

طراحی یک مدل ریاضی جدید چندهدفه برای زمان بندی ماشین آلات چندکاره با در نظر گرفتن کیفیت قطعات تولیدی

محمد اسفندیار

دانشجوی دکتری مدیریت تحقیق در عملیات، پردیس بین الملل، دانشگاه فردوسی مشهد، Mohammad.esfandiar@mail.um.ac.ir

مصطفی کاظمی

(نویسنده مسئول)، استاد دانشکده علوم اداری و اقتصاد، گروه مدیریت دانشگاه فردوسی مشهد*

بهمن نادری

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، bahman.naderi@aut.ac.ir

علیرضا پویا

استاد دانشکده علوم اداری و اقتصاد، گروه مدیریت دانشگاه فردوسی مشهد، alirezapooya@gmail.com

چکیده: هدف این مقاله طراحی یک مدل برنامه ریزی ریاضی چندهدفه برای زمان بندی ماشین آلات چندکاره در یک سلول تولیدی است. بدین منظور، یک الگوریتم علف هرز مهاجم چندهدفه ارائه شد و نتایج حل آن با الگوریتم های ازدحام ذرات چندهدفه و ژنتیک مقایسه گردید. با توجه به روش تاگوچی، پارامترهای الگوریتم تنظیم گردید. نوآوری این مقاله از یک سو، در اجرای ایده سرعت پردازش ماشین آلات در تولید قطعات با کیفیت های متفاوت است. به عبارت دیگر، برای تضمین کیفیت، سرعت پردازش و میزان بارگیری در ماشین تنظیم می گردد و از سوی دیگر، الگوریتم چندهدفه با ساختار جدید کروموزومی برای بهینه سازی مدل طراحی شد. برای تحلیل عملکرد الگوریتم های حل، سی مسئله نمونه با ابعاد مختلف، طراحی و هریک ده نوبت اجرا شد. تحلیل نتایج نشان داد الگوریتم مبتنی بر علف هرز مهاجم چندهدفه بیش از سایر الگوریتم ها قادر به حل و پاسخ گویی به مسائل بوده است.

واژگان کلیدی: زمان بندی، مدل سازی ریاضی، ماشین چندکاره، تولید انعطاف پذیر، کیفیت قطعات

۱- مقدمه:

با وجود فناوری های نوین، دستگاه های تولیدی سنتی مثل تولید کارگاهی و خط تولید سنتی، پاسخ گوی مناسبی برای چنین شتاب روبه رشد نخواهند بود. یکی از راه کارهای مناسب می تواند تولید سلولی باشد. این رهیافت هم انعطاف پذیری سیستم تولید کارگاهی و هم میزان تولید انبوه در سیستم خط تولید را به دنبال دارد [۲].

امروزه، همگام با توسعه تکنولوژی و فناوری های پیشرفته، دستگاه های تولید نیز تغییرات بسیاری را تجربه کرده اند. با ظهور فناوری های تولیدی جدید، مسائل جدیدی نیز ایجاد شده است. سازمان ها برای دستیابی به مزیت نسبی در بازار جهانی نیازمند به کارگیری روش هایی هستند که مطلوبیت نهایی محصول را حفظ نمایند [۱].

*. (Corresponding Author) kazemi@um.ac.ir

به طور دقیق، یک ماشین ابزار می تواند عملیات مختلف را با استفاده از هر یک از واحد ابزارهای خود در بخش بارگذاری شده روی بخش نگهدارنده انجام دهد یا اینکه عملیات مختلفی را در بخش بارگذاری شده در دیگر بخش نگهدارنده ها پردازش کند [۵]. با وجود اینکه کارگاه های تولیدی پیشرفته به طور مستمر کاربرد ماشین آلات چندکاره را در خطمشی خود قرار داده اند؛ اما مطالعات کمی در مورد بهینه سازی این نوع دستگاه ها وجود دارد [۴].

پیشینه پژوهشی موضوع نشان می دهد مطالعات صرفاً به بیان یک معیار برای زمان بندی اکتفا کرده اند؛ در حالی که برحسب توضیح این مقاله، ماشین های چندکاره دارای اهداف متعددی هستند؛ بنابراین بر اساس راهبرد تولید؛ معیاری از اهمیت حداکثری برخوردار است که با حداقل کاراکتر، حداکثر اهداف را دربرگرفته و تبیین نماید. به طور کلی، برای مقوله بهینه سازی معیارهای مختلفی را می توان در نظر گرفت. در این راستا، برنامه های از نظر زمانی برای حداکثر کردن مطلوبیت مشتری بهینه است که نیازهای ادراک شده مشتری را سازگار با درخواست آن ها همراه با لحاظ اهداف متعدد در نظر بگیرد. در این بین افراد خبره و کارشناس قادر به انتخاب گزینه مناسب و باکیفیت برای زمان بندی بهینه هستند.

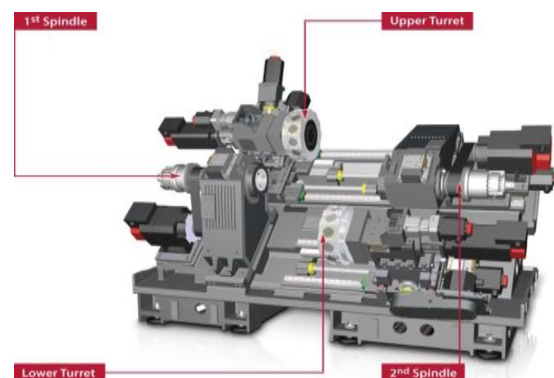
در این مقاله، مدل ریاضی جدید چندهدفه برای زمان بندی سیستم تولید سلولی انعطاف پذیر با به کارگیری ماشین های چندکاره ارائه شده است. اهداف اصلی عبارتند از: کاهش زمان فرایند تولید، حداکثر کردن کیفیت قطعات تولیدی و کاهش هزینه تعمیرات ماشین آلات است که رفع شکاف تحقیقاتی در این موضوع را ضروری می نماید. همچنین مدل زمان بندی طوری توسعه یافته که بتواند مفهوم مسیر پردازش اختیاری برای اجرای فرایند تولید و با رهیافت شبکه در مسیر پردازش را در نظر بگیرد. اعمال رویکرد شبکه در این مدل نه تنها برای مدل های زمان بندی تولید سلولی انعطاف پذیر؛ بلکه برای دستگاه های تولید کارگاهی و مدل های موازی که در آن ها زمان پردازش عملیات به هر دلیلی تغییر کند، قابل استفاده خواهد بود.

۲- پیشینه تحقیق

برخلاف تقاضای زیاد صنعت برای به کارگیری ماشین کاری موازی و ابزارهای چندکاره، تحقیقات کمی در مورد زمان بندی آن ها

تولید سلولی با کاهش فاصله و زمان نقل و انتقالات، پاسخ به سفارش ها، تولید، راه اندازی چرخه تولید و موجودی محصولات، بسیار مؤثرتر از سایر دستگاه های تولیدی عمل می کند [۳]. از طرف دیگر، یکی از عوامل مؤثر بر انعطاف پذیری تولید سلولی، به کارگیری ماشین آلاتی با توانایی اجرای کارهای گوناگون است [۴]. در دهه های اخیر با بهبود و توسعه دستگاه های فرز- تراش مرکزی، چندکاره بودن دستگاه های انعطاف پذیر به واقعیت تبدیل شده است. ماشین های چندکاره توانایی انجام چندین عملیات فرز و تراش را به طور هم زمان دارند. در گذشته ماشین ابزارها دارای یک بخش نگهدارنده^۱ و یک واحد ابزار^۲ بودند [۵]. در نتیجه، یک ماشین ابزار از آنجاکه فقط دارای یک بخش نگهدارنده بود؛ در یک زمان مشخص تنها می توانست یک قسمت را پردازش کند و فقط می توانست یک عملیات بارگذاری شده روی بخش نگهدارنده را انجام دهد زیرا به طور معمول دارای یک واحد ابزار بود. با این حال، در دستگاه های تولید انعطاف پذیر پیشرفته، ما نسل جدیدی از ماشین های تراش- فرز مرکزی خواهیم داشت که دارای چندین بخش نگهدارنده [۶] و [۷] و چندین واحد ابزار است [۸].

