۵	۵۹۶	۱۰۰
۱۲	۲۷۰	۳۸۵	۳۰۰	۱۵۰	۱۶۰	۹۶	۵۸۴	۱۱۰
۱۳	۳۴۵	۱۴۵	۱۷۵	۲۰۰	۱۷۰	۷۲	۴۱۰	۱۲
۱۴	۴۲۰	۳۰۰	۱۶۵	۲۵۰	۱۶۵	۷۴	۴۲۴	۸۰
۱۵	۲۲۰	۱۵۵	۱۵۵	۱۳۰	۱۶۰	۸۴	۴۷۶	۲۰۰



شکل ۴. چیدمان سیستم تولید کاشی

جدول ۳. زمان پردازش محصولات روی ماشین آلات b_{smj}

محصول (j)	S ₁				S ₂				S ₃				S ₄			
	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄
۱	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۳	۳	۳	۳	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۳	۳	۳	۳	۹	۹	۹	۹
۳	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۶	۶	۶	۶
۴	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۲	۲	۲	۲	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۷	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
۹	۳	۳	۳	۳	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۷	۷	۷	۷
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۳	۳	۳	۳	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۱۱	۷	۷	۷	۷	۳	۳	۳	۳	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۳	۳	۳	۳
۱۲	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۶	۶	۶	۶	۲	۲	۲	۲	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹
۱۳	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۵	۵	۵	۵	۲	۲	۲	۲	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
۱۴	۱	۱	۱	۱	۴	۴	۴	۴	۵	۵	۵	۵	۲	۲	۲	۲
۱۵	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱

جدول ۴. هزینه تولید P_{jms}

محصول (j)	S ₁				S ₂				S ₃				S ₄			
	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄
۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹
۲	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
۳	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳
۴	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳
۵	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
۶	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
۷	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
۸	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
۹	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶
۱۰	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹
۱۱	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
۱۲	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
۱۳	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
۱۴	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹
۱۵	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴

جدول ۵. برنامه تولید، سطح موجودی و میزان تأمین خارجی محصولات در دوره‌های مختلف (PSO)

محصول (j)	تاریخ دوره	اندازه انباشته (X_{jt})					موجودی (I_{jt})					تأمین خارجی (B_{jt})				
		۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
۱		۴۳۴	۲۳۰	۳۳۴	۲۲۱	۳۰۰	۰	۵	۰	۰	۰	۲۸۶	۰	۲۱	۴۱	۲۰
۲		۲۳۹	۱۳۰	۲۱۴	۲۲۸	۱۰۱	۱۱۴	۷۴	۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۵۴	۱۳۹
۳		۲۰۵	۱۵۸	۲۳۴	۱۸۶	۲۹۷	۱۵	۰	۰	۰	۲۷	۰	۱۷	۶۶	۷۴	۰
۴		۲۵۳	۲۸۷	۲۱۱	۲۴۷	۲۵۱	۱۱۸	۱۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۵۳	۲۹
۵		۲۸۰	۳۷۷	۱۴۴	۱۱۱	۱۳۸	۱۲۰	۳۲	۰	۰	۰	۰	۰	۸۹	۲۹	۱۳۲
۶		۱۷۷	۲۱۳	۲۶۰	۱۲۴	۱۹۴	۰	۰	۱۵	۴	۰	۱۳	۳۷	۰	۰	۷۲
۷		۲۲۶	۱۱۷	۱۹۴	۱۵۰	۲۵۵	۷۶	۱۳	۷	۲	۷	۰	۰	۰	۰	۰
۸		۱۴۳	۱۵۲	۱۳۱	۱۶۰	۲۲۹	۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۶۴	۱۶	۱۶
۹		۲۲۳	۱۳۱	۱۴۸	۷۶	۲۲۵	۱۴۳	۸۴	۵۲	۰	۵	۰	۰	۰	۲۲	۰
۱۰		۱۷۸	۱۷۴	۳۱۰	۴۰۲	۱۷۳	۱۶۳	۷	۷	۰	۰	۰	۰	۰	۶	۱۷
۱۱		۱۶۲	۲۵۲	۲۶۰	۱۱۷	۹۲	۰	۰	۰	۰	۰	۳۸	۴۸	۴۰	۱۰۳	۵۳
۱۲		۱۴۷	۳۴۶	۱۸۳	۱۴۷	۱۴۷	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳	۳۹	۱۱۷	۳	۱۳
۱۳		۲۴۷	۱۱۵	۱۴۸	۱۹۱	۱۳۵	۰	۰	۰	۰	۰	۸۶	۳۰	۲۷	۹	۳۵
۱۴		۳۱۷	۱۹۸	۱۱۳	۲۱۲	۱۶۳	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳	۱۰۲	۵۲	۳۸	۲
۱۵		۲۰۹	۶۹	۱۴۲	۸۴	۱۱۷	۱۸۹	۱۰۳	۹۰	۴۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۶. اثر درصد تغییر هزینه تأمین خارجی واحد بر هزینه تولید، هزینه موجودی، هزینه تأمین خارجی و هزینه کل

