

# الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی برای حل یک مدل دو هدفه استوار جریان کارگاهی انعطاف پذیر دومرحله‌ای با خط مونتاژ اختصاصی تحت عدم قطعیت

علی اکبر حسنی<sup>۱\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۲۵	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۱	
<b>واژگان کلیدی:</b> جریان کارگاهی انعطاف پذیر، خط مونتاژ اختصاصی، بهینه سازی چندهدفه، عدم قطعیت، الگوریتم فرا ابتکاری تکاملی ترکیبی.	در این مقاله، مساله زمان بندی استوار جریان مونتاژ کارگاهی انعطاف پذیر دومرحله‌ای با خط مونتاژ اختصاصی تولیدکننده محصولات متنوع چند دوره‌ای ارائه شده است. هدف حداقل نمودن همزمان حداکثر زمان تکمیل آخرین کار و میانگین موزون کل تأخیرها است. مرحله نخست تولید شامل مجموعه‌ای از ماشین‌های موازی متفاوت در نخستین سایت تولید و یک ماشین در دومین سایت و مرحله دوم شامل دو خط تولید اختصاصی است. هر محصول دارای یک لیست مواد است. هر قطعه نیز ساختار خاص خود را داشته و از این رو زمان خاص برای مونتاژ دارد. محصولات با فرایند ساخت تک مرحله‌ای به خط مونتاژ نخست و محصولات با حداقل دو فرایند ساخت به دومین خط مونتاژ تخصیص داده می‌شوند. قطعات پس از پایان فرایند تولید در مرحله نخست بر روی خط تولید مخصوص به خود در مرحله دوم قرار می‌گیرند. محصول نهایی از مونتاژ قطعات مدنظر ایجاد خواهد شد. تقاضای محصولات نهایی با عدم قطعیت همراه است که برای نمایش آن از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای استفاده شده است. نوآوری اصلی این مقاله، ارائه یک مدل ریاضی جدید برای مساله زمان بندی تولید در جریان کارگاهی انعطاف پذیر با خط مونتاژ اختصاصی در فضای عدم قطعیت و همچنین ارائه یک روش حل کارآمد برای مدل ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی حل بالای مسائل جریان کارگاهی انعطاف پذیر، یک روش حل فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم‌های نقاط قوت پارتو II و جستجوی وسیع همسایگی انطباق پذیر در این مقاله ارائه شده است. نتایج حل حاکی از کارایی مدل ریاضی و روش حل فرا ابتکاری ارائه شده برای مواجهه با مساله مورد بررسی است.

## ۱- مقدمه

مساله زمان بندی نقش مهمی را در تمامی انواع سیستم‌های تولید ایفا می‌نماید. مشکلات برنامه‌ریزی تولید در اغلب محیط‌های تولیدی مطرح است هر زمان که نیاز باشد مجموعه‌ای از فعالیت‌ها بر روی کارها انجام شود و هر فعالیت نیز به طرق مختلفی قابل انجام باشد [۱]. هدف

مساله زمان بندی جریان کارگاهی مرکب، بهینه نمودن انجام فرایند یک مجموعه شامل چندین کار و یک مجموعه شامل چندین مرحله فرایند تولید است که حداقل یکی از آن مراحل دارای بیش از یک ماشین موازی است [۲]. مساله جریان کارگاهی انعطاف پذیر از جنبه‌های بسیار متنوع و متفاوت در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته شده است

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: aa.hasani@semnan.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه شاهرود

ماشین در سایت دوم قرار داده شده است. در مرحله دوم، دو خط تولید قرار دارد که محصولات برای مونتاژ با توجه به مشخصات موردنیاز به یکی از آن‌ها تخصیص داده می‌شوند. در نهایت یک روش حل کارا مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری تحولی ترکیبی برای حل مساله چندهدفه موردبررسی ارائه شده است.

دیگر بخش‌های مقاله به صورت ذیل در ادامه ارائه شده است. در بخش ۲، ادبیات موضوع زمان‌بندی جریان کارگاهی مرکب بررسی شده است. در بخش ۳، مساله تحقیق و مدل ریاضی آن ارائه شده است. در بخش ۴، الگوریتم حل ترکیبی جدید پیشنهاد شده، بررسی شده است. مسائل نمونه موردبررسی و تنظیم پارامترهای الگوریتم حل در بخش ۵ ارائه شده است. نتایج محاسباتی در حل مساله نمونه و اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی نیز در بخش ۵ ارائه شده است. در نهایت جمع‌بندی و پیشنهادها برای انجام تحقیقات آتی در بخش ۶ ارائه شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

مساله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر می‌تواند به عنوان توسعه یافته دو نوع از انواع مسائل زمان‌بندی شامل زمان‌بندی ماشین‌های موازی و زمان‌بندی جریان کارگاهی در نظر گرفته شود. تصمیم اصلی در مسائل زمان‌بندی ماشین‌های موازی عبارت است از تخصیص کارها به ماشین‌ها درحالی‌که تصمیم کلیدی در مساله زمان‌بندی جریان کارگاهی تعیین توالی عملیات کارها در فضای تولیدی است. ماشین‌های حاضر در هر مرحله از مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر می‌توانند متفاوت و یا یکسان باشند. مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با توجه به دامنه وسیع کاربرد آن موردتوجه بسیاری از محققان واقع شده است [۱، ۱۷-۱۴]. یکی از انواع این مسائل عبارت است از زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی با خط مونتاژ است.

جانسون [۱۸] برای نخستین بار مساله جریان کارگاهی را معرفی نمود و یک روش حل به منظور حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین کار با در نظر گرفتن دو ماشین ارائه نمود. لی و همکارانش [۱۹] مدل عمومی مساله جریان کارگاهی را با در نظر گرفتن سه ماشین و خط مونتاژ تولید موتور خودرو توسعه داده‌اند. در مدل دومرحله‌ای ایشان، در مرحله

که از جمله آن‌ها می‌توان به مواردی همچون مساله جریان کارگاهی دومرحله‌ای [۳، ۴]، مساله جریان کارگاهی بدون انتظار و مسدود شدن [۵]، مساله جریان کارگاهی با زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی عملیات [۶]، مساله جریان کارگاهی با محدودیت دسترسی [۷]، و مساله جریان کارگاهی با محدودیت پیش‌نیازی [۸] اشاره نمود.

به‌طور کلی، دو نوع از مسائل زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر دومرحله‌ای وجود دارد که عبارت‌اند از [۹: ۱] مسائل با ماشین‌های اختصاصی در دو مرحله به نحوی که کارها در مرحله یک پردازش شده و سپس در مرحله دوم بر اساس نیاز خاص خود بر روی یک ماشین خاص پردازش می‌شوند و [۲] مجموعه قطعات متنوع که در مرحله نخست ساخته شده‌اند در مرحله دوم با یکدیگر مونتاژ شده و محصول نهایی را ایجاد می‌نمایند. دو مدل یادشده در دنیای واقعی بسیار پرکاربرد بوده و می‌تواند در بسیاری از محیط‌های تولیدی نظیر تولید برچسب‌های کالا [۱۰]، مونتاژ مبلمان [۱۱]، تولید مصنوعات سفالی [۱۱]، و نمونه‌های فراوان دیگری که در آن‌ها چندین ماشین در هر مرحله برای انجام کار حضور دارند [۱۲]، به کار گرفته شود. علاقه‌مندان جهت آگاهی بیشتر از کاربرد مسائل جریان کارگاهی ترکیبی می‌توانند به مطالعه انجام‌شده توسط رین و همکارانش [۱۳] مراجعه نمایند.

در این مقاله، ترکیب هر دو نوع از مدل‌های جریان کارگاهی ترکیبی در نظر گرفته شده است که عبارت است از مساله زمان‌بندی جریان مونتاژ کارگاهی ترکیبی دومرحله‌ای که در آن یک خط مونتاژ اختصاصی برای تولید محصولات مختلف در طی دوره برنامه‌ریزی با توجه به تقاضای مشتریان و اهداف حداقل نمودن حداکثر زمان تکمیل آخرین کار و میانگین موزون کل تأخیرها ارائه شده است. همچنین عدم قطعیت تقاضای محصولات نهایی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای در نظر گرفته شده است. نخستین مرحله از تولید از شامل مجموعه‌ای از ماشین‌های موازی با سرعت‌های متفاوت پردازش قطعات است که در سایت یک قرار داده شده‌اند. همچنین یک

انشعاب و تحدید ارائه نموده است. یان و همکارانش [۲۵] در یک مطالعه به بررسی مساله زمان بندی جریان کارگاهی دومرحله‌ای با خط مونتاژ و با تابع هدف حداقل نمودن میانگین وزنی زمان‌های تکمیل کارها پرداخته‌اند. یان و همکارانش [۲۵] مساله زمان بندی جریان کارگاهی دومرحله‌ای با خط مونتاژ به منظور حداقل نمودن میانگین وزنی زمان انجام کارها، زودکرد و دیرکرد به صورت همزمان در قالب یک مدل نوآورانه ارائه نموده‌اند. در این مدل، تعداد ماشین  $m$  در مرحله اول حضور دارند که هر یک قطعه‌ای از محصول تحت عنوان یک کار تولید می‌نمایند. یک ماشین در مرحله دوم، مجموعه قطعات تولید شده در مرحله نخست را مونتاژ می‌نماید. حل مدل ارائه شده با توجه به پیچیدگی‌های محاسباتی آن با استفاده از یک الگوریتم حل فرا ابتکاری مبانی بر الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر انجام شده است. زونگ و همکارانش [۲۶] مساله زمان بندی جریان کارهای ترکیبی با در نظر گرفتن خط مونتاژ و در قالب سه مرحله تولید شامل تولید قطعات، مونتاژ و متمایزسازی را ارائه نموده‌اند. در این مساله ارائه شده، در مرحله دوم عملیات مونتاژ توسط یک ماشین انجام می‌شود. در مرحله سوم، مجموعه کارهای مختص هر ماشین با توجه به ماشین در نظر گرفته شده انجام خواهد شد. هدف مدل برنامه ریزی خطی مختلط ارائه شده عبارت است از حداقل نمودن زمان کل جریان کار در کارگاه. با توجه به پیچیدگی‌های حل مدل مذکور، دو روش ابتکاری با سرعت حل بالا مبتنی بر الگوریتم کوتاه‌ترین زمان انجام فرایند و الگوریتم نه و سه الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ ارائه شده است. شعاع اردبیلی و فتاحی [۲۷] مساله زمان بندی جریان مونتاژ کارگاهی سه مرحله‌ای با محدودیت در دسترس بودن ماشین آلات با در نظر گرفتن دو معیار ارزیابی حداقل نمودن مجموع وزنی زمان‌های تکمیل کارها و حداقل نمودن مجموع وزنی زودکرد و دیرکردها به صورت همزمان را بررسی نموده‌اند. مدل ارائه شده توسط شعاع اردبیلی و فتاحی [۲۷] را می‌توان حالت عمومی مدل مساله زمان بندی جریان کارگاهی با سه ماشین و مساله زمان بندی جریان مونتاژ کارگاهی دومرحله‌ای دانست که با توجه به پیچیدگی‌های حل بالای هر یک از زیر مدل‌های یاد شده، مساله نهایی نیز از پیچیدگی‌های حل بالایی نیز برخوردار خواهد بود. از این رو

نخست دو ماشین وظیفه ساخت قطعات را بر عهده داشته و در مرحله دوم تنها یک ماشین وظیفه مونتاژ قطعات ساخته شده را بر عهده دارد. لی و همکارانش [۱۹] نشان داده‌اند که مدل ارائه شده از نوع مسائل با پیچیدگی‌های حل زیاد بوده و برای حل آن، یک الگوریتم‌های شاخه و کران و سه الگوریتم ابتکاری ارائه نموده‌اند. هری و پاتس [۲۰] یک الگوریتم شاخه و کران دیگر جهت حل مساله ارائه شده توسط لی و همکارانش [۱۹] ارائه نموده‌اند. فتاحی و همکارانش [۲۱] مساله جریان کارگاهی ترکیبی را با در نظر گرفتن عملیات مونتاژ در طی دو مرحله برای تولید محصولات متشکل از مجموعه‌ای از قطعات بررسی نموده‌اند. قطعات نخست در مرحله ابتدا که یک مساله جریان کارگاهی ترکیبی است، ساخته شده و سپس در مرحله دوم جهت ساخت محصول نهایی با یکدیگر مونتاژ می‌شوند. با توجه به دشواری‌های حل مدل ارائه شده، فتاحی و همکارانش [۲۱] یک الگوریتم شاخه و کران سلسله‌مراتبی با تعریف حدود بالا و پایین مناسب جهت بهبود کارایی فرایند جستجوی جواب ارائه نموده‌اند. در تمامی مدل‌های بررسی شده در بالا، تابع هدف مساله زمان بندی حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین کار بوده است. در مجموعه مطالعات ذیل، محققان میانگین وزنی زمان تکمیل کارها را به عنوان معیار ارزیابی زمان بندی کارها در نظر گرفته‌اند. یوکویاما [۲۲] یک مساله سیستم تولید دومرحله‌ای را بررسی نموده است که در مرحله نخست آن، یک ماشین وظیفه تولید انواع قطعات را بر عهده داشته و در مرحله دوم نیز یک ماشین به منزله خط مونتاژ فعالیت می‌نماید. تمامی فرایندها به بلوک‌های مجزا تقسیم بندی شده و در هر بلوک مجموعه قطعات مشابه به صورت متوالی تولید می‌شوند. یوکویاما [۲۲] یک روش حل مبتنی بر برنامه ریزی پویا برای حل مساله پیشنهادی ارائه نموده است. مدل مذکور بار دیگر توسط یوکویاما و سانتوس [۲۳] با در نظر گرفتن سه سطح توسعه داده شده است. در دو مرحله نخست فرایند تولید قطعات به صورت متوالی انجام شده و در مرحله سوم نیز مونتاژ قطعات به منظور تولید محصول نهایی انجام می‌شود. یوکویاما و سانتوس [۲۳] یک روش حل مبتنی بر الگوریتم انشعاب و تحدید برای حل مدل پیشنهادی ارائه نموده‌اند. یوکویاما [۲۴] مدل مذکور را با در نظر گرفتن چندین مرحله شامل یک ماشین توسعه داده و یک روش حل مبتنی بر برنامه ریزی پویا و الگوریتم

دو الگوریتم حل فرا ابتکاری چندهدفه جهت حل کارای مدل یادشده ارائه شده است.

