

## رویکرد یکپارچه زمانبندی و برنامه‌ریزی فرایند بر مبنای تلفیق پایگاه دانش فازی و روش‌های فراابتکاری

داریوش محمدی زنجیرانی\*، مجید اسماعیلیان\*\*، سعیده جوکار\*\*\*

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۲۴

### چکیده

طرح‌ریزی فرآیند شامل تعیین مناسب‌ترین و کارآمدترین فرآیندهای ساخت (مونتاژ) و نیز تعیین توالی آنها به منظور تولید یک محصول (قطعه)، مطابق با مشخصه‌های مورد نیاز است که در مستندات طراحی محصول، ذکر شده است. در مقاله حاضر در رویکردی یکپارچه به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی با در نظر داشتن پارامترهای کیفی موثر در سیستم ساخت و تولید کارگاهی و انعطاف‌پذیر پرداخته شده است. برای حل مسئله، از تلفیق الگوریتم‌های فراابتکاری و سیستم استنتاج فازی در قالب توابع هدف چندگانه و آرمانی شامل کمینه‌سازی هزینه و زمان پردازش قطعات و بیشینه‌سازی مطلوبیت طرح فرایند (از نظر پارامترهای کیفی جریان مواد، پایداری، سهولت جابه‌جایی و ارتباط نظارتی) با استفاده از پایگاه دانش فازی و با توجه به محدودیت‌های سیستمی و آرمانی استفاده شده است. نتایج مطالعه حاکی از آن است که الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید با توجه به مثال موردی ارائه شده نسبت به الگوریتم‌های رقابت استعماری، ازدحام ذرات و کلونی زنبور عسل کارایی بهتری در حل مدل پیشنهادی دارد.

**واژگان کلیدی:** الگوریتم‌های فراابتکاری، برنامه‌ریزی فرایند، پایگاه دانش فازی، رویکرد یکپارچه، زمانبندی، سیستم تولید انعطاف‌پذیر

\* استادیار دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان، (نویسنده مسئول مقاله)

Email: d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

\*\* استادیار دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان، اصفهان

\*\*\* کارشناسی ارشد مدیریت تولید و عملیات دانشگاه اصفهان

## مقدمه

تولید در مفهوم مدرن آن به معنی ساخت قطعه‌ای از مواد اولیه با استفاده از فرآیندها، عملیات، نیروی انسانی و ماشین‌آلات مختلف بر اساس یک نقشه مشخص است. در حین تولید تغییراتی روی ماده اولیه رخ می‌دهد که منجر به تبدیل ماده اولیه به قطعه می‌شود. پس از انجام این فرآیند قطعه باید در بازار دارای قیمت یا ارزش باشد. بنابراین شرط کافی تولید را بایستی افزودن ارزش به ماده اولیه دانست. افزودن ارزش به مواد در حین فرآیند، باید بیش از هزینه فرآیند باشد تا کسب درآمد و سود برای تولید کننده نیز میسر شود. طرح‌های فرآیند می‌تواند به دلیل تفاوت در محدودیت‌های منابع مورد نیاز متفاوت باشند، وسعت و تنوع فرآیندهایی که طرح‌ریزی می‌شوند به تجهیزات فرآیند و قابلیت‌های تکنولوژیکی شرکت تولیدی بستگی داشته و به همین منظور می‌بایست از بین طرح‌های مختلف طرحی را انتخاب کرد که در عین ممکن بودن، هزینه تولید محصول (قطعه) را کمینه کرده و با ترکیبی از معیارهای متعارف، هدف مدل را بهینه‌سازی کند، از اینرو توسعه ساختارهای برنامه‌ریزی فرآیند با هدف بهینه‌سازی هزینه‌های موجود (با توجه به پارامترهای کمی و کیفی تاثیرگذار) و نیز اعمال محدودیت‌های مربوط به ظرفیت انعطاف‌پذیری سیستم تولید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و برنامه‌ریزی مراحل ساخت یکی از با اهمیت‌ترین بخش‌های مربوط به کار تولید است. امروزه در بسیاری از سیستم‌های ساخت و تولید، انعطاف‌پذیری در عملیات ساخت ضروری و در حال افزایش است و بطور همزمان استفاده بهینه از منابع ساخت و تولید نیز در کانون تمرکز قرار داشته و لذا تقارن زمانبندی و برنامه‌ریزی فرآیند اجتناب‌ناپذیر است.

طرح‌ریزی فرآیند شامل تعیین مناسب‌ترین و کارآمدترین فرآیندهای ساخت (مونتاژ) و نیز تعیین توالی آنها به منظور تولید یک محصول (قطعه)، مطابق با مشخصه‌های مورد نیاز است که در مستندات طراحی محصول، ذکر شده است (ادیتن، ۲۰۰۷). زمانبندی نیز در تلاش است تا براساس برنامه تعیین شده فرآیند، تخصیص منابع و زمانبندی بهره‌برداری از آنها برای

عملیات تولید را بر مبنای معیارهای چندگانه (کمی و کیفی) بهینه‌سازی کند (وتنبه، ایدا و ژن، ۲۰۰۵).

از آنجا که مساله برنامه‌ریزی فرآیند و زمانبندی در یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر و یافتن ترکیبی بهینه یا نزدیک به بهینه یکی از مسائل  $Np\_hard$  می‌باشد و یافتن جواب بهینه در زمان معقول با روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی امکان‌پذیر نمی‌باشد، بنابراین برای حل این مساله از روش‌های متاهوریستیک استفاده می‌گردد.

علاوه بر این موضوع، در اکثر پژوهش‌های پیشین نیز طرح‌ریزی فرایند یا بدون توجه به انعطاف‌های مورد نیاز در سیستم تولید انعطاف‌پذیر  $FMS^1$  انجام گرفته و یا دامنه کوچکی از انعطاف‌ها (صرفاً در حوزه کاربرد ماشین‌ها) لحاظ شده و همچنین تاثیر پارامترهای کیفی روی مطلوبیت طرح فرایند اندازه‌گیری نشده است. در این مطالعه سعی بر آن است با اعمال انعطاف‌های مختلف شامل انعطاف ماشین، انعطاف ابزار، انعطاف توالی و انعطاف جهت دسترسی به ابزار ( $TAD^2$ ) و با توجه به تاثیر پارامترهای کیفی بر انتخاب طرح فرایند، زمانبندی و بهینه‌سازی طرح‌ریزی فرایند بصورت یکپارچه و در قالب یک مدل ریاضی دارای توابع هدف چندگانه (آرمانی) انجام شود.

برای ارزیابی کیفیت جواب‌های بدست آمده، مسئله با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی همچون ازدحام ذرات، رقابت استعماری، کلونی زنبور عسل و شبیه‌سازی تبرید حل شده و جواب‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

---

1- Flexible manufacture system

2- tool access direction

## پیشینه پژوهش

زمانبندی<sup>۱</sup> و برنامه ریزی فرایند<sup>۲</sup> یکپارچه

ادغام برنامه ریزی فرایند و زمانبندی یکی از مهمترین توابع برای اجرای برنامه ریزی منعطف در یک محیط تولید کارگاهی است. قابل ذکر است که برنامه ریزی فرایند و زمانبندی به صورت جداگانه و پی در پی انجام می شوند (لی و مک ماهان، ۲۰۰۷).

یکپارچه سازی این دو فعالیت راه کاری موثر برای جلوگیری از تحمل هزینه و تلاشی اضافی ناشی از این نوع تغییرات و استفاده از انعطاف پذیری موجود در راستای بهبود عملکرد سیستم است (وانگ، ونگ و ژانگ، ۲۰۰۷).

