مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱-۳۳، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۰۵-۱۱۵

Original Article

# رویکرد واکنشی باثبات برای زمان‌بندی آنی سیستم جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با شرط‌پذیرش یا رد سفارش‌های غیرمنتظره

**دنیا رحمانی (استادیار)***
**دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی**

درمسائل زمان‌بندی اختلالات غیرمنتظره‌یی رخ می‌دهد که باعث می‌شود یافتن جواب‌های باثبات حتی نسبت به یافتن جواب‌های بهینه کاراتر باشد. تاکنون در مواجهه با چنین اختلالاتی، یا از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده شده است که بسیار وقت‌گیرند یا مقیاس‌های جای‌گزینی توسعه داده شده‌اند که تقریبی از شرایط واقعی سیستم بعد از اختلال را پیش‌بینی می‌کنند که ضعف‌های زیادی دارند.
در این مقاله برای به‌دست‌آوردن زمان‌بندی باثبات، در برابر اختلالاتی که به‌صورت ورود غیرمنتظره و پیش‌بینی‌نشده‌ی کارهای جدید است، یک رویکرد نوین واکنشی چندهدفه ارائه شده است که بعد از هر اختلال به زمان‌بندی مجدد سیستم می‌پردازد و عملکرد آن با یک مطالعه‌ی موردی در صنعت شیرآلات نفتی بررسی شده است. نتایج محاسباتی حاکی از آن است که رویکرد پیشنهادی در برابر روش‌های موجود عملکرد بهتری دارد.

**واژگان کلیدی:** زمان‌بندی آنی، اختلال، مقیاس‌های جای‌گزین، ثبات، زمان‌بندی واکنشی.

drahmani@kntu.ac.ir

## ۱. مقدمه

در اغلب مسائل زمان‌بندی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند فرض می‌شود که تمام پارامتر و مشخصه‌های مسئله از قبل مشخص و قابل پیش‌بینی اند. به هرحال چنین فرضی منعکس‌کننده‌ی این واقعیت که رخدادهای غیرمنتظره و پیش‌بینی‌نشده در سیستم‌های تولیدی واقعی رخ می‌دهند، نیست. بنابراین، زمان‌بندی بهینه که بر پایه‌ی معیارهای قطعی و شرایط مشخص انجام می‌شود زمانی‌که در سطح کارگاه استفاده شود ممکن است منتج به کاهش عملکردهای سیستم شود[۱] به این دلیل تأکید بیشتر بر آن است که زمان‌بندی‌های ایجادشده بتوانند عدم قطعیت‌هایی را که معلول اختلالات تصادفی و غیرمنتظره هستند، لحاظ کنند. اخیراً زمان‌بندی‌هایی که با درنظرگرفتن این عدم قطعیت‌ها تولید می‌شوند بیشتر مورد توجه محققان قرارگرفته است؛ زیرا تفسیر بهتری از واقعیت بیرونی دارند.

زمانی‌که یک اختلال تصادفی یا غیرمنتظره در سیستم رخ می‌دهد، لازم است که زمان‌بندی مجدد انجام شود و برنامه‌ریز باید مقیاس عملکردی جدیدی را به جز اهداف کلاسیک نظیر زمان اتمام آخرین کار، زمان در جریان ساخت، دیرکرد، زودکرد و... برای زمان‌بندی مجدد مشخص کند. در پژوهش‌های اخیر، دو مقیاس جدید یعنی پایداری و ثبات مورد توجه بسیاری قرارگرفته است که در مواجهه با اختلالات کاراتر عمل می‌کنند.

معیارهای «پایداری» و «ثبات» برای کاهش اثر رخدادهای غیرمنتظره و تصادفی تعریف شده‌اند. اگر عملکرد و تابع هدف برنامه‌ی واقعی بعد از مواجهه با اختلالات نسبت به برنامه‌ی اولیه تغییر کمتری کند، پایدار نامیده می‌شود. از طرفی، معیار ثبات به تفاوت بین خود برنامه‌های اولیه و واقعی (مثل ترتیب انجام کارها) توجه دارد نه عملکرد آن‌ها. اگر برنامه‌یی هنگام مواجه‌شدن با خرابی یا اختلال، نسبت به برنامه‌ی اصلی زیاد تغییر نکند، برنامه با ثبات خواهد بود.

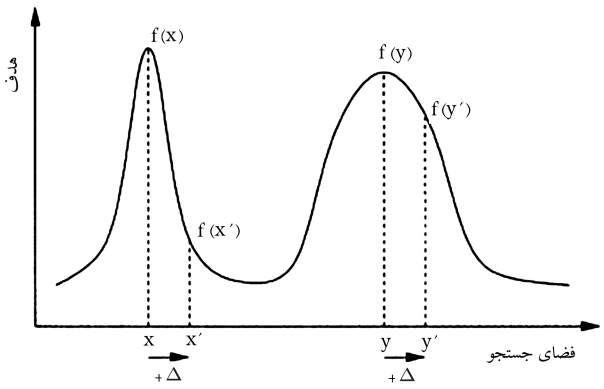
لِاون و همکاران[۱] پایداری را در محیط کارگاهی مطالعه کردند. هدف آن‌ها ایجاد و ساخت یک زمان‌بندی اولیه‌ی پایدار بود. با استفاده از رویکرد جابه‌جایی به سمت راست، یک زمان‌بندی برون‌خط (آفلاین) پیشین برای دستیابی به عملکرد بهتر سیستم در حالت وجود خرابی‌های ماشین، توسعه یافته است. جِنسن[۲] زمان‌بندی‌های پایدار را در محیط کارگاهی با توجه به خرابی‌های ماشین به‌طوری‌که معیار عملکرد زمان اتمام آخرین کار درنظرگرفته شود، تولید کرد.

اساس ایده‌ی جنسن بر این اصل استوار است که جواب بهینه‌ی استوار در مناطق پهن‌تر از تابع توزیع (هدف) قرار دارد در صورتی‌که جواب‌های بهینه‌ی شکننده و ناپایدار بر روی قله‌های نازک و باریک از تابع توزیع قرار می‌گیرند. این مسئله در شکل ۱ قابل مشاهده است.

ساتس‌کوک و همکاران[۳و۴] نیز برای بررسی پایداری و ثبات در محیط تک‌ماشینی، بر اساس زمان‌های فرایند بازه‌یی رویکردهایی ارائه دادند.

یکی از اولین مطالعات در این محیط به‌وسیله وو و همکاران[۵] انجام پذیرفت که مسئله‌ی زمان‌بندی مجدد تک‌ماشینی با خرابی‌های تصادفی ماشین را در نظر

* نویسنده مسئول
*تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۷/۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۲/۱، پذیرش ۱۳۹۵/۳/۸.*




شکل ۱. پایداری جواب در منطقه‌ی پهن‌تر نسبت به منطقه‌ی باریک.

گرفتند. آن‌ها کارها را در پاسخ به خرابی ماشین زمان‌بندی مجدد کردند به‌طوری‌که حداقل زمان اتمام آخرین کار، همراه با زمان‌بندی باثبات ایجاد شود.

وَن دِ وُندِر و همکاران[۶] زمان‌بندی‌های اولیه پایدار را برای مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منبع تحت تغییرپذیری مدت زمان فعالیت، تولید کردند.

رانگساریتراتسامی و همکاران[۷] یک روش زمان‌بندی مجدد را بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله زمان‌بندی کارگاهی با درنظرگرفتن این مسئله که کارها به‌صورت پویا می‌رسند، پیشنهاد کردند. الگوریتم پیشنهادی آن‌ها به‌طور هم‌زمان کارایی را با حفظ زمان اتمام آخرین کار و دیرکرد و همچنین ثبات و پایایی را به‌وسیله کمینه‌کردن انحرافات زمان آغاز کارها در نظر می‌گیرد.

شفاعی و بارُن[۸و۹] از رویکرد زمان غلطان برای بررسی پایداری زمان‌بندی‌ها استفاده کردند. کولینگ و همکاران[۱۰] ساختار چندعامله را با دو معیار ثبات و سودمندی برای تولید یک زمان‌بندی پیشگویانه ـ واکنشی، استفاده کردند. پلیسلا و همکاران[۱۱و۱۲] رویکردی دومرحله‌یی را برای تولید زمان‌بندی سفارش جزیی انعطاف‌پذیر پایدار، برای مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با محدودیت ظرفیت، با کمینه و بیشینه‌ی زمان‌های تاخیر مطالعه کردند.

قیزیل و همکاران،[۱۳] برای مسئله‌ی جریان کارگاهی، برای مقابله و مواجهه با اختلالات یک رویکرد کیفی‌گرافیکی را مطرح کردند. آن‌ها برخلاف سایر مقالات موجود در این حوزه، به‌جای استفاده از مقیاس‌های کمی برای پایداری یک رویکرد گرافیکی را مطرح کردند به‌طوری‌که به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا پیامدهای خرابی‌های اتفاقی را مشاهده و بهترین توالی را انتخاب کند.

برتری روش‌های زمان‌بندی واکنشی مثل زمان‌بندی آنی نسبت به روش‌های قطعی در شرایط عدم قطعیت توسط ماتسورا و کانزاشی[۱۴] بحث شده است. آن‌ها یک محیط کارگاهی را با هدف کمینه‌سازی زمان اتمام آخرین کار با درنظرگرفتن خرابی ماشین‌آلات بررسی کردند. سپس روش‌های زمان‌بندی معین (توالی ثابت)، زمان‌بندی مجدد، و زمان‌بندی پویا و آنی را دو به دو بر اساس زمان اتمام آخرین کار و انحراف از آن در طی اجرا مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در شرایط وجود خرابی‌های اتفاقی، روش‌های پویا و آنی به روش‌های زمان‌بندی مجدد و روش‌های زمان‌بندی مجدد نیز به توالی ثابت و قطعی ارجحیت دارد.