## ۲-۱- زمان‌بندی مساله جریان کارگاهی ترکیبی با ماشین اختصاصی

رین و همکارانش [۱۳] مساله زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی دومرحله‌ای با دو ماشین اختصاصی در مرحله دوم و با هدف حداقل نمودن زمان تکمیل کارها را بررسی نموده‌اند. به دلیل پیچیدگی‌های بالای حل مدل مذکور، سه الگوریتم حل ابتکاری و یک الگوریتم حل مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا ارائه نموده‌اند. بسبز و همکارانش [۲۸] مساله جریان کارگاهی دومرحله‌ای را با دو ماشین موازی اختصاصی در نظر گرفته‌اند و دو روش حل ابتکاری مبتنی بر قوانین جانسون و خروج به ترتیب ورود و روش حل فرا ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه نموده‌اند. ونگ و لیو [۲۹] مساله زمان‌بندی جریان کارگاهی دومرحله‌ای با ماشین‌های اختصاصی را با هدف حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین کار بررسی نموده‌اند که در مرحله نخست تنها یک ماشین و در مرحله دوم چند ماشین اختصاصی قرار دارد. فرایند نخست از دو مرحله تولید تمامی کارهای می‌بایست توسط ماشین حاضر در مرحله اول انجام شود. ونگ و لیو [۲۹] یک روش حل مبتنی بر الگوریتم انشعاب و تحدید و دو الگوریتم حل فرا ابتکاری مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوعه ارائه نموده‌اند. هادا و همکارانش [۳۰] یک الگوریتم انشعاب و تحدید بهبود داده‌شده با قوانین حذف برای مساله ارائه‌شده توسط ونگ و لیو [۲۹] معرفی نموده‌اند. عباس و همکارانش [۳۱] مساله جریان کارگاهی دومرحله‌ای را در یک سلول رباتیک با ماشین اختصاصی در مرحله نخست و ماشین غیراختصاصی در مرحله دوم در نظر گرفته‌اند. در این مدل دو نوع کار در نظر گرفته شده است. بخشی از تولید تمامی کارها در مرحله نخست توسط ماشین اختصاصی انجام شده و سپس کارهای انجام‌شده در این مرحله توسط یک نوار نقاله با ظرفیت مشخص به مرحله دوم انتقال داده می‌شوند. هدف حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین کار با توجه به برنامه‌ریزی توأم زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل قطعات است. در این مقاله، مدل ارائه‌شده توسط ونگ و لیو [۲۹] و نیکزاد و همکارانش [۹] به مساله زمان‌بندی چندهدفه تحت عدم قطعیت جریان مونتاژ کارگاهی ترکیبی با دو ماشین

اختصاصی در مرحله دوم برای مونتاژ توسعه داده شده است. کارها در این محیط عبارت‌اند از تولید قطعات محصولات در مرحله نخست. سپس با توجه به نوع هر محصول، مونتاژ آن بر روی خط مونتاژ اختصاصی در مرحله دوم انجام خواهد شد. قطعات مورد استفاده در تولید محصولات برای تولید می‌توانند به یک و یا دو فرایند نیاز داشته باشند که بر این اساس نیز تقسیم‌بندی می‌شوند. بر این اساس می‌توان محصولات را به دو دسته تقسیم‌بندی نمود. دسته نخست محصولات که تنها از قطعات با یک مرحله فرایند تولید ساخته شده‌اند و دسته دوم محصولات که در آن‌ها از حداقل یک قطعه با دو فرایند تولید استفاده شده است. دسته نخست محصولات توسط خط تولید اختصاصی شماره دو در مرحله دوم مونتاژ می‌شوند. از این رو در این مقاله با یک مساله جریان کارگاهی ترکیبی با ماشین‌های اختصاصی و خطوط مونتاژ مواجه هستیم که در دنیای واقعی و محیطی صنعتی همچون صنایع خودروسازی، مبل‌سازی و لوازم‌خانگی نیز دارای کاربرد فراوان است. توابع هدف مساله موردبررسی عبارت است از حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین کار و میانگین موزون کل تأخیرها به صورت توأم. به‌منظور حل مدل چندهدفه ارائه‌شده، یک الگوریتم حل ابتکاری جدید نیز پیشنهاد شده است. نتایج محاسباتی حل مسائل نمونه و تحلیل حساسیت آن نیز در نهایت ارائه شده است.

## ۳- مدل ریاضی

### ۳-۱- معرفی مساله

در این مقاله، مساله جریان کارگاهی دومرحله‌ای با توان تولید چند محصول در طی چند دوره برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. محصولات با توجه به لیست مواد از دو یا تعداد بیشتری قطعه ساخته شده‌اند که هر قطعه نیز در طی یک و یا دو فرایند مشخص تولید شده است. در گام نخست تمامی قطعات در مرحله یک و در سایت نخست شامل  $n$  ماشین موازی با سرعت‌های متفاوت انجام کار، پردازش می‌شوند. محدودیتی برای تولید انواع قطعات توسط انواع ماشین‌آلات وجود ندارد. در صورت آغاز تولید، فرایند آن بدون وقفه تا پایان ادامه خواهد یافت. سپس قطعاتی که

۳-۲- مفروضات

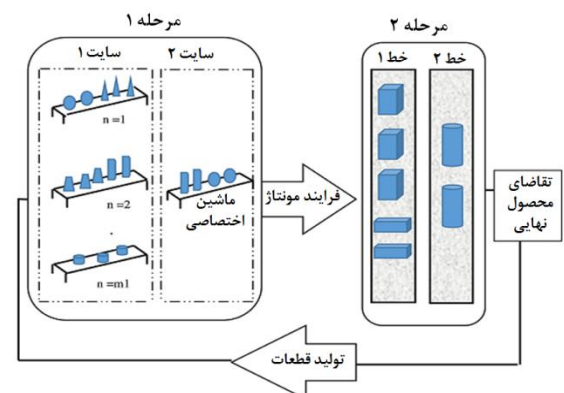
مجموعه مفروضات ذیل در این مقاله در نظر گرفته شده است:

۱. زمان راه‌اندازی ماشین‌آلات وابسته به توالی عملیات است.
۲. هر قطعه تنها متعلق به لیست مواد یک محصول است.
۳. زمان حمل‌ونقل مابین مراحل در نظر گرفته نشده است.
۴. کمبود مجاز نیست.
۵. انقطاع در انجام کارها مجاز نیست.
۶. تمامی ماشین‌ها در زمان صفر در کارگاه حاضر هستند.
۷. امکان وقوع خرابی ماشین‌ها و در دسترس نبودن آن‌ها در طی دوره برنامه‌ریزی وجود دارد.
۸. هر یک از ماشین‌ها و خطوط مونتاژ در واحد زمان تنها می‌توانند یک عملیات را انجام دهند.
۹. عدم قطعیت پارامتر تقاضا با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بازه‌ای در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها قطعی هستند.

۳-۳- نشانه‌ها

- $M$ : تعداد ماشین موازی در سایت ۱ از مرحله ۱
- $P_1$ : تعداد قطعات قابل تولید با یک فرایند
- $P_2$ : تعداد قطعات قابل تولید با دو فرایند
- $p$ : تعداد کل قطعات
- $pr_1$ : تعداد محصولات متشکل از قطعات با یک فرایند تولید
- $pr_2$ : تعداد محصولات متشکل از حداقل یک قطعه با بیش از یک فرایند تولید
- $Pr$ : تعداد کل محصولات
- $a$  و  $b$ : اندیس قطعات
- $i$  و  $j$ : اندیس قطعات
- $N$ : اندیس ماشین‌آلات
- $DM$ : اندیس ماشین‌آلات در سایت ۲ از مرحله ۱
- $L$ : اندیس خط مونتاژ
- $M_1$ : مجموعه ماشین‌های موازی در سایت ۱ در مرحله ۱
- $(n \in M_1 = \{1, 2, \dots, m_1\})$

نیازمند انجام فرایند دوم تولید هستند، به سایت دوم انتقال یافته و به ماشین‌آلات اختصاصی تخصیص می‌یابند. انجام فرایند تولید قطعات در مرحله نخست برای یک دسته مشخص انجام خواهد شد. به عبارت دیگر، هر دسته تولید شامل قطعات مشابه متعلق به لیست مواد یکسان بوده و اندازه دسته با توجه به تقاضای مشتریان تعیین می‌شود. در مرحله دوم، محصولات در دسته‌های مشخص با توجه به اندازه تقاضا مونتاژ می‌شوند. محصولات در قالب دو دسته متمایز بوده و برای مونتاژ به خط اختصاصی مربوطه تخصیص داده می‌شوند. محصولات دسته نخست ( $PR_1$ ) از قطعاتی تشکیل شده است که همگی تحت یک فرایند تولید شده‌اند و به خط یک مونتاژ تخصیص می‌یابند. محصولات دسته دوم ( $PR_2$ ) حداقل شامل یک قطعه است که تحت دو فرایند تولید شده و به خط دوم مونتاژ اختصاص می‌یابند. فرایند مونتاژ در مرحله دوم نمی‌تواند آغاز شود مگر آن‌که فرایند تولید تمامی انواع قطعات مورد نیاز برای آن با توجه به لیست مواد در مرحله یک به پایان رسیده باشد. عدم قطعیت پارامتر کلیدی تقاضای مشتریان در سطوح مختلف ریسک‌پذیری در نظر گرفته شده است. شکل ۱ نمای شماتیک فرایند تولید نمایش داده شده است. هدف ارائه برنامه زمان‌بندی و توالی عملیات برای تولید قطعات و مونتاژ محصولات نهایی به منظور حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین محصول و میانگین کل تأخیرها به صورت توأم است.



شکل ۱- نمای شماتیک از فرایند تولید جریان کارگاهی با خطوط مونتاژ

## ۳-۵- متغیرهای تصمیم‌گیری

$q_{bj}$ : اندازه تولید قطعه  $b$  برای محصول  $j$   
 $mp_{bn}$ : زمان تولید اصلاح‌شده برای قطعه  $b$  بر روی ماشین  $n$  در مرحله اول

$ct_{b11}$ : زمان تکمیل قطعه  $b$  در سایت یک از مرحله اول  
 $st_{bDM21}$ : زمان آغاز تولید قطعه  $b$  بر روی ماشین اختصاصی در سایت دو از مرحله دوم

$r_{j11}$ : زمان تکمیل تمامی قطعات متعلق به محصول  $j$  در سایت یک از مرحله اول

$r_{j21}$ : زمان تکمیل تمامی قطعات متعلق به محصول  $j$  در سایت دو از مرحله دوم

$f_{rj}$ : زمان تکمیل تمامی قطعات متعلق به محصول  $j$

$st_{j2}$ : زمان آغاز تولید محصول  $j$  در سایت دو

$ct_{j2}$ : زمان تکمیل محصول  $j$  در سایت دو

$c_{max}$ : حداکثر مقدار زمان‌های  $ct_1$  الی  $ct_j$

$z_{bn11}$ : متغیر باینری با مقدار ۱ در صورت تخصیص قطعه  $b$  به ماشین  $n$  در سایت یک از مرحله ۱؛ ۰ در غیر این صورت  
 $y_{0bn}$ : متغیر باینری با مقدار ۱ اگر قطعه  $b$  اولین قطعه در حال پردازش بر روی ماشین  $n$  باشد؛ ۰ در غیر این صورت  
 $y_{abn}$ : متغیر باینری با مقدار ۱ اگر قطعه  $b$  پس از قطعه  $a$  بر روی ماشین  $n$  پردازش شود؛ ۰ در غیر این صورت

$y_{0bDM}$ : متغیر باینری با مقدار ۱ اگر قطعه  $b$  به‌عنوان اولین قطعه بر روی ماشین اختصاصی تولید شود؛ ۰ در غیر این صورت

$y_{abDM}$ : متغیر باینری با مقدار ۱ اگر قطعه  $b$  پس از قطعه  $a$  بر روی ماشین اختصاصی تولید شود؛ ۰ در غیر این صورت

$y_{0j}$ : متغیر باینری با مقدار ۱ اگر محصول  $j$  به‌عنوان اولین محصول بر روی خط اختصاصی مونتاژ شود؛ ۰ در غیر این صورت