هزینه تأمین خارجی	هزینه موجودی	هزینه تولید	هزینه کل	درصد تغییر هزینه تأمین خارجی واحد
۳/۵۰×۱۰۶	۰/۰۰	۱/۲۹×۱۰۶	۴/۷۹×۱۰۶	-۳۰
۱/۷۷×۱۰۶	۴/۷۶×۱۰۴	۳/۵۹×۱۰۶	۵/۴۱×۱۰۶	-۲۰
۱/۰۰×۱۰۶	۹/۱۱×۱۰۴	۴/۴۰×۱۰۶	۵/۴۹×۱۰۶	-۱۰
۹/۶۰×۱۰۵	۱/۳۰×۱۰۵	۴/۵۵×۱۰۶	۵/۶۴×۱۰۶	۰
۹/۳۳×۱۰۵	۱/۳۷×۱۰۵	۴/۶۲×۱۰۶	۵/۶۹×۱۰۶	۱۰
۷/۹۱×۱۰۵	۱/۳۸×۱۰۵	۴/۷۳×۱۰۶	۵/۶۶×۱۰۶	۲۰
۷/۳۹×۱۰۵	۲/۰۵×۱۰۵	۴/۸۴×۱۰۶	۵/۷۸×۱۰۶	۳۰

جدول ۷. مقدار C_{max} در دوره‌های مختلف (PSO)

دوره (t)

۱	۲	۳	۴	۵
۲۳۴۳۵	۲۱۶۸۸	۲۲۱۴۰	۲۲۶۲۲	۲۳۹۰۵

جدول ۸. هزینه برنامه تولید تعیین شده (PSO)

هزینه کل	هزینه تأمین خارجی	هزینه موجودی	هزینه تولید
۵,۶۴۴,۰۳۳	۹۶۰,۰۵۲	۱۲۹,۶۱۷	۴,۵۵۴,۳۶۴

محصول در هر دوره نشان داده می‌شود. همچنین، سطح موجودی و میزان کالایی که باید برای تأمین تقاضای مشتریان به صورت خارجی تأمین شود، در این جدول خلاصه می‌شود. همان‌طور که قابل مشاهده است، با توجه به هزینه زیاد تأمین خارجی سهم بیشتر تقاضا از طریق استفاده از حداکثر ظرفیت تولید داخلی تأمین شده است.

• نتایج محاسباتی مطالعه موردی با روش حل ICA در این زیربخش با استفاده از روش حل ICA تشریح شده در می‌بخت قبلی، مسئله مطالعه موردی صنعت کاشی حل می‌شود. نتایج در جدول‌های ۹ تا ۱۱ به صورت خلاصه مشاهده می‌شود. زمان حل مسئله مورد نظر ۳۵۱ ثانیه است. در جدول ۹، اندازه انباشته (میزان تولید) برای هر