گورن و سابونکوگلو[۱۵] به‌بررسی زمان‌بندی پایدار و باثبات با درنظرگرفتن خرابی‌های تصادفی می‌پردازند. آن‌ها دو مقیاس جایگزین برای پایداری و ثبات ارائه و با الگوریتم جست‌وجوی ممنوع مسئله را حل کردند. در نهایت نیز با درنظرگرفتن یک تابع خطی از ترکیب دو معیار پایداری و ثبات، یعنی با درنظرگرفتن هم‌زمان این دو معیار، حل و تحلیل کرده‌اند.

به‌علاوه، می‌توان دید که بر خلاف محیط تک‌ماشینی، محیط دوماشینی و محیط کارگاهی، بیشتر مقالاتی که در حوزه‌ی زمان‌بندی تصادفی منتشر شده‌اند توجه کمی به مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر داشته‌اند. همچنین مقالات برمسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر قطعی، مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی کلاسیک تصادفی، یا مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر دینامیک، تمرکز داشته‌اند. تحقیقات بر روی زمان‌بندی پیش‌بینانه برای مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر تحت خرابی‌های ماشین در نظرگرفته نشده است. هدف مقاله‌ی الهینای و اِلمکاوی[۱۶] بهبود پایداری، ثبات و پایایی زمان‌بندی پیش‌بینانه برای مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر با درنظرگرفتن خرابی‌های تصادفی ماشین است. این مقاله یک روش جدید را معرفی می‌کند که از ترکیب رویکرد درج و جاسازی زمان و الگوریتم ژنتیک ترکیبی پیشنهادشده توسط الهینای و اِلمکاوی[۱۷] به‌دست آمده است. روش پیشنهادی برپایه‌ی یک الگوریتم ژنتیک هیبرید دوهدفه است. تحقیق آن‌ها در ارتباط با پایداری یک زمان‌بندی با درجه‌ی تنزل زمان اتمام آخرین کار تحت شکست است و درنظرمی‌گیرد که زمان‌بندی زمانی‌که مجموع قدرمطلق تغییرات زمان‌های اتمام عملیات‌ها از زمان‌بندی واقعی کوچک است، باید پایدار باشد. رحمانی و همکاران[۱۸و۱۹] زمان‌بندی استوار و باثبات در سیستم‌های جریان کارگاهی را بر مبنای مقیاس‌های عملکردی جدید و به‌صورت رویکردهای پیش‌بینانه و واکنشی ارائه دادند. گائو و همکاران[۲۰] مسئله‌ی کارگاهی انعطاف‌پذیر را با درنظرگرفتن کارهای جدید در نظر گرفتند. آنها مسئله را به دو بخش زمان‌بندی اولیه و زمان‌بندی مجدد تقسیم کردند.

پریرا[۲۱] نیز مسئله‌ی زمان‌بندی را با درنظرگرفتن عدم قطعیت و اختلالات موجود با ارائه‌ی مدل استوار پیش‌بینانه مورد بررسی قرار داد. مقالات و تحقیقات موجود در این حوزه غالباً در محیط‌های ایستا و برون‌خط به ارائه‌ی رویکردهایی پرداخته‌اند. از طرفی این رویکردها غالباً فقط پیش‌بینانه بوده و رویکرد خاصی را که به‌عنوان اقدام واکنشی در زمان رخداد یک اختلال صورت بپذیرد، ارائه نداده‌اند. همچنین این مقالات بیشتر به بررسی فقط یک مقیاس مثلاً پایداری یا ثبات پرداخته‌اند و با توجه به ناسازگاری و تضاد این دو مقیاس (و سایر مقیاس‌های مهم) و اهمیت هر دوی آن‌ها رویکردهای چند هدفه ارائه نداده و در شرایط مختلف اختلالات، آن‌ها را تحلیل نکرده‌اند. در این مقاله سعی بر آن است که از مقیاس‌های عملکردی متفاوتی برای زمان‌بندی مجدد استفاده شود و نیز محیط زمان‌بندی کاملاً پویا و آنی است و رویکرد معرفی‌شده به‌صورت واکنشی مطرح می‌شود تا از مضرات رویکردهای پیش‌بینانه که باعث ایجاد خطا در مسئله می‌شوند، جلوگیری کند.

در بخش دوم به تعریف مسئله و مفروضات آن خواهیم پرداخت و مدل ریاضی بر پایه‌ی این مفروضات ارائه خواهیم کرد. در بخش سوم به بررسی و معرفی مطالعه‌ی موردی می‌پردازیم. در بخش ۴ به بررسی نتایج حاصل از حل مدل ارائه‌شده و روش حل خواهیم پرداخت. در بخش پایانی نتیجه‌گیری و پیشنهاد کارهای آینده آورده شده است.

## ۲. تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

مسئله‌ی زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر (FFS)[۱] یکی از مهم‌ترین محیط‌های زمان‌بندی است که کاربردهای زیادی در صنایع واقعی دارد. سیستم FFS شامل یک سری از مراحل تولیدی است که هریک از این مراحل از یک یا چند ماشین

یکسان تشکیل شده است که به‌طور موازی کار می‌کنند. در این‌جا فرض بر آن است که تمام کارها نیز با ترتیب یکسانی در مراحل مختلف پردازش می‌شوند.

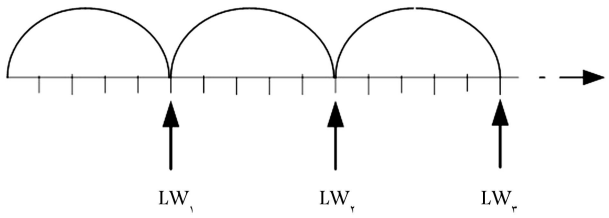
در این مقاله یک سیستم زمان‌بندی FFS با ورود غیرمنتظره‌ی کارهای جدید در نظر گرفته شده است. در واقع چند سفارش اولیه در ابتدا برای تعیین یک برنامه‌ی زمان‌بندی آغازین در کارگاه حضور دارند و اطلاعات این کارها مانند مدت زمان پردازش کارها و زمان تحویل کارها مشخص است. علاوه‌برکارهای اولیه به‌مرور زمان، سفارش‌هایی نیز به‌صورت غیرمنتظره وارد کارگاه می‌شوند که هیچ اطلاعاتی از آنها در اختیار نیست. در واقع ورود یک سفارش جدید که هیچ‌گونه پیش‌بینی از آن وجود نداشته است، یک اختلال غیرمنتظره است که باید رویکرد مناسب برای برخورد با این رخداد در هنگام ورود آنی کار جدید تعیین شود. در این بخش برای مقابله با ورود غیرمنتظره‌ی کارها به سیستم یک رویکرد واکنشی چند هدفه پیشنهاد شده است.

همان‌طور که اشاره شد در مسئله‌ی تحت بررسی، در زمان اجرای برنامه سفارش‌های جدیدی وارد کارگاه می‌شود. از قبل هیچ‌گونه اطلاعات اولیه درباره‌ی این سفارش وجود نداشته است. باید مشخص شود که آیا هرکدام از این سفارش‌های جدید پذیرفته می‌شود یا خیر و درصورت پذیرفته‌شدن باید کی انجام شود. درواقع یافتن نوبت مناسب برای انجام کارهای جدید اهمیت زیادی درکارایی سیستم دارد. تغییر توالی قبلی با درنظرگرفتن کارهای جدید، گرچه ممکن است جواب بهتری از دیدگاه تابع هدف ایجاد کند اما در عین حال ممکن است باعث کاهش ثبات و ایجاد آشفتگی در سیستم شود. برای کاهش این بی‌ثباتی رویکرد «افق پیشرو (LW)[۲]» پیشنهاد می‌شود. بدین‌ترتیب که بازه‌های زمانی از پیش تعیین‌شده‌یی به‌طور ثابت درنظرگرفته می‌شود. فرض کنید طول مدت این بازه‌ی زمانی به اندازه‌ی عدد ثابت $\Delta$ باشد. از ابتدای شروع پردازش کارهای موجود تا اتمام زمان $\Delta$ چنانچه سفارش جدیدی به کارگاه برسد در سیستم نگهداری می‌شود. پس از گذشت مدت زمان $\Delta$، تمام کارهای قبلی که هنوز پردازش آن‌ها شروع نشده است به همراه سفارش‌های جدید که در این مدت ثبت شده‌اند به‌عنوان کل مجموعه‌ی کارها مورد بررسی قرار می‌گیرد و با شرط‌پذیرش یا عدم پذیرش برای کارهای جدید بهترین توالی طبق روش پیشنهادی تعیین می‌شود (شکل ۲).