سیستم استنتاج فازی<sup>۳</sup>

استنتاج فازی به عنوان فرایند نگاشت مجموعه ای از داده های ورودی به مجموعه ای از داده های خروجی، بر مبنای منطق فازی بیان می شود (کاتاکبارا و اندریتو، ۲۰۰۹). سیستم استنتاج فازی، عموماً متشکل از ۴ بخش اصلی شامل فازی سازی، قوانین فازی، موتور استنتاج فازی و غیر فازی سازی می باشد. ساختار کلی سیستم استنتاج فازی در شکل ۱ ارائه شده است (صابری نصر، رضایی، دشتی و منصوری مجومرد، ۱۳۹۲).



شکل ۱. ساختار کلی سیستم استنتاج فازی (صابری نصر، رضایی، دشتی و منصوری مجومرد، ۱۳۹۲)

- 1- scheduling
- 2- Process planning
- 3 -Fuzzy Inference System

فازی‌سازی: عبارت است از تبدیلی که مقادیر اندازه‌گیری شده را به متغیرهای زبانی به کار رفته در قسمت شرط قوانین فازی تبدیل می‌کند. فازی‌سازی با استفاده از توابع عضویت انجام می‌گیرد (صابری نصر، رضایی، دشتی و منصوری مجومرد، ۱۳۹۲).

قوانین فازی: در سیستم‌های مبتنی بر دانش رابطه بین ورودی و متغیرهای زبانی خروجی، به صورت یک مجموعه فازی اگر-آنگاه بیان می‌شود. در سیستم استنتاج فازی، هر قانون دو قسمت دارد: (۱) شرط (فرض): اگر... (۲) نتیجه: آنگاه... (کاتامبارا و اندریتو، ۲۰۰۹).

موتور استنتاج فازی: عملیات استنتاج قوانین بر عهده سیستم استنتاج یا واحد تصمیم گیرنده است. این سیستم، روش ترکیب قوانین را کنترل می‌کند (ماهاپاترا، ناندا و پانیگرایی، ۲۰۱۱).

غیر فازی‌سازی: این فرایند شامل تبدیل خروجی فازی به یک خروجی قطعی نهایی است (سیلورت، ۲۰۰۰).

در مطالعه حاضر با استفاده از روش مرکز سطح، کمیت فازی با استفاده از رابطه ۱ به کمیت قطعی تبدیل می‌گردد (آکگان، سزار و نفسلیوگلو، ۲۰۱۱):

$$Z_{COA} = \frac{\int \mu_A(z) z dz}{\int \mu_A(z) dz} \quad \text{رابطه ۱}$$

بطوریکه  $Z_{COA}$  مقدار قطعی برای خروجی  $Z$  و  $\mu_A(z)$  تابع عضویت خروجی است.

الگوریتم‌های فراابتکاری

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی ندارند الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری و فوق‌ابتکاری بخش‌بندی می‌شوند. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، قرار گرفتن آنها در بهینه‌های محلی و ناتوانی آنها برای کاربرد در مسائل گوناگون است. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. در واقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برونرفت از بهینه محلی

می‌باشند و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل هستند. در این پژوهش کارایی الگوریتم‌های رقابت استعماری (آتش پز، ۲۰۰۴)، شبیه‌سازی تبرید (زارع مهرجردی، برقی و مومنی، ۱۳۹۰)، کلونی زنبور عسل (گارا بوگا و باستورک، ۲۰۰۷) و ازدحام ذرات (کاوایی، پورموسوی کانی و جهانبانی اردکانی، ۱۳۸۴) مورد بررسی قرار گرفته است.

### پیشینه تجربی

لی و مک ماهان (۲۰۰۷) یک رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی تبرید را جهت بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی یکپارچه ارائه کرده‌اند. و معیارهای عملکرد شامل متوسط زمان تکمیل قطعات، سطح متوازن بهره‌برداری از ماشین‌الات، هزینه تولید و تاخیر در تولید سفارشات در نظر گرفته شده است.

وان و همکاران (۲۰۰۶) برای حل مساله برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی یکپارچه از رویکرد بهینه‌سازی کلونی مورچگان با در نظر گرفتن زمان‌های راه‌اندازی استفاده کرده‌اند، همچنین در این تحقیق منابع خارجی (تولیدکنندگان مستقل) نیز مورد توجه قرار گرفته اند.

وانگ و تیان (۲۰۰۸) برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی یکپارچه از الگوریتم زنتیک با عملگرهای تقاطع و جهش استفاده کرده‌اند و مسیر فرایند مطلوب تولید در کارگاه‌های انعطاف‌پذیری را با استفاده از روش ذکر شده بدست آورده اند.

وانگ و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فرآیند یکپارچه چند هدفه و مسائل زمانبندی را برای یافتن مجموعه راه‌حل‌های تجاری با کیفیت بالا مورد استفاده قرار دادند.

### روش‌شناسی پژوهش

#### فاکتورهای تاثیر گذار در سیستم تولید کارگاهی و انعطاف‌پذیر

برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی به صورت توأم نقش بسیار مهمی در کارا بودن سیستم تولید کارگاهی و انعطاف‌پذیر ایفا می‌کنند. برای یافتن طرح فرایند مناسب باید متغیرهای تاثیرگذار

در توالی اجرای عملیات‌ها بر روی ماشین‌های موجود با چیدمان ثابت به دقت مشخص و کنترل کرد. تعداد، پیچیدگی و طبیعت مبهم بعضی از این متغیرها طراح فرایند را ناچار می‌سازد تا از منطق و نگرش مجموعه‌های فازی به عنوان ابزاری برای فایق آمدن بر این ابهام استفاده کنند. بر مبنای نظریه فازی، برای ارزیابی مطلوبیت یک طرح فرایند، لازم است از تخصیص متغیرهای زبانی به فاکتورهای کیفی تاثیرگذار روی طراحی فرایند، استفاده نمود. جدول ۱ برخی از این فاکتورها را به همراه برجسب‌های زبانی متناظر نشان داده است:

جدول ۱. برجسب‌های زبانی پارامترهای کیفی

معیارهای ارزیابی	برجسب زبانی متناظر
جریان مواد بین دستگاه‌ها	بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا، خیلی بالا
پایداری طرح فرایند	بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا، خیلی بالا
سهولت نظارت	بسیار ضروری، ضروری، متوسط، کم، بسیار کم
سهولت جابه‌جایی در اجرای عملیات	بسیار راحت، راحت، متوسط، سخت، بسیار سخت

### طراحی مدل

بدیهی است تلاش برای پایین نگهداشتن هزینه یا زمان تولید قطعات در سیستم تولید کارگاهی به سهولت تحقق اهداف تولید، بازاریابی و ... نیز منجر می‌شود، در همین راستا در مطالعه حاضر تلاش شده با ادغام دو مساله برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی، همچنین با لحاظ کردن پارامترهای کیفی مورد توجه در تامین احتیاجات توالی، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فرایند در رویکردی فازی و آرمانی پرداخته شود. اهداف تشکیل‌دهنده مدل عبارتند از: بهینه‌سازی مطلوبیت طرح فرایند، کمینه‌سازی کل زمان تکمیل قطعات و سفارشات موجود در سیستم تولید و کمینه‌سازی مجموع موزون هزینه‌های مربوط به تامین انعطاف سیستم تولید (شامل انعطاف ابزار، ماشین، فرآیند و توالی). در بخش‌های زیر به ترتیب احتیاجات مفهومی و فنی مرتبط با هر یک از این اهداف تشریح شده‌اند.