شکل (۱) ماشین ابزاری مرکزی با دو بخش نگهدارنده و دو واحد ابزار را نشان می دهد. ساخت چنین ماشین ابزارهایی محدودیت انجام عملیاتی واحد در زمانی واحد را مشخص کرده و موجب پردازش موازی در یک یا دو قطعه شده است [۸]. این نوع ماشین ابزار می تواند در یک زمان می تواند بیش از یک عملیات و یا پردازش بیش از یک قطعه را انجام دهد.



شکل ۱- ماشین چندکاره با چندین بخش نگهدارنده و واحد ابزار [۹]

3. turrets

2. spindles

انجام داده‌اند و یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی آن ارائه کردند. نادری و آزاب [۴] در جدیدترین مطالعه مربوط به زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره، بررسی و زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره موازی را در دستگاه‌های تولیدی سلولی انجام داده‌اند. در ابتدا مدل ریاضی مسئله را طراحی و برای بهینه‌سازی مدل از چند الگوریتم فرا ابتکاری به‌طور تطبیقی استفاده نموده‌اند. همان‌طور که ذکر گردید مطالعات بسیار کمی در مورد زمان‌بندی ماشین‌های چندکاره وجود دارد و در اکثر مدل‌های طراحی‌شده برای زمان‌بندی این‌گونه ماشین‌آلات، مدل به‌صورت تک هدفه در نظر گرفته‌شده است؛ در صورتی که در شرایط واقعی در نظر گرفتن یک هدف خاص نمی‌تواند کارایی یک صنعت تولیدی را تضمین نماید. در بررسی مقالات مختلف در حوزه زمان‌بندی و بهینه‌سازی چندهدفه ماشین‌آلات، زمان‌بندی تولید سلولی و به‌طور هم‌زمان زمان‌بندی تولید سلولی چندهدفه، اهداف متفاوتی مشاهده می‌شود که این اهداف با شرایط خاص هرگونه مدل در نظر گرفته‌شده است. در این تحقیق حداقل کردن حداکثر زمان کل عملیات به‌عنوان هدف اصلی مسئله در نظر گرفته‌شده است. همچنین با مطالعه تحقیقات متوجه خواهیم شد که در مقالات انجام‌گرفته در حوزه زمان‌بندی چندهدفه ماشین‌آلات، در نظر گرفتن کیفیت قطعات پردازش‌شده توسط ماشین‌آلات به‌عنوان یک هدف در نظر گرفته نشده است و وجود چنین هدفی می‌تواند نوآوری جدیدی در مدل‌های زمان‌بندی ماشین‌آلات باشد که با در نظر گرفتن سرعت پردازش قطعه و اندازه بارگیری محقق می‌گردد؛ بنابراین در این مقاله برای اولین بار لحاظ نمودن کیفیت قطعات تولیدی در شرایط مختلف به‌عنوان یک تابع هدف در مدل ریاضی نهائی موردبررسی قرار می‌گیرد. همچنین کاهش هزینه نگهداری ماشین‌آلات به‌عنوان یک هدف که از سیستم تولیدی دارای مطلوبیت است نیز یکی دیگر از اهداف مدل زمان‌بندی این تحقیق است. بعد از بررسی کلی و نهائی از مطالعات انجام‌شده در دو بخش مسائل زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره و مسائل زمان‌بندی تولید سلولی چندهدفه، فقدان یک مدل جامع که به‌طور هم‌زمان بتواند اهداف این دو حوزه را تأمین نماید و یا به‌عبارت‌دیگر، مکمل کاستی‌های این دو بخش باشد مشاهده می‌گردد؛ بنابراین در این مقاله مدل جامع و جدیدی طراحی‌شده تا بتواند مسائل زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره را در یک سیستم تولیدی سلولی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن اهداف چندگانه ارائه دهد.

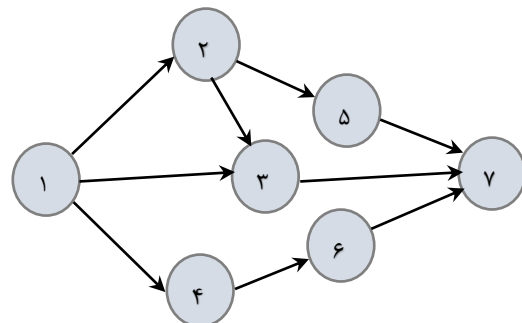
صورت گرفته است. مسئله زمان‌بندی و ترتیب عملیات بر روی ماشین‌آلات چندکاره در مقایسه با مسائل زمان‌بندی سنتی برای ماشین‌کاری موازی [۱۱]، [۱۲] و [۱۳] کمتر موردتوجه قرار گرفته است، به همین دلیل تلاش شده در این مقاله بیشتر موردتوجه قرار بگیرد. میسر [۱۴] و میشکا [۱۵] نوع جدیدی از ماشین‌ابزارها را معرفی کرده‌اند که می‌توانند قطعات را در زمان کمتر و با تنظیمات کمتری تولید کنند. محققان بسیاری برنامه‌ریزی فرایندها و ویژگی ماشین‌آلات را بررسی کرده‌اند [۱۶]، [۱۷] و [۱۸]. لوین و دوتا [۱۹]، در مورد عناصر مختلف ماشین‌کاری موازی و چندوظیفه‌ای که بر برنامه‌ریزی فرایند برای ماشین‌های چندکاره تأثیر می‌گذارد، بحث کرده‌اند. آن‌ها برنامه‌ریزی فرایندهای گوناگون را در مقابل برنامه‌ریزی فرایندهای تولیدی و برنامه‌ریزی فرایندهایی که از روش‌های بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند، مقایسه کردند. آن‌ها همچنین طرح نهایی و توسعه برنامه‌ریزی فرایندهای کامپیوتری^۴ را برای دستگاه‌های فرز- تراش تعریف کرده‌اند. نادری و همکاران [۲۰] بررسی‌های فرا ابتکاری مختلفی را برای حل مسئله زمان‌بندی عملیات در ماشین‌کاری هم‌زمان پیشنهاد داده‌اند. هدف الگوریتم پیشنهادشده، رسیدن به حداقل زمان تکمیل برای تمامی عملیات است. آن‌ها مسئله را برای تعریف قابلیت‌ها و محدودیت‌های ماشین‌های موازی به‌صورت ریاضی مدل‌سازی نموده‌اند. علاوه بر این، ظرفیت ماشین‌ابزار برای پردازش یک عملیات خاص با بیش از یک ابزار برش، حالت‌های عملیات و مفاهیم مربوط به یک تنظیم خاص، در مطالعه آن‌ها در نظر گرفته نشده است. دوتا و همکاران [۲۱] یک الگوریتم ژنتیک^۵ برای حل مشکل توالی عملیات بر روی دستگاه‌های فرز- تراش چندکاره را پیشنهاد داده‌اند. آن‌ها یک طرح فرایند را برای نشان دادن ویژگی‌های هندسی و محدودیت‌های مربوط به ماشین‌آلات فرز- تراش ارائه دادند. هدف از الگوریتم ارائه‌شده، به دست آوردن زمان مطلوب برای تمام عملیات است. مدل ارائه‌شده، همچنین اولویت روابط در میان عملیات، مسیر پردازش و پارامترهای ماشین‌کاری را در نظر می‌گیرد. با این‌وجود، هیچ مدل ریاضی برای گسترش بیشتر مسئله برای نمونه‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر ارائه نشده است. چپو و همکاران [۲۲] یک مسئله منحصربه‌فرد از توالی عملیات با پردازش موازی را در نظر گرفته‌اند. آن‌ها فرض کردند یک کارگاه تنها دارای یک بخش تولیدی است و در هر زمان حداکثر دو عملیات را می‌تواند پردازش کند و چیدمان ماشین‌آلات به‌صورت موازی است. آن‌ها برای اولین بار یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را پیشنهاد داده‌اند که به‌صورت غیرخطی است. نورمن و بین [۲۳] زمان‌بندی عملیات روی ماشین‌ابزار موازی را