بازه‌ی زمانی $r$ام را با $\mathrm{LW}_r$ نمایش می‌دهیم. طول مدت سررسیدن اولین بازه‌ی زمانی از لحظه‌ی فعلی برابر با $\Delta$ است و با فرض ثابت‌بودن این بازه خواهیم داشت:

$$\mathrm{LW}_r = r\Delta \qquad (۱)$$

فرض کنید که $J_r$ تعداد کل کارها در بازه‌ی زمانی $r$ و $r+۱$ باشد. یعنی هنگامی که نقطه‌ی زمانی $\mathrm{LW}_r$ فرا می‌رسد تعداد کل کارهایی که باید زمان‌بندی مجدد روی آنها انجام شود را نشان می‌دهد. تعداد کل این کارها برابر با تعداد کارهایی است که از زمان‌بندی قبلی باقی مانده‌اند و پردازش آنها انجام نشده است و نیز تعداد کل کارهای جدیدی که تا این لحظه در سیستم ثبت شده‌اند و باید راجع به آنها تصمیم




شکل ۲. زمان‌بندی مجدد در بازه‌های زمانی ثابت.

گرفته شود. مجموعه کارهای باقی‌مانده و پردازش‌نشده در سیستم تا لحظه‌ی $\mathrm{LW}_r$ که از مرحله‌ی قبل باقی‌مانده را با $J'_{r-۱}$ نشان می‌دهیم و داریم:

$$J'_{r-۱} = \{j \in J_{r-۱} \,\big|\, S_j^{r-۱} \geq \mathrm{LW}_r\} \qquad (۲)$$

همچنین $J'''_{r-۱}$ مجموعه‌ی کارهایی است که در مرحله‌ی قبلی یعنی تا قبل از زمان $\mathrm{LW}_r$ پردازش آنها به اتمام رسیده است. از طرفی مجموعه‌ی $J''_r$ برابر با تعداد کل کارهای غیر منتظره‌ی جدید است که تا لحظه‌ی $\mathrm{LW}_r$ درسیستم ثبت شده است. بنابراین، مجموعه‌ی کل کارهایی که باید در بازنگری $r$ام زمان‌بندی شوند برابر خواهد بود با:

$$J_r = J'_{r-۱} \cup J''_r \qquad (۳)$$

همچنین فرض کنید که تعداد کارهایی که در مجموعه‌ی $J''_r$ قرار می‌گیرند (تعداد کارهای جدید) تا لحظه‌ی زمانی $\mathrm{LW}_r$ برابر با $n''_r$ باشد، همچنین تعداد کارهای پردازش‌نشده و باقی‌مانده از برنامه‌ی قبلی $n'_{r-۱}$ باشد. بنابراین تعداد کل کارها در مجموعه برابر با:

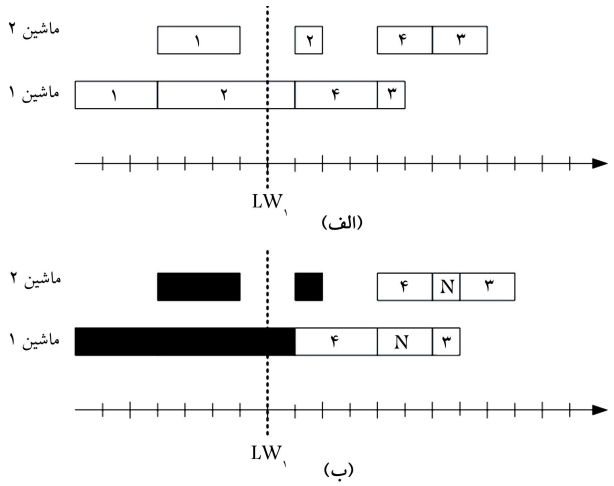
$$n_r = n'_{r-۱} + n''_r \qquad (۴)$$

فرض کنید که $J_۰ = \{j_۱, j_۲, j_۳, j_۴\}$ مجموعه کارهای اولیه است که در ابتدای برنامه‌ریزی در کارگاه حضور دارند و با توالی اولیه‌ی $S_۰ = j_۱, j_۲, j_۴, j_۳$ پردازش آنها انجام می‌گیرد (شکل ۳الف). در اثنای اجرای برنامه‌ی زمان‌بندی اولیه $S_۰$ کار جدیدی به کارگاه می‌رسد که این کار را با $j_N$ نشان می‌دهیم.

این کار در سیستم ثبت سفارش‌ها نگهداری می‌شود و تصمیم‌گیری درباره‌ی این سفارش پس از رسیدن زمان $\mathrm{LW}_۱$ اتفاق می‌افتد.

تا قبل از رسیدن $\mathrm{LW}_۱$ برخی از این کارها پردازش شده‌اند. اما پردازش تعدادی از کارها هنوز شروع نشده است. با توجه به اینکه سیستم جریان کارگاهی مدنظر، غیرجایگشتی درنظرگرفته شده است، فرض می‌کنیم که چنانچه پردازش کاری روی ماشین ۱ شروع شده باشد، باید تا انتها روی ماشین‌های دیگر نیز پردازش شود حتی اگر زمان $\mathrm{LW}_۱$ فرا رسیده باشد. با توجه به مسائل گفته شده، کارهای ۱ و ۲ از برنامه‌ریزی مجدد حذف می‌شوند و کارهای ۳ و ۴ باقی می‌مانند.

برای این کارها به همراه کار جدید، مجدداً توسط مدل ارائه شده در ادامه، زمان‌بندی مجدد انجام می‌شود و برنامه‌ی جدید به‌دست می‌آید (شکل ۳ب).




شکل ۳. مثال عددی برای اولین زمان‌بندی مجدد.

مدل زیر برای زمان‌بندی مجدد کارهای مجموعه‌ی $J_r$ ارائه شده است. در واقع بعد از رسیدن زمان بازنگری و زمان‌بندی مجدد $r$ام اتفاق می‌افتد.

## ۱.۲. مدل ریاضی

مدل ریاضی چندهدفه به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

### ۱.۱.۲. مجموعه‌ها

**اندیس‌ها**

$k, j$: اندیس کارها؛

$i$: اندیس مراحل؛

$r$: اندیس مربوط به دفعات زمان‌بندی مجدد.

**پارامترها و متغیرها**

$m$: تعداد مراحل؛

$n_r$: تعداد کارها برای زمان‌بندی مجدد $r$ام؛

$m_i$: تعداد ماشین‌ها در مرحله‌ی $i$؛

$p^r_{ji}$: مدت زمان پردازش کار $j$ در مرحله‌ی $i$ در زمان‌بندی مجدد $r$ام؛

$w_j$: جریمه‌ی نقدی حاصل از دیرکرد کار $j$ام؛

$a_j$: درآمد حاصل از پذیرش کار $j$؛

$X^r_{kji}$: متغیر تصمیم دودویی در زمان‌بندی مجدد $r$ام به‌طوری‌که اگر کار $j$ بلافاصله بعد از کار $k$ در مرحله‌ی $i$ پردازش شود برابر ۱ و درغیر این صورت برابر صفر است $(k \neq j)$؛

$Y^r_j$: متغیر تصمیم دودویی در زمان‌بندی مجدد $r$ام به‌طوری‌که اگر کار جدید $j$ مورد پذیرش قرار گیرد برابر ۱ و درغیر این صورت برابر صفر است؛

$S^r_{ji}$: زمان شروع کار $j$ در مرحله‌ی $i$ در زمان‌بندی مجدد $r$ام؛

$C^r_{jm}$: زمان اتمام کار $j$ روی ماشین $m$ در زمان‌بندی مجدد $r$؛

$T^r_j$: زمان دیرکرد کار $j$ در زمان‌بندی مجدد $r$ام.

در رویکرد واکنشی پیشنهادی بعد از تعیین توالی اولیه‌ی کارها، چنانچه سفارش‌های جدیدی به کارگاه برسد در سیستم نگهداری می‌شود. بعد ازگذشت یک بازه‌ی زمانی مشخص، کارهای قبلی باقی‌مانده و کارهای جدید در یک مجموعه درنظرگرفته می‌شود به‌طوری‌که کارهای جدید قابلیت پذیرش یا رد شدن را دارا هستند. برای این مجموعه ازکارها، طبق مدل زیرزمان‌بندی مجدد انجام و مجموعه‌ی جواب‌های پاراتویی ایجاد می‌شود که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند طبق نظر خود یک توالی بهتر را انتخاب کنند. در واقع این مدل، جواب‌هایی را به‌عنوان زمان‌بندی‌های مجدد تعیین می‌کند که انتخاب یکی از آن‌ها به عهده‌ی خود تصمیم‌گیرندگان خواهد بود. تابع هدف دوم در این مدل یک مقیاس پیشنهادی کاملاً جدید است. این مقیاس «ثبات» نامیده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

زمانی‌که یک اختلال مثل رسیدن کارهای جدید رخ می‌دهد، زمان‌بندی و توالی واقعی ممکن است تغییر کند. در واقع وجود اختلال باعث می‌شود که کارها لزوماً طبق برنامه‌ی توالی ابتدایی به‌ترتیب پردازش نشوند و در ترتیب انجام آنها تغییری ایجاد شود. تغییر توالی انجام کارها بعد از هر اختلالی، باعث ایجاد هزینه‌هایی مثل هزینه‌ی تخصیص مجدد ابزار و وسایل، هزینه‌ی مجدد سفارش مواد اولیه، و... می‌شود. اما زمانی‌که بعد از اختلال برنامه‌ی واقعی به برنامه‌ی زمان‌بندی اولیه نزدیک‌تر باشد می‌گوییم که ثبات زمان‌بندی زیاد بوده و این هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