جدول ۹. برنامه تولید، سطح موجودی و میزان تأمین خارجی محصولات در دوره‌های مختلف

دوره (t)	اندازه انباشته (X_{jt})					موجودی (I_{jt})					تأمین خارجی (B_{jt})				
	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۲۶۴/۹	۳۰/۹	۰	۰	۲۷۰/۳	۱۸۵/۳	۱۹۱/۳	۰	۰	۷۴/۷	۰	۰	۱۶۸/۷	۲۶۲	۰
۲	۸۹/۷	۴/۷	۴۴/۸	۳۶۱/۶	۲۴/۷	۱۹۵/۲	۸۱/۶	۰	۱۱۵/۹	۲۹	۰	۰	۵۴/۵	۰	۰
۳	۷۹/۶	۰	۷۸/۱	۰	۶۷/۵	۳۳/۳	۰	۰	۰	۰/۸	۰	۷۸/۳	۱۶/۸	۲۶۰	۰
۴	۲۱۵/۳	۱۳۴	۰	۱۳۷/۵	۲۹	۱۴۶/۳	۵۹/۷	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۷	۱۳۰/۲	۲۰۴/۱
۵	۳۳/۴	۰	۶۱/۲	۶۸/۹	۷۳/۶	۱۴۱/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۳۲۳/۶	۶۷/۹	۸/۹	۱۵
۶	۳۸۵/۷	۱۷۵/۲	۰	۹۶/۸	۰	۳۲۲	۴۵۲/۳	۲۰۷/۳	۲۰۴/۸	۶۲/۹	۰	۰	۰	۰	۰
۷	۰	۶۷/۶	۱۲۵/۷	۱۵/۹	۱۰۳/۹	۰	۰	۰	۰	۰/۶	۹۸/۱	۶۶/۱	۴۷/۶	۷۴/۴	۰
۸	۰	۰	۱۴۱/۸	۸۱/۴	۲۳۸/۹	۴۷/۷	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵۲/۳	۱۳	۲۵/۷	۱/۶
۹	۱۰۵/۵	۴۹/۵	۷	۰	۱۹۹/۲	۱۴۲/۷	۷۶/۴	۰	۰	۲۰/۷	۰	۰	۱۰/۹	۱۱۸/۳	۰
۱۰	۲۰۹/۹	۷۳/۱	۰	۱۹۳/۴	۸۰/۹	۳۰۱/۵	۲۲۵/۹	۱۲۹/۱	۰	۳/۴	۰	۰	۰	۱۷/۷	۰
۱۱	۱۵۲/۹	۱۳۳/۹	۳۰/۱	۴۳/۳	۴۳	۱۰۷/۴	۷۹/۸	۱/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۷۱/۳	۲۲/۸
۱۲	۰	۲۸۹/۷	۰	۸۳/۵	۲۶/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶۰	۷۳/۲	۳۰۰	۵/۱	۶۳/۳
۱۳	۰	۱۵	۰	۲۷/۵	۴۸/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۳۳۳	۴۵/۲	۱۷۵	۹۶/۴	۵۱/۸
۱۴	۲/۴	۱۷۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۱/۶	۲۹/۹	۳۶/۹	۱۰۱/۳	۱۱۱/۵
۱۵	۰	۱۱۴/۷	۶۴	۱۰۳/۱	۱۲۵/۴	۱۵۰/۴	۱۲۷/۸	۷۰/۱	۶۷/۶	۵۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۰. مقدار C_{max} در دوره‌های مختلف

دوره (t)	۱	۲	۳	۴	۵
C_{max}	۲۰۹۰۱	۱۴۰۲۷	۸۸۷۴٫۵	۱۹۷۸۵	۱۸۳۰۷

جدول ۱۱. هزینه برنامه تولید تعیین شده

هزینه کل	هزینه تأمین خارجی	هزینه موجودی	هزینه تولید
۳,۷۸۵,۰۰۰	۱,۷۱۰,۱۰۰	۲۹۴,۶۹۰	۱,۷۸۰,۲۰۰

الگوریتم ICA توانسته است مسئله مورد مطالعه را در زمان کوتاه‌تری حل کند. با توجه به جدول حداکثر زمان تکمیل کارها، الگوریتم ICA در تمام دوره‌ها عملکرد بهتری دارد. این الگوریتم قابلیت دارد برنامه تولید را طوری تنظیم کند که فعالیت ساخت در زمان کوتاه‌تری خاتمه یابد. با توجه به اینکه الگوریتم ICA توانسته است با مصرف کمتر ظرفیت در دسترس ماشین‌آلات، تقاضای مشتریان را پاسخ دهد، ظرفیت باقیمانده برای فعالیت‌های حیاتی‌ای مانند نگهداری و تعمیرات، پاسخگویی به تقاضاهای برنامه‌ریزی نشده و... استفاده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم تولیدی چندمحصولی و چنددوره‌ای در محیط جریان کارگاهی هیبرید با محدودیت ظرفیت در دسترس برای ماشین‌آلات در نظر گرفته شد. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی هم‌زمان پیشنهاد می‌شود که قابلیت برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی را به صورت هم‌زمان دارد. هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های تولید، موجودی و تأمین خارجی است. با توجه به پیچیدگی محاسباتی بسیار زیاد مسئله مورد بررسی، برای حل آن الگوریتم‌های بهینه‌سازی گروه ذرات و رقابت استعماری پیشنهاد شد. از این الگوریتم‌ها برای حل یک مطالعه موردی در صنعت کاشی استفاده شده است. همان‌طور که در نتایج مشخص است، الگوریتم رقابت استعماری در تمام دوره‌ها عملکرد بهتری داشته است.