5. Genetic Algorithm

4. CAPP

۳- تعریف مسئله و مدل سازی

در این بخش فرایند زمان بندی برای ماشین آلات چندکاره همراه با اهداف چندگانه تشریح می گردد. یک مثال عددی برای بهتر نشان دادن مسئله ارائه شده است. در پایان، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط توسعه داده است که به شرح زیر ارائه گردید. در مدل ارائه شده، مجموعه قطعه وجود دارد که هر قطعه J شامل n_i عملیات است که هر عملیات دارای رابطه پیش نیازی است. در مدل های قبلی فرض بر این بوده که طور محض رابطه پیش نیازی بین عملیات ترتیبی بوده است (همچنین گاهی اوقات به صورت غیررسمی خطی شرح داده شده)؛ به عبارت دیگر، هر عملیات یک پیش نیاز و یک پس نیاز دارد. در این مقاله، روابط میان عملیات نیز به شکل دلخواه در نظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر، یک عملیات ممکن است بیش از یک پیش نیاز و یا شاید چند پس نیاز برای تشکیل ساختاری همانند شبکه برای روابط اولویت خود داشته باشد. مثال نشان داده شده در شکل ۳ را مشاهده کنید. در این مثال، عملیات ۳ تنها پس از تکمیل هر دو عملیات ۱ و ۲ می تواند آغاز شود. مجموعه m ماشین وجود دارد که هر ماشین قابلیت انجام کار با چند واحد ابزار و بخش نگه دارنده با سرعت های متفاوت را دارد که در این مسئله زمان پردازش و کیفیت قطعه وابسته به چهار عنصر ماشین، واحد ابزار و بخش نگه دارنده و سرعت پردازش است. واحد ابزارها می توانند انواع گوناگون ابزار را نگه دارند که توانایی عملیات فرز یا تراش روی ماشین های مرکزی را دارند. از دیدگاه سنتی، فرض بر این است که هر دستگاه تنها دارای یک بخش نگه دارنده و یک واحد ابزار است. در نتیجه، یک ماشین حداکثر می تواند یک قطعه را در یک زمان پردازش کند، از آنجاکه تنها دارای یک بخش نگه دارنده است.



شکل ۲- یک مثال از روابط پیش نیازی اختیاری

افزون بر این، یک ماشین حداکثر می تواند یک قسمت بارگذاری شده توسط بخش نگه دارنده خود را (با توجه به داشتن تنها یک واحد ابزار) پردازش کند؛ اما در این مقاله، با توجه به ماشین های جدید چندکاره، فرض می کنیم هر ماشین i ام $S_i \geq 1$ بخش نگه دارنده و $t_i \geq 1$ واحد ابزار است. (معمولاً ما داریم $t_i \geq S_i$). با توجه به اینکه هر ماشین دارای چند بخش نگه دارنده و واحد ابزار است؛ بنابراین، هر ماشین قابلیت پردازش چند قطعه به طور هم زمان را دارد و هر قطعه در زمان واحد فقط از یک ماشین، بخش نگه دارنده و واحد ابزار پردازش شود. فرضیات دیگر مدل به صورت زیر است:

- هر واحد ابزار، یک عملیات در هر قطعه را می تواند پردازش کند.
- در یک زمان هر قطعه را می توان در بیش از یک بخش نگه دارنده بارگذاری کرد.
- هر قطعه توسط مجموعه ای از بخش های نگه دارنده مشخص انجام می پذیرد.
- هر واحد ابزار نمی تواند انواع مختلف پردازش را انجام دهد.
- هر قطعه / کار، مسیرهای پردازش خود و روابط پیش نیازی در میان عملیات خود را دارد.
- ماشین آلات، بخش نگه دارنده ها و واحد ابزارها خود را به طور مداوم در دسترس دارند.
- زمان وقفه امکان پذیر نیست؛ یعنی، زمانی که پردازش یک عملیات شروع می شود، آن را نمی توان قبل از اتمام آن قطع کرد.
- امکان در دسترس بودن هر واحد ابزار در هر بخش نگه دارنده وجود ندارد. هر واحد ابزار می تواند مجموعه ای از عملیات مختلف را با تعویض بین ابزارهای برش خود، پردازش کند.
- قبل از شروع هر عملیات، برای بارگذاری قسمت مربوطه در یک بخش نگه دارنده، برخی از تنظیمات باید انجام شود. در نتیجه، در هنگام پردازش یک عملیات روی یک قطعه در همان بخش نگه دارنده هیچ نصبی فرض نشده است.
- برنامه زمان بندی با پنج نوع تصمیم گیری در دستگاه های تولید انعطاف پذیر با پردازش موازی و ماشین آلات چندکاره سروکار دارد.

۱. تخصیص قطعات به بخش نگه دارنده مربوط برای اجرای مراحل تولید قطعه
۲. تخصیص واحد ابزار مربوط برای اجرای مراحل تولید قطعه
۳. تعیین ترتیب و توالی عملیات یا فرایندها با توجه به روابط پیش نیازی

برای درک بهتر مسئله، یک مثال عددی ارائه شده است. قبل از ارائه مدل، پارامترها و شاخص‌های مورد استفاده در مدل تعریف را می‌کنیم.

۴. تخصیص سرعت پردازش به عملیات هر قطعه
 ۵. تخصیص مقدار بارگیری در هر دور
 هدف اول مسئله به حداقل رساندن زمان تکمیل کارها است. هدف دوم مسئله کاهش هزینه تعمیرات ماشین آلات است. هدف سوم حداکثر سازی کیفیت پردازش قطعات است. برای بالا بردن کیفیت قطعات سرعت ماشین کاری را به حداکثر و مقدار بارگیری را به حداقل مقدار ممکن می‌رسانیم و برای کاهش زمان پردازش، مقدار بارگیری و سرعت پردازش را به حداکثر مقدار آن می‌رسانیم.

j :	اندیس کار یا قطعه	$j = 1, 2, \dots, J$
i :	اندیس ماشین	$i = 1, 2, \dots, m$
l :	اندیس عملیات	$l = 1, 2, \dots, L_j$
k :	اندیس بخش نگهدارنده	$k = 1, 2, \dots, K$
h :	اندیس واحد ابزار	$h = 1, 2, \dots, H$
r :	اندیس سرعت پردازش	$r = 1, 2, \dots, R$
f :	اندیس میزان بار پردازش	$f = 1, 2, \dots, F$
u :	اندیس خرابی	$u = 1, 2, \dots, U$
$A_{j,l}$	مجموعه عملیات پیش نیاز th عملیات هر قطعه	
$S_{j,i}$	مجموعه بخش نگهدارنده ماشین آلات که می‌تواند قطعات را نگه دارد.	
$T_{j,i}$	مجموعه واحد ابزار ماشین آلات که می‌تواند قطعات را پردازش کند.	