بنابراین، میزان تغییر توالی کارها توسط زمان‌بندی مجدد بعد از رخداد یک اختلال را «ثبات زمان‌بندی» می‌گوییم. بنابراین، معیار ثبات به تفاوت بین خود برنامه‌های اولیه و واقعی زمان‌بندی توجه دارد نه عملکرد آن‌ها. اگر برنامه‌یی هنگام مواجه‌شدن با خرابی یا اختلال، نسبت به برنامه‌ی اصلی زیاد تغییر نکند، برنامه‌ی با ثبات نامیده می‌شود. این مقیاس که به‌صورت میزان تغییر در توالی و به‌صورت زیر تعریف می‌شود، تابع هدف دوم خواهد بود:

$$\text{Stability}: \sum_i \sum_{j \in J'_r} \left| S^r_{ji} - S^{r-1}_{ji} \right| \quad (۵)$$

مدل نهایی پیشنهادی سه‌هدفه به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Maximize } f^r_1 = \sum_{j \in J_r} Y^r_j (a_j - w_j T^r_j) \quad (۶)$$

$$\text{Minimize } f^r_2 = \sum_i \sum_{j \in J'_r} \left| S^r_{ji} - S^{r-1}_{ji} \right| \quad (۷)$$

$$\text{Minimize } f^r_3 = \text{Max}_{\forall j \in J_r} C^r_{jm} \quad (۸)$$

S.t :

$$\sum_{k=0, j \neq k}^{n} X^r_{kji} = 1 \quad \forall j \in J_r, \ \forall i \quad (۹)$$

$$\sum_{j \in J_r, j \neq k} X^r_{kji} \leq 1 \quad \forall k \in \{1, 2, ..., n\}, \ \forall i \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j \in J_r} X^r_{0ji} = m_i \quad \forall i \quad (۱۱)$$

$$X^r_{kji} + X^r_{jki} \leq 1 \quad \forall k, \ \forall j > k, \ \forall i \quad (۱۲)$$

$$X^r_{kji} \leq Y^r_j \times Y^r_k \quad \forall j, k \in J_r, \ \forall i \quad (۱۳)$$

$$S^r_{ji} \geq Y^r_j S^r_{ji-1} + Y^r_j p_{ji-1} \quad \forall j \in J_r, \ \forall i > 1 \quad (۱۴)$$

$$S^r_{ji} \geq S^r_{ki} + p_{ki} - Y^r_j (1 - X^r_{kji}).M \quad \forall k \in \{1, 2, ..., n\}, \ \forall i, \ \forall j, k \in J_r, \ k \neq j \quad (۱۵)$$

$$T^r_j \geq S^r_{jm} + p_{jm} - d_j \quad \forall j \in J_r \quad (۱۶)$$

$$C^r_{ji} = S^r_{j'i} + P_{ji} \quad \forall j, i \quad (۱۷)$$

$$S^r_{0i} = \max_{j \in J'''_r} (S^{r-1}_{ji} + p_{ji}) \quad (۱۸)$$

$$Y^r_j = 1, \quad \forall j \in J'_r \quad (۱۹)$$

$$Y^r_j = \{0, 1\}, \quad \forall j \in J''_r \quad (۲۰)$$

$$S^r_{ji}, T^r_j \geq 0 \quad \forall j \in J_r, \ \forall i \quad (۲۱)$$

$$X^r_{kji} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \ \forall j, k \in J_r, \ k \neq j \quad (۲۲)$$

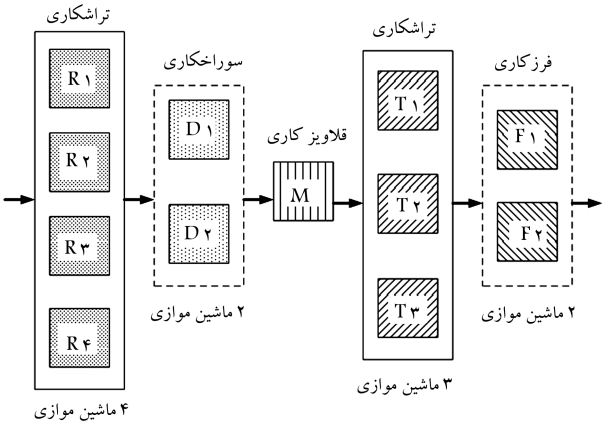
اولین تابع هدف مورد بررسی ۶ بیشینه‌کردن سود حاصل از کارهایی است که زمان‌بندی می‌شوند. هدف دوم ۷ مربوط به معیار ثبات است که تعداد تغییر موقعیت کارها در توالی بعد از زمان‌بندی مجدد را نشان می‌دهد. هدف سوم ۸ مربوط به بررسی زمان اتمام کل کارهاست. مجموعه محدودیت ۹ مشخص می‌کند که هر کاری دقیقاً یک کار پیامد دارد. مجموعه محدودیت ۱۰ بیان می‌کند که هرکار نهایتاً یک کار پیش‌رو[3] دارد. مجموعه محدودیت ۱۱ مشخص می‌کند که کار مجازی[4] در هر مرحله برابر تعداد کارهای مجازی در آن مرحله است. مجموعه محدودیت ۱۲ تضمین می‌کند که یک کار هم‌زمان نمی‌تواند هم پس‌رو[5] و هم پیش‌رو باشد. محدودیت ۱۳ بیان می‌کند زمانی کار $j$ می‌تواند بعد ازکار $k$ قرار بگیرد که هر دوی این کارها پذیرفته شده باشند. محدودیت ۱۴ بیان می‌کند که زمان شروع هرکار باید

بزرگ‌تر از زمان تکمیل همان کار در مرحله‌ی قبل باشد به شرط آن‌که آن کار جدید مورد پذیرش قرار گیرد. مجموعه محدودیت ۱۵ بیان می‌کند که اگر کار $j$ بلافاصله بعد از کار $k$ زمان‌بندی شود، پردازش آن روی هر ماشین $i$ نمی‌تواند قبل از پردازش کار $k$ روی ماشین $i$ شروع شود. مجموعه محدودیت ۱۶ تأخیر هر کار را محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۷ زمان اتمام کارها را محاسبه می‌کند. معادله‌ی ۱۸ هم بیان می‌کند که لحظه‌ی شروع کار اول روی هر ماشین در برنامه‌ی $r$ام برابر با زمان اتمام آخرین کار انجام‌شده در برنامه‌ی قبلی است. محدودیت ۱۹ بیان می‌کند کارهایی که در برنامه‌ی زمان‌بندی قبلی وجود داشته‌اند، قبلاً مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. بنابراین به‌ازای این کارها باید متغیر $y_j^r$ برابر با ۱ باشد. مجموعه محدودیت‌های ۲۰ تا ۲۳ محدوده‌ی مجاز متغیرهای تصمیم را تعیین می‌کند.

نکته‌ی قابل بحث وجود تضاد منطقی بین سه هدف تعیین شده است. هدف اول که سود حاصل درکارگاه است بر اساس مقیاس دیرکرد خواهد بود. از آنجا که ممکن است برای کاهش میزان دیرکرد کارها، تعداد زیادی ازکارهای قبلی و جدید مجدداً زمان‌بندی شوند و در ترتیب کارها تغییر زیادی ایجاد شود، کاهش دیرکرد قطعاً باعث افزایش تابع هدف دوم یعنی بدتر شدن مقیاس ثبات می‌شود و اثر نامطلوب روی آن خواهد داشت. همین مسئله در ارتباط با زمان اتمام کارها و مقیاس ثبات اتفاق می‌افتد. بنابراین، بهبود توابع هدف سود یا زمان اتمام کارها، نه تنها ممکن است بین خود همراستا نباشند بلکه بهبود آنها لزوماً باعث بهبود مقیاس ثبات نخواهد شد.

## ۳. مطالعه‌ی موردی

شرکت پترو تجهیز سپاهان در منطقه‌ی صنعتی شهر نجف‌آباد واقع در استان اصفهان احداث شده است. هدف این شرکت ساخت‌وتولید تجهیزات صنعتی به‌خصوص انواع شیرآلات مورد نیاز صنعت نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی و خودکفایی ایران اسلامی است. این‌شرکت با در اختیار داشتن سیستم فنی مدیریتی مجرب و جمعی از مهندسان و دست‌اندرکاران فرهیخته و هم‌چنین دانش فنی لازم و نیز امکانات سخت‌افزاری، نرم‌افزاری، و تجهیزات آزمایشگاه کنترل کیفیت مناسب و دریافت تأییدیه‌ها، در تولید شیرآلات صنعت پتروشیمی فعالیت می‌کند. یکی از خطوط تولید این شرکت مربوط به تولید شیرآلات فورج شده است. این خط تولید دارای سیستم جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر است که در شکل ۴ نشان داده شده است.




**شکل ۴. نمودار خط تولید شیرآلات فولادی فورج‌شده.**

تمام این شیرآلات ابتدا ریخته‌گری‌شده و پس از عملیات بازرسی و آزمون‌های مکانیکی، وارد خط تولید می‌شوند. در ابتدا عملیات تراش‌کاری بر روی قطعه انجام می‌شود.

در این مرحله چهار ماشین موازی وجود دارد. سپس باید بر اساس طرح هر محصول، عملیات سوراخ‌کاری لازم انجام شود در این مرحله دو ماشین سوراخ‌کاری وجود دارد. سپس توسط یک ماشین عملیات قلاویزکاری روی قطعات انجام می‌گیرد. در مرحله‌ی بعدی، ادامه‌ی عملیات تراش‌کاری مجدد بر حسب نوع محصول بر روی قطعه صورت می‌گیرد که ۳ ماشین موازی نیز برای انجام این عملیات وجود دارد. در نهایت توسط دو ماشین موازی عملیات فرزکاری انجام می‌گیرد.