$v_{ij}$ : متغیر باینری با مقدار ۱ اگر محصول  $j$  پس از محصول  $i$  بر روی خط اختصاصی زمان‌بندی شود؛ ۰ در غیر این صورت

$P_1$ : مجموعه قطعات به‌موقع پردازش‌شده  
 $(P_1 = \{1, 2, \dots, p_1\})$

$P_{2DM}$ : مجموعه قطعات دارای پردازش دوم مرحله‌ای که پردازش دوم تولید آن‌ها در سایت دوم از مرحله یک و توسط ماشین‌های اختصاصی انجام می‌شود  
 $(P_{2DM} = \{1, 2, \dots, p_2\})$

$P$ : مجموعه کل قطعات  
 $(P = \{1, 2, \dots, p\}, a, b \in P_1 \cup P_{2DM} = P)$

$AL$ : مجموعه خطوط مونتاژ اختصاصی  $(l \in AL = \{1, 2\})$   
 $PR_1$ : مجموعه محصولات نوع یک (متشکل از قطعات تولیدشده با یک فرایند و مونتاژشده بر روی خط اختصاصی اول)  $(1 \in AL)$

$PR_2$ : مجموعه محصولات نوع ۲ (متشکل از حداقل یک قطعه با بیش از یک پردازش و مونتاژشده بر روی خط اختصاصی دوم)  $(2 \in AL)$

## ۳-۴- پارامترها

$D_j$ : مقدار اسمی تقاضای محصول  $j$ ؛  
 $DI_{sj}$  و  $D2_{sj}$ : مقادیر انحراف از مقدار اسمی تقاضای محصول  $j$   $(DI_{sj} = D2_{sj})$ ؛

$CN_{bj}$ : تعداد قطعه مورد نیاز  $b$  برای تولید یک واحد محصول  $j$ ؛

$Dd_j$ : موعد تحویل محصول  $j$ ؛

$W_j$ : ارزش (وزن) محصول  $j$ ؛

$P_b$ : زمان استاندارد تولید قطعه  $b$  در سایت ۱ از مرحله ۱،  
 $V_{nb}$ : سرعت ماشین  $n$  در سایت ۱ از مرحله ۱ برای تولید قطعه  $b$ ؛

$P_{bDM}$ : زمان تولید قطعه  $b$  در سایت ۲ از مرحله ۱ بر روی ماشین اختصاصی (زمان دومین فرایند تولید قطعات با بیش از یک فرایند تولید)

$P_j$ : زمان مونتاژ برای محصول  $j$

$S_{ab}$ : زمان راه‌اندازی وابسته به‌توالی از قطعه  $a$  به قطعه  $b$  در مرحله اول

$S_{ij}$ : زمان راه‌اندازی وابسته به‌توالی از محصول  $i$  به محصول  $j$  در مرحله دوم

$W$ : عدد بزرگ مثبت

$$r_{j11} = \max_{b \in P} \{ct_{b11} \times bom_{bj}\} \quad \forall j \in PR \quad (17)$$

$$r_{j21} = \max_{b \in P_{2DM}} \{ct_{bDM 21} \times bom_{bj}\} \quad \forall j \in PR \quad (18)$$

$$fr_j = \max\{r_{j1}, r_{j2}\} \quad \forall j \in PR \quad (19)$$

$$st_{j2} = \max \left\{ \begin{array}{l} fr_j, \\ \sum_{i \in PR_1, i \neq j} y_{ij} \times ct_{i2} \end{array} \right\} \quad \forall j \in PR_1, I \in AL \quad (20)$$

$$ct_{j2} = \left( \begin{array}{l} st_{j2} \\ + P_j \times D_j \\ + \sum_{i \in PR_1, i \neq j} y_{ij} \times S_j \end{array} \right) \quad \forall j \in PR_1, I \in AL \quad (21)$$

$$c_{max} \geq ct_{j2} \quad \forall j \in PR \quad (22)$$

$$\sum_{j \in PR_1} y_{0j} = 1 \quad \forall I \in AL \quad (23)$$

$$y_{0j} + \sum_{i \in PR_1, i \neq j} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in PR_1, I \in AL \quad (24)$$

$$\sum_{i \in PR_1, i \neq j} y_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in PR_1, I \in AL \quad (25)$$

تابع هدف (۱) حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین کار که برابر است با بزرگ‌ترین زمان تکمیل کارها در مرحله دوم تولید را نشان می‌دهد. تابع هدف (۲) نیز حداقل نمودن میانگین وزنی کل دیرکردها را نشان می‌دهد. هر کار با توجه به ارزش آن تحت تأثیر ارزش مجموعه قطعات، ارزش بازار و نوع تعهد ارائه شده به مشتری دارای یک ارزش کلی خواهد بود. اندازه تولید وابسته به میزان تقاضای هر محصول و تعداد قطعات بر اساس لیست مواد هر محصول با استفاده از محدودیت‌های (۳) الی (۸) با توجه به عدم قطعیت تقاضای محصولات تعیین می‌شود. محدودیت‌های (۴) و (۶) به‌عنوان محدودیت‌های قرین استوار تحت تأثیر عدم قطعیت پارامتر تقاضا در نظر گرفته شده‌اند [۳۲]. محدودیت (۹) تضمین می‌کند که هر قطعه تنها به یک ماشین در سایت ۱ از مرحله ۱ تولید تخصیص یابد. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد که هر توالی برای تولید قطعات بر روی هر یک از  $n$  ماشین موجود، تنها با کار بر روی یک قطعه آغاز می‌شود. محدودیت (۱۱) مقید می‌کند که هر قطعه پس از پایان کار قطعه دیگر بر روی هر ماشین تولید شود مگر آن‌که اولین بر روی ماشین مدنظر باشد. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که هر قطعه حداکثر می‌تواند یک پیش‌نیاز

$bom_{bj}$ : متغیر باینری اگر قطعه  $b$  متعلق باشد به لیست مواد محصول  $j$ ; ۰ در غیر این صورت

### ۳-۶- مدل‌سازی ریاضی

$$\text{Min } c_{max} \quad (1)$$

$$\text{Min } \bar{T}_w = \sum_j W_j \times t_j = \sum_j W_j \times \max\{ct_{j2} - Dd_j, 0\} \quad (2)$$

$$q_{bi} \leq \left( \begin{array}{l} CN_{bj} \times D_j \\ -pro2_j \\ -Bud2_j \times zro2_j \end{array} \right) \quad \forall b \in P, j \in PR \quad (3)$$

$$\left( \begin{array}{l} pro2_j \\ +Bud2_j \times zro2_j \end{array} \right) \geq D2s_j \quad \forall b \in P, j \in PR \quad (4)$$

$$q_{bi} \geq \left( \begin{array}{l} CN_{bj} \times D_j \\ +pro1_j \\ +Bud1_j \times zro1_j \end{array} \right) \quad \forall b \in P, j \in PR \quad (5)$$

$$\left( \begin{array}{l} pro1_j \\ +Bud1_j \times zro1_j \end{array} \right) \geq D1s_j \quad \forall b \in P, j \in PR \quad (6)$$

$$bom_{bj} \leq CN_{bj} \quad \forall b \in P, j \in PR \quad (7)$$

$$W \times bom_{bj} \geq CN_{bj} \quad \forall b \in P, j \in PR \quad (8)$$

$$\sum_{n \in M_1} z_{bn11} = 1 \quad \forall b \in P \quad (9)$$

$$\sum_{b \in P_1} z_{0bn} = 1 \quad \forall n \in M_1 \quad (10)$$

$$y_{0bn} + \sum_{a \in P, a \neq b_1} y_{abn} = z_{bn11} \quad \forall b \in P, n \in M_1 \quad (11)$$

$$\sum_{a \in P, a \neq b_1} y_{abn} \leq z_{bn11} \quad \forall b \in P, n \in M_1 \quad (12)$$

$$mp_{bn} = \frac{P_b}{V_{nb}} \quad \forall b \in P, n \in M_1 \quad (13)$$

$$ct_{b11} = \left( \begin{array}{l} \sum_{j \in PR, n \in M_1} [z_{bn11} \times mp_{bn} \times q_{bj}] \\ + \sum_{a \in P, a \neq b, n \in M_1} [y_{abn} \times S_{ab}] \\ + \sum_{a \in P, a \neq b, n \in M_1} [y_{abn} \times ct_{a11}] \end{array} \right) \quad \forall b \in P \quad (14)$$

$$st_{bDM 21} = \max \left\{ \begin{array}{l} ct_{b11}, \\ \sum_{a \in P_{2DM}, a \neq b} (Y_{abDM} \times ct_{aDM 21}) \end{array} \right\} \quad \forall b \in P_{2DM} \quad (15)$$

$$ct_{bDM 21} = \left( \begin{array}{l} st_{bDM 21} \\ + \sum_{j \in PR} (P_{bDM} \times q_{bj}) \\ + \sum_{a \in P_{2DM}, a \neq b} (y_{abDM} \times q_{bj}) \end{array} \right) \quad \forall b \in P_{2DM} \quad (16)$$

نقاط قوت پارتو II و الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر است.

نتایج مطالعات انجام شده در ادبیات موضوع پیرامون استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری تحولی برای حل مسائل زمان بندی تولید محصولات با پیچیدگی حل بسیار بالا نظیر مسائل برنامه ریزی جریان کارگاهی ترکیبی یک و چندهدفه در ابعاد بزرگ حاکی از کارایی این الگوریتم و برتری نسبی آن نسبت به دیگر الگوریتم های فرا ابتکاری تکاملی به کار گرفته شده است [۳۳ و ۹].

علی رغم توانمندی های معمول الگوریتم های تکاملی نظیر ژنتیک به عنوان یک الگوریتم بهینه سازی ترکیبی، این الگوریتم دارای توان محدود در قدرت بخشیدن به فرایند جستجوی محلی است که از آن می توان به عنوان یک نقطه ضعف الگوریتم ژنتیک یاد نمود [۳۶-۳۴]. در این راستا، الگوریتم ترکیبی نظیر ممتیک با هدف تقویت قدرت جستجوی محلی در الگوریتم های تکاملی نظیر ژنتیک ارائه شده است که مورد استقبال محققان نیز قرار گرفته است [۳۷]. الگوریتم ممتیک در هر مرحله از تکرارهای الگوریتم تکاملی، از یک الگوریتم جستجوی همسایگی بهره می برد [۳۸].

الگوریتم های تکاملی چندهدفه فراوانی برای یافتن مجموعه جواب های پارتو برای مسائل زمان بندی در طی سال های اخیر ارائه شده است. در نسخه های اولیه الگوریتم های تکاملی نظیر ژنتیک چندهدفه [۳۸]، ژنتیک مبتنی بر نیچینگ (همسایگی) پارتو [۳۹] و ژنتیک مبتنی بر مرتب سازی نامغلوب [۴۰] صراحتاً نخبه گرایی را در فرایند جستجوی جواب در نظر نمی گیرند. پس از درک اهمیت مفهوم نخبه گرایی در جستجوی چندهدفه، الگوریتم های چندهدفه تکاملی بهبود یافته نظیر الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو [۴۱] و استراتژی تکاملی با آرشیو پارتو [۴۲] ارائه شده است. در طی سال های اخیر، مطالعات بسیاری برای بهبود بیشتر عملکرد الگوریتم های مذکور انجام شده است که منجر به معرفی الگوریتم هایی نظیر ژنتیک مبتنی بر مرتب سازی نامغلوب II [۴۳]، الگوریتم

مستقیم برای تولید داشته باشد. محدودیت (۱۳) زمان اصلاحی تولید هر قطعه بر روی ماشین  $n$  در سایت ۱ از مرحله ۱ تولید را نشان می دهد. زمان تکمیل اندازه تولید قطعات در سایت ۱ از مرحله ۱ تولید توسط محدودیت (۱۴) تعریف می شود. محدودیت (۱۵) نشان می دهد که هر توالی تولید محصول در سایت ۱ تنها توسط یک محصول آغاز می شود. محدودیت (۱۶) تضمین می کند که زمان آغاز دومین مرحله از فرایند تولید قطعات با بیش از یک فرایند تولید بر روی ماشین اختصاصی در سایت ۲ تولید برابر است با حداکثر زمان تکمیل کارها در سایت ۱ و زمان تکمیل کارهای تخصیص داده شده پیش از آن به ماشین مورد نظر. محدودیت (۱۷) زمان تکمیل هر یک از اندازه های تولید قطعات با بیش از یک فرایند تولید را بر روی ماشین اختصاصی در سایت ۲ تولید از مرحله ۱ نشان می دهد. محدودیت (۱۸) زمان تکمیل تمامی کارها برای تولید قطعات متعلق به محصول  $z$  در سایت ۱ و مرحله ۱ را نشان می دهد. زمان حاضر بودن تمامی قطعات مورد نیاز برای مونتاژ محصول  $z$  توسط محدودیت (۱۹) تعیین می شود. محدودیت (۲۰) زمان آغاز محصولات نوع ۱ در مرحله ۲ تولید را نشان می دهد. محدودیت (۲۱) زمان تکمیل کارها را مشخص می کند. محدودیت (۲۲) بازه ساخت در فرایند تولید را نشان می دهد. محدودیت (۲۳) تضمین می کند که توالی عملیات تولید هر محصول بر روی هر خط تولید تنها با یک محصول آغاز می شود. محدودیت (۲۴) تصریح می کند که هر محصول می بایست دارای یک فرایند تولید پیش نیاز باشد مگر آن که اولین محصول بر روی خط یک باشد. محدودیت (۲۵) اطمینان می دهد که هر محصول  $i$  حداکثر می تواند یک پیش نیاز تولید داشته باشد.