برای اندازه گیری مطلوبیت می توان از فاکتورهایی نظیر جریان مواد بین دستگاه‌ها (ارتباط بین ماشین‌ها)، پایداری برنامه‌ریزی فرآیند نسبت به تغییر در تقاضای محصولات، سهولت نظارت بر توالی اجرای عملیات، سهولت جابه‌جایی در اجرای عملیات روی ماشین‌های مختلف و تعادل بار منابع تولید و ... استفاده کرد. بدیهی است سنجش پارامترهای مورد اشاره که بعضاً کیفی و قضاوتی می‌باشند مستلزم بهره‌گیری از استدلال تقریبی افراد مجرب و ناظر در یک سیستم تولید کارگاهی مفروض (با چیدمان معین) است.

بمنظور تسهیل محاسبات سیستماتیک مطلوبیت در ساختار اجرایی رویکردهای فراابتکاری لازم است به ترکیب دانش افراد خبره و ناظر سیستم تولید (بررسی موردی سیستم تولید معین) در یک پایگاه دانش فازی پرداخته شود. با داشتن اولویت‌های رابطه‌ای بین ماشین‌ها با استفاده از پایگاه دانش فازی، در هر توالی مفروض عملیات پردازشی، مطلوبیت طرح فرایند  $i$  ( $U_i$ ) به عنوان هدفی که الگوریتم فراابتکاری در بین طرح‌های جایگزین فرایند بدنبال بیشینه سازی آن است محاسبه و مورد استفاده قرار می‌گیرد. محاسبه میزان مطلوبیت برای یک طرح فرایند مفروض می‌تواند به شرح زیر می‌باشد:

در ابتدا فاکتورهای تاثیرگذار در توالی عملیات‌ها روی ماشین‌ها با چیدمان ثابت به عنوان متغیرهای ورودی و تاثیرگذار در مطلوبیت توالی عملیات‌ها مشخص می‌شوند. در این مقاله ۴ فاکتور جریان مواد بین دستگاه‌ها، پایداری برنامه‌ریزی فرایند، سهولت نظارت و سهولت جابه‌جایی در اجرای عملیات در نظر گرفته شده‌اند. سپس مقادیر هر یک از فاکتورها برای رابطه بین همه ماشین‌ها با در نظر داشتن جابه‌جایی‌ها و رفت و برگشت‌های عملیات‌های مختلف روی ماشین‌ها با چیدمان ثابت بر مبنای متغیرهای زبانی متناظر با استفاده از اعداد مثلثی فازی و طبق نظر فرد خبره مشخص می‌شوند. درجه اهمیت هر یک از فاکتورها نسبت به یکدیگر برای تمام روابط با استفاده از طیف ساعتی تعیین می‌شود. بر همین اساس درصد وزن هر یک از معیارها برای تمام روابط بدست می‌آید. مرحله بعدی شامل تابع عضویت برای مقدار عددی هر یک از فاکتورها در تمامی روابط بدست می‌آید. بر مبنای تابع عضویت، وزن فاکتورها در هر رابطه بدست می‌آید. پایگاه داده شامل اطلاعات ماشین‌ها (تعداد ماشین‌ها،



اندازه و فاصله بین ماشین‌ها و...) و پایگاه داده متغیرهای فازی شامل نمودارهای مثلثی برای میزان فاکتورها، نمودارهای مثلثی وزن فاکتورها و نمودارهای مثلثی متغیر خروجی که به صورت مقادیر زبانی ضرورت مطلق (A)، بسیار مهم (E)، مهم (I)، معمولی (O)، غیر مهم (U) و نامطلوب (X) اختصاص یافته است، می‌باشد. پایگاه دانش نیز شامل قوانین فازی که به صورت قوانین اگر-آنگاه برای فاکتورها هستند برای تمام روابط موجود توسط نظر فرد خبره تعیین می‌شوند.

بعد از فازی کردن متغیرها و تشکیل پایگاه دانش با استفاده از پایگاه داده به موتور استنتاج نیاز است. موتور استنتاج ورودی‌های فازی را بر اساس قوانین اگر / آنگاه حاصل از پایگاه دانش به خروجی فازی مناسب تبدیل می‌کند. در روش ممدانی، متغیرهای ورودی میزان فاکتورها و وزن فاکتورها برای هر رابطه بوده و متغیر خروجی، نرخ‌های نزدیکی عملیات معینی در رابطه با ماشینهای مستقر، برای هر رابطه می‌باشد. برای هر فاکتور در هر رابطه یک میزان عضویت نهایی برای نرخ نزدیکی دو بخش حاصل می‌شود. با استفاده از روش غیر فازی کننده COA<sup>۱</sup>، خروجی فازی به یک مقدار قطعی تبدیل خواهد شد. در گام نهایی برای هر رابطه، میانگین مقدار قطعی تمام فاکتورها مشخص شده و به عنوان ارزش نهایی نرخ‌های نزدیکی عملیات معین در رابطه با ماشین‌های مستقر، آماده بهره‌برداری در الگوریتم‌های فراابتکاری است.

در الگوریتم‌های فراابتکاری، در هر تکرار، یک جایگشت از توالی عملیات‌های تولید قطعات روی ماشین‌های مختلف بررسی می‌شوند، با مشخص شدن توالی عملیات‌های تولید قطعات بر روی ماشین‌های مستقر در هر تکرار و نرخ‌های نزدیکی بدست آمده در رابطه با ماشین‌های مستقر، میزان مطلوبیت طرح فرایند از مجموع نرخ‌های نزدیکی در هر توالی، مطابق رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$U_i = \sum u_j \quad \text{رابطه ۲}$$

$U_i$ : مطلوبیت طرح فرایند نهایی در جایگشت  $i$ ام

$u_j$ : مطلوبیت توالی دو عملیات  $j$  و  $j-1$

در رابطه با هدف دوم مدل، ضرورت دارد با استفاده از اطلاعات مهم استخراج شده از نقشه‌های فنی (هندسه و ابعاد، تolerانس‌های هندسی، کیفیت سطح مورد نیاز، خصوصیات مواد و تعداد قطعات مورد نیاز) تخصیص عملیات و تعیین توالی عملیات مشخص شود. در همین راستا دسته‌ای از مهمترین انعطاف‌های ضروری در سیستم تولید انعطاف پذیر شامل انعطاف ابزار، ماشین، فرآیند و توالی در قالب یک تابع هدف که بدنبال کمینه‌سازی مجموع موزون هزینه‌های تامین انعطاف<sup>۱</sup> است مدلسازی می‌شوند. هزینه‌های مورد اشاره در رابطه با این هدف، عبارتند از: هزینه بکارگیری ماشین<sup>۲</sup>، هزینه استفاده از ابزار<sup>۳</sup>، هزینه تغییر ماشین<sup>۴</sup>، هزینه جابجایی ابزار<sup>۵</sup> و هزینه تنظیمات مجدد<sup>۶</sup>. در همین راستا پیشنیازهای فرایندی پردازش قطعه در قالب محدودیت‌های سیستمی مدل و به عنوان اولویت‌های عملیات پردازشی تعریف می‌شوند. روابط ریاضی مربوط به تابع هدف در این بخش بشرح روابط تعریف شده در پژوهش لیان، ژانگ و شائو (۲۰۱۲) می‌باشد.