برای مطالعات آتی در مورد این موضوع، می‌توان سایر فرضیات موجود در مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی

در جدول ۱۰، حداکثر زمان تکمیل کارها در دوره‌های ۱ تا ۵ نشان داده می‌شود. با توجه به اینکه ظرفیت در دسترس برای تمام ماشین‌آلات ۲۴۰۰۰ واحد زمانی است، برنامه تولید حاصل از الگوریتم حل برای تمام دوره‌ها شدنی است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، روش حل استفاده‌شده می‌کوشد تا حد ممکن از ظرفیت در دسترس ماشین‌آلات (۲۴۰۰۰ دقیقه) استفاده کند و در دوره اول از ظرفیت در دسترس ماشین‌آلات بیشترین استفاده صورت گرفته است.

جدول ۱۱ هزینه‌های کل برنامه تولید تعیین شده و همچنین به تفکیک هزینه‌های تولید، موجودی و تأمین خارجی را نشان می‌دهد.

• مقایسه نتایج الگوریتم‌های PSO و ICA

همان‌طور که در زیربخش اول نتایج محاسباتی مشاهده می‌شود، الگوریتم ICA به نتایج بهتری با زمان محاسباتی پایین‌تر می‌رسد. در نتیجه، این الگوریتم برای مسئله مورد مطالعه در پژوهش حاضر کارایی و عملکرد بهتری دارد. همچنین، استفاده از دو الگوریتم PSO و ICA برای حل مسئله واقعی صنعت کاشی نشان می‌دهد الگوریتم ICA عملکرد محاسباتی بهتری دارد. یکی از معیارهای عملکردی برای مقایسه دو الگوریتم مقدار تابع هدف است. همان‌طور که جدول‌های زیربخش‌های قبل مشاهده می‌شود، برای مطالعه موردی در نظر گرفته‌شده هزینه کل حاصل از حل از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی گروه ذرات و رقابت استعماری به ترتیب ۵,۶۴۴,۰۳۳ و ۳,۷۸۵,۰۰۰ است. از آنجا که محققان به دنبال کاهش هزینه‌های کل بوده‌اند، الگوریتم رقابت استعماری به نتیجه بهتری رسیده است. الگوریتم PSO مسئله مورد نظر را در ۴۷۹ ثانیه و الگوریتم ICA را در ۳۵۱ ثانیه حل کرده است.

مانند فضای بافر محدود بین ایستگاه‌های کاری و موجود در سیستم‌های تولیدی یکی دیگر از محیط‌های باز محدودیت‌های حمل‌ونقل درون کارخانه را در نظر گرفت و مدل پیشنهادی را توسعه داد. لحاظ کردن عدم قطعیت برای تحقیقات است.