پارامترها

$Cost_i$	هزینه تعمیرات برای ماشین i
$p_{j,l,i}$	زمان پردازش فرایند توسط ماشین
δ_{iu}	متغیر باینری اگر که خرابی در ماشین i رخ دهد برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰
ML_i	عمر ماشین
TM_i	زمان عملیات ماشین i
W_{irf}	درصد وزن نسبی ماشین i ام اگر با سرعت r و میزان بار f کار کند.
C_{max}	حداکثر زمان تکمیل کارها
$Z_{j,l,i,k,h,r,f}$	اگر عملیات l روی کار z پردازش شود توسط بخش نگهدارنده k و واحد ابزار h از ماشین i
$X_{j,l,j',l'}$	متغیر باینری که اگر $O_{j,l}$ بعد از $O_{j',l'}$ پردازش شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت $j' > j$
$X_{j,l,j,l'}$	متغیر باینری که اگر $O_{j,l}$ بعد از $O_{j,l'}$ پردازش شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت $l' > l$
$Y_{j,l,l'}$	متغیر باینری که اگر $O_{j,l}$ و $O_{j,l'}$ پردازش شوند توسط ۲ بخش نگهدارنده متفاوت؛ در غیر این صورت $l' > l$
$S_{j,i}$	متغیر پیوسته برای زمان شروع $O_{j,l}$

مدل مسئله:

تابع هدف:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 &= C_{max} & (1) \\ \text{Min } Z_2 &= \sum_{i=1}^m \left(Cost_i \cdot \sum_{u=1}^U \delta_{iu} \right) & (2) \\ \text{Min } Z_3 &= \sum_{j=1}^J \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F Z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot Q_{j,l,i,r,f}}{N \cdot n_j} & (3) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} = 1 \quad \forall j, l \quad (۴)$$

$$S_{j,l} - S_{j',l'} \geq \sum_{i=1}^m \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l',i,r,f} \quad \forall j, l, l' \in A_{j,t} \quad (۵)$$

$$S_{j,l} - S_{j',l'} \geq \sum_{h \in T_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l',i,r,f} - M(1 - X_{j,l,j',l'}) - M \left(1 - \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \right) - M \left(1 - \sum_{h \in T_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \right) \quad \forall j < n, l; j' > j, l'; i, k \in \{S_{j,i} \cap S_{j',i}\} \quad (۶)$$

$$S_{j',l'} - S_{j,l} \geq \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l,i,r,f} - M(X_{j,l,j',l'}) - M \left(1 - \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \right) - M \left(1 - \sum_{h \in T_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \right) \quad \forall j < n, l; j' > j, l'; i, k \in \{S_{j,i} \cap S_{j',i}\} \quad (۷)$$

$$S_{j,l} - S_{j',l'} \geq \sum_{k \in S_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \cdot p_{j',l',i,r,f} - M(1 - X_{j,l,j',l'}) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \right) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \right) \quad \forall j < n, l; j' > j, l'; i, h \in \{T_{j,i} \cap T_{j',i}\} \quad (۸)$$

$$S_{j',l'} - S_{j,l} \geq \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l,i,r,f} - M(X_{j,l,j',l'}) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \right) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \right) \quad \forall j < n, l; j' > j, l'; i, h \in \{T_{j,i} \cap T_{j',i}\} \quad (۹)$$

$$S_{j,l'} - S_{j,l} \geq \sum_{i=1}^m \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l',i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l',i,r,f} - M(1 - X_{j,l,j,l'}) - M(1 - Y_{j,l,l'}) \quad \forall j, l < l' \quad (۱۰)$$

$$S_{j,l'} - S_{j,l} \geq \sum_{i=1}^m \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l,i,r,f} - M \cdot X_{j,l,j,l'} - M(1 - Y_{j,l,l'}) \quad \forall j, l < l' \quad (۱۱)$$

$$\sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} - \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l',i,k,h,r,f} \leq Y_{j,l,l'} \quad \forall j, l < l', i, k \in \{S_{j,i}\} \quad (۱۲)$$

$$\sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l',i,k,h,r,f} - \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \leq Y_{j,l,l'} \quad \forall j, l < l', i, k \in \{S_{j,i}\} \quad (۱۳)$$

$$S_{j,l} - S_{j',l'} \geq \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l,i,r,f} - M(1 - X_{j,l,j,l'}) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \right) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \right) \quad \forall j, l < l', i, h \in \{T_{j,i}\} \quad (۱۴)$$

$$S_{j,l'} - S_{j,l} \geq \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l,i} - M(X_{j,l,j,l'}) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j,l,i,k,h,r,f} \right) - M \left(1 - \sum_{k \in S_{j',i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F z_{j',l',i,k,h,r,f} \right) \quad \forall j, l < l', i, h \in \{T_{j,i}\} \quad (۱۵)$$

$$C_{max} - S_{j,l} \geq \sum_{i=1}^m \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{h \in T_{j,i}} \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F Z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l,i,r,f} \quad \forall j, l \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left(W_{irf} \cdot \sum_{l=1}^{L_j} \sum_{k \in S_{j,i}} \sum_{h \in T_{j,i}} Z_{j,l,i,k,h,r,f} \cdot p_{j,l,i,r,f} \right) \leq TM_i \quad \forall i \quad (17)$$

$$\delta_{iu+1} - \delta_{iu} \geq 0 \quad \forall h, u = 1, \dots, U-1 \quad (18)$$

$$TM_i \leq ML_i \left(1 + \sum_{u=1}^U \delta_{iu} \right) \quad \forall i \quad (19)$$

$$S_{j,l} \geq 0 \quad \forall j, l \quad (20)$$

$$X_{j,l,j',l'} \in \{0,1\} \quad \forall j, l, j', l' \quad (21)$$

$$Z_{j,l,i,k,h,r,f} \in \{0,1\} \quad \forall j, l, i, k, h \quad (22)$$

$$Y_{j,l,l'} \in \{0,1\} \quad \forall j, l < l' \quad (23)$$

«علف‌های هرز» گیاهانی هستند که رشد آن‌ها تهدید مهمی برای گیاهان زراعی محسوب می‌شود. علف‌های هرز بسیار پایدار و تطابق‌پذیری در مقابل تغییرات محیط است؛ بنابراین با الهام گرفتن شبیه‌سازی خصوصیات آن‌ها می‌توان به یک الگوریتم کارا دست پیدا کرد. علف هرز گیاهی است که در مکان‌های ناخواسته، وابسته به شرایط، تولید و رشد می‌کند و برای گیاهان زراعی مفید، آفت جدی است و جلوی رشد آن‌ها را می‌گیرد. این الگوریتم در عین سادگی، دریافتن نقاط بهینه بسیار مؤثر و سریع است و بر اساس ویژگی‌های اولیه و طبیعی علف‌های هرز مانند تولید بذر، رشد و تنازع برای بقا در یک کلونی عمل می‌کند. ابتدا یک‌میزان دانه در فضای جواب پخش می‌شود و این دانه‌ها رشد می‌کند و به علف تبدیل می‌شوند و علف‌ها با توجه به شایستگی، شروع به زادوولد می‌کند و هرچه شایستگی آن بهتر باشد، تعداد زادوولد آن بیشتر است. نکته‌ای که حائز اهمیت است، در طول زمان پراکندگی محیطی پخش دانه در کنار علف، کمتر می‌شود و بعد از تبدیل دانه‌های جدید به علف، برای نسل بعدی علف‌های دارای شایستگی بهتر باقی می‌ماند و بقیه علف‌ها حذف می‌شوند که به این پدیده حذف رقابتی گویند و این رویه را تا زمان رسیدن به علف با بهترین مطلوبیت ادامه پیدا می‌کند. الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه دارای مراحل زیر است.

- تولید جمعیت تصادفی اولیه و ارزیابی توابع هدف آن‌ها
- به دست آوردن جواب‌های نا مغلوب و اولویت‌بندی جمعیت با استفاده از روش مرتب‌سازی فازی

توابع (۱)، (۲)، (۳) نشان‌دهنده توابع هدف مدل است. محدودیت (۴) هر یک از عملیات را به بخش نگه‌دارنده - واحد ابزار- ماشین با سرعت‌ها و میزان بار متفاوت، تخصیص می‌دهد. مجموعه محدودیت (۵) روابط پیش‌نیازی در میان عملیات هر کار را تضمین می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۶) و (۷) اطمینان می‌دهد که حداکثر یک کار را می‌توان در هر بخش نگه‌دارنده بارگذاری کرد. مجموعه محدودیت‌های (۸) و (۹) مشخص می‌کند که حداکثر یک عملیات توسط هر واحد ابزار پردازش شود. مجموعه محدودیت‌های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) اطمینان می‌دهد که یک کار می‌تواند در حداکثر یک بخش نگه‌دارنده در یک‌زمان بارگذاری شود. مجموعه محدودیت (۱۴) و (۱۵) پردازش حداکثر یک عملیات از یک کار را با یک واحد ابزار در یک‌زمان می‌تواند تضمین دهد. مجموعه محدودیت (۱۶) محاسبه حداکثر زمان تکمیل کارها را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) تعداد تعمیرات ماشین را محاسبه می‌کند. مجموعه محدودیت (۲۰)، (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

۴- الگوریتم‌های چندهدفه

۴-۱- الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه^۷

الگوریتم چندهدفه جمعیت محور به نام الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه، توسط کاندو^۸ و همکاران ارائه شده است [۲۴].