سومین هدفی که الگوریتم‌های فراابتکاری در صدد دستیابی به آن است، تعیین توالی بهینه قطعات (سفارشات) مختلف همزمان با تعیین طرح بهینه فرایند برای آنهاست. توالی بهینه سفارشات، به حداقل شدن متوسط زمان تکمیل (و نیز متوسط تعداد) سفارشات موجود در سیستم تولید خواهد انجامید. در این مرحله با استفاده از برنامه فرایند مربوط به هر قطعه که از مرحله قبل به دست آمده به اولویت‌بندی و زمانبندی پردازش سفارشات روی ماشین‌های در دسترس پرداخته می‌شود. تابع هدف مربوط به این مرحله با توجه به روابط ریاضی تعریف شده در پژوهش لی و مک ماهان (۲۰۰۷) می‌باشد.

- 
- 1- Total weight cost
  - 2- Machine cost
  - 3- Tool cost
  - 4- Machine change cost
  - 5- Tool change cost
  - 6- Set up change cost

بدیهی است برای حل این مساله به روش همگن نیاز است تابع هدف در قالب یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی و به صورت کمینه انحرافات نامساعد از آرمانهای مدل تعریف شود، که با تعریف مقدار آرمانی برای هر یک از اهداف اول تا سوم ( $G_{TWC}$ ,  $G_{MakeSpan}$ ,  $G_U$ )، آنها به محدودیت‌های آرمانی تبدیل شده و به تابع هدف اضافه می‌شوند، محدودیت‌های سیستمی نیز که شامل روابط پیشینازی در توالی اجرای عملیات‌ها می‌باشند توسط یک تابع تعریف شده در برنامه تهیه شده در متلب اعمال می‌شوند. لذا تابع هدف مدل به صورت رابطه ۳ و با مفهوم حداقل‌سازی مجموع موزون انحرافات نامساعد ( $w_i d_i$ ) از آرمان‌های مدل فرموله می‌شود:

$$\text{Min } D = (w_1 \times d_1^+) + (w_2 \times d_2^+) + (w_3 \times d_3^-) \quad (\text{رابطه ۳})$$

Subject to :

$$\begin{aligned} TWC + d_1^+ - d_1^- &= G_{TWC} \\ MakeSpan + d_2^+ - d_2^- &= G_{MakeSpan} \\ U + d_3^+ - d_3^- &= G_U \\ d_1^+ &\geq 0 \\ d_2^+ &\geq 0 \\ d_3^- &\geq 0 \\ d_1^- &\geq 0 \\ d_2^- &\geq 0 \\ d_3^+ &\geq 0 \end{aligned}$$

$w_1, w_2, w_3$  وزن‌های مربوط به هر یک از اهداف هستند که با توجه به اهمیت هر یک از اهداف توسط متخصصین مربوطه تعیین می‌شوند. مقادیر آرمانی ذکر شده نیز توسط نظر متخصصین مربوطه و همینطور با در نظر داشتن بهترین مقدار هر یک از اهداف مستقل در تکرارهای مختلف الگوریتم‌های مورد توجه در حل مساله تعیین می‌شوند.

پس از فرموله‌سازی و نگارش مساله با استفاده از داده‌های موجود و با در نظر داشتن توابع هدف، محدودیت‌های موجود و همچنین اطلاعات بدست آمده از پایگاه دانش فازی، مساله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری حل شده و در نهایت نتایج حاصل از الگوریتم‌های به کار گرفته شده مقایسه می‌شود.

## کاربرد مدل

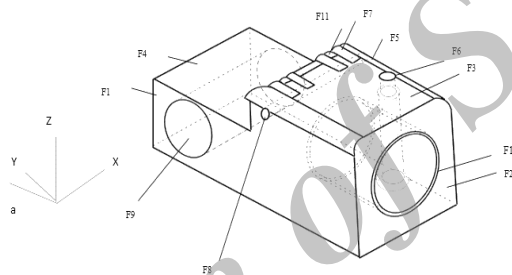
جهت بررسی کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از یک مثال شامل سه قطعه با ویژگی‌های ماشینکاری متفاوت حل شده است. مشخصات ماشین‌ها و هزینه بکارگیری آنها در هر واحد عملیاتی در جدول ۲ نشان داده شده است، شاخص هزینه و زمان تعویض ابزار، تعویض ماشین و تغییر تنظیمات اعداد ثابتی هستند که در جدول ۲ آمده‌اند.

جدول ۲. مشخصات منابع تولید

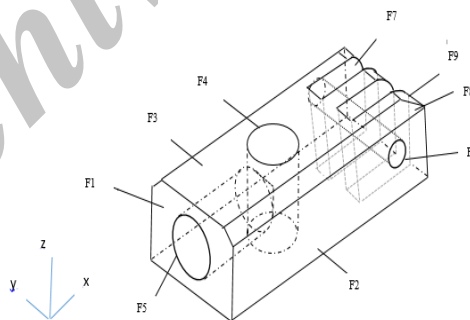
منابع	علامت اختصاری	هزینه به ازای هر عملیات
دستگاه فرز تراش ۱	M <sub>1</sub>	۵۰
دستگاه فرز تراش ۲	M <sub>2</sub>	۶۰
دستگاه چرخ تراش	M <sub>3</sub>	۳۰
دستگاه دریل ستونی	M <sub>4</sub>	۳۵
دستگاه دریل دستی	M <sub>5</sub>	۲۰
دستگاه سنگ فرز	M <sub>6</sub>	۲۰
مته ۱	T <sub>1</sub>	۶
مته ۲	T <sub>2</sub>	۵
مته ۳	T <sub>3</sub>	۱۰
مته ۴	T <sub>4</sub>	۱۵
مته ۵	T <sub>5</sub>	۱۳
مته ۶	T <sub>6</sub>	۱۴
مته ۷	T <sub>7</sub>	۸
مته ۸	T <sub>8</sub>	۱۰
مته ۹	T <sub>9</sub>	۵
سمباده	T <sub>10</sub>	۱۰
قلاویز ۱	T <sub>11</sub>	۱۵
قلاویز ۲	T <sub>12</sub>	۲۰
قلاویز ۳	T <sub>13</sub>	۱۸
تیغه الماسه	T <sub>14</sub>	۱۵
صفحه تراش	T <sub>15</sub>	۱۸

۱۳	T <sub>16</sub>	اسپارک
۲۴	T <sub>17</sub>	سنگ مغناطیسی
SET UP-INDEX=۹۰(s)	MC-INDEX=۱۰(s)	TC-INDEX=۴۰(s)
SCCI=۱۰۰	MCCI=۱۶۰	TCCI=۲۰

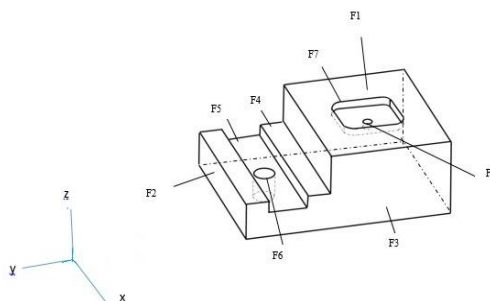
۳ قطعه نشان داده شده در شکل‌های ۲ تا ۴ با مشخصات ارائه شده در جداول ۳ تا ۸ به عنوان ورودی‌های مساله برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی یکپارچه در نظر گرفته شده‌اند. قطعه اول دارای ۱۱ ویژگی ماشینکاری، قطعه دوم دارای ۹ ویژگی ماشینکاری و قطعه سوم دارای ۸ ویژگی ماشینکاری می‌باشد.