مراجع

1. Wagner, H. M. and Whithin, T. M. (1958). "Dynamic version of the economic lot size model", *Management Science*, Vol. 5, No. 1, PP. 89– 96.
2. Gupta, D. and Magnusson, T. (2005). "The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times", *Computers & Operations Research*, Vol. 32, No. 4, PP. 727– 747.
3. Almada-Lobo, B., Klabjan, D., Carravilla, M. A. and Oliveira, J. (2007). "Single machine multiproduct capacitated lotsizing with sequence-dependent setups", *International Journal of Production Research*, Vol. 45, No. 20, PP. 4873– 4894.
4. James, R. J. W. and Almada-Lobo, B. (2011). "Single and parallel machine capacitated lotsizing and scheduling: New iterative MIP-based neighborhood search heuristics", *Computers & Operations Research*, Vol. 38, No. 12, PP. 1816- 1825.
5. Buschkühl, L., Sahling, F., Helber, S. and Tempelmeier, H. (2010). "Dynamic capacitated lot-sizing problems: A classification and review of solution approaches", *OR Spectrum*, Vol. 32, No. 2, PP. 231– 261.
6. Kimms, A. (1996). "Multi-level, single-machine lotsizing and scheduling (with initial inventory)", *European Journal of Operational Research*, Vol. 89, No. 1, PP. 86– 99.
7. Kimms, A. and Drexl, A. (1998). "Some insights into proportional lotsizing and scheduling", *Journal of the Operational Research*, Vol. 49, No. 11, PP. 1196- 1205.
8. Fandel, G. and Stammen-Hegene, C. (2006). "Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production", *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, No. 2, PP. 308– 316.
9. Mohammadi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Karimi, B. and Torabi, S. A. (2010). "Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the multi-product multi-level capacitated lotsizing problem with sequence-dependent setups", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 21, No. 4, PP. 501– 510.
10. Mohammadi, M., Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T. and Torabi, S. A. (2010). "A new algorithmic approach for capacitated lot-sizing problem in flow shops with sequence-dependent setups", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 1, PP. 201– 211.
11. Clark, A. R. and Clark, S. J. (2000). "Rolling-horizon lot-sizing when setup times are sequence-dependent", *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 10, PP. 2287– 2308.
12. Mohammadi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T. and Jafari, N. (2011). "A genetic algorithm for simultaneous lotsizing and sequencing of the permutation flow shops with sequence-dependent setups", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 24, No. 1, PP. 87– 93.
13. Ramezani, R., Saidi-Mehrabad, M. and Fattahi, P. (2013). "Integrated lot-sizing and scheduling with overlapping for multi-level capacitated production system", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 7, PP. 681- 695.
14. Ramezani, R., Saidi-Mehrabad, M. and Fattahi, P. (2013). "MIP formulation and heuristics for multi-stage capacitated lot-sizing and scheduling problem with availability constraints", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 32, No. 2, PP. 392- 401.
15. Ramezani, R., Shafiei-Nikabadi, M. and Fallah, S. (2014). "Particle swarm optimization algorithm for integrated lot-sizing and scheduling in the flow shop production environment", *Journal of Industrial Engineering (University of Tehran)*, Vol. 48, No. 2, PP. 215- 228.
16. Babaei, M., Mohammadi, M. and Fatemi Ghomi, S. M. T. (2013). "A genetic algorithm for the simultaneous lot sizing and scheduling problem in capacitated flow shop with complex setups and backlogging", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 1- 4, PP. 125- 134.

17. Urrutia, E. D. G., Aggoune, R. and Dauzère-Pérès, S. (2014). "Solving the integrated lot-sizing and job-shop scheduling problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 52, No. 17, PP. 5236– 5254.
18. Wolosewicz, C., Dauzère-Pérès, S. and Aggoune, R. (2015). "A lagrangian heuristic for an integrated lot-sizing and fixed scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 244, No. 1, PP. 3–12.
19. Glover, F. and Kochenberger, G. (2005). *Handbook of metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, Norwell.
20. Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995). "A New Optimizer Using Particles Swarm Theory", *Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* (Nagoya, Japan), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, PP. 39- 43.
21. Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). "Particle Swarm Optimization", *IEEE Conference on Neural Networks*, (Perth, Australia), Piscataway, NJ, IV, PP. 1942- 1948.
22. Shi, Y. and Eberhart, R. C. (1998). "A modified particle swarm optimizer", *In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, PP. 69– 73.
23. Pinedo, M. (2008). *Scheduling: Theory, algorithms and systems*, 3rd edition, Springer.
24. Atashpaz-Gargari E. and Lucas, C. (2007). "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *IEEE Congress on Evolutionary Computation Singapore*, PP. 4661–4667.
25. Riane, F. (1998). *Scheduling hybrid flowshops: Algorithms and applications*, PhD thesis, CREGI-FUCaM, Belgium.

واژگان انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Multi-level Capacitated Lot-sizing Problem
2. Multi-level Discrete Lot-sizing and Scheduling Problem
3. Multi-level Proportional Lot-sizing and Scheduling Problem
4. Multi-level General Lot-sizing and Scheduling Problem
5. Particle Swarm Optimization
6. Imperialist Competitive Algorithm