جدول ۱- شبه کد الگوریتم مرتب‌سازی فازی

```

For k = 1: n //calculate fuzzy J-dominance
per solution in population//
μ(k) = 0;
For i = 1: n
    μ(i) = 1; For j = 1: m // compute
Fuzzy J-dominance per solution//
    if yj(x̄i) - yj(x̄k) < 0
        μidom(x̄k <F x̄i) = 0
    else if yj(x̄i) - yj(x̄k) < pj
        μidom(x̄k <F x̄i) = (yj(x̄i) - yj(x̄k))/pj
    else
        μidom(x̄k <F x̄i) = 1
        μdom(x̄k <F x̄i) = μdom(x̄k <F x̄i) *
μidom(x̄k <F x̄i)
    end
    μ(k) = μ(k) + μdom(x̄k <F x̄i) - μ(k) *
μdom(x̄k <F x̄i)
    end
end
end

```

در این الگوریتم، در هر نسل، تعدادی علف وجود دارد و این علف‌ها بر اساس دانه‌هایی که در اطراف آن‌ها پخش شده است تولید جمعیت جدید می‌کنند؛ در صورتی که جمعیت جدید از حداکثر جمعیت بیشتر باشد جمعیت‌هایی که دارای درجه فازی کمتری هستند در زمان پیدایش نسل بعدی حذف می‌شوند.

III. تعیین تعداد دانه‌هایی که لازم است به هر علف هرز در الگوریتم علف هرز چندهدفه تخصیص یابد

در الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه، هرچه علف دارای رتبه کمتری باشد از شایستگی بیشتری برای تخصیص برخوردار خواهد بود؛ یعنی، شرایط به دست آوردن رتبه‌های کمتر در همسایگی این علف هرز بیشتر است؛ پس بدین علت از این علف، فرزندان بیشتری باید تولید شود و بدین منظور لازم است دانه‌های بیشتری در همسایگی علف یادشده پخش شود. در این مقاله با استفاده از معادله (۲۵) تعداد دانه‌های تخصیص داده‌شده به هر علف مشخص می‌شود.

$$seed_i = \left[\frac{np - rank_i}{np} (S_{max} - S_{min}) + S_{min} \right] \quad (25)$$

• تعیین تعداد دانه‌های تخصیص داده به هر جواب بر اساس رتبه آن‌ها

• حذف جمعیت جواب‌ها در صورتی که تعداد جواب‌های آرشو از حداکثر تعداد جواب‌های آرشو بیشتر شود.

۱. تولید جمعیت تصادفی اولیه و ارزیابی آن‌ها

در این الگوریتم، در ابتدا تعداد محدودی علف به‌اندازه جمعیت اولیه^۹ به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. این جمعیت اولیه در فضای جواب پخش خواهند شد. برای نمایش جواب‌های این مسئله از یک ارائه حقیقی استفاده شده که عدد تصادفی در بازه $(1, nWeed + 1)$ است. nWeed بیانگر تعداد روش‌های ممکن برای انجام هر کار است.

II. به دست آوردن جواب‌های نا مغلوب و اولویت‌بندی جمعیت با استفاده از روش مرتب‌سازی فازی

در الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه پس از ارزیابی جمعیت جواب‌ها، برای یافتن جواب‌های نا مغلوب از رویه زیر استفاده می‌کنیم. برای یافتن جواب‌های نا مغلوب، هر جواب با تمام جواب‌های دیگر موجود در جمعیت بر اساس توابع هدف مقایسه می‌شود. اگر x_1 و x_2 را دو جواب الگوریتم فرض کنیم؛ زمانی جواب x_1 ، x_2 را مغلوب می‌کند که در تمامی اهداف، جواب x_1 بر جواب x_2 ارجحیت داشته باشد. در نهایت یک تعداد جواب وجود دارد که هیچ‌کدام غالب و مغلوب هم‌دیگر نمی‌شوند؛ لذا این جواب‌ها، اولین مرز لبه^{۱۰} از مرزهای نا مغلوب را تشکیل می‌دهند. برای مرتب‌سازی، به هر جمعیت یک درجه فازی تعلق می‌گیرد. این درجه فازی توسط فرمول ۲۴ که توسط کاندو^{۱۱} و همکاران ارائه شده است به دست می‌آید [۲۴]

$$I(\vec{v}) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i(\vec{u}) - y_i(\vec{w}))}{\max(y_i) - \min(y_i)} \quad (24)$$

که در آن \vec{u} و \vec{w} دو راه‌حل مجاور به جواب \vec{v} است. جمعیت بر اساس I امین تابع هدف \mathcal{L} به‌صورت صعودی مرتب می‌شوند. بدیهی است که هر چه پراکندگی عضو $I(\vec{v})$ بیشتر باشد دارای اولویت بیشتری است و این پراکندگی برای جواب‌های نامطلوبی که در آرشو وجود دارند محاسبه می‌شود. شبه کد الگوریتم مرتب‌سازی فازی در جدول زیر نشان داده شده است.

۴-۲ - الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نا مغلوب^{۱۲}

در دو دهه گذشته، به الگوریتم‌های ژنتیک به دلیل قابلیت بالای آن به‌عنوان یک رویکرد جدید به مسائل بهینه‌سازی چندهدفه که تحت عنوان روش‌های تکاملی یا بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک شناخته می‌شود، توجه خاصی شده است. الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نا مغلوب توسط دیب^{۱۳} و همکاران ارائه شده است. ویژگی‌های ذاتی الگوریتم‌های ژنتیک بیانگر دلایل مناسب بودن جستجوی ژنتیک در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه هستند [۲۵]. ویژگی‌های اصلی این الگوریتم، چندجهته بودن آن و جستجوی سرتاسری با حفظ جمعیتی از راه‌حل‌های خوب از نسلی به نسل دیگر است. رویکرد نسلی در زمان بررسی راه‌حل‌های پارتو مفید است.

۴-۳ - الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه^{۱۴}

الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط کوئلو^{۱۵} و همکاران برای حل مسائل چندهدفه معرفی شده است [۲۶]. با توجه به این که قوانین منطقی خاصی بر نحوه رفتار موجودات اجتماعی حاکم است، پرندگان تنها، با تنظیم حرکت فیزیکی خود و با اجتناب از تصادف به دنبال غذا می‌گردند و از لحاظ نظری هر پرنده به‌عنوان یکی از اعضای گروه از تجربه‌های قبلی خود و سایر پرندگان برای یافتن غذا بهره می‌برد. ایده اصلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به اشتراک‌گذاری اطلاعات بین اعضای گروه است [۲۷]. اساس کار الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره^{۱۶} مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. به این ترتیب، در هر تکرار الگوریتم، همه ذرات جهت‌ی را برای حرکت به سمت نواحی موفق فضای جستجو انتخاب می‌نمایند. در این الگوریتم که از دو عملگر به‌روزرسانی موقعیت و سرعت بهره می‌گیرد، برخلاف الگوریتم‌های تکاملی، عملیات انتخاب وجود ندارد؛ به این معنا که هیچ‌یک از ذرات یا جواب‌ها حذف نمی‌شوند و تنها موقعیت و سرعت هر ذره در هر تکرار الگوریتم تغییر می‌کند.