شکل ۲: قطعه شماره ۱



شکل ۳: قطعه شماره ۲



شکل ۴: قطعه شماره ۳

جدول ۳: مشخصات فنی قطعه ۱

ویژگی ماشینکاری	عملیات	TAD انعطاف	انعطاف ماشین	انعطاف ابزار	زمان ماشینکاری برای هر یک از ماشین‌های جایگزین (s)	
F <sub>1</sub>	Oper <sub>1</sub>	تراشکاری	-Z	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> , T <sub>15</sub> , T <sub>16</sub> , T <sub>17</sub>	۴۰ و ۳۸
F <sub>2</sub>	Oper <sub>2</sub>	تراشکاری	+Z	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> , T <sub>15</sub> , T <sub>16</sub> , T <sub>17</sub>	۳۷ و ۳۸
F <sub>3</sub>	Oper <sub>3</sub>	تراشکاری	-Z, -y	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> , T <sub>15</sub> , T <sub>16</sub> , T <sub>17</sub>	۴۱ و ۴۳
F <sub>4</sub>	Oper <sub>4</sub>	تراشکاری	+Y, -Z	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> , T <sub>15</sub> , T <sub>16</sub> , T <sub>17</sub>	۳۱ و ۳۰
F <sub>5</sub>	Oper <sub>5</sub>	پرداخت	+Y, -Y	M <sub>6</sub>	T <sub>10</sub>	۴۰
F <sub>6</sub>	Oper <sub>6</sub>	سوراخکاری	-Z	M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub>	T <sub>1</sub>	۴۰ و ۵۰ و ۳۰
	Oper <sub>7</sub>	فلاویزکاری	-Z	M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub>	T <sub>11</sub>	۴۰ و ۵۰ و ۳۰
F <sub>7</sub>	Oper <sub>8</sub>	شیارزدن	-Z, -Y	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> , T <sub>15</sub> , T <sub>16</sub> , T <sub>17</sub>	۵۴ و ۵۲
F <sub>8</sub>	Oper <sub>9</sub>	سوراخکاری	+X, -X	M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub>	T <sub>2</sub>	۲۰ و ۳۰ و ۲۱
F <sub>9</sub>	Oper <sub>10</sub>	سوراخکاری	+X, -X	M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub>	T <sub>3</sub>	۵۰ و ۶۰ و ۴۰
F <sub>10</sub>	Oper <sub>11</sub>	سوراخکاری	+Y	M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	۶۰ و ۵۰ و ۳۰
	Oper <sub>12</sub>	فلاویزکاری	+Y	M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub>	T <sub>12</sub>	۶۰ و ۵۰ و ۳۰
F <sub>11</sub>	Oper <sub>13</sub>	پرداخت	A	M <sub>6</sub>	T <sub>10</sub>	۵۰

جدول ۴: مشخصات فنی قطعه ۲

ویژگی ماشینکاری	عملیات	TAD انعطاف	انعطاف ماشین	انعطاف ابزار	زمان ماشینکاری برای هر یک از ماشین‌های جایگزین (s)	
F <sub>1</sub>	oper <sub>1</sub>	تراشکاری	-y	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۳۰ و ۲۰
F <sub>2</sub>	oper <sub>2</sub>	تراشکاری	+Z	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۳۵ و ۲۹
F <sub>3</sub>	oper <sub>3</sub>	تراشکاری	-y,-z	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۲۹ و ۲۴
F <sub>4</sub>	oper <sub>4</sub>	سوراخکاری	+z,-Z	M <sub>3</sub> ,M <sub>4</sub> ,M <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	۵۷ و ۶۶ و ۵۱
F <sub>5</sub>	oper <sub>5</sub>	سوراخکاری	+x	M <sub>3</sub> ,M <sub>4</sub> ,M <sub>5</sub>	T <sub>5</sub>	۴۱ و ۵۹ و ۳۸
	oper <sub>6</sub>	فلاویزکاری	+x	M <sub>3</sub> ,M <sub>4</sub> ,M <sub>5</sub>	T <sub>13</sub>	۵۲ و ۷۱ و ۴۱
F <sub>6</sub>	oper <sub>7</sub>	سوراخکاری	-y,+y	M <sub>3</sub> ,M <sub>4</sub> ,M <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	۳۰ و ۴۱ و ۲۸
F <sub>7</sub>	oper <sub>8</sub>	شیارزدن	-Z,+z,-x	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۴۷ و ۴۹
F <sub>8</sub>	oper <sub>9</sub>	تراشکاری	A	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۴۰ و ۴۱
F <sub>9</sub>	oper <sub>10</sub>	پرداخت	+X,-X,+y,- y	M <sub>6</sub>	T <sub>10</sub>	۴۰

جدول ۵: مشخصات فنی قطعه ۳

ویژگی ماشینکاری	عملیات	TAD انعطاف	انعطاف ماشین	انعطاف ابزار	زمان ماشینکاری برای هر یک از ماشین‌های جایگزین (s)	
F <sub>1</sub>	oper <sub>1</sub>	تراشکاری	-y,-x	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۳۰ و ۳۵
F <sub>2</sub>	oper <sub>2</sub>	تراشکاری	+z,+x	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۲۸ و ۳۰
F <sub>3</sub>	oper <sub>3</sub>	تراشکاری	+z,+y	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۳۳ و ۳۰
F <sub>4</sub>	oper <sub>4</sub>	تراشکاری	+x,-x	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۲۹ و ۲۵
F <sub>5</sub>	oper <sub>5</sub>	تراشکاری	+x,-x	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۳۷ و ۳۱
F <sub>6</sub>	oper <sub>6</sub>	سوراخکاری	-z,+z	M <sub>3</sub> ,M <sub>4</sub> ,M <sub>5</sub>	T <sub>9</sub>	۵۰ و ۶۰ و ۴۰
F <sub>7</sub>	oper <sub>7</sub>	تراشکاری	-Z	M <sub>1</sub> ,M <sub>2</sub>	T <sub>14</sub> ,T <sub>15</sub> ,T <sub>16</sub> ,T <sub>17</sub>	۴۰ و ۳۹
F <sub>8</sub>	oper <sub>8</sub>	سوراخکاری	-z	M <sub>3</sub> ,M <sub>4</sub> ,M <sub>5</sub>	T <sub>8</sub>	۳۹ و ۵۰ و ۳۸

## جدول ۶. محدودیت‌های پیشنیازی فرایند تولید قطعه ۱

محدودیت‌های اولویت عملیات
Oper <sub>1</sub> اولین عملیات است.
Oper <sub>2</sub> باید قبل از oper <sub>7</sub> , oper <sub>9</sub> انجام شود
Oper <sub>3</sub> باید قبل از oper <sub>5</sub> , oper <sub>9</sub> انجام شود
Oper <sub>4</sub> باید قبل از oper <sub>5</sub> , oper <sub>6</sub> انجام شود
Oper <sub>5</sub> باید قبل از oper <sub>6</sub> انجام شود
Oper <sub>7</sub> باید قبل از oper <sub>8</sub> , oper <sub>10</sub> انجام شود
Oper <sub>8</sub> باید قبل از oper <sub>10</sub> انجام شود

## جدول ۷. محدودیت‌های پیشنیازی فرایند تولید قطعه ۲

محدودیت‌های اولویت عملیات
Oper <sub>1</sub> اولین عملیات است.
Oper <sub>2</sub> باید قبل از oper <sub>4</sub> , oper <sub>5</sub> , oper <sub>11</sub> , oper <sub>12</sub> انجام شود
Oper <sub>3</sub> باید قبل از oper <sub>4</sub> , oper <sub>5</sub> , oper <sub>10</sub> انجام شود
Oper <sub>6</sub> باید قبل از oper <sub>7</sub> , oper <sub>11</sub> , oper <sub>12</sub> انجام شود.
Oper <sub>8</sub> باید قبل از oper <sub>13</sub> انجام شود.
Oper <sub>9</sub> باید قبل از oper <sub>13</sub> انجام شود.
Oper <sub>11</sub> باید قبل از oper <sub>12</sub> انجام شود