#### ۴- روش حل پیشنهادی

در این بخش، یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی جدید با توجه به ماهیت مساله برنامه ریزی جریان کارگاهی ترکیبی با پیچیدگی حل بالا بوده، ارائه شده است. الگوریتم فرا ابتکاری تحولی ارائه شده مبتنی بر الگوریتم های فرا ابتکاری



بخش‌های سوم و چهارم از کروموزوم نشان‌دهنده توالی محصول بر روی خطوط مونتاژ یک و دو است (شکل ۳). با توجه به آن که  $P$  قطعه وجود دارد که همگی می‌بایست بر روی  $MI$  ماشین موازی حاضر در سایت یک از مرحله یک پردازش شوند، نخستین بخش از کروموزوم مدنظر دارای  $P + s * (MI - 1)$  ژن است که برای ۱۰ قطعه ( $P$ ) و پنج عدد از ماشین  $MI$  دارای ۱۴ ژن خواهد بود. برای این منظور نیاز است تا ۱۴ عدد تصادفی در بازه [۰-۱] نظیر ذیل تولید شود.

رشته ۱ (توالی اعداد از چپ به راست):

۱۲۳۴۵۶۷۸۹۱۰۱۱۱۲۱۳۱۴۰،۴۵۰،۳۹۰،۷۸۰،۲۱۰،۳۸۰،۹۱۰،۱۶۰،۸۴۰،۱۷۰،۲۵۰،۵۱۰،۷۷۰،۶۴۰،۵۷

سپس مجموعه اعداد تصادفی ایجاد شده با ترتیب صعودی نظیر ذیل مرتب می‌شوند.

رشته ۱ مرتب شده (توالی اعداد از چپ به راست):

۷۹۴۱۰۵۲۱۱۱۱۴۱۳۱۲۳۸۶۰،۱۶۰،۱۷۰،۲۱۰،۲۵۰،۳۸۰،۳۹۰،۴۵۰،۵۱۰،۵۷۰،۶۴۰،۷۷۰،۷۸۰،۸۴۰،۹۱۰

مجموعه ژن‌های ۱۱ الی ۱۴ نشان‌دهنده مرز تفکیک‌کننده مابین ۵ ماشین حاضر در مرحله یک از سایت یک هستند. با تبدیل ژن‌های ۱۱ الی ۱۴ به \* به راحتی می‌توان توالی قطعات بر روی هر یک از پنج ماشین مورد بررسی را مشاهده نمود. برای نمونه مجموعه مرتب شده در فوق را می‌توان به صورت ذیل بازتعریف نمود:

کروموزم جواب ۱ (توالی اعداد از چپ به راست):

۷۹۴۱۰۵۲۱\*\*\*۳۸۶

توالی اعداد در بخش یک از کروموزوم فوق نشان می‌دهد که مجموعه قطعات ۷، ۹، ۴، ۱۰، ۵، ۲ و ۱ بر روی ماشین یک پردازش می‌شوند. قطعات ۳، ۸ و ۶ نیز بر روی ماشین پنجم پردازش می‌شوند. همچنین هیچ قطعه‌ای به ماشین‌های ۲، ۳ و ۴ تخصیص داده نشده است. تعیین توالی تصادفی در بخش‌های دوم، سوم و چهارم کروموزوم مورد بررسی نیز همانند بخش یک انجام خواهد شد.

انتخاب مبتنی بر الگوی پارتو [۴۴] و الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو II [۴۵] شده است. در الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو II، ضعف نسخه اولیه آن برطرف شده و یک ساختار مؤثر جهت ایجاد یک الگوریتم تکاملی چندهدفه قوی و نوآورانه در نظر گرفته شده است. در طی سال‌های اخیر، از الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو II با موفقیت برای حل مسائل با پیچیدگی محاسباتی بالا و ابعاد بزرگ در حوزه‌های مختلف به کار گرفته شده است [۴۶].

در این مطالعه، یک الگوریتم فرا ابتکاری کارا مبتنی بر الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو II ارائه شده است. الگوریتم ارائه شده برای جستجو از الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر قوت پارتو II و جستجوی وسیع انطباق‌پذیر استفاده می‌نماید. در این الگوریتم ترکیبی، جستجوی فضای جواب برای توابع هدف متفاوت توسط تکاملی مبتنی بر قوت پارتو II انجام می‌شود. در حالی که بهبود جواب‌های پارتو ایجاد شده در هر مرحله از تکرار تکاملی مبتنی بر قوت پارتو II توسط الگوریتم جستجوی وسیع انطباق‌پذیر بهبود می‌یابد. الگوریتم جستجوی وسیع انطباق‌پذیر ارائه شده، فضای جواب را با استفاده از ساختار همسایگی سفارشی‌سازی شده با توجه به فضای جواب مساله و همچنین بهره‌گیری از تکنیک تجزیه و تحلیل فضای جواب حل می‌نماید. علاوه بر آن، جستجوی بیشتر فضای جواب با استفاده از الگوریتم ابتکاری تپه‌نورد در فرایند جستجوی الگوریتم جستجوی وسیع انطباق‌پذیر انجام می‌شود. در شکل ۲ می‌توان ساختار الگوریتم ابتکاری ترکیبی ارائه شده را مشاهده نمود.

#### ۴-۱- کدگذاری کروموزوم‌های جواب

هر جواب با استفاده از یک کروموزوم نمایش داده می‌شود. هر کروموزوم دارای ۴ بخش است. بخش نخست مرتبط با توالی قطعات بر روی ماشین‌های حاضر در سایت یک از مرحله یک است. بخش دوم مرتبط با توالی قطعات بر روی ماشین اختصاصی در سایت دوم از مرحله یک است.

همسایگی با توجه به عملکرد آن‌ها در حین فرایند جستجو استفاده می‌نماید [۴۷]. استفاده از این رویکرد انطباق پذیر در جهت اجتناب از قرار گرفتن الگوریتم در یک جواب بهینه محلی در پی اعمال یک ساختار همسایگی خاص بوده و منجر به عمق بخشیدن به فرایند جستجوی جواب خواهد شد [۴۸-۴۹]. مکمل بودن ساختارهای همسایگی انتخاب شده در حین فرایند جستجو یکی از الزامات اصلی برای داشتن جستجوی مؤثر فضای جواب با استفاده از الگوریتم جستجوی وسیع همسایگی انطباق پذیر خواهد بود. بنابراین، نظم و توالی انتخاب ساختارهای همسایگی می‌بایست به درستی انتخاب شود. در این مطالعه، از رویکرد تجزیه و تحلیل فضای جواب برای تعیین یک توالی کارا برای انتخاب ساختارهای همسایگی استفاده شده است. با استفاده از این رویکرد می‌توان دریافت نمود که کدام ساختار همسایگی و در کجای فرایند جستجو عملکردی مؤثر و کارا خواهد داشت [۴۸، ۴۹]. به منظور تجزیه و تحلیل فضای جواب مساله پیشنهاد شده، متوسط فاصله نرمال برای جامعه جواب مورد بررسی با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه شده است. از فاصله همیلتونی برای محاسبه فواصل مابین کروموزوم‌های جواب با توجه به مقدار متغیرهای باینری استفاده شده است [۴۸].

شبه کد الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر در شکل ۶ نمایش داده شده است.

$$Dmm(P) = \frac{\sum_{s \in P} \sum_{t \in P, t \neq s} \sum_{i=1}^n s_i \oplus t_i}{|P| \cdot (|P|-1) \times \left( \max_{s,t \in P} dist(s,t) \right)} \quad (27)$$

دو ساختار هم‌سایگی تخریب و چهار ساختار هم‌سایگی تعمیر در الگوریتم جستجوی همسایگی سریع انطباق پذیر پیشنهادی با توجه به ساختار کروموزوم جواب در نظر گرفته شده است. ابتدا ساختار تخریب و پس از آن ساختار تعمیر بر روی کروموزوم اعمال می‌شود. ساختارهای تعمیر و تخریب طراحی شده برای جستجوی فضای جواب در ذیل توضیح داده شده است.

- ساختار تعمیر (RN)

#### ۲-۴- گام‌های الگوریتم ارائه شده مبتنی بر

##### قوت پارتو II و جستجوی وسیع انطباق پذیر

در این مرحله، گام‌های الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی ارائه شده به صورت تفصیلی معرفی شده است.

گام ۱: جامعه اولیه ( $P_0$ ) و آرشیو خالی ایجاد می‌شود. اندازه جمعیت ( $N$ )، مجموعه آرشیو و حداکثر تعداد تکرار ( $T$ ) از پیش معین و مشخص است. مقدار شمارنده تکرارها نیز برابر با صفر قرار داده شود.

گام ۲: در این مرحله، برازش معیار ارزیابی برای تمامی اعضای جامعه و مجموعه آرشیو جهت تعیین روابط چیرگی مابین اعضای جامعه انجام می‌شود. سپس معیار ارزیابی  $F(i)$  متعلق به هر عضو جامعه با افزوده شدن مقدار چگالی  $D(i)$  به مقدار معیار ارزیابی اولیه  $R(i)$  محاسبه خواهد شد (شکل ۴ مشاهده شود). عملگرهای  $| \cdot |$  نشان‌دهنده کاردینالیتی مجموعه،  $+$  بیانگر اتحاد چندگانه،  $\succ$  نشان‌دهنده رابطه چیرگی پارتو و  $\sigma_i^k$  فاصله تا  $k$  امین نزدیک‌ترین همسایه است [۴۵].

گام ۳: در این مرحله انتخاب محیط انجام می‌شود. نخست تمامی اعضای حاضر در جامعه و مجموعه آرشیو با مقدار معیار ارزیابی کمتر از ۱ (در تکرار  $t$ ) به مجموعه آرشیو در تکرار بعد منتقل می‌شوند (رابطه ۲۶). در صورت تجاوز تعداد اعضای منتقل شده به مجموعه آرشیو با توجه به اندازه تعیین شده برای آن، تعداد اعضای انتقال یافته کاهش خواهد یافت (شکل ۵).

$$\bar{P}_{t+1} = \{i \mid i \in P_t + \bar{P}_t \wedge F(i) < 1\} \quad (26)$$

گام ۴: در این مرحله، جستجوی محلی فضای جواب با هدف تقویت نمودن فرایند جستجو انجام می‌شود. برای این منظور از الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر برای ایجاد بهبود در جواب‌های پارتو به دست آمده در هر مرحله از تکرار الگوریتم مبتنی بر نقاط قوت پارتو II استفاده شده است. الگوریتم جستجوی همسایگی سریع انطباق پذیر، یک توسعه مؤثر از الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع است که از مجموعه‌ای از ساختارهای

جواب‌های نهایی فرایند جستجو گزارش می‌شود. در غیر این صورت به گام ۶ بروید.

گام ۶: در این گام، الگوریتم انتخاب مبتنی بر چرخه رولت بر روی مجموعه آرشیو با هدف پر نمودن استخر تولید نسل اعمال می‌شود [۴۸].

گام ۷: در این گام دو عملگر جهش و تقاطع بر روی استخر تولید نسل به منظور تولید نسل جدید، اعمال می‌شود. برای این منظور، عملگرهای جهش و تقاطع چندنقطه‌ای با توجه به ساختار کروموزوم جواب‌ها در نظر گرفته شده است. عملگرهای مذکور برای هر بخش از کروموزوم‌های جواب به صورت مستقل و تصادفی و با احتمال مشخص اعمال خواهد شد. علاوه بر آن، مجموع نرخ‌های اعمال جهش و تقاطع برابر با یک در نظر گرفته شده است. نقاط تقاطع برای هر بخش از کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. عملگر جهش در هر بخش به صورت تصادفی با جابجایی مکان دو ژن انتخاب شده انجام می‌شود.

گام ۸: در نهایت، شمارشگر تعداد تکرارها یک واحد افزایش یافته و به گام ۲ مراجعه شود.

### ۵- تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش در قالب نتایج محاسباتی حل مدل ریاضی (توابع هدف و محدودیت‌های ۱ تا ۲۵) با هدف بررسی اثر عدم قطعیت بر عملکرد و برنامه‌ریزی جریان کارگاهی ارائه شده است. برای این منظور، ده مساله نمونه اصلی و الگوی تولید داده‌ها از مطالعه انجام شده توسط نیکزاد و همکارانش [۹] به عنوان نزدیک‌ترین مساله مشابه بررسی شده در ادبیات موضوع که در این مطالعه نیز توسعه یافته، برداشت شده است (جدول ۱). به منظور نمایش سطوح متفاوت محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده، پنج سطح مختلف شامل ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از کل بودجه‌های عدم قطعیت (*Bud*) در نظر گرفته شده است (جدول ۱). سطوح ۰ و ۱۰۰ درصد بودجه به ترتیب نشان‌دهنده قطعیت و عدم قطعیت کامل است. سطوح میانی نیز یک حد متوسط از محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهند. به طور کلی، مسائل نمونه از ترکیب پارامترهای کلیدی شامل تعداد کل قطعات،

○ یک ( $RNI$ ): مجموعه‌های متفاوت از ژن‌های غیر همسایه در یک بخش مشخص به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. هر مجموعه یک توالی از ژن‌ها با اندازه تصادفی است. همچنین تعداد مجموعه‌های انتخابی نیز به صورت تصادفی تعیین می‌شود.