که در آن np تعداد رتبه‌های موجود در جمعیت هست. $rank_i$ رتبه علف λ ام از بین تمامی علف‌ها است. S_{max} و δ_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل دانه برای پخش در کنار علف است. در انتها $seed_i$ تعداد دانه‌های پخش شده در کنار علف λ ام است.

IV. تعیین پراکندگی محیطی پخش دانه‌ها در الگوریتم علف‌هرز چندهدفه

دانه‌ها در فضای جستجوی D بعدی با توزیع نرمال با میانگین موقعیت علف واحد و انحراف معیار $\delta_{current}$ پخش می‌شوند و با توجه به تضمین همگرایی الگوریتم در طول زمان، باید پراکندگی محیطی ($\delta_{current}$) پخش دانه در کنار علف کمتر شوند. به عبارت دیگر، هرچه به انتهای کار الگوریتم نزدیک‌تر شویم، دانه‌ها بیشتر پیرامون جواب‌های به‌دست‌آمده تولید می‌شود و پراکندگی کمتری نسبت به شروع الگوریتم دارد. این رویه بر طبق معادله (۲۶) انجام می‌شود.

$$\delta_{current} = (\delta_{initial} - \delta_{final}) \frac{(iter_{max} - iter)^n}{(iter_{max})^n} + \delta_{final} \quad (26)$$

در رابطه بالا n ضریب غیرخطی ساز است و $iter$ و $iter_{max}$ به ترتیب بیشترین تکرار الگوریتم و تکرار حال حاضر الگوریتم است. انحراف معیار اولیه $\delta_{initial}$ و نهایی δ_{final} باید از قبل تعیین شود و جزو پارامترهای الگوریتم است به صورتی که در طول اجرا الگوریتم مقدار آن به صورت غیرخطی از مقدار اولیه به مقدار نهایی تغییر می‌کند.

V. حذف جمعیت اضافی از آرشیو جواب‌ها

در الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه جواب‌های نا مغلوب در مجموعه‌ای به نام آرشیو نگهداری می‌شود؛ در صورتی که جواب‌های به‌دست‌آمده از حداکثر ظرفیت آرشیو بیشتر باشد و جواب‌هایی که دارای درجه فازی کمتری هستند از مجموعه آرشیو حذف می‌شوند.

15.Coello
16.Particle

12.NSGA-II.
13.Deb
14.MOPSO

۵- پارامتر اندازه‌گیری عملکرد الگوریتم

زیر است:

برای سنجش کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه در این مقاله چهار معیار¹⁹SNS, ¹⁸DM, ¹⁷MID, ²⁰SM ارزیابی ارائه شده است [۲۸][۲۹][۳۰][۳۱]. پارامترهای الگوریتم به شرح

جدول ۲- محدوده پارامترهای الگوریتم همراه با سطوح آنها						
الگوریتم‌های چندهدفه	نماد پارامتر	نام پارامتر	سطوح پارامتر			مقدار بهینه
			سطح سوم	سطح دوم	سطح اول	
NSGA-II	درصد جهش	Pc	۰.۷	۰.۸	۰.۹	۰.۷
	درصد تقاطع	Pm	۰.۲	۰.۱۵	۰.۱	۰.۱۵
	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم	Max It	۵*N	۱۰*N	۱۵*N	۱۵*N
	تعداد جمعیت	N Pop	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰
MOIWO	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم	MaxIt	۵*n	۱۰*n	۱۵*n	۵*n
	تعداد جمعیت اولیه	Pmax	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۰۰
	حداکثر جمعیت در هر تکرار	Nweed	Pmax	۳*Pmax	۳*pmax	Pmax
	انحراف معیار اولیه	Initial Sigma	۰.۵	۰.۴	۰.۳	۰.۵
	انحراف معیار نهایی	Final Sigma	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۵	۰.۰۱
	حداقل تعداد دانه برای هر علف	Smin	۱	۲	۳	۲
	حداکثر تعداد دانه برای هر علف	Smax	۵	۸	۱۰	۸
	اندیس غیرخطی سازی	n	۱	۵	۳	۳
	ضریب درجه غلبه فازی	KF	۱	۲	۳	۳
	حداکثر تعداد جواب‌ها	NArchive	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰
MOPSO	ضریب بهترین حافظه شخصی	C1	۱	۱.۴۹۶۲	۲	۱
	ضریب بهترین حافظه جمعی	C2	۱	۱.۴۹۶۲	۲	۲
	وزن اینرسی	W	۰.۶	۰.۷۲۹۸	۰.۹	۰.۹
	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم	Max It	۵*N	۱۰*N	۱۵*N	۵*N
	تعداد جمعیت	N Particle	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰
	حداکثر عضو مخزن جواب‌ها	N Rep	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰
	تعداد بخش‌بندی در هر نمودار	N Grid	۵	۸	۱۰	۸
	ضریب بهترین حافظه شخصی	Gamma	۱	۲	۳	۱
ضریب بهترین حافظه جمعی	Beta	۱	۲	۳	۱	

19. The spread of Non-dominated solutions

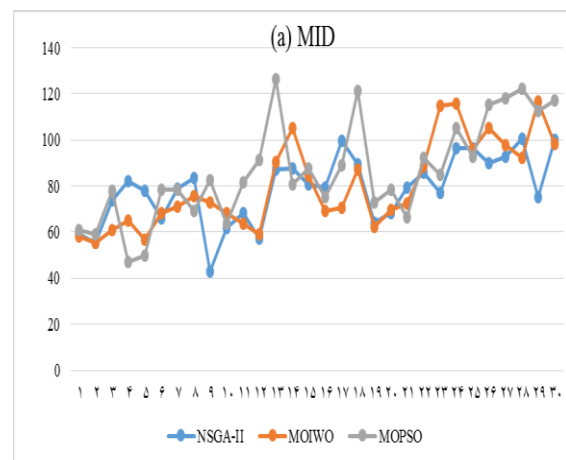
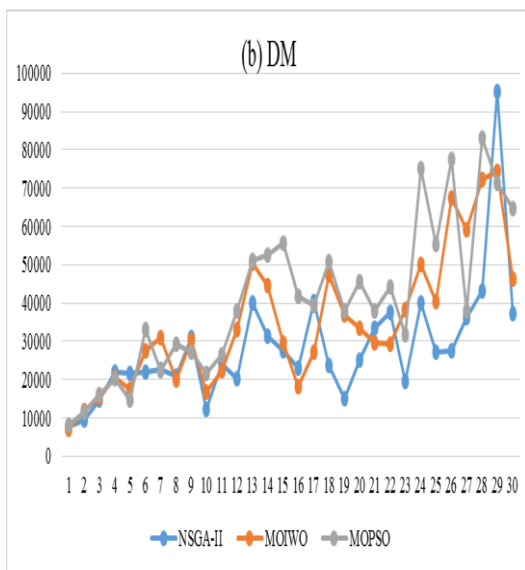
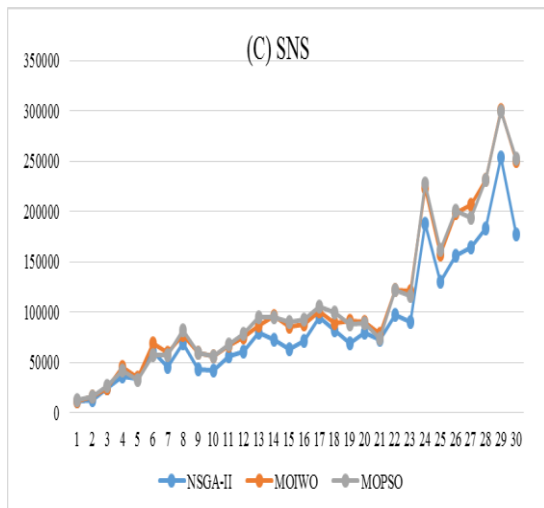
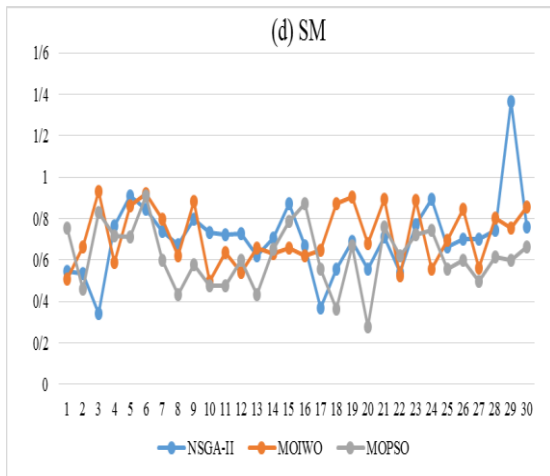
20. Spacing metric