## جدول ۸. محدودیت‌های پیشنیازی فرایند تولید قطعه ۳

محدودیت‌های اولویت عملیات
Oper <sub>1</sub> اولین عملیات است.
Oper <sub>2</sub> باید قبل از oper <sub>4</sub> , oper <sub>5</sub> انجام شود
Oper <sub>3</sub> باید قبل از oper <sub>4</sub> , oper <sub>5</sub> انجام شود
Oper <sub>4</sub> باید قبل از oper <sub>5</sub> , oper <sub>6</sub> انجام شود
Oper <sub>5</sub> باید قبل از oper <sub>6</sub> انجام شود
Oper <sub>7</sub> باید قبل از oper <sub>8</sub> انجام شود



برای محاسبه میزان مطلوبیت هر طرح فرایند، بر مبنای پارامترهای کیفی موثر در توالی عملیات پردازش هر قطعه، شامل فاکتور جریان مواد بین دستگاه‌ها، پایداری برنامه‌ریزی فرایند، سهولت نظارت و سهولت جابه‌جایی در اجرای عملیات، به ازای استفاده از تجهیزات و ماشین‌آلات موجود، توابع عضویت برای میزان هر پارامتر به صورت مثلثی تعریف شده و مجموعه مرجع (سطح تکیه گاه) برای تمامی این پارامترها [۰ و ۵] در نظر گرفته شده است. تابع عضویت برای وزن پارامترها نیز به صورت مثلثی تعریف شده و مجموعه مرجع آن در بازه [۰ و ۱] در نظر گرفته شده است. تابع عضویت برای نرخ‌های نزدیکی عملیات معینی در رابطه با ماشین‌های مستقر به صورت مثلثی تعریف شده و در بازه [۰ و ۵] تنظیم شده است. در نهایت برای محاسبه نرخ‌های نزدیکی عملیات معین در رابطه با ماشین‌های مستقر قوانین فازی "اگر - آنگاه" برای میزان هر پارامتر و وزن آن نیز تعریف شده است. که با به دست آوردن نرخ‌های نزدیکی عملیات معین در رابطه با ماشین‌های مستقر از منظر هر یک از پارامترها در نهایت میانگین هر ۴ پارامتر به عنوان نرخ نزدیکی نهایی توالی عملیات‌های معین در رابطه با ماشین‌های مستقر معرفی می‌شود. به طور مثال قوانین فازی برای پارامتر جریان مواد به شرح جدول ۹ می‌باشد.

جدول ۹. قوانین اگر - آنگاه برای پارامتر جریان مواد

وزن/جریان مواد	بسیار پایین	پایین	متوسط	بالا	بسیار بالا
بسیار پایین	X	X	U	O	I
پایین	X	U	O	I	I
متوسط	U	O	I	I	E
بالا	O	I	I	E	E
بسیار بالا	I	I	E	E	A

### یافته‌های پژوهش

برای بدست آوردن نرخ نزدیکی نهایی توالی عملیات‌های معین در رابطه با ماشین‌های مستقر با توجه به پارامترهای جریان مواد، پایداری، سهولت جابه‌جایی و ارتباط نظارتی ابتدا مقادیر هر یک از پارامترها در مقایسه دودویی ماشین‌آلات موجود با استفاده از متغیرهای زبانی تعریف شده توسط مصاحبه و توافق جمعی متخصصین کارگاه قطعه‌سازی تعیین شده است. توابع عضویت برای میزان هر پارامتر، وزن هر پارامتر و نرخ‌های نزدیکی هر پارامتر برای همه روابط موجود بین ماشین‌آلات به ترتیبی که گفته شد تعریف شده است، با استفاده از مقادیر و وزن‌های بدست آمده برای هر یک از پارامترها در هر یک روابط بین ماشین‌آلات، سیستم استنتاج فازی با استفاده از قوانین اگر آنگاه تعریف شده برای هر یک از پارامترها، نرخ‌های نزدیکی هر یک از پارامترها در هر یک از روابط را به صورت فازی محاسبه کرده و با استفاده از روش COA مقادیر بدست آمده را دیفازی کرده است، در نهایت از مقادیر دیفازی شده نرخ‌های نزدیکی در تمام روابط بین ماشین‌آلات برای هر یک از پارامترها میانگین گرفته و به عنوان نرخ نزدیکی نهایی توالی عملیات‌های معین در رابطه با ماشین‌های مستقر در هر یک از روابط بین ماشین‌آلات معرفی شده است که به شرح جدول ۱۰ بدست آمده است. که به عنوان یکی از ورودی‌های الگوریتم جهت بهینه کردن میزان مطلوبیت توالی عملیات‌ها بر روی ماشین‌آلات مستقر از نظر پارامترهای جریان مواد، پایداری، سهولت جابه‌جایی و ارتباط نظارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این صورت که پس از مشخص شدن توالی عملیات‌ها، توالی استفاده از ماشین‌آلات مشخص شده و با استفاده از نتایج بدست آمده در جدول ۱۰ در همه توالی‌های موجود اعداد مربوطه از جدول استخراج شده و مجموع آنها به عنوان مطلوبیت طرح از لحاظ پارامترهای گفته شده معرفی می‌شود.

جدول ۱۰. نرخ نزدیکی بین ماشین‌ها

	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
$M_1$	۱/۸۲	۱/۶۳	۱/۴۳	۱/۸۰	۱/۸۴	۱/۳۷
$M_2$	۱/۶۳	۱/۸۲	۱/۴۳	۱/۸۰	۱/۸۴	۱/۳۷
$M_3$	۰/۸۱	۰/۸۱	۱/۰۴	۰/۸۱	۰/۸۱	۲/۵۴
$M_4$	۰/۷۹	۰/۷۹	۱/۶۰	۱/۵	۱/۵۰	۱/۹۰
$M_5$	۰/۷۳	۰/۷۳	۱/۶۰	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۹۰
$M_6$	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۹	۰/۹	۱/۸۹	۲/۱۷

در پژوهش مورد بحث هدف یافتن مناسب‌ترین طرح فرایند ممکن شامل توالی عملیات‌ها برای تولید قطعات، همراه با ماشین و ابزار و جهت دسترسی به ابزار برای هر عملیات و زمانبندی تخصیص و توالی عملیات‌های موجود بر روی ماشین‌آلات می‌باشد. بطوریکه اهداف شامل کمینه‌سازی هزینه و زمان پردازش قطعات و بیشینه‌سازی مطلوبیت طرح فرایند (از نظر پارامترهای کیفی جریان مواد، پایداری، سهولت جابه‌جایی و ارتباط نظارتی) با استفاده از پایگاه دانش فازی می‌باشد. که معیار محاسبه مقدار هدف، مجموع موزون انحرافات از آرمان‌های مقدار هزینه و زمان پردازش قطعات و نیز مطلوبیت طرح فرایند می‌باشد. مقادیر آرمانی هر یک از اهداف با توجه به نظر متخصصین تولید قطعات مورد مطالعه و در تکرارهای مختلف الگوریتم مطابق جدول ۱۱ تعیین شده‌اند.