○ دو ( $RN2$ ): مجموعه‌ای از ژن‌ها همسایه در یک بخش مشخص به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. اندازه مجموعه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود.

#### ● ساختارهای تخریب ( $DN$ )

○ یک ( $DN1$ ): مجموعه انتخاب شده در مکان اولیه آن با یک توالی تصادفی برای مجموعه ژن‌ها قرار بگیرد.

○ دو ( $DN2$ ): مجموعه انتخاب شده با توالی معکوس برای مجموعه ژن‌ها در مکان اولیه خود قرار می‌گیرد.

○ سه ( $DN3$ ): مجموعه انتخاب شده با یک توالی اولیه ژن‌های خود به یک مکان تصادفی در همان بخش منتقل می‌شود. انتخاب مکان جدید با توجه به تعداد مجموعه‌های انتخاب شده انجام می‌شود. در صورتی که تعداد مجموعه ژن‌ها برابر با یک باشد، مکان جدید انتقال به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در غیر این صورت، مجموعه‌های انتخاب شده به صورت تصادفی به سمت راست یا چپ به اندازه مشخص انتقال می‌یابند. انتخاب جهت انتقال به صورت تصادفی و با احتمال برابر برای هر دو جهت انجام می‌شود. همچنین، مقدار جابجایی برای تمامی مجموعه ژن‌ها برابر خواهد بود.

○ چهار ( $DN4$ ): مجموعه ژن انتخاب شده به مکان جدید با ترتیب تصادفی جدید منتقل می‌شود. تمامی ملاحظات ذکر شده برای ساختار همسایگی تعمیر سه برای ساختار همسایگی چهار نیز برقرار است.

گام ۵: در صورت ارضا شدن شرط توقف (رسیدن به تعداد تکرارهای مشخص از پیش تعیین شده)، مجموعه جواب‌های ناچیره حاضر در مجموعه آرشیو به عنوان

همچنین، برتری الگوریتم ارائه شده نسبت به الگوریتم ترکیبی بر پایه نقاط قوت پارتو II و جستجوی همسایگی وسیع بیانگر اثر مثبت استفاده از یک فرآیند سیستماتیک در جستجوی همسایگی و انتخاب ساختارهای همسایگی مبتنی بر عملکرد هریک از ساختارهای فرآیند جست و جو نسبت به انتخاب ساختار همسایگی به صورت غیر نظام مند است. این در حالی است که این برتری را می توان از نظر معیار زمان جست و جو نیز مشاهده کرد. نتایج اعمال آزمون ناپارامتری من-ویتنی برای تمامی مقایسه های ممکن بین عملکرد الگوریتم ممتیک پیشنهادی با سایر روش های حل مورد مقایسه از منظر ۳ معیار در نظر گرفته شده، حاکی از اختلاف آماری معنادار برای تمامی مقایسات در سطح اطمینان ۹۵ درصد است [۵۰].

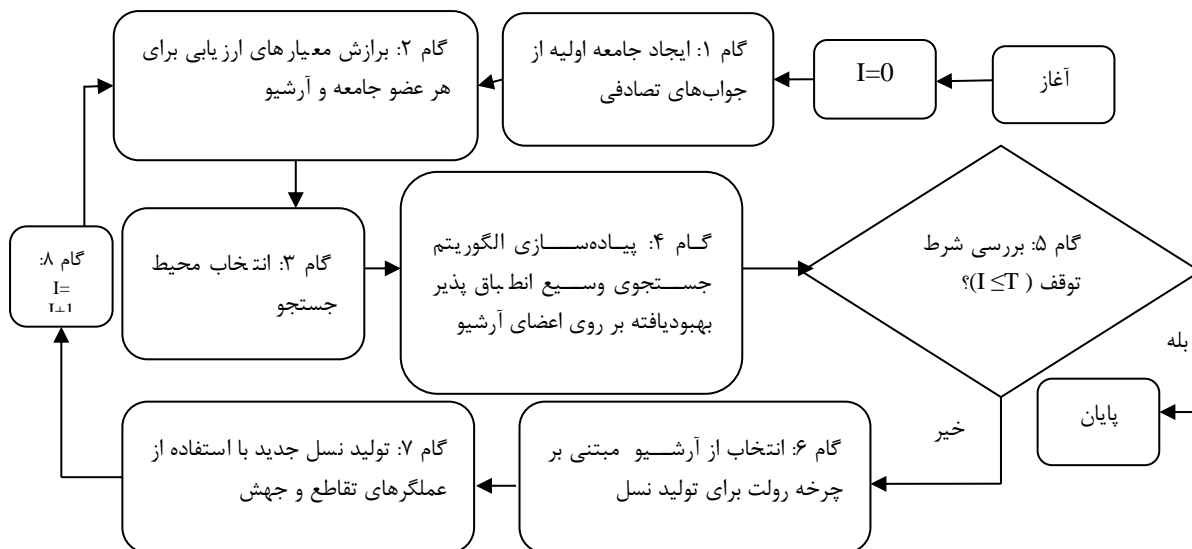
در شکل ۷، مجموعه نقاط پارتو یافت شده برای بهینه سازی توأمان حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین کار و حداقل سازی میانگین موزون تأخیر برای پنج سطح مختلف از بودجه عدم قطعیت نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، حداقل ساختن زمان تکمیل آخرین کار لزوماً به حداقل نمودن میانگین موزون کل تأخیرها منجر نخواهد شد. این در حالی است که با افزایش بودجه عدم قطعیت، زمان تکمیل آخرین کار افزایش یافته که حاکی از برنامه ریزی محافظه کارانه در برابر شدت یافتن عدم قطعیت است. سهم بودجه عدم قطعیت صفر و صد به ترتیب نشان دهنده حداکثر ریسک پذیری و ریسک گریزی (محافظه کاری) تصمیم گیرنده خواهد بود. از سوی دیگر، مشاهده می شود که برای یک مقدار مشخص از بودجه عدم قطعیت، شاهد روند افزایشی زمان تکمیل آخرین کار در پی کاهش میانگین موزون کل تأخیرها در پاسخگویی به تقاضای مشتریان هستیم. دلیل این امر را می توان در افزایش هزینه های مدیریت جریان کارگاهی برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان دانست که در نهایت به افزایش زمان تکمیل آخرین کار منجر خواهد شد.

محصولات، ماشین آلات، محصولات متشکل از قطعات با یک و بیش از یک فرایند تولید، قطعات با یک و بیش از یک فرایند تولید و بودجه های عدم قطعیت ایجاد شده اند. تنظیم تمامی پارامترهای الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهاد شده با استفاده از روش طراحی آزمایش های تاگوچی انجام شده است [۵۰] و نتایج آن را می توان در جدول ۲ مشاهده کرد.

نخست، کیفیت جواب های به دست آمده از الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر قوت پارتو II و جستجوی وسیع همسایگی انطباق پذیر پیشنهاد شده در مقایسه با الگوریتم فرا ابتکاری ارائه شده برای نزدیک ترین مدل مشابه در ادبیات موضوع، الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر قوت پارتو II بدون جستجوی محلی و با جستجوی همسایگی معمولی (غیر انطباق پذیر)، بر اساس دو معیار ارزیابی متداول ارائه شده در ادبیات بهینه سازی مسائل چندهدفه و پس از ۱۰ بار اجرای الگوریتم حل، بررسی شده است [۵۱، ۵۲]. این دو معیار به ترتیب عبارتند از: متوسط تعداد جواب های پارتو به دست آمده طی هر اجرای الگوریتم (معیار ۱) و متوسط نرخ جواب های پارتو به دست آمده (بر حسب درصد) توسط یک الگوریتم به طوری که توسط جواب های پارتو دیگر الگوریتم های مورد بررسی مغلوب نشود (معیار ۲). زمان بر حسب ثانیه نیز به عنوان سومین معیار مقایسه عملکرد الگوریتم ها در نظر گرفته شده است. نتایج ارائه شده در جداول ۳ و ۴ نشان از برتری الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهاد شده در مقایسه با الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر شبیه سازی تبرید و رقابت استعماری (ارائه شده توسط نیکزاد و همکارانش [۹]) دارد. نتایج مقایسه با الگوریتم مبتنی بر قوت پارتو II حاکی از اثربخشی فرآیند جستجوی محلی در عمق بخشیدن به جستجو و بهبود در کیفیت جواب های به دست آمده است. الگوریتم مبتنی بر قوت پارتو II از نظر زمان جست و جو برتر از فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر قوت پارتو II و جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر پیشنهاد شده است؛ هر چند این برتری تحت تأثیر کیفیت پایین جواب آن قرار می گیرد.

جدول ۱- مسائل نمونه

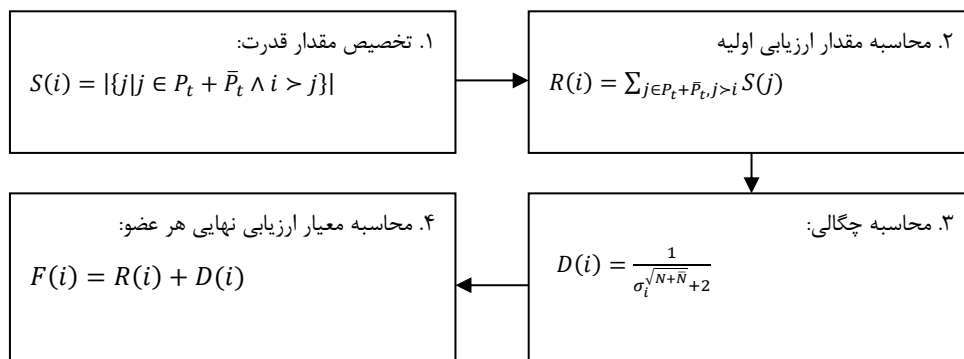
<i>Bud</i>	$(pr_1, pr_2)$	$(p_1, p_2)$	<i>m</i>	<i>Pr</i>	<i>P</i>	مسائل نمونه	<i>Bud</i>	$(pr_1, pr_2)$	$(p_1, p_2)$	<i>m</i>	<i>Pr</i>	<i>P</i>	مسائل نمونه
۰						۲۶	۰						۱
۲۵						۲۷	۲۵						۲
۵۰	(۶و۴)	(۱۸و۶)	۸	۱۰	۲۴	۲۸	۵۰	(۰و۱)	(۱و۱)	۱	۱	۲	۳
۷۵						۲۹	۷۵						۴
۱۰۰						۳۰	۱۰۰						۵
۰						۳۱	۰						۶
۲۵						۳۲	۲۵						۷
۵۰	(۷و۶)	(۲۱و۹)	۱۲	۱۳	۳۰	۳۳	۵۰	(۰و۱)	(۱و۱)	۲	۱	۲	۸
۷۵						۳۴	۷۵						۹
۱۰۰						۳۵	۱۰۰						۱۰
۰						۳۶	۰						۱۱
۲۵						۳۷	۲۵						۱۲
۵۰	(۸و۱۰)	(۲۵و۱۵)	۱۵	۱۸	۴۰	۳۸	۵۰	(۱و۱)	(۳و۱)	۱	۲	۴	۱۳
۷۵						۳۹	۷۵						۱۴
۱۰۰						۴۰	۱۰۰						۱۵
۰						۴۱	۰						۱۶
۲۵						۴۲	۲۵						۱۷
۵۰	(۱۱و۱۱)	(۳۱و۱۷)	۱۷	۲۲	۴۸	۴۳	۵۰	(۲و۲)	(۶و۳)	۳	۴	۹	۱۸
۷۵						۴۴	۷۵						۱۹
۱۰۰						۴۵	۱۰۰						۲۰
۰						۴۶	۰						۲۱
۲۵						۴۷	۲۵						۲۲
۵۰	(۱۷و۱۱)	(۴۳و۱۷)	۲۰	۲۸	۶۰	۴۸	۵۰	(۳و۴)	(۹و۶)	۶	۷	۱۵	۲۳
۷۵						۴۹	۷۵						۲۴
۱۰۰						۵۰	۱۰۰						۲۵



شکل ۲- ساختار الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی بر پایه الگوریتم مبتنی بر قوت پارتو II و جستجوی وسیع انطباق پذیر