برای بررسی و نشان‌دادن نحوه‌ی عملکرد رویکرد پیشنهادی، از اطلاعات ثبت‌شده‌ی شرکت در سال گذشته مربوط به این خط تولید استفاده کرده‌ایم. این شرکت، سفارش‌های مختلف خود را از مشتریان مختلفی از صنایع نفت و گاز در طی سال دریافت می‌کند و با آن‌ها قرارداد می‌بندد. اطلاعات مربوط به سفارش‌های مختلف ثبت شده در این شرکت در این بازه‌ی زمانی در جدول ۱ آورده شده است. در جدول‌های ارائه شده در این پژوهش منظور از اندازه‌ی قطر شیر مورد نظر به اینچ و منظور از دسته تعداد مورد نظر از هر شیر در هر سفارش است.

در ابتدای سال، این شرکت ۶ سفارش را از قبل، از مشتریان دریافت کرده است که باید در طی این سال برنامه‌ریزی کند و انجام دهد. این سفارش‌ها در جدول ۲ آورده شده‌اند.

پس از برنامه‌ریزی و تعیین توالی این سفارش‌ها در طی زمان، به‌صورت پویا شرکت سفارش‌های دیگری نیز در طی سال از مشتریان دیگر دریافت می‌کند. حال باید نسبت به پذیرش و رد این کارهای جدید که از قبل هیچ پیش‌بینی از ورود آنها نبوده است و نیز ترتیب انجام آنها در برنامه‌ی موجود تصمیم گرفت.

**جدول ۱. مدت زمان پردازش انواع محصولات فولادی فورج‌شده در شرکت.**

| شیرآلات | اندازه | دسته | مرحله‌ی فرایند تولید | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
| Ball | ۱" | ۱۵۰ | ۲۹۰ | ۱۱۵ | ۳۵ | ۲۵۰ | ۱۱۰ |
| | ۱/۴" | ۱۵۰ | ۳۲۵ | ۱۲۰ | ۴۰ | ۲۷۰ | ۱۳۵ |
| | ۲" | ۳۰۰ | ۳۴۰ | ۱۵۰ | ۴۵ | ۲۷۵ | ۱۵۰ |
| | ۴" | ۱۵۰ | ۳۷۰ | ۱۵۰ | ۵۵ | ۳۱۰ | ۱۸۰ |
| Check | ۱/۴" | ۱۵۰ | ۳۱۰ | ۱۶۰ | ۴۵ | ۲۸۰ | ۸۵ |
| | ۲" | ۱۵۰ | ۳۳۵ | ۱۷۵ | ۶۵ | ۲۹۰ | ۱۰۰ |
| | ۲" | ۳۰۰ | ۳۳۰ | ۱۷۵ | ۷۰ | ۳۱۰ | ۹۰ |
| Gate | ۲" | ۱۵۰ | ۱۶۰ | ۹۵ | ۴۰ | ۱۱۰ | ۸۵ |
| | ۲" | ۳۰۰ | ۱۹۰ | ۱۰۰ | ۴۰ | ۱۲۰ | ۹۰ |
| | ۳" | ۳۰۰ | ۲۰۰ | ۱۲۵ | ۵۸ | ۱۸۰ | ۹۵ |
| | ۶" | ۳۰۰ | ۲۶۵ | ۱۳۳ | ۶۵ | ۱۸۰ | ۱۲۵ |
| Globe | ۲" | ۱۵۰ | ۱۸۰ | ۸۵ | ۴۰ | ۸۵ | ۶۰ |
| | ۲" | ۲۵۰ | ۱۸۰ | ۹۰ | ۴۵ | ۸۵ | ۷۵ |

جدول ۲. کارهای موجود در آغاز زمان‌بندی اولیه.

| کار | | | اندازه انباشته (تعداد) | تاریخ تحویل (روز) | هزینه‌ی جریمه | سود |
|---|---|---|---|---|---|---|
| شیر | اندازه | دسته | | | | |
| Check | ۲" | ۱۵۰ | ۳۸ | ۶۰ | ۱۶۰۰ | ۴۷۰۰ |
| Ball | ۱" | ۱۵۰ | ۲۵ | ۷۰ | ۱۴۰۰ | ۳۵۵۰ |
| Ball | ۲" | ۳۰۰ | ۱۰ | ۹۰ | ۱۹۵۰ | ۴۷۵۰ |
| Globe | ۲" | ۱۵۰ | ۹۰ | ۶۵ | ۵۰۰ | ۲۵۰۰ |
| Globe | ۲" | ۲۵۰ | ۴۷ | ۱۰۰ | ۹۰۰ | ۳۵۰۰ |
| Gate | ۲" | ۳۰۰ | ۲۴ | ۹۵ | ۱۲۵۰ | ۳۲۰۰ |

## ۴. حل مسئله و نتایج محاسباتی

در این بخش روش حل مسئله و نتایج حل روش پیشنهادی برای کارخانه‌ی تحت بررسی ارائه می‌گردد.

### ۱.۴. روش NSGA-II

مسائل زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر در حالت چندهدفه توسط محققان در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آن‌جا که این اهداف ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند، یک جواب بسیار خوب برای یک هدف ممکن است نتیجه‌ی بسیار نامطلوبی برای هدف دیگر ایجاد کند. الگوریتم NSGA-II یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. در این مقاله برای حل مسئله‌ی ارائه‌شده در بخش پیشین از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

#### ۱.۱.۴. الگوریتم

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی چیره‌ناپذیر نخبه‌گرای سریع (NSGA-II) که به‌وسیله دِب و همکاران[۲۲] ارائه شده است یک الگوریتم ژنتیک بر پایه‌ی جمعیت است که از یک رویه‌ی واگرایی (ایجاد تنوع) برای اجتناب از هم‌گرایی محلی استفاده می‌کند. رویه‌ی اصلی الگوریتم، مرتب‌سازی جواب‌های مختلف در مرزهای چیره‌ناپذیر با رویکرد مرتب‌سازی چیره‌ناپذیر سریع و رویکرد مقایسه‌ی تراکمی به‌منظور حفظ واگرایی در مرز به‌کار برده می‌شود.

#### ۲.۱.۴. روش نمایش

روش نمایش مسئله‌ی مورد مطالعه در این قسمت ارائه می‌شود. یک روش نمایش مناسب، که مشخصات یک جواب را نشان دهد، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد روش فرا ابتکاری دارد. بر طبق مسئله‌ی مورد مطالعه، دو متغیر تصمیم توالی کارها و پذیرش سفارش‌های جدید رسیده به کارگاه وجود دارند که باید تعیین شوند. جدول ۳، ساختار کلی نمایش جواب را که برای اجرای الگوریتم به‌کار رفته است نمایش می‌دهد. این ساختار با دو بخشی که به‌صورت اجزای Seq و Rej نام‌گذاری شده‌اند ساخته شده است. برچسب‌های Seq و Rej به‌ترتیب توالی تمام کارها (کارهای قبلی و سفارش جدید رسیده) و پذیرش یا رد کارها را نشان می‌دهد.

مسئله‌ی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر ترکیبی از تصمیم‌گیری تخصیص کارها به ماشین‌ها در هر مرحله و تعیین توالی کارهاست. بنابراین، برای جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، برای تخصیص کارها به ماشین‌ها در هر مرحله یک طرح نمایش متفاوت مورد نیاز است. در این مطالعه، یک جایگشت ساده از کارها در یک رشته، که یک روش بسیار عملی از نمایش جواب است، برای بخش Seq مطابق جدول ۳ استفاده می‌شود. در طرح جواب، هر جز نشان‌دهنده‌ی یک کار و ترکیب آن‌ها نشان‌دهنده‌ی توالی کارهاست؛ (به‌طوری‌که $n$ تعداد کارهای اولیه و $n'r$ تعداد کارها برای سفارش گروهی $r$ام است) نشان داده می‌شود. بنابراین، اندازه‌ی کروموزوم پویاست و بعد از هر پنجره‌ی زمانی یک سفارش جدید با $n'r$ تعداد کار باید درنظرگرفته شود. $J[j]$ کار در اولویت $j$ام توالی را نشان می‌دهد. در هر مرحله در مسئله‌ی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر (FFS)، تخصیص کارها به ماشین‌ها بر پایه‌ی اولین ماشین در دسترس برای کارهای در حال پردازش تعیین می‌شود؛ زیرا مدت زمان پردازش برای یک کار مشخص بر روی همه‌ی ماشین‌ها، یکسان است. در مسئله‌ی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، اولین ماشین در دسترس منتج به سریع‌ترین زمان تکمیل کار می‌شود.

مقدار هر ژن در بخش Rej، پذیرش یا رد کارها را نشان می‌دهد به‌طوری‌که به‌وسیله‌ی یک رشته‌ی باینری با اندازه‌ی مشابه بخش Seq مطابق جدول ۴ نمایش داده می‌شود. مقدار ۱ پذیرش و مقدار صفر رد یک کار جدید درگروه سفارش جدید را نشان می‌دهد. برای مثال، $Yjr$ یک عدد دودویی است و $Yjr = ۱$ نشان می‌دهد که کار $j$ سفارش گروهی $r$ برای تولید پذیرفته می‌شود.

بعد از هر پنجره‌ی زمانی، اندازه‌ی کروموزوم به‌طور پویا به اندازه‌ی کارهای گروه سفارش جدید رسیده، افزایش می‌یابد.