جدول ۱۱. مقادیر آرمانی و درجه اهمیت هر یک از اهداف

ردیف	هدف	مقدار آرمانی	درجه اهمیت ( $w_j$ )
۱	TWC	۶۰۰۰	۱
۲	MakeSpan	۱۰۰۰	۲
۳	U	۱۰۰	۱۰

برای حل مساله با استفاده از هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری ابتدا باید پارامترهای الگوریتم معرفی شود و ذکر این نکته ضروریست که تنظیم پارامترها برای هر یک از

الگوریتم‌ها برای حل مساله مورد نظر از طریق حل مسائل متعدد صورت گرفته است، پارامترهای استفاده شده برای هر یک از الگوریتم‌ها به شرح جدول ۱۲ است.

جدول ۱۲. پارامترهای تنظیم شده برای هر یک از الگوریتم‌ها

نوع الگوریتم	پارامترها
رقابت استعماری	تعداد کل کشورها=۶۰ تعداد امپریالیست‌ها=۲۰ تعداد تکرار=۳۰۰ بتا=۱/۵ احتمال انقلاب=۰/۵ Zeta=۰/۰۵
کلونی زنبور عسل	تعداد جمعیت اولیه=۹۰ تعداد تکرار=۴۰۰ حد (limit)=۳۰
ازدحام ذرات	تعداد جمعیت اولیه=۲۰ تعداد تکرار=۳۰۰ $1=W$ $0/2=C1$ $0/4=C2$
شیشه سازی تبرید	تعداد جمعیت اولیه=۱۵ تعداد نقاط همسایگی=۱۵ تعداد تکرار=۲۰۰ آلفا=۰/۹۸

برای حل مسئله برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی یکپارچه با در نظر داشتن پارامترهای کیفی بیان شده به صورتی که در زیر بیان شده است به بهینه‌سازی مساله پرداخته می‌شود:

برای استفاده از هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری در ابتدا دسته‌ای از جواب‌های ممکن به صورت اولیه ایجاد می‌شود. به اینصورت که برای حل مسئله در مرحله اول برای یافتن توالی

انجام عملیات‌ها به تعداد عملیات‌های موجود متغیرهای مسئله بین صفر و یک قرار داده شده و ترتیب این اعداد به عنوان توالی عملیات‌ها در نظر گرفته می‌شود. در ادامه جهت تخصیص ماشین و ابزار و انتخاب جهت دسترسی به ابزار از تابع randi برای انتخاب تصادفی بین ماشین و ابزار و جهت دسترسی به ابزار جایگزین برای هر عملیات استفاده می‌شود. جهت رعایت محدودیت‌ها و روابط پیشینازی توالی عملیات‌ها، ترتیب و توالی بدست آمده عملیات‌ها با استفاده از یک تابع تعریف شده تبدیل به یک توالی ممکن از لحاظ محدودیت‌های پیش‌نیازی می‌شود.

برای حل مساله برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی یکپارچه، ابتدا طرح فرایند برای همه قطعات به شرحی که در بالا اشاره شد مشخص شده و سپس جهت زمانبندی توالی و تخصیص عملیات-های قطعات بر روی ماشین‌آلات با استفاده از یک تابع تعریف شده، زمان شروع هر عملیات و زمان ماشینکاری برای هر عملیات پس از تعیین ماشین تخصیص یافته از روی طرح فرایند بدست آمده، مشخص شده و با استفاده از توابع تعریف شده مربوط به زمانبندی به حل مساله پرداخته می‌شود. همانطور که گفته شد برای شروع الگوریتم باید یک جمعیت اولیه از جواب‌های ممکن ایجاد شود. بنابراین به تعداد جمعیت اولیه (با توجه به الگوریتم مورد استفاده) ماتریس اولیه شامل توالی عملیات‌ها با لحاظ ماشین، ابزار و جهت دسترسی به ابزار مربوط به هر یک و زمان‌های شروع، پردازش و زمان انتظار برای هر یک از عملیات‌ها تشکیل می‌شود.

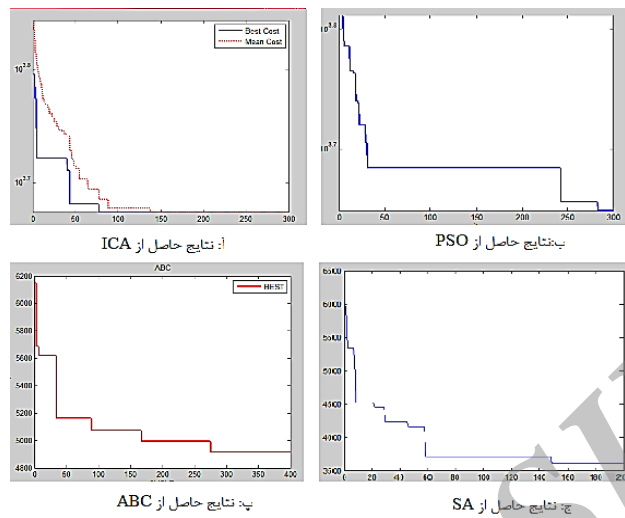
سپس با توجه به الگوریتم مورد استفاده جهت یافتن نقطه بهینه مساله، یک سری عملیات در هر تکرار (تعداد تکرار برای هر یک از الگوریتم‌ها مطابق جدول ۱۲ تعیین شده است)، بر روی جمعیت ایجاد شده برای هر یک از الگوریتم‌ها انجام می‌شود، هنگام حل مساله با استفاده از هر یک از الگوریتم‌های مورد استفاده، بهترین نقطه نگهداری می‌گردد و جواب نهایی الگوریتم، معادل مقدار تابع هدف در آن نقطه می‌باشد.

با استفاده از داده‌های موجود، توابع هدف، محدودیت‌های پیشینازی عملیات و محدودیت-های ارمانی، مسئله مورد اشاره فرموله شده و بر مبنای هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری (با

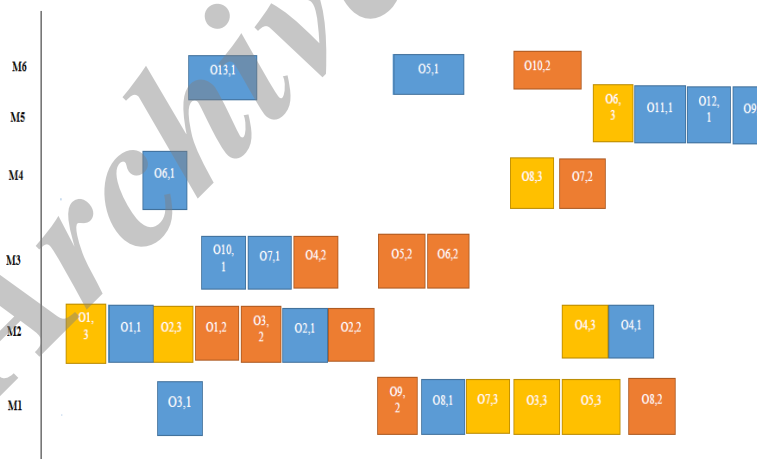
استفاده از نرم افزار متلب) حل شد. با توجه به جواب های حاصل (مطابق جدول ۱۳ و شکل ۵) نتایج حاکی از آن است که الگوریتم شبیه سازی تبرید نسبت به سه روش دیگر با تعداد تکرار پایین تر و سرعت بالاتری جواب های مقبول تری برای هر یک از اهداف مورد نظر برای مساله به دست داده است در نتیجه الگوریتم شبیه سازی تبرید به منظور بهینه سازی مساله مورد بحث مناسب تر تشخیص داده شد.