	بخش ۱	بخش ۲	بخش ۳	بخش ۴
دوره زمانی				

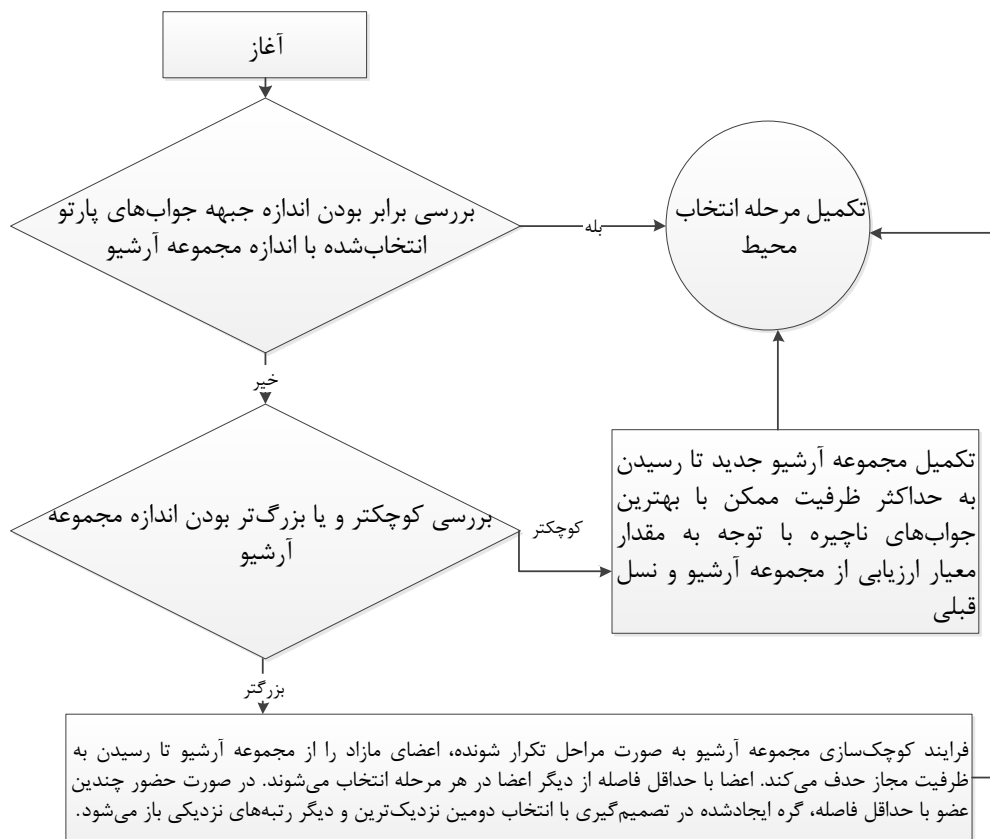
شکل ۳- ساختار کروموزوم ۲ بعدی جواب



شکل ۴- فرایند محاسبه معیار ارزیابی نهایی برای هر عضو در الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی

جدول ۲- مقادیر تنظیم شده برای پارامترهای الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی با استفاده از روش تاگوچی (مقادیر انتخاب شده از میان سه سطح مورد بررسی با خط زیرین مشخص شده است)

پارامتر	سطوح آزمایش	پارامتر	سطوح آزمایش
تکرار الگوریتم اصلی	(۵۰۰, ۴۰۰, ۳۰۰)	اندازه جمعیت	(۱۰۰, ۷۵, ۵۰)
تکرار الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر	(۱۵, ۱۰, ۵)	اندازه آرشیو	(۲۰, ۱۵, ۱۰)
احتمال جهش (۱ منهای احتمال تقاطع)	(۰/۰, ۱/۰, ۲/۳)	تکرار الگوریتم تپه‌نورد	(۵, ۴, ۳)
وزن ساختار همسایگی	(۰/۰, ۳/۰, ۵/۷)	اندازه بخش	(۲۵, ۱۵, ۱۰)



شکل ۵- فرایند انتخاب محیط در الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر قوت پارتو II و جستجوی وسیع همسایگی انطباق پذیر

ورودی:  
 مجموعه‌ای از ساختارهای همسایگی ( $N_s$ ) شامل تخریب ( $Dp^-$ ) و تعمیر ( $Rp^+$ ) برای قوت بخشیدن به فرایند جستجوی محلی، مجموعه آرشیو برای نگهداری جواب‌های ناچیره، نظم اولیه برای انتخاب ساختارهای همسایگی به همراه احتمالات اولیه یکسان برای هر انتخاب و در نهایت شرط توقف الگوریتم جستجو.

خروجی:  
 جواب‌های بهبود یافته  
 تکرار (تا رسیدن به تعداد تکرار مشخص)  
 $i=1; Dp^-= (1, \dots, 1); Rp^+= (1, \dots, 1)$   
 تعیین جواب پارتو در لیست پارتو در نظر گرفته شده قرار داده شود در  $x_c$   
 تکرار (تا رسیدن به تعداد تکرار مشخص)

انتخاب ساختار همسایگی با توجه به نظم تعریف شده در لیست در نظر گرفته شده و انتخاب بهترین ساختار تعمیر و تخریب ایجاد جواب جدید  $x'$  با اعمال ساختارهای تخریب و تعمیر انتخاب شده به صورت پی در پی ارزیابی تابع برازش جواب‌های به دست آمده در صورت غلبه جواب جدید ( $x'$ ) بر جواب اولیه ( $x$ )، جواب جدید جایگزین جواب اولیه شود.

به روزرسانی احتمال انتخاب مجموعه ساختارهای همسایگی تعمیر و تخریب انتخاب شده با استفاده از رابطه ذیل.  $\pi_i$  نشان‌دهنده امتیاز ساختار همسایگی نام است.  $w_i$  برابر است با عدد مثبت مشخص در صورت ایجاد بهبود در جواب و در غیر این صورت مقدار برابر با صفر دارد.  $\theta_i$  برابر است با تعداد دفعات استفاده از ساختار همسایگی نام پس از آخرین به روزرسانی وزن آن و  $r$  نیز ضریب میزان وابستگی به عملکرد گذشته در چرخه انتخاب رولت است.

$$\pi_{i,n+1} = r \times \frac{w_i}{\theta_i} + (1 - r) \times \pi_{i,n}$$

الگوریتم جستجوی ابتکاری تپه نورد بر روی جواب  $x'$  اعمال می‌شود (تغییر در توالی ژن‌ها به صورت تصادفی برای یک تعداد تکرار مشخص).

شکل ۶- شبه کد الگوریتم جستجوی همسایگی سریع انطباق پذیر پیشنهاد شده

جدول ۳- مقایسه کارایی الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهادشده با دیگر الگوریتم‌های مشابه

الگوریتم فرا ابتکاری نقاط قوت پارتو II			الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر نقاط قوت پارتو II و جستجوی همسایگی وسیع انطباق‌پذیر			درصد بودجه عدم قطعیت	مساله نمونه اصلی
معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱		
۲۹,۷۹	۰,۵۶۶۳	۸,۹۴	۴۲,۸۶	۰,۶۴۷۱	۱۰,۵۹	۰	۱
۳۳,۵۵	۰,۵۵۱۴	۷,۷۵	۴۴,۱۶	۰,۶۱۶۸	۹,۳۷	۲۵	
۳۱,۷۰	۰,۵۹۸۹	۷,۳۸	۴۶,۹۶	۰,۶۶۶۴	۹,۰۲	۵۰	
۳۲,۸۳	۰,۵۷۵۳	۷,۲۴	۴۶,۵۷	۰,۶۳۷۴	۸,۸	۷۵	
۳۶,۵۷	۰,۵۲۴۸	۶,۳۸	۵۴,۰۶	۰,۶۲۲۹	۸,۴۶	۱۰۰	
۱۹۲,۸۹	۰,۵۵۸۸	۹,۹۹	۲۹۷,۲۸	۰,۶۳۶۰	۱۱,۶۶	۰	
۱۹۵,۹۴	۰,۵۵۴۳	۸,۷۰	۲۹۸,۱۸	۰,۶۲۹۶	۱۰,۲۸	۲۵	
۱۹۹,۷۲	۰,۵۰۸۰	۸,۴۹	۳۰۱,۹۱	۰,۶۲۱۵	۱۰,۱۳	۵۰	
۲۰۷,۲۸	۰,۴۷۹۶	۸,۴۲	۳۰۱,۱۸	۰,۵۸۲۰	۱۰,۰۴	۷۵	
۲۱۱,۵۸	۰,۴۴۲۱	۷,۳۸	۳۲۰,۵۶	۰,۵۵۷۵	۹,۱۳	۱۰۰	
۹۳۱,۳۱	۰,۵۶۸۳	۱۱,۳۴	۱۳۱۶,۵۱	۰,۶۲۴۷	۱۳,۲۸	۰	۳
۹۳۷,۳۷	۰,۵۵۱۳	۱۰,۲۵	۱۳۲۴,۱۳	۰,۶۱۵۳	۱۲,۷	۲۵	
۱۰۳۲,۴۰	۰,۵۳۶۲	۸,۴۱	۱۳۸۲,۴۹	۰,۶۰۷۴	۱۰,۶۵	۵۰	
۱۰۸۴,۹۹	۰,۵۲۳۶	۷,۱۸	۱۴۶۹,۷۱	۰,۵۹۴۰	۹,۰۳	۷۵	
۱۱۱۸,۳۰	۰,۴۸۳۵	۶,۳۸	۱۵۳۷,۰۹	۰,۵۳۶۸	۸,۴۲	۱۰۰	
۱۲۳۰,۴۵	۰,۵۳۳۰	۱۲,۷۷	۱۷۲۳,۵۶	۰,۵۹۴۵	۱۴,۶۹	۰	
۱۳۶۵,۹۸	۰,۵۳۰۰	۱۲,۵۴	۱۹۱۶,۱۶	۰,۵۹۲۷	۱۴,۲۶	۲۵	
۱۳۹۳,۹۵	۰,۵۱۳۴	۱۱,۰۱	۱۹۵۵,۷۴	۰,۵۷۷۴	۱۲,۷۸	۵۰	
۱۴۵۱,۱۱	۰,۴۸۵۵	۹,۹۲	۲۰۷۰,۷۸	۰,۵۵۸۲	۱۱,۵۵	۷۵	
۱۵۸۹,۰۶	۰,۴۳۷۰	۸,۲۵	۲۱۸۱,۵۱	۰,۵۱۲۷	۱۰,۷۱	۱۰۰	
۱۳۲۹,۴۵	۰,۵۱۲۵	۱۴,۵۱	۱۸۸۱,۵۶	۰,۵۶۴۷	۱۶,۷۴	۰	۵
۱۴۷۴,۸۷	۰,۴۹۸۳	۱۳,۸۹	۲۰۲۰,۹۵	۰,۵۶۷۳	۱۵,۷۱	۲۵	
۱۴۶۱,۸۰	۰,۴۹۱۶	۱۳,۰۸	۲۰۸۶,۰۸	۰,۵۴۶۴	۱۴,۹	۵۰	
۱۴۸۱,۰۵	۰,۴۷۳۲	۱۲,۰۶	۲۱۲۳,۸۴	۰,۵۳۶۵	۱۳,۹۵	۷۵	
۱۵۷۳,۵۲	۰,۴۳۱۷	۱۰,۶۰	۲۲۸۶,۸۳	۰,۴۹۸۹	۱۲,۶۳	۱۰۰	



(ب)

فرا ابتكارى مبتنى بر شبیه‌سازى تبرید و رقابت استعماری			الگوریتم فرا ابتكارى مبتنى بر نقاط قوت پارتو II و جستجوی همسایگی وسیع			درصد بودجه عدم قطعیت	مساله نمونه اصلی
معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱		
۴۶,۰۲	۰,۵۸۶۳	۹,۲۰	۴۶,۲۶	۰,۵۸۹۷	۹,۱۸	۰	۱
۴۸,۲۶	۰,۵۷۶۴	۸,۹۸	۴۸,۷۷	۰,۵۷۷۱	۹,۱۱	۲۵	
۴۹,۰۳	۰,۶۱۴۳	۷,۶۷	۴۹,۵۴	۰,۶۱۹۴	۷,۶۹	۵۰	
۴۹,۸۸	۰,۵۸۸۱	۷,۵۰	۵۰,۴۶	۰,۵۹۱۰	۷,۵۲	۷۵	
۵۴,۷۱	۰,۵۵۵۸	۷,۰۷	۵۵,۲۷	۰,۵۵۶۷	۷,۱۳	۱۰۰	
۳۰۶,۸۱	۰,۵۸۲۲	۱۰,۳۰	۳۰۷,۸۷	۰,۵۸۴۲	۱۰,۴۲	۰	
۳۱۸,۴۸	۰,۵۸۱۵	۸,۹۸	۳۲۱,۸۳	۰,۵۸۳۱	۸,۹۸	۲۵	
۳۳۸,۰۰	۰,۵۷۰۶	۸,۸۵	۳۴۱,۸۳	۰,۵۷۶۰	۸,۹۴	۵۰	
۳۴۵,۴۸	۰,۵۴۰۰	۸,۶۶	۳۴۷,۹۹	۰,۵۴۶۷	۸,۷۶	۷۵	
۳۶۹,۲۱	۰,۵۰۱۷	۷,۳۹	۳۷۰,۵۷	۰,۵۰۴۱	۷,۳۷	۱۰۰	
۱۴۱۶,۲۸	۰,۵۸۴۱	۱۱,۷۳	۱۴۲۲,۴۶	۰,۵۸۴۰	۱۱,۷۱	۰	۳
۱۴۲۶,۷۳	۰,۵۶۳۰	۱۱,۱۴	۱۴۲۵,۸۳	۰,۵۶۴۱	۱۱,۱۱	۲۵	
۱۴۶۸,۱۷	۰,۵۵۴۰	۹,۱۷	۱۴۷۹,۷۱	۰,۵۵۴۷	۹,۲۸	۵۰	
۱۶۰۲,۱۹	۰,۵۴۶۰	۷,۶۷	۱۶۲۰,۱۹	۰,۵۴۷۲	۷,۷۰	۷۵	
۱۶۷۳,۹۳	۰,۵۰۱۷	۶,۶۵	۱۶۸۵,۹۵	۰,۵۰۲۶	۶,۶۵	۱۰۰	
۱۸۵۰,۲۹	۰,۵۵۳۴	۱۳,۱۸	۱۸۶۸,۳۸	۰,۵۵۴۳	۱۳,۲۸	۰	
۲۰۵۳,۴۸	۰,۵۵۲۲	۱۲,۸۹	۲۰۵۵,۴۹	۰,۵۵۱۵	۱۳,۰۷	۲۵	
۲۱۲۵,۳۴	۰,۵۳۲۱	۱۱,۲۲	۲۱۴۲,۲۶	۰,۵۳۲۲	۱۱,۳۴	۵۰	
۲۲۱۶,۰۱	۰,۵۱۳۸	۱۰,۱۷	۲۲۰۹,۱۸	۰,۵۱۸۳	۱۰,۱۶	۷۵	
۲۳۹۶,۰۳	۰,۴۹۱۹	۹,۱۳	۲۴۳۳,۰۰	۰,۴۹۴۷	۹,۱۸	۱۰۰	
۲۰۱۵,۲۰	۰,۵۲۹۴	۱۵,۱۸	۲۰۳۷,۵۹	۰,۵۳۱۶	۱۵,۳۲	۰	۵
۲۱۷۴,۰۱	۰,۵۱۶۲	۱۴,۰۴	۲۱۹۲,۱۸	۰,۵۲۲۸	۱۴,۱۶	۲۵	
۲۲۳۱,۹۲	۰,۵۰۸۹	۱۳,۴۳	۲۲۶۳,۰۲	۰,۵۱۱۴	۱۳,۴۵	۵۰	
۲۲۷۹,۴۰	۰,۴۸۵۹	۱۲,۴۴	۲۲۷۲,۷۶	۰,۴۸۸۵	۱۲,۵۷	۷۵	
۲۳۸۵,۴۹	۰,۴۶۱۲	۱۱,۵۳	۲۴۰۳,۴۶	۰,۴۶۵۵	۱۱,۶۹	۱۰۰	