17. Mean ideal distance

18. Diversification Metric

۶- نتایج محاسباتی

در این بخش از مقاله برای مقایسه جستجوهای محلی و تأثیر آن در الگوریتم پیشنهادی، ۳۰ مسئله در سایز کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شده است. مسئله ۱-۱۲ در سایز کوچک، ۱۳-۲۰ در سایز متوسط و ۲۱ تا ۳۰ در سایز بزرگ هست. این مسائل توسط نرم‌افزار متلب ورژن ۲۰۱۶ برنامه‌نویسی شده است و در سیستم با پردازنده cori7 و حافظه ۸ گیگابایت حل شده است. برای تحلیل عملکرد الگوریتم‌ها نسبت به شاخص‌ها در شکل ۳، مقادیر هر الگوریتم در هر مسئله برحسب شاخص نمایش داده شده است. شکل ۳-*a* برتری نسبی الگوریتم علف هرز در شاخص MID را نشان می‌دهد و همچنین در شکل ۳-*b* حاکی از برتری نسبی الگوریتم بهینه‌سازی ذرات چندهدفه در شاخص DM و در شکل ۳-*d* حاکی از برتری نسبی الگوریتم علف هرز چندهدفه و الگوریتم ازدحام ذرات در شاخص SM نسبت به سایر الگوریتم‌ها است؛ ولی همان‌طور که در شکل ۳-*c* مشخص است عملکرد الگوریتم نسبت به شاخص SNS تفاوت زیادی باهم ندارند.



شکل ۳- نمودار اندازه الگوریتم‌ها در معیارهای مختلف

بعد از تعیین وزن شاخص‌ها، برای رتبه‌بندی‌های الگوریتم از روشی بر اساس رتبه‌بندی استفاده می‌کنیم. در این روش ابتدا الگوریتم‌ها را بر اساس هر شاخص رتبه‌بندی می‌کنیم و سپس طبق فرمول ۳۴ رتبه‌های هر الگوریتم نسبت به شاخص را در وزن متریک مدنظر ضرب می‌کنیم و رتبه‌بندی وزنی را به دست می‌آوریم.

$$WR_{ij} = W_j \cdot R_{ij} \quad (34)$$

که در آن R_{ij} رتبه‌بندی الگوریتم i ام در شاخص j ام است و W_j وزن شاخص j ام هست. هر الگوریتمی که دارای مجموع رتبه‌بندی وزنی کمتری باشد در اولویت است که نتایج در جدول ۴ نمایش داده می‌شود.

Metric	MID	DM	SM	SNS
MID	۱	۲	۳	۴
DM	۰.۵	۱	۲	۲
SM	۰.۳۳	۰.۶۷	۱	۲
SNS	۰.۲۵	۰.۵	۰.۶۷	۱

برای انتخاب الگوریتم مناسب در این مقاله از روشی بر اساس روش رتبه‌بندی استفاده می‌کنیم. برای به‌کارگیری این روش باید در ابتدا وزن هر یک از شاخص‌های الگوریتم‌های چندهدفه برای ما مشخص باشد. برای به دست آوردن وزن متریک با توجه به نظر خبرگان در ماتریس مقایسات زوجی که در جدول (۳) نمایش داده شده است، از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به نام تحلیل سلسله مراتبی استفاده می‌شود [۳۲].

جدول ۴- نتایج رتبه‌بندی الگوریتم‌ها برای مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ

رتبه الگوریتم	مجموع اوزان رتبه بندی	اوزان رتبه ها				رتبه بندی				میانگین نتایج				الگوریتم چند هدفه	اندازه الگوریتم
		MID	DM	SNS	SM	MID	DM	SNS	SM	MID	DM	SNS	SM		
Small	۲	۲.۳۵۶	۰.۳۳۰	۰.۳۴۸	۰.۷۲۰	۰.۹۵۸	۲	۳	۲	۰.۶۹۵	۴۱۴۵۹	۱۹۰۷۱.۲	۶۷.۲	NSGA-II	۲
	۱	۱.۶۸۶	۰.۴۹۵	۰.۲۳۲	۰.۴۸۰	۰.۴۷۹	۱	۲	۳	۰.۷۰۵	۴۹۸۴۳.۴	۲۱۰۹۳.۴	۶۴.۵	MOIWO	۱
	۲	۱.۹۵۸	۰.۱۶۵	۰.۱۱۶	۰.۲۴۰	۱.۴۳۷	۳	۱	۱	۰.۶۶۵	۵۷۱۰۰.۲	۲۶۶۰۳.۴	۸۰.۵	MOIWO	۲
Medium	۳	۲.۳۵۶	۰.۳۳۰	۰.۳۴۸	۰.۷۲۰	۰.۹۵۸	۲	۳	۲	۰.۶۲۹	۷۶۶۹۳.۳	۲۸۲۵۳.۴	۸۲	NSGA-II	۳
	۱	۱.۶۸۶	۰.۴۹۵	۰.۲۳۲	۰.۴۸۰	۰.۴۷۹	۱	۲	۳	۰.۷۰۸	۹۰۹۲۷.۲	۳۵۸۶۳.۳	۷۹.۸	MOIWO	۱
	۲	۱.۹۵۸	۰.۱۶۵	۰.۱۱۶	۰.۲۴۰	۱.۴۳۷	۳	۱	۱	۰.۵۷۷	۹۴۲۳۴.۲	۴۶۸۲۵.۱	۹۱.۴	MOPSO	۲
Large	۲	۲.۰۴۲	۰.۴۹۵	۰.۳۴۸	۰.۷۲۰	۰.۴۷۹	۱	۳	۳	۰.۷۸۵	۱۵۱۲۳۹.۹	۳۹۷۲۲.۱	۸۹.۳	NSGA-II	۲
	۱	۱.۸۸۴	۰.۳۳۰	۰.۱۱۶	۰.۴۸۰	۰.۹۵۸	۲	۱	۲	۰.۷۳۹	۱۸۸۷۸۲.۲	۵۰۷۲۷.۹	۹۹.۷	MOIWO	۱
	۳	۲.۰۷۴	۰.۱۶۵	۰.۲۳۲	۰.۲۴۰	۱.۴۳۷	۳	۱	۱	۰.۶۳۹	۱۸۷۹۷۲.۷	۵۷۸۲۲.۵	۱۰۲.۷	MOPSO	۳

۷- نتیجه‌گیری

است. در تحقیقات آتی باید الگوریتم‌هایی کاراتر و بهتر برای حل مسائل زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره توسعه داده شود. یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقات آتی، توسعه و ارائه مدل زمان‌بندی ماشین‌آلات همراه با به‌کارگیری کارگرانی است که از مهارت‌های گوناگونی بهره‌مندند هست. همچنین تلفیق زمان‌بندی ماشین‌آلات با تولید سلولی می‌تواند از محورهای تحقیقات آتی باشد.