جدول ۱۳. جواب های حاصل از حل تابع چند هدفه توسط الگوریتم های مختلف

انحراف از مقدار آرمانی زمان نهایی تولید قطعات	انحراف از مقدار آرمانی مطلوبیت از لحاظ پارامترهای کیفی	مطلوبیت از لحاظ پارامترهای کیفی	انحراف از مقدار آرمانی هزینه تولید قطعات	هزینه تولید قطعات	رقابت
۱۸۷۴	۲۸۷۴	۴۵/۲۲	۲۷۸۲	۸۷۸۲	رقابت
۱۱۰۳	۲۱۰۳	۴۴/۱۱	۲۱۵۲	۸۱۵۲	کلونی زنبور عسل
۱۰۰۲	۲۰۰۲	۴۳/۹۸	۱۸۸۲	۷۸۸۲	ازدحام ذرات
۱۰۵۰	۲۰۵۰	۴۵/۹۲	۹۷۲	۶۹۷۲	شبیه سازی تبرید



شکل ۵. نتایج بدست آمده توسط هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری با استفاده از تابع هدف چندگانه جواب نهایی مساله توسط حل تابع چند هدفه با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، بر روی یک نمودار گانت، که محور افقی آن زمان و محور عمودی نشان دهنده ماشین تخصیص داده شده برای هر عملیات می‌باشد ترسیم شده است، نمودار گانت نشان داده شده در شکل ۶ نشان دهنده توالی و تخصیص عملیات-های قطعات به ماشین آلات در تکرار نزدیک به بهینه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌باشد.



شکل ۶. نمودار گانت تخصیص و توالی عملیات‌ها به ماشین‌آلات ( $O_{i,j}$ : نشان دهنده شماره عملیات.  $j$  نشان دهنده شماره قطعه)

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

از جمله عوامل موثر در سیستم تولید کارگاهی، برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی می‌باشد. برنامه‌ریزی فرایند به دنبال یافتن طرحی برای پردازش قطعات یا سفارشات با کمترین هزینه و بیشترین مطلوبیت بازای نحوه بهره‌برداری از ماشین‌ها و ابزار است، زمانبندی نیز در صدد تحقق اهداف کمی تولید و نیز کسب اهدافی همچون حداقل‌سازی زمان نهایی تکمیل قطعات، حداقل‌سازی متوسط تعداد قطعات موجود در سیستم و متعادل‌سازی بار کاری ماشین‌ها و... می‌باشد. در مطالعه حاضر با در نظر داشتن ابعاد کیفی موثر در برنامه‌ریزی فرایند، به طراحی مدلی چند هدفه و یکپارچه برای حل همزمان زمانبندی و برنامه‌ریزی فرایند پرداخته شد. اهداف مدل شامل مینیم کردن هزینه‌های عملیاتی، مینیم کردن زمان تولید نهایی و حداکثرسازی مطلوبیت طرح فرایند نهایی بود. بدیهی است حل مسئله مورد اشاره به کمک روش‌های ریاضی امکان‌پذیر نیست و در نتیجه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری همچون رقابت استعماری، ازدحام ذرات، شبیه‌سازی تبرید و کلونی زنبور عسل به حل این مسئله پرداخته شد.

پارامترهای کیفی مدل بر اساس سیستم استنتاج فازی محاسبه و پس از تامین سایر ورودی‌های مدل و حل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ذکر شده، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی تبرید جواب بهینه مساله حاصل شد.

نتایج بدست آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نسبت به سایر روش‌ها، جواب‌های مقبول‌تری به دست داده است همچنین نتایج حاکی از آن است که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با تعداد تکرار پایین‌تر و سرعت بالاتری نسبت به بقیه الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده در این تحقیق به جواب نزدیک به بهینه رسیده است.

صرفنظر از اینکه در تحقیقات قبلی، در زمینه یکپارچه‌سازی و حل همزمان مسائل زمانبندی و برنامه‌ریزی فرایند و با در نظر گرفتن تابعی چند هدفه با معیارهایی همچون هزینه، زمان و مطلوبیت مورد مشابهی مشاهده نشده، اعمال پارامترهای کیفی موثر بر برنامه‌ریزی فرایند بر



مبنای پایگاه دانش فازی نیز در برنامه‌ریزی فرایند بدیع می‌باشد. نظر به اینکه در عصر حاضر با توجه به افزایش رقابت و پیشرفت صنایع قطعه‌سازی در فعالیتهای تولیدی به بحث برنامه‌ریزی فرایند و زمانبندی توجه عمده‌ای معطوف است، استفاده از مدل ارائه شده در این تحقیق جهت بهینه‌سازی هزینه، زمان و مطلوبیت طرح‌های فرایند در امر تولید به مدیران صنایع قطعه‌سازی توصیه می‌شود.

Archive of SID

## منابع

Adithan, M. (2007). Process Plsnning and Cost Estimation. *Publishing for one world new age international (P) limited*, publishers.

Chan, T. S ; Kumar,V; Tiwari ,M. K.(2006). Optimizing the Performance of an Integrated Process Planning and Scheduling Problem: An AIS-FLC based Approach, *1-4244-0023-6/06/\$20.00 © IEEE*

Khoshnevis, B.(2000). Integration of process planning and scheduling a review, *Journal of Intelligent Manufacturing* , 11, 51-63

Li, W. D; McMahan, C. A. (2007). A simulated annealing-based optimization approach for integrated process planning and scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20:1, pp.80-95,

Lian, K; Zhang, Ch; Shao, X; & Gao,L. (2012). Optimization of process planning with various flexibilities using an imperialist competitive algorithm. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 815–828, DOI 10.1007/s00170-011-3527-8.

Wan, S.Y; Wong, T.N; Zhang,S; Zhang,L(2006). Integrated Process Planning and Scheduling whit Setup Time Consideration by Ant Colony Optimization. *Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering*

Wang, Y.F; Zhang, Y.F; & Fuh, J.Y.H. (2010). A PSO-based multi-objective optimization approach to the integration of process planning and scheduling. *IEEE International Conference on Control and Automation*, Xiamen, China, June 9-11.

Wang,Zh;Tian,j.(2008). The research about integration of process planning and production scheduling based on genetic algorithm, *International Conference on Computer Science and Software Engineering*

Zhao, F; Zhang,Q; & Yang,Y. ( 2006). An improved particle swarm optimization(PSO) algorithm and fuzzy inference systems based approach to process planning and production scheduling integration in holonic manufacturing system (HMS). *Machine Learning and CyberneticsInternational Conference*, 13-16 Aug, pp.396 – 401.

Akgun, A., Sezer, E.A., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., and Pradhan, B. (2011). An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Computers & Geosciences, Article in press.*

Katambara, Z, and Ndiritu, J. (2009). A fuzzy inference system for modeling streamflow: *Case of Letaba River, South Africa. Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 34, pp. 688-700.

Mahapatra, S.S., Nanda, S.K., and Panigrahy, B.K. (2011). A Cascaded Fuzzy Inference System for Indian river water quality prediction. *Advances in Engineering Software*, Vol. 42, pp. 787-796.

Silvert, W. (2000). Fuzzy indices of environmental conditions, *Ecological Modelling*, Vol. 130, No. 1-3, pp. 111-119.

Atashpaz Gargari.E, (2008) "social optimization algorithm development and performance review," MS Thesis, School of Electrical and Computer Engineering Tehran University, In Persian

Zare mehrjerdi. Y, Barghi.sh, momeni. H, (2011), "The use of innovative methods to solve problems like slow cooling of the supply chain", Faculty of Engineering, University of Yazd, Journal of Operations Research and Applications, Issue 3, In Persian

Kashefi.A, Pormosavi.S.A, Jahanbani ardakani.A, (2007), "Training a multilayer neural networks using particle swarm algorithm", Amirkabir University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Intelligent Systems Conference, Ferdowsi University of Mashhad, In Persian