جدول ۴- مقایسه کارایی الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهادشده با دیگر الگوریتم‌های مشابه

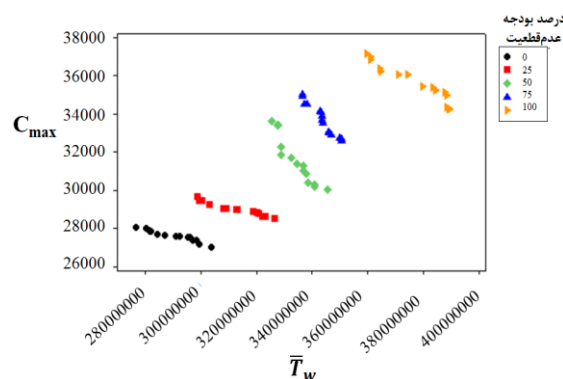
(الف)

الگوریتم فرا ابتکاری نقاط قوت پارتو II			الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر نقاط قوت پارتو II و جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر			درصد بودجه عدم قطعیت	مساله نمونه اصلی
معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱		
۳۴,۵۹	۰,۵۶۸۲	۸,۹۶	۴۴,۸۰	۰,۶۵۸۱	۱۰,۷۶	۰	۶
۳۸,۸۳	۰,۵۵۴۰	۷,۷۹	۴۶,۳۳	۰,۶۲۶۹	۹,۵۳	۲۵	
۳۶,۶۹	۰,۶۰۱۶	۷,۴۱	۴۹,۲۱	۰,۶۷۷۷	۹,۱۶	۵۰	
۳۸,۰۶	۰,۵۷۷۶	۷,۲۷	۴۹,۰۳	۰,۶۴۸۶	۸,۹۴	۷۵	
۴۲,۴۴	۰,۵۲۶۸	۶,۴۰	۵۶,۶۵	۰,۶۳۳۷	۸,۶۰	۱۰۰	
۲۲۳,۰۰	۰,۵۶۱۲	۱۰,۰۲	۳۱۱,۰۴	۰,۶۴۷۰	۱۱,۸۵	۰	
۲۲۷,۲۹	۰,۵۵۵۸	۸,۷۴	۳۱۳,۱۸	۰,۶۴۰۷	۱۰,۴۶	۲۵	
۲۳۱,۰۵	۰,۵۰۹۸	۸,۵۳	۳۱۷,۱۱	۰,۶۳۲۶	۱۰,۲۹	۵۰	
۲۴۰,۹۹	۰,۴۸۱۱	۸,۴۶	۳۱۶,۲۱	۰,۵۹۱۵	۱۰,۱۹	۷۵	
۲۴۵,۶۷	۰,۴۴۳۲	۷,۴۰	۳۳۶,۳۶	۰,۵۶۷۱	۹,۲۸	۱۰۰	
۱۰۸۱,۹۶	۰,۵۷۱۱	۱۱,۳۷	۱۳۷۸,۶۶	۰,۶۳۴۴	۱۳,۴۸	۰	۸
۱۰۸۸,۴۰	۰,۵۵۳۸	۱۰,۳۰	۱۳۸۶,۵۵	۰,۶۲۶۱	۱۲,۸۹	۲۵	
۱۱۹۸,۴۸	۰,۵۳۸۷	۸,۴۳	۱۴۴۶,۰۳	۰,۶۱۷۳	۱۰,۸۳	۵۰	
۱۲۶۰,۱۸	۰,۵۲۵۳	۷,۲۱	۱۵۴۲,۱۱	۰,۶۰۳۱	۹,۱۷	۷۵	
۱۲۹۸,۶۹	۰,۴۸۴۵	۶,۴۱	۱۶۱۴,۶۷	۰,۵۴۴۹	۸,۵۶	۱۰۰	
۱۴۲۹,۴۸	۰,۵۳۴۳	۱۲,۸۲	۱۸۰۴,۱۰	۰,۶۰۴۳	۱۴,۹۲	۰	
۱۵۸۷,۹۶	۰,۵۳۱۳	۱۲,۵۷	۲۰۱۷,۵۸	۰,۶۰۲۵	۱۴,۵۸	۲۵	
۱۶۱۵,۸۴	۰,۵۱۵۷	۱۱,۰۴	۲۰۵۲,۱۰	۰,۵۸۷۰	۱۳,۰۰	۵۰	
۱۶۷۹,۱۳	۰,۴۸۷۸	۹,۹۷	۲۱۶۴,۸۰	۰,۵۶۷۰	۱۱,۷۳	۷۵	
۱۸۳۹,۳۶	۰,۴۳۹۱	۸,۲۷	۲۲۸۶,۵۷	۰,۵۲۰۵	۱۰,۹۰	۱۰۰	
۱۵۳۶,۲۳	۰,۵۱۴۴	۱۴,۵۸	۱۹۷۵,۰۳	۰,۵۷۴۵	۱۷,۰۱	۰	۱۰
۱۷۰۶,۸۰	۰,۴۹۹۹	۱۳,۹۵	۲۱۱۷,۵۴	۰,۵۷۶۸	۱۵,۹۹	۲۵	
۱۶۹۰,۲۴	۰,۴۹۲۷	۱۳,۱۴	۲۱۸۱,۶۶	۰,۵۵۵۰	۱۵,۱۵	۵۰	
۱۷۱۱,۰۴	۰,۴۷۴۵	۱۲,۰۸	۲۲۳۲,۷۱	۰,۵۴۵۱	۱۴,۱۷	۷۵	
۱۸۲۸,۴۶	۰,۴۳۳۶	۱۰,۶۵	۲۳۹۸,۵۰	۰,۵۰۶۶	۱۲,۸۵	۱۰۰	

(ب)

فرا ابتکاری مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید و رقابت استعماری			الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر نقاط قوت پارتو II و جستجوی همسایگی وسیع			درصد بودجه عدم قطعیت	مساله نمونه اصلی
معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱		
۵۰,۱۹	۰,۵۹۲۵	۹,۲۹	۵۲,۷۱	۰,۵۹۳۳	۹,۲۴	۰	۶
۵۲,۷۴	۰,۵۸۲۳	۹,۰۸	۵۵,۸۰	۰,۵۸۰۸	۹,۱۸	۲۵	
۵۳,۲۸	۰,۶۲۰۹	۷,۷۵	۵۶,۰۸	۰,۶۲۴۳	۷,۷۴	۵۰	
۵۴,۱۳	۰,۵۹۴۱	۷,۵۸	۵۷,۶۰	۰,۵۹۴۷	۷,۵۸	۷۵	
۵۹,۷۷	۰,۵۶۱۶	۷,۱۴	۶۲,۸۳	۰,۵۶۰۱	۷,۱۹	۱۰۰	
۳۳۴,۲۵	۰,۵۸۷۶	۱۰,۳۹	۳۴۸,۰۴	۰,۵۸۸۲	۱۰,۴۹	۰	
۳۴۶,۷۰	۰,۵۸۷۲	۹,۰۶	۳۶۸,۹۹	۰,۵۸۷۱	۹,۰۵	۲۵	
۳۶۷,۱۹	۰,۵۷۶۵	۸,۹۵	۳۸۶,۰۱	۰,۵۸۰۶	۹,۰۱	۵۰	
۳۷۵,۰۳	۰,۵۴۴۹	۸,۷۴	۳۹۹,۸۸	۰,۵۵۰۵	۸,۸۳	۷۵	
۴۰۱,۹۷	۰,۵۰۶۴	۷,۴۶	۴۲۶,۳۳	۰,۵۰۸۰	۷,۴۲	۱۰۰	
۱۵۳۷,۵	۰,۵۹۰۴	۱۱,۸۳	۱۶۱۶,۰۳	۰,۵۸۷۸	۱۱,۷۹	۰	۸
۱۵۵۲,۵	۰,۵۶۹۱	۱۱,۲۵	۱۶۰۸,۲۰	۰,۵۶۸۰	۱۱,۱۹	۲۵	
۱۶۰۲,۹	۰,۵۵۹۵	۹,۲۷	۱۷۰۳,۶۰	۰,۵۵۸۲	۹,۳۵	۵۰	
۱۷۴۰,۷	۰,۵۵۱۰	۷,۷۵	۱۸۴۱,۶۵	۰,۵۵۰۸	۷,۷۶	۷۵	
۱۸۱۶,۸	۰,۵۰۶۴	۶,۷۲	۱۹۲۵,۰۸	۰,۵۰۵۷	۶,۷۰	۱۰۰	
۲۰۱۹,۸	۰,۵۵۸۷	۱۳,۳۰	۲۱۴۰,۶۴	۰,۵۵۷۹	۱۳,۳۷	۰	
۲۲۴۱,۵	۰,۵۵۷۶	۱۳,۰۲	۲۳۶۲,۷۰	۰,۵۵۴۹	۱۳,۱۵	۲۵	
۲۳۲۲,۰	۰,۵۳۷۲	۱۱,۳۲	۲۴۶۲,۷۲	۰,۵۳۶۳	۱۱,۴۳	۵۰	
۲۴۱۶,۳	۰,۵۱۸۷	۱۰,۲۸	۲۵۳۹,۹۶	۰,۵۲۲۳	۱۰,۲۲	۷۵	
۲۶۱۰,۷	۰,۴۹۷۳	۹,۲۲	۲۷۸۲,۰۸	۰,۴۹۸۰	۹,۲۵	۱۰۰	
۲۲۰۲,۳	۰,۵۳۴۲	۱۵,۳۴	۲۲۹۲,۸۶	۰,۵۳۵۲	۱۵,۴۴	۰	۱۰
۲۳۶۸,۸	۰,۵۲۱۲	۱۴,۱۸	۲۴۸۶,۳۵	۰,۵۲۶۳	۱۴,۲۶	۲۵	
۲۴۳۷,۲	۰,۵۱۴۳	۱۳,۵۶	۲۵۴۹,۲۲	۰,۵۱۴۹	۱۳,۵۵	۵۰	
۲۴۸۳,۸	۰,۴۹۰۴	۱۲,۵۵	۲۵۷۳,۹۷	۰,۴۹۲۲	۱۲,۶۷	۷۵	
۲۵۹۸,۳	۰,۴۶۵۴	۱۱,۶۴	۲۷۷۱,۴۶	۰,۴۶۹۳	۱۱,۷۶	۱۰۰	

جستجوی فضای جواب از الگوریتم فرا ابتکاری نقاط قوت پارتو II بهره برده و بهبود کیفیت جواب‌های پارتو در هر مرحله توسط الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق‌پذیر انجام می‌شود. نتایج سنجش کارایی این الگوریتم نسبت به سه الگوریتم نقاط قوت پارتو II، ترکیبی نقاط قوت پارتو II با جستجوی همسایگی وسیع و ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و رقابت استعماری حاکی از برتری معنادار از حیث کیفیت جواب است. این برتری حاکی از اثربخشی مثبت استفاده از یک ساختار سیستماتیک برای انتخاب ساختارهای همسایگی حین فرآیند بهبود جواب است. نتایج حل مدل استوار چندهدفه ارائه شده نیز نشان می‌دهد که با افزایش بودجه عدم قطعیت، زمان تکمیل آخرین کار و میانگین موزون تأخیرها افزایش یافته و شاهد شکل‌گیری یک طراحی محافظه‌کارانه برای برنامه‌ریزی جریان کارگاهی خواهیم بود. استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای می‌تواند به‌خوبی طیف متنوعی از ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده را نشان دهد. به‌منظور انجام تحقیقات آتی می‌توان امکان تولید محصولات نیمه ساخته به هنگام بروز کمبود در تأمین قطعات موردنیاز و یا برنامه‌ریزی تحت وقوع اختلال به‌واسطه ایجاد خرابی در تجهیزات و یا جریان تأمین قطعات را به‌منظور افزایش کارایی مدل برنامه‌ریزی ارائه شده در دنیای واقعی پیشنهاد می‌شود. همچنین توسعه روش‌های حل کارا با هدف افزایش کیفیت جواب و کاهش زمان حل مدل ریاضی توسعه داده شده با پیشنهادها و تحقیقاتی مطرح شده نیز می‌تواند برای محققان و فعالان این حوزه مطلوب باشد.