۸- مراجع

- [1] K.R. Baker, (1974). Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley, NY
- [2] Mungwattana, A. (2000). Design of Cellular Manufacturing Systems for Dynamic and Uncertain Production Requirements with Presence of Routing Flexibility. Blacksburg, Virginia: Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [3] Wemmerlov, R. and Vakharia, A. J. (1991). Job and family scheduling in a flow-line manufacturing cell, IIE Transaction, 23, 383-393
- [4] Naderi, B. and A. Azab (2015) Modeling and scheduling a flexible manufacturing cell with parallel processing capability. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 11: p. 18-27.
- [5] J.B. Levin, D. Dutta. (1996) PMPS: A Prototype CAPP System for Parallel Machining. Journal of Engineering for Industry, 118(3) 406-414.
- [6] Battaïa, O. et al. (2013) Equipment location in machining transfer lines with multispindle heads. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms: p. 1-17.
- [7] Guschinskaya, O. et al. (2009) Minimizing makespan for multi-spindle head machines with a mobile table. Computers & Operations Research, 2009. 36(2): p. 344-357.
- [8] Battaïa, O. et al. (2014). Combinatorial techniques to optimally customize an automated production line with rotary transfer and turrets. IIE Transactions, 2014. 46(9): p.867-879.
- [9] <http://www.techspex.com> (Model NZ1500 T2Y; Date: Feb 2014)
- [10] <http://www.fabricatingandmetalworking.com>; Date: Feb 2014.

در این مقاله یک مدل سه هدفه جدید برای زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره با لحاظ متغیرهایی چون اهداف هزینه-زمان-کیفیت انجام شد. اهداف مدل چندهدفه پیشنهادی شامل به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل قطعات، به حداقل رساندن هزینه تعمیرات اساسی و به حداکثر رساندن کیفیت قطعات بوده است. با توجه به اینکه مدل توسعه‌یافته از نوع مسائل بسیار بزرگ بوده، یک الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم چندهدفه با ساختار جدید کروموزومی برای حل مدل ارائه‌شده است. از آنجاکه معیار مناسبی برای اعتبارسنجی راه‌حل‌های به‌دست‌آمده پیدا نشد، دو الگوریتم دیگر فرا ایتکاری پرکاربرد مانند الگوریتم بهینه‌سازی ذرات چندهدفه و الگوریتم ژنتیک با همان ساختار کروموزومی برای حل این مدل توسعه داده شد. برای بهبود عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده، روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سپس الگوریتم‌های تنظیم‌شده با پارامتر برای حل ۳۰ مسئله تصادفی در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مورد استفاده قرار گرفتند. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های تنظیم‌شده با توجه به شاخص‌های SM، SNS و DM، از آزمون‌های آماری استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم علف‌های هرز مهاجم در شاخص تنوع در اندازه DM بهتر عمل نموده است. الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری را از لحاظ معیارهای SNS داشت. از لحاظ شاخص MID، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری داشته است، درحالی‌که از لحاظ معیار SM رقابت بین الگوریتم بهینه‌سازی ذرات و ژنتیک وجود داشت. در پایان، با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی برای انتخاب الگوریتم با بهترین عملکرد از لحاظ تمام معیارها به‌طور هم‌زمان استفاده شد. نتیجه رتبه‌بندی الگوریتم بر اساس این رویکرد نشان داد الگوریتم علف‌های هرز مهاجم بهترین عملکرد را در حل مسائل کوچک، متوسط و بزرگ داشته است. در مجموع، نتایج این تحقیق و خروجی‌های مدل نشان داده است که زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره برخلاف تحقیقات گذشته که بیشتر بر یک هدف فرض بوده است می‌توان با چندین هدف در نظر گرفت؛ همچنین این مدل با در نظر گرفتن شاخص سرعت به‌عنوان یک هدف، راه‌حل‌های مطلوبی ارائه داده است. طراحی مدل در حوزه زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره راهکار قابل قبولی را برای شرکت‌هایی که به دنبال مطلوبیت خاص و متنوع هستند، ارائه داد. زمینه‌ها و فرصت‌های تحقیقاتی بسیاری در مدل‌سازی و حل مسئله زمان‌بندی ماشین‌آلات چندکاره وجود دارد. این امر به دلیل ماهیت پویا و کاربرد زیاد این ماشین‌آلات در صنایع امروزی

- [23] Norman, B.A. and J.C. Bean. (2000). Scheduling operations on parallel machine tools. *Iie Transactions*. 32(5): p. 449-459.
- [24] Kundu, D. Suresh, K. Ghosh, S. Das, S. Panigrahi, B. K. & Das, S. (2011). Multi-objective optimization with artificial weed colonies. *Information Sciences*, 181, 2441-2454.
- [25] DEB, K. AGRAWAL, S. PRATAP, A. & MEYARIVAN, T. (2000). A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. In:
- [26] CHOENAUER, M. DEB, K. RUDOLPH, G. YAO, X. LUTTON, E. MERELO, J. J. & SCHWEFEL, H.P. (eds.) (2000) *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI: 6th International Conference Paris, France, September 18–20, Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [26] COELLO, C. A. C. & LECHUGA, M. S. (2002) MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization. *Evolutionary Computation, CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on*. 1051-1056.
- [27] POLI, R. KENNEDY, J. & BLACKWELL, T. (۲۰۰۷). Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, 1, 33-57.
- [28] N. Karimi, M. Zandieh, and H. R. Karamooz. (2010) "Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: A multi-phase approach, *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 4024-4032, 6.
- [29] E. Zitzler. (1999) *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications* vol. 63: Citeseer.
- [30] J. R. Schott. (1995). "Fault Tolerant Design Using Single and Multicriteria Genetic Algorithm Optimization, DTIC Document.
- [31] C. C. Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuizen. (2007) *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems: Springer Science & Business Media*.
- [32] T. L. Saaty, (1989). "Group Decision Making and the AHP, in *The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies*, B. L. Golden, E. A. Wasil, and P. T. Harker, Eds. ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 59-67.
- [11] Fanjul-Peyro, L. F. Perea, and R. Ruiz, (2017) Models and matheuristics for the unrelated parallel machine-scheduling problem with additional resources. *European Journal of Operational Research*. 260(2): p. 482-493.
- [12] Low, C. and G.H. Wu. (2016) Unrelated parallel machine scheduling with controllable processing times and eligibility constraints to minimize the makespan. *Journal of Industrial and Production Engineering*., 33(4): p. 286-293.
- [13] Rajkanth, R. C. Rajendran, and H. Ziegler. (2017) a single machine and on identical parallel machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 88 (5-8): p.1923-1936.
- [14] Miller, P.C. (1989). Lathes turn to other tasks. *Tooling & Production*, 54(12): p.54-60.
- [15] Miska, K.H. (1990). Driven tools turn on turning centers. *Manufacturing Engineering*. 104(5): p. 63-66.
- [16] Date, N. P. Krishnaswami, and V.S.K. Motipalli, (2009). Automated process planning method to machine A B-Spline free-form feature on a mill-turn center. *Computers & Industrial Engineering*. 56(1): p. 198-207.
- [17] Kim, Y.S. et al. (1997) Geometric reasoning for mill-turn machining process planning. *Computers & industrial engineering*. 33 (3-4): p. 501-504.
- [18] Waiyagan, K. and E.L. Bohez. (2009). intelligent feature based process planning for fiveaxis mill-turn parts. *Computers in Industry*. 60(5): p. 296-316.
- [19] Levin, J.B. and D. Dutta. (1992) Computer-aided process planning for parallel machines. *Journal of Manufacturing Systems*. 11(2): p. 79-92.
- [20] Azab, A. and B. Naderi. (2014) A variable neighborhood search metaheuristic for cellular manufacturing with multitask machine tools. *Procedia CIRP*. 20: p.50-55.
- [21] Yip-Hoi, D. and D. Dutta. (1996). A genetic algorithm application for sequencing operations in process planning for parallel machining. *IIE transactions*. 28(1): p. 55-68.
- [22] Chiu, N.C. S.C. Fang and Y.S. Lee. (1999). Sequencing parallel machining operations by genetic algorithms. *Computers & industrial engineering*, 36(2): p. 259-280.