باید توجه شود که $r = ۰$ نشان‌دهنده‌ی سفارش اولیه‌ی کارهایی است که در ابتدای افق برنامه‌ریزی توسط تولیدکننده پذیرفته شده است. اگر مقدار متغیر پذیرش یک کار مشخص، صفر باشد این کار در بخش Seq یک کار موهومی است.

همان‌طورکه در جدول‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، بعد از هر پنجره‌ی زمانی، اندازه‌ی کروموزوم به‌طور پویا به اندازه‌ی کارهای گروه سفارش جدید رسیده، افزایش می‌یابد.

#### ۳.۱.۴. مقداردهی اولیه

رویکردهای مختلفی همچون تولید تصادفی می‌تواند برای تولید جمعیت اولیه استفاده شود. با توجه به مسئله‌یی که در این مقاله تشریح شد، رسیدن کارهای جدید به کارگاه و اثر آن بر روی توالی محصولات باید تعیین شود. بنابراین، اگر پردازش یک کار قبل از رسیدن کار جدید شروع شده باشد، پردازش آن باید تکمیل شود. با تعیین کارهای باقی‌مانده، توالی آن‌ها و کارهای جدید رسیده در پنجره‌ی زمانی مشخص با استفاده از عمل‌گرهای «تصادفی»، «زودترین زمان تحویل وزنی» (WEDD) و «هزینه‌ی جریمه» (PO) تولید می‌شود. برای بخش Rej، جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی با احتمال ۰٫۵ تولید می‌شود. اگر rand $\leq$ ۰٫۵ باشد در نتیجه متغیر پذیرش مقدار ۱ و در غیر این‌صورت صفر می‌گیرد. برای درصدی از جمعیت اولیه، در نظر می‌گیریم که همه‌ی کارهای سفارش‌های جدید پذیرفته خواهند شد؛ بنابراین، تمام متغیرهای پذیرش مقدار ۱ را می‌گیرند.

#### ۴.۱.۴. عمل‌گرهای ادغام و جهش

عمل‌گر ادغام، دوکروموزوم را برای تولید یک تعداد بچه ترکیب می‌کند. فرزند حاصل از ادغام باید نشان‌دهنده‌ی جواب‌هایی باشد که حاصل ترکیب زیرساختارهای جواب‌های والدینشان باشد.

عمل‌گر ادغام، ادغام دونقطه‌یی است که برای دو جزء طرح جواب استفاده می‌شود. برای بخش توالی، دوکروموزوم با تورنمنت دودویی انتخاب و به‌ترتیب والد ۱ و ۲ نامیده می‌شوند. برای تحقق ادغام، دو ژن درکروموزوم به‌صورت تصادفی انتخاب

جدول ۳. نمایش توالی کارها.

| | سفارش‌های اولیه | | | گروه سفارش ۱ Seq | | | ... | گروه سفارش R Seq |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| آغاز افق برنامه‌ریزی | $J_{[n]}$ | ... | $J_{[1]}$ | | | | | |
| پنجره‌ی زمانی ۱ | $J_{[n]}$ | ... | $J_{[1]}$ | $J_{[n+n'_1]}$ | ... | $J_{[n+1]}$ | | |
| | | | | | $\ddots$ | | | |
| پنجره زمانی R | $J_{[n]}$ | ... | $J_{[1]}$ | $J_{[n+n'_1]}$ | ... | $J_{[n+1]}$ | ... | $J_{[n+\sum_{r=1}^{R-1} n'_r]}$ ... $J_{[n+\sum_{r=1}^{R-1} n'_r+1]}$ |

جدول ۴. طرح نمایش جواب.

| کارها | سفارش‌های اولیه | | | | گروه سفارش ۱ Rej | | | | ... |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $J_n$ | ... | $J_2$ | $J_1$ | $J_{n'_1}$ | ... | $J_2$ | $J_1$ | ... |
| افق برنامه‌ریزی | ۱ | ۱ | ... | ۱ | | | | | |
| پنجره‌ی زمانی ۱ | ۱ | ۱ | ... | ۱ | ۱ یا ۰ | ۱ یا ۰ | ... | ۱ یا ۰ | |
| | | | | | $\ddots$ | | | | |
| پنجره‌ی زمانی R | ۱ | ۱ | ... | ۱ | ۱ یا ۰ | ۱ یا ۰ | | ... | |

می‌شود. دو فرزند با کپی‌کردن زیررشته‌ی توالی کارها در جایگاه‌های مرتبط والدین انتخاب‌شده تولید می‌شود. با شروع از اولین جایگاه برای باقی‌مانده‌ی توالی کارهای والد ۲ (والد ۱)، کارهایی‌که در زیررشته‌ی والد دوم (اول) است، حذف می‌شود. کارهای باقی‌مانده در جایگاه‌های خالی بچه از چپ به راست بر طبق توالی والد دوم (اول) قرار می‌گیرد. رویه‌ی مشابهی برای بخش پذیرش یا رد استفاده می‌شود. برای بخش توالی، عمل‌گر جهش، جهش مبادله است: دو ژن به‌طور تصادفی در کروموزوم انتخاب و سپس مقادیر آن‌ها با یکدیگر عوض می‌شوند. برای بخش پذیرش یا رد، عمل‌گر جهش، جهش یک نقطه‌یی است: یک ژن از کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و مقدار آن از صفر (یک) به یک (صفر) مطابق با احتمالات متفاوت، تغییر می‌کند.

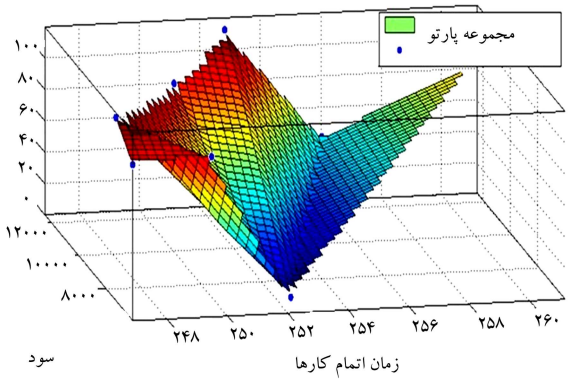
یک مسئله‌ی زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ۸ کار در ابتدای افق برنامه‌ریزی را در نظر بگیرید. توالی و پذیرش گروه سفارش‌های جدید رسیده با ۵ کار بعد از اولین پنجره‌ی زمانی بررسی می‌شود. فرض کنید در اولین پنجره‌ی زمانی، ۴ کار از توالی اولیه پردازش شده است.

### ۵.۱.۴. شرط توقف

فرایند جست‌وجو متوقف می‌شود اگر تعداد تکرارها از بیشینه‌ی تعداد تولید از قبل تعیین‌شده بزرگ‌تر شود. گام‌های NSGA-II توسعه‌یافته مطابق شبه‌برنامه‌ی نشان‌داده‌شده در جدول ۵ می‌تواند خلاصه شود.

## ۲.۴. نتایج محاسباتی

در ابتدا برای نشان‌دادن نحوه‌ی عملکرد رویکرد پیشنهادی برای اولین دوره‌ی بازنگری یعنی $LW_1$ مسئله را حل می‌کنیم. فرض کنید که یک توالی اولیه برای کارهای موجود در کارگاه وجود دارد. در اینجا فرض می‌کنیم که $\Delta = 10$. یعنی پس از گذشت ۱۰ روز کاری تمام کارهای جدیدی که به شرکت رسیده‌اند و در سیستم ثبت شده‌اند به همراه کارهای پردازش‌نشده‌ی قبلی با هم درنظرگرفته می‌شود




شکل ۵. جواب‌های پاراتوی روش پیشنهادی.

و طبق مدل پیشنهادی چندهدفه توالی جدید برای مجموعه‌ی کارهای جدید به دست می‌آید. جدول ۶ مجموعه جواب‌های پارتوی ایجاد شده را نشان می‌دهد. در این جدول نتایج حاصل از حل مسئله با پنج روش ابتکاری که غالباً در این شرکت مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه شده است. با توجه به اینکه مقادیر هریک از اجزا کاملاً مشخص است تصمیم‌گیرنده می‌تواند بهترین گزینه را انتخاب کند.

از بین جواب‌های پارتوی حاصل، با استفاده از روش فازی مطرح‌شده یک جواب را انتخاب و بردار توالی کارها و بردار پذیرش یا رد کارها را در جدول ۷ نمایش می‌دهیم. توالی انتخاب‌شده توسط روش پیشنهادی و توالی ایجادشده توسط روش‌های دیگر در جدول ۷ نشان داده شده است. سطر دوم از هر روش بردار پذیرش یا رد هر سفارش جدید را نشان می‌دهد. مثلاً روش پیشنهادی کارهای ۷ و ۸ را رد و توالی جدیدی ایجاد کرده است. در صورتی‌که روش FIFO تنها کار ۱۰ را رد کرده است.

شکل ۵ مجموعه جواب‌های پارتوی ایجاد شده توسط روش پیشنهادی را به طورگرافیکی نشان می‌دهد.