شکل ۷- مجموعه نقاط جبهه پارتو با توجه به معیارهای ارزیابی سود و میانگین موزون تأخیرها برای سطوح مختلف عدم قطعیت تقاضای محصولات نهایی

## ۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح چندهدفه برای برنامه‌ریزی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر دومرحله‌ای با خط مونتاژ و در نظر گرفتن ماشین اختصاصی ارائه شده است. هدف مدل ارائه شده عبارت است از حداکثر نمودن سود کل مجموعه و حداقل نمودن میانگین موزون کل تأخیرها به‌صورت توأمان. همچنین عدم قطعیت میزان تقاضای محصولات نهایی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای جهت نمایش سطوح مختلفی از محافظه‌کاری تصمیم‌گیرندگان نمایش داده شده است. با توجه به پیچیدگی‌های بالای حل مدل پیشنهاد شده، یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی جدید مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری نقاط قوت پارتو II و جستجوی همسایگی وسیع انطباق‌پذیر ارائه شده است. تنظیم پارامترهای الگوریتم مذکور با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی انجام شده است. این الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی برای

## ۷- مراجع

- [1] Sangsawang, C., Sethanan, K., Fujimoto, T., Gen, M.c. (2015). "Metaheuristic Optimization Approaches For Two-Stage Reentrant Flexible Flow Shop With Blocking Constraint". Expert Systems with Applications, Vol 42(15): pp. 2395-2410.
- [2] Linn, R., Zhang, W. (1999). "Hybrid Flow Shop Scheduling: A Survey". Comput. Ind. Eng., Vol 37: pp. 57-61.
- [3] Gupta, J., Hariri, A., Potts, P. (1997). "Scheduling A Two-Stage Hybrid Flow Shop With Parallel Machines at The First Stage". Ann. Oper. Res., Vol 69: pp. 171-191.

- [4] Haouari, M., Hidri, L., Gharbi, A. (2006). "Optimal Scheduling of a Two-Stage Hybrid Flow Shop". *Math. Methods Oper. Res.*, Vol 64: pp. 107–124.
- [5] Hall, N.G., Sriskandarajah, C. (1996). "A Survey of Machine Scheduling Problems With Blocking and No-Wait In Process". *Oper. Res.*, Vol 44: pp. 510–525.
- [6] Ruiz, R., Serifoğlu, F.S., Urlings, V. (2008). "Modeling Realistic Hybrid Flexible Flow shop Scheduling Problems". *Comput. Oper. Res.*, Vol 35: pp. 1151-1175.
- [7] Allaoui, H., Artiba, A. (2006). "Scheduling Two-Stage Hybrid Flow Shop with Availability Constraints". *Comput. Oper. Res.*, Vol 33: pp. 1399–1419.
- [8] Carпов, S., Carlier, J., Nace, D., Sirdey, R. (2012). "Two-Stage Hybrid Flow Shop With Precedence Constraints and Parallel Machines at Second Stage". *Comput. Oper. Res.*, Vol 39: pp. 736–745.
- [9] Nikzad, F., Rezaeian, J., Mahdavi, I., Rastgar, I. (2015). "Scheduling of Multi-Component Products in a Two-Stage Flexible Flow Shop". *Applied Soft Computing*, Vol 32: pp. 132–143.
- [10] Lin, H.-T., Liao, C.J. (2003). "A Case Study in a Two-Stage Hybrid Flow Shop With Setup Time and Dedicated Machines". *Int. J. Prod. Econ.*, Vol 86: pp. 133–143.
- [11] Cheng, T.E., Lin, B.M., Tian, Y. (2009). "Scheduling of a Two-Stage Differentiation Flow Shop To Minimize Weighted Sum of Machine Completion Times". *Comput. Oper. Res.*, Vol 36: pp. 3031–3040.
- [12] Brah, S.A., Hunsucker, J.L. (1991). "Branch and Bound Algorithm For The Flow Shop With Multiple Processors". *Eur. J. Oper. Res.*, Vol 51: pp. 88–99.
- [13] Riane, F., Artiba, A., Elmaghraby, S.E. (2002). "Sequencing a Hybrid Two-Stage Flow Shop with Dedicated Machines". *Int. J. Prod. Res.*, Vol 40: p. 4353–4380.
- [14] Li, Z., Liu, J., Chen, Q., Mao, N., Wang, X. (2015). "Approximation Algorithms for the Three-Stage Flexible Flow Shop Problem with Mid Group Constraint". *Expert Systems with Applications*, Vol 42(7): pp. 3571-3584.
- [15] Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., Ramezani, P. (2013). "Bi-Objective Simulated Annealing Approaches For No-Wait Two-Stage Flexible Flow Shop Scheduling Problem". *Scientia Iranica E*, Vol 20(3): pp. 861–872.
- [16] Gerstl, E., Mosheiov, G. (2014). "A Two-Stage Flexible Flow Shop Problem with Unit-Execution-Time Jobs and Batching". *Int. J. Production Economics*, Vol 158: pp. 171–178.
- [17] Wei, Q., E. Shan, Kang, L. (2014). "A FPTAS for a Two-Stage Hybrid Flow Shop Problem and Optimal Algorithms for Identical Jobs". *Theoretical Computer Science*, Vol 524: pp. 78–89.
- [18] Johnson, S.M. (1954). "Optimal Two and Three Stage Production Schedules With Setup Times Included". *Naval Res. Log., Quart.* 1: pp. 61–68.
- [19] Lee, C.-Y., Cheng, T., Lin, B.M. (1993). "Minimizing the Makespan in the 3-Machine Assembly Type Flow Shop Scheduling Problem". *Manage. Sci.*, 39: pp. 616–625.
- [20] Hariri, A., Potts, C. (1997). "A branch and bound algorithm for the two-stage assembly scheduling problem". *Problem, Eur. J. Oper. Res.*, 103: pp. 547–556.
- [21] Fattahi, P., Hosseini, S.M.H., Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., (2014). "A Branch and Bound Algorithm For Hybrid Flow Shop Scheduling Problem With Setup Time and Assembly Operations". *Appl. Math. Model.*, Vol 38: pp. 119-134.
- [22] Yokoyama, M., (2004). "Scheduling For Two-Stage Production System With Setup and Assembly Operations". *Comput. Oper. Res.*, Vol 31: pp. 2063–2078.

- [23] Yokoyama, M., Santos, D.L. (2005). "Three-Stage Flow-Shop Scheduling With Assembly Operations To Minimize The Weighted Sum of Product Completion Times". *Eur. J. Oper. Res.*, Vol 161: pp. 754–770.
- [24] Yokoyama, M. (2008). "Flow Shop Scheduling with Setup and Assembly Operations". *Eur. J. Oper. Res.*, Vol 187: pp. 1184–1195.
- [25] Yan, H.-S., Wan, X.-Q., Xiong, F.-L. (2014). "A Hybrid Electromagnetism-Like Algorithm For Two-Stage Assembly Flow Shop Scheduling Problem". *Int. J. Prod. Res.*, Vol 52(14): pp. 1–14.
- [26] Xiong, F., Xing, K., Wang, F. (2015). "Scheduling A Hybrid Assembly-Differentiation Flows Shop To Minimize Total Flow Time". *Eur. J. Oper. Res.*, Vol 240: pp. 338–354.
- [27] Shoaardebili, N., Fattahi, P. (2014). "Multi-Objective Meta-Heuristics To Solve Three-Stage Assembly Flow Shop Scheduling Problem With Machine Availability Constraints". *Int. J. Prod. Res.*, Vol 53(3): pp. 1-25.
- [28] Besbes, W., Loukil, T., Teghem, J. (2010). "A Two-Stage Flow Shop with Parallel Dedicated Machines", in *Proceedings of the Conference Mosim*.
- [29] Wang, S., Liu, M. (2013). "A Heuristic Method For Two-Stage Hybrid Flow Shop with Dedicated Machines". *Comput. Oper. Res.*, Vol 40: pp. 438–450.
- [30] Hadda, H., Dridi, N., Hajri-Gabouj, S. (2014). "Exact Resolution of The Two-Stage Hybrid Flow Shop With Dedicated Machines". *Optim. Lett.*, Vol 8(8): pp. 1–11.
- [31] Abbas, M., Bekrar, A., Benmansour, R., Hanafi, S. (2014). "On The Complexity of Robotic Flow Shop With Transportation Constraints", in *ROADEF-15ème congrès annuel de la Société franc, aise de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*.
- [32] Bertsimas, D., Sim, M. (2002). "The Price of Robustness". *Oper. Res.*, Vol 52(1): pp. 35 - 53.
- [۳۳] بهشتی‌نیا، م. قاضی وکیلی، ن. (۱۳۹۴). "ارزیابی الگوریتم‌های زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر و مقایسه آن‌ها با الگوریتم ژنتیک دو بخشی". *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، ۴۰، ۱۶-۱.
- [34] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Karaoglan, I. (2008). "A Steady-State Genetic Algorithm for Multi-Product Supply Chain Network Design". *Computers & Industrial Engineering*, Vol 56: 521-537.
- [35] Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E. (2015). "Robust Closed-Loop Global Supply Chain Network Design under Uncertainty: The Case of the Medical Device Industry". *International Journal of Production Research*, Vol 53(5): pp. 1596-1624.
- [36] Fahimnia, B., Farahani, R.Z., Sarkis, J., (2013) "Integrated Aggregate Supply Chain Planning Using Memetic Algorithm – A Performance Analysis Case Study". *International Journal of Production Research*, Vol 15(18): pp. 5354-5373.
- [37] Moscato, P., Norman, M.G., (1992). "A Memetic Approach for The Traveling Salesman Problem Implementation of A Computational Ecology For Combinatorial Optimization On Message-Passing Systems". *Parallel Computing and Transporter Applications*, pp. 177–186.
- [38] Fonseca, C.M., Fleming, P.J. (1993). "Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization", in the *Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, M. Kaufmann, Editor. SanMateo, California.
- [39] Horn, J., Nafpliotis, N., Goldberg, D.E. (1994). "A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization, in *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*", IEEE World Congress on Computational Computation, N. Piscataway, Editor. IEEE Press.
- [40] Srinivas, N., Deb, K. (1994). "Multi-objective Optimization Using Non-dominated Sorting in Genetic Algorithms". *Evolutionary Computation*, Vol 2(3): pp. 221–248.
- [41] Zitzler, E., Thiele, L. (1999). "Multi-objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol 3(4): pp. 257–271.

- [42] Knowles, J.D., Corne, D.W. (1999). "The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Pareto Multi-objective Optimization", in Congress on Evolutionary Computation (CEC99), N. Piscataway, Editor. IEEE Press. pp. 98–105.
- [43] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T. (2000). "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, in Parallel Problem Solving from Nature". Springer: Berlin. pp. 849–858.
- [44] Corne, D.W., Knowles, J.D., Oates, M.J. (2000). "The Pareto Envelope-Based Selection Algorithm for Multi-objective Optimization", in Parallel Problem Solving from Nature. Springer: Berlin. pp. 839–848.
- [45] Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L. (2001). "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm". Department of Electrical Engineering: Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich.
- [46] Baños, R., Ortega, J., Gilb, C., Márquez, A.L., Toro, F.D. (2013). "A Hybrid Meta-Heuristic for Multi-Objective Vehicle Routing Problems with Time Windows". Computers & Industrial Engineering, Vol 65: pp. 286–296.
- [47] Ropke, S., Pisinger, D. (2006). "An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows". TRANSPORTATION SCIENCE, Vol 40: pp. 455-472.
- [48] Talbi, E.G. (2009). "Metaheuristics: From Design to Implementation". Wiley.
- [49] Eskandarpour, M., Nikbakhsh, E., Zegordi, S.H. (2014). "Variable Neighborhood Search for the Bi-Objective Post-Sales Network Design Problem: A Fitness Landscape Analysis Approach". Computers & Operations Research, Vol 52: pp. 300–314.
- [50] Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E. (2015). "Robust Closed-Loop Global Supply Chain Network Design under Uncertainty: The Case of the Medical Device Industry". International Journal of Production Research, Vol 53(5): pp. 1596-1624.
- [51] Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., Paksoy, T. (2006). "A Genetic Algorithm Approach For Multi-Objective Optimization of Supply Chain Networks". Computers & Industrial Engineering, Vol 51: pp. 196-215.
- [52] Eskandarpour, M., E. Nikbakhsh, Zegordi, S.H. (2014). "Variable Neighborhood Search for the Bi-Objective Post-Sales Network Design Problem: A Fitness Landscape Analysis Approach". Computers & Operations Research, Vol 52(B): pp. 300–314.