برای بررسی و مقایسه‌ی بیشتر روش پیشنهادی و روش‌های حل فرض می‌کنیم که تابع هدف دوم یعنی تابع ثبات اهمیت زیادی برای شرکت دارد و ضریب ۱۰۰ را در آن ضرب می‌کنیم و مجدداً مسئله حل می‌شود. همان‌طورکه نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد اولین جواب پارتوی منتخب روش FIFO را مغلوب می‌کند. زیرا اهمیت تابع ثبات بیشتر شده و مدل جوابی که عدم ثبات را کم کند، ایجاد کرده است. در این جدول جواب منتخب دوم نیز سه روش پیشنهادی بعدی را مغلوب کرده است. این مسئله نشان‌دهنده‌ی برتری روش پیشنهادی نسبت به تمام روش‌های دیگر است. اما در جدول ۷ که ضرایب هر سه هدف در مدل پیشنهادی یکسان است جواب‌های

جدول ۵. رویه‌ی حل برای مسئله‌ی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر پویا با درنظرگرفتن رد سفارش.

مقداردهی اولیه‌ی پارامترها: $n_{gen}, pop_{size}, Pc, P_m$
تولید جمعیت اولیه ($P_0$) به تعداد $pop_{size}$ جواب
محاسبه‌ی مقدار $k$ هدف برای هر جواب در جمعیت اولیه
$F =$ مرتب‌سازی چیره‌ناپذیر سریع ($P_0$) $F = (F_1, F_2, ...)$ تمام مرزهای چیره‌ناپذیر ($P_0$)
تخصیص فاصله‌ی ادغامی* ($F_i$)
$t = 0$
تا زمانی‌که ($t < n_{gen}$)
$t = t + 1$
$Q_t =$ ساخت جمعیت جدید ($P_{t-1}$) استفاده انتخاب، ادغام، و جهش برای ایجاد یک جمعیت جدید ($Q_t$)
**انتخاب:** استفاده از عمل‌گر انتخاب تورنمنت دودویی برای انتخاب والدین برای ترکیب مجدد بر پایه‌ی ترتیب جزیی $\prec_n$ (عمل‌گر مقایسه‌ی تراکمی) **
**ادغام:** استفاده از عمل‌گر ادغام دونقطه‌یی برای بخش‌های توالی و پذیرش یا رد هر جواب والد انتخاب‌شده با احتمال $P_c$. دو جواب جدید از هر جواب والد تولید می‌شود.
**جهش:** استفاده از عمل‌گر جهش معاوضه برای بخش توالی و عمل‌گر جهش تک نقطه‌یی برای بخش پذیرش یا رد برای تولید جواب‌های جدید با احتمال $P_m$
$R_t = P_{t-1} \cup Q_t$ ترکیب والدین و فرزندان
$F =$ مرتب‌سازی چیره‌ناپذیر سریع ($R_t$) $F = (F_1, F_2, ...)$ تمام مرزهای چیره‌ناپذیر ($R_t$)
$P_t = \emptyset$
$i = 1$
تا $|P_t| + |F_i| \leq pop_{size}$
تخصیص فاصله‌ی ادغامی ($F_i$)
$P_t = P_t \cup F_i$
$i = i + 1$
پایان تا
مرتب‌سازی مرتب‌سازی با ترتیب نزولی با استفاده از $\prec_n$
$P_t = P_t \cup F_i[1 : (N - |P_t|)]$ انتخاب اولین $(N - |P_t|)$ عنصر از $F_i$
پایان تا زمانی‌که
نمایش بهترین مجموعه‌ی چیره‌ناپذیر یافته‌شده

* crowding-distance-assignment

** crowded-comparison operator

جدول ۶. مقایسه‌ی عملکرد روش‌های حل.

| رویکرد | سود | $C_{\max}$ | ثبات | زمان حل |
|---|---|---|---|---|
| پیشنهادی (جواب‌های پارتو) | ۱۱۸۲۵ | ۲۵۲٫۵۰ | ۱۱۹٫۰۱ | ۱۰٫۵ |
| | ۶۳۴۰ | ۲۲۹٫۵۸ | ۹۹٫۰۶ | |
| | ۷۰۱۵ | ۲۵۲٫۵۰ | ۰٫۰۰ | |
| | ۶۱۱۵ | ۲۴۶٫۸۷ | ۲۹٫۰۶ | |
| | ۷۳۳۰ | ۲۰۶٫۸۷ | ۱۱۵٫۹۸۳ | |
| | ۱۴۵۱۵ | ۲۶۱٫۱۴ | ۸۳٫۴۸ | |
| | ۱۰۳۵۰ | ۲۳۵٫۹۳ | ۴۲٫۵۰ | |
| FIFO | ۱۱۰۵۵ | ۲۵۵٫۹۳ | ۰٫۰۰ | ۱ |
| SPT | ۱۲۲۰۵ | ۲۶۴٫۳۷ | ۱۰۳٫۴۸ | ۱٫۲ |
| LPT | ۱۰۶۹۰ | ۲۵۰٫۳۱ | ۹۹٫۰۶ | ۱٫۱ |
| WEDD | ۱۰۸۶۵ | ۲۶۰٫۰۰ | ۹۹٫۰۶ | ۲ |

پارتو روش FIFO را مغلوب نکرده و مغلوب نیز نمی‌شوند و انتخاب نهایی نیز بر عهده‌ی تصمیم‌گیرنده خواهد بود.

برای بررسی بیشتر برای مجموعه‌ی سفارش‌های گروه دوم نیز مسئله حل شده است. بنابراین در روز بیستم مجموعه‌ی کارهایی که از قبل باقی‌مانده همراه با مجموعه‌ی کارهای جدید در یک گروه مجدداً زمان‌بندی می‌شوند.

جدول ۹ نتایج حاصل از حل مسئله به روش پیشنهادی که مجموعه‌یی از جواب‌های پارتویی است و نیز روش‌های دیگر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جواب‌ها مشخص است، تمام روش‌های ابتکاری توسط حداقل یکی از جواب‌های پارتو مغلوب می‌شود و این برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

یکی از این جواب‌های پارتو از طریق روش فازی، انتخاب شده است. توالی انتخاب‌شده و بردار پذیرش و رد حاصل از روش پیشنهادی و سایر روش‌های ابتکاری در جدول ۱۰ ارائه شده است.

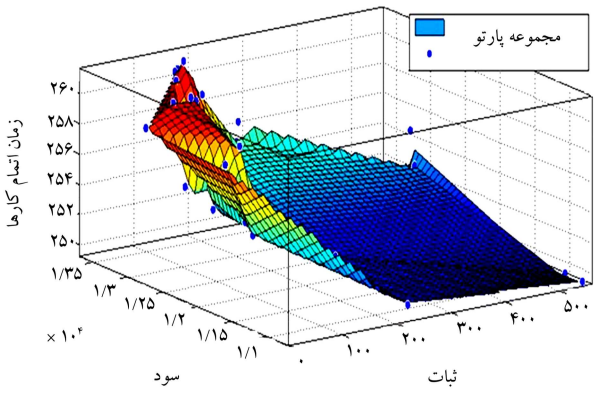
شکل ۶ مجموعه جواب‌های پارتویی ایجادشده توسط روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ۷. نتایج حاصل از عملکرد روش پیشنهادی و سایر روش‌های حل.

| رویکرد | بردار | موقعیت | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
| پیشنهادی | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۸ | ۷ | ۶ | ۳ | ۱۰ | ۹ |
| | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| FIFO | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۶ | ۳ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
| | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ |
| SPT | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۸ | ۱۰ | ۷ | ۹ | ۶ | ۳ |
| | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ |
| LPT | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۳ | ۶ | ۹ | ۷ | ۱۰ | ۸ |
| | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ |
| WEDD | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۷ | ۸ | ۳ | ۶ | ۱۰ | ۹ |
| | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| P | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۸ | ۷ | ۶ | ۳ | ۱۰ | ۹ |
| | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |

جدول ۸. مقایسه‌ی عملکرد روش‌های حل با درجه‌ی اهمیت بیشتر تابع هدف ثبات.

| رویکرد | سود | $C_{\max}$ | ثبات |
|---|---|---|---|
| پیشنهادی (جواب های پارتوی منتخب) | ۱۱۸۲۵ | ۲۵۲٫۵۰ | ۰٫۰۰ |
| | ۱۲۹۷۰ | ۲۳۸٫۷۴ | ۶۷٫۸۹ |
| FIFO | ۱۱۰۵۵ | ۲۵۵٫۹۳ | ۰٫۰۰ |
| SPT | ۱۲۲۰۵ | ۲۶۴٫۳۷ | ۱۰۳٫۴۸ |
| LPT | ۱۰۶۹۰ | ۲۵۰٫۳۱ | ۹۵٫۱۵ |
| WEDD | ۱۰۸۶۵ | ۲۶۰٫۰۰ | ۸۹٫۲۳ |




شکل ۶. جواب‌های پارتوی ایجاد شده توسط روش پیشنهادی.

جدول ۹. مقایسه‌ی عملکردی روش پیشنهادی با سایر روش های حل.

| رویکرد | سود | $C_{\max}$ | ثبات |
|---|---|---|---|
| جواب‌های پارتوی پیشنهادی | ۱۳۴۴۰ | ۲۴۹٫۲۱۸۷۵ | ۵۵۸٫۱۷ |
| | ۱۱۸۰۰ | ۲۵۱٫۲۵ | ۲۲۸٫۳۳ |
| | ۱۲۷۹۵ | ۲۵۹٫۳۲ | ۷٫۹۱ |
| | ۱۲۱۸۵ | ۲۵۸٫۶۴ | ۱۰۱٫۸۲ |
| | ۱۱۰۷۰ | ۲۴۹٫۲۱ | ۵۵۶٫۰۳ |
| | ۱۱۵۹۵ | ۲۵۹٫۳۲ | ۰ |
| | ۱۱۹۷۰ | ۲۵۴٫۲۱ | ۸۴٫۵۸ |
| | ۱۳۰۶۵ | ۲۵۲٫۵ | ۵۳۵٫۳۱ |
| | ۱۰۸۰۰ | ۲۴۹٫۲۱ | ۵۵۳٫۴۲ |
| | ۱۳۳۶۰ | ۲۶۰٫۴۱ | ۱۳۵٫۶۲ |
| | ۱۲۸۶۵ | ۲۶۰٫۴۱ | ۶۷٫۲۹ |
| | ۱۳۶۹۰ | ۲۵۵٫۹۳ | ۲۹۱٫۶۶ |
| | ۱۳۶۳۵ | ۲۵۴٫۷۹ | ۲۸۱٫۷۱ |
| | ۱۲۹۰۵ | ۲۶۰٫۴۱ | ۱۰۴٫۷۳ |
| | ۱۰۶۹۰ | ۲۵۰٫۳۱ | ۲۱۹٫۲۱ |
| | ۱۱۹۹۰ | ۲۵۴٫۲۱ | ۱۰۹٫۲۷ |
| | ۱۳۳۰۰ | ۲۵۹٫۳۲ | ۱۷۶٫۱۴ |
| | ۱۱۸۹۰ | ۲۵۰٫۳۱ | ۲۴۲٫۵ |
| | ۱۱۸۲۵ | ۲۵۳٫۶۴ | ۷۹٫۹۴ |
| | ۱۲۰۸۵ | ۲۵۲٫۵ | ۱۴۳٫۴۳ |
| FIFO | ۱۱۰۵۵ | ۲۵۵٫۹۳ | ۰ |
| SPT | ۱۳۲۱۵ | ۲۶۶٫۴۵ | ۴۷٫۰۸۳ |
| LPT | ۱۰۶۹۰ | ۲۵۰٫۳۱ | ۰ |
| WEDD | ۷۸۳۰ | ۲۹۶٫۰۴ | ۵۶۶٫۶۱ |

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله یک مسئله‌ی زمان‌بندی در یک محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر درنظرگرفته شد و برای کاهش اثر اختلالی که به‌صورت ورود غیر منتظره‌ی کارها درنظرگرفته شده بود، رویکرد واکنشی ارائه شد. البته در این مدل امکان پذیرش یا رد کارهای جدید نیز در نظرگرفته شده و رویکرد واکنشی به‌صورت یک مدل چندهدفه ارائه شد. به‌نظر می‌رسد بررسی کاربرد رویکرد ارائه شده در مورد سایر اختلالات تصادفی مانند لغو سفارش‌ها، خرابی ماشین‌آلات، تغییر زمان پردازش کارها، و... نیز می‌تواند مؤثر و مفید باشد. همچنین می‌توان به‌طورکلی موارد زیر را نیز برای تحقیقات بیشتر پیشنهادی داد:

- تحلیل مقیاس‌های عملکرد برای کاهش اثرات اختلالات تصادفی و غیرمنتظره بر مبنای هزینه و جریمه.
- در نظر گرفتن شرایط عملی سیستم‌های زمان‌بندی نظیر عدم پذیرش کارها و تقسیم‌بندی کارها به کارهای حساس و غیر حساس.

جدول ۱۰. مقایسه‌ی عملکرد و توالی ایجادشده توسط روش پیشنهادی و سایر روش ها.

| رویکرد | | بردار | موقعیت | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ |
| پیشنهادی | سفارش ۱ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۸ | ۷ | ۶ | ۳ | ۱۰ | ۹ | | | |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | | |
| | سفارش ۲ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۶ | ۷ | ۱۱ | ۱۳ | ۱۲ | ۳ | ۸ | ۱۰ | ۹ |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| FIFO | سفارش ۱ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۶ | ۳ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | | | |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | | | |
| | سفارش ۲ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۶ | ۳ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| SPT | سفارش۱ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۸ | ۱۰ | ۷ | ۹ | ۶ | ۳ | | | |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | | |
| | سفارش ۲ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۱۳ | ۸ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۰ | ۷ | ۹ | ۶ | ۳ |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ |
| LPT | سفارش ۱ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۳ | ۶ | ۹ | ۷ | ۱۰ | ۸ | | | |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | | | |
| | سفارش ۲ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۳ | ۶ | ۹ | ۷ | ۱۰ | ۱۲ | ۸ | ۱۱ | ۱۳ |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ |
| WEDD | سفارش ۱ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۷ | ۸ | ۳ | ۶ | ۱۰ | ۹ | | | |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | | |
| | سفارش ۲ | Seq | ۴ | ۵ | ۲ | ۱ | ۷ | ۸ | ۱۳ | ۱۲ | ۳ | ۱۱ | ۶ | ۱۰ | ۹ |
| | | Rej | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ |

## پانوشت‌ها

1. flexible flow shop
2. look-ahead window
3. succeeding job
4. dummy job
5. predecessor

## منابع (References)


1. Leon, V.J., Wu, S.D. and Storer, R.H. "Robustness measures and robust scheduling for job shops", *IIE Transactions*, **26**(5), pp. 32-43 (1994).
2. Jensen, M.T. "Generating robust and flexible job shop schedules using genetic algorithms", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation,* **7**(3), pp. 275-288 (2003).
3. Sotskov, Y.N., Egorova, N.G. and Lai, T.-C. "Minimizing total weighted flow time of a set of jobs with interval processing times", *Mathematical and Computer Modelling*, **50**, pp. 556-73 (2009).
4. Sotskov, Y.N. and Lai, T.-C. "Minimizing total weighted flow time under uncertainty using dominance and a stability box", *Computers & Operations Research*, **39**, pp. 1271-1289 (2012).
5. Wu, S.D., Storer, R.N. and Chang, P. "One-machine rescheduling heuristics with efficiency and stability as criteria", *Computers and Operations Research,* **20**(1), pp. 1-14 (1993).
6. Van de Vonder, S., Demeulemeester, E. and Herroelen, W. "Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis", *European Journal of Operational Research,* **189**, pp. 723-733 (2008).
7. Rangsaritratsamee, R., Ferrell, W.G. and Kurtz, M.B. "Dynamic rescheduling that simultaneously considers efficiency and stability", *Computers & Industrial Engineering*, **46**, pp. 1-15 (2004).
8. Shafaei, R. and Brunn, P. "Workshop scheduling using practical (inaccurate) data Part 2: An investigation of the robustness of scheduling rules in a dynamic and stochastic environment", *International Journal of Production Research*, **37**, pp. 4105-4117 (1999).
9. Shafaei, R. and Brunn, P. "Workshop scheduling using practical (inaccurate) data Part 3: A framework to integrate job releasing, routing and scheduling functions to create a robust predictive schedule", *International Journal of Production Research*, **38**, pp. 85-99 (2000).
10. Cowling, P.I., Ouelhadj, D. and Petrovic, S. "Dynamic scheduling of steel casting and milling using multi-

agents", *Production Planning & Control*, **15**, pp. 178-188 (2004).

11. Policella, N., Oddi, A., Smith, S.F. and Cesta, A. "Generating robust partial order schedules", *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, Principles and Practice of Constraint Programming, pp. 496-511 (2004).
12. Policella, N., Cesta, A., Oddi, A. and Smith, S.F. "Schedule robustness through broader solve and robustify search for partial order schedules", *Congress of the Italian Association for Artificial Intelligence*, AI*IA 2005: Advances in Artificial Intelligence, pp. 160-172 (2005).
13. Ghezail, F., Pierreval, H. and Hajri-Gabouj, S. "Analysis of robustness in proactive scheduling: A graphical approach", *Computers & Industrial Engineering*, **58**, pp. 193-198 (2010).
14. Matsuura, H. and Kanezashi, M. "Makespan comparison between resequencing and switchingin a dynamic manufacturing environment", *International Journal of Production Economics*, **44**, pp. 137-149 (1996).
15. Goren, S. and Sabuncuoglu, I. "Robustness and stability measures for scheduling: single machine environment", *IIE Transactions,* **40**, pp. 66-83 (2008).
16. Al-Hinai, N. and ElMekkawy, T.Y. "Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm", *International Journal of Production Economics,* **132**(2), pp. 279-291 (2011).
17. Al-Hinai, N. and ElMekkawy, T.Y. "An efficient hybridized genetic algorithm architecture for the flexible job-shop scheduling problem", *Flexible Services and Manufacturing Journal,* **23**, pp. 64-85 (2011).
18. Rahmani, D., Heydari, M., Makui, A. and Zandieh, M. "A new approach to reduce the effects of stochastic disruptions in flexible flow shop problem with stability and nervousness", *International Journal of Management Science and Engineering Management*, **8**(3), pp. 173-178 (2013).
19. Rahmani, D. and Heydari, M. "Robust and stable flow shop scheduling with unexpected arrival of new jobs and uncertain processing times", *Journal of Manufacturing System,* **33**(1), pp. 84-92 (2014).
20. Gao, K.Zh., Suganthan, P.N., Chua, T.J., Chong, C.S., Xiang Cai, T. and Pan, Q.K. "A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shopscheduling problem with new job insertion", *Expert Systems with Applications*, **42**, pp. 7652-7663 (2015).
21. Pereira, J. "The Robust (minmax regret) single machine scheduling with interval processing times and total weighted completion time objective", *Computers & Operations Research,* **66**, pp. 141-152 (2016).
22. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", in: *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference,* pp. 849-858 (2000).