

## مدل‌سازی ریاضی و حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

پریا خاکساری<sup>۱</sup>، سمیه قندی بیدگلی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران  
۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

### خلاصه

به دلیل جایگاه ویژه زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار در مراکز تولیدی، این مسأله در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده است. در این نوع زمان‌بندی، میان پردازش یک کار بر روی ماشین‌های متوالی هیچ‌گونه توقفی صورت نمی‌گیرد. این مسأله در صنایع بسیاری از جمله تولید مواد غذایی فاسدشدنی مطرح می‌باشد. یکی از فرضیات رایج در این مسأله، در دسترس بودن کارها در لحظه صفر است. در بسیاری از مواقع کارها دارای زمان آزادسازی غیرصفر می‌باشند. همچنین یکی از فرضیات رایج در حوزه زمان‌بندی عملیات، در دسترس بودن ماشین‌ها در افق برنامه‌ریزی است. واضح است که در عمل یک ماشین، به دلایل مختلف نظیر وقوع خرابی یا انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موقتاً در دسترس نباشد. با توجه به اهمیت این موضوع، در تحقیق حاضر مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با زمان آزادسازی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بررسی شده است. برای این مسأله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه گردیده است. برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. همچنین به منظور احراز اعتبار مدل ارائه شده روی پارامترهای مهم مدل تحلیل حساسیت انجام شده است. با توجه به پیچیدگی مدل و NP-hard بودن مسأله مورد بررسی، جهت حل مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی ترکیبی پیشنهاد شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، به حل مسائل نمونه عددی با استفاده از این الگوریتم، نرم‌افزار گمز الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک و همچنین الگوریتم جستجوی پرتوی بهبودیافته پرداخته شده است. نتایج محاسباتی، مؤید کارایی بسیار خوب الگوریتم مذکور برای حل مسأله مورد بررسی می‌باشد.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۲/۸/۳

پذیرش ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار  
زمان آزادسازی کار  
فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه  
الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی

### ۱. مقدمه

این نوع مسائل دارای ویژگی‌های گوناگون، اهداف و اولویت‌های مختلف هستند، به همین دلیل مدل‌سازی این‌گونه مسائل بسیار مشکل است. زمان‌بندی سیستم جریان کارگاهی جزء یکی از پیچیده‌ترین مباحث بهینه‌سازی ترکیبی به‌شمار می‌رود. در مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی کلاسیک، یکسری از ماشین‌ها با عملکرد و انواع متفاوت در

زمان‌بندی تولید حوزه وسیعی از مسائل اکثر سیستم‌های تولیدی و خدماتی را تحت پوشش قرار داده است. به همین دلیل ساختار این نوع مسائل بسیار متنوع هستند. هدف زمان‌بندی تولید، تخصیص منابع محدود در طول زمان برای انجام گروهی از فعالیت‌های مختلف است.

\* نویسنده مسئول: سمیه قندی بیدگلی

تلفن: ۰۳۱-۵۵۹۱۲۴۱۶؛ پست الکترونیکی: [s.ghandi@kashanu.ac.ir](mailto:s.ghandi@kashanu.ac.ir)

زمان بندی، این است که ماشین ها به طور پیوسته در کل افق برنامه ریزی در دسترس هستند. اما در بسیاری از سیستم های تولیدی واقعی، ماشین ها به دلایل متعددی نظیر خرابی و فعالیت های نگهداری و تعمیرات (نت) در دسترس نیستند. اگرچه زمان بندی کارها و فعالیت های نت معمولاً به طور جداگانه و مستقل بررسی می شوند. اما این دو موضوع ارتباط نزدیکی با هم دارند. عملیات نت زمان تولید را مصرف می کند و در نتیجه برای انجام آن، پردازش کارها باید قطع شود. از سوی دیگر، به تعویق انداختن اقدامات نت به دوره های زمانی آزاد، ممکن است احتمال خرابی دستگاه را افزایش دهد. بنابراین، مسأله زمان بندی با محدودیت نت ماشین آلات به موضوع جالبی برای محققان تبدیل شده است. محدودیت دسترسی به ماشین در سیستم های تولیدی جهت انجام عملیات نت به دو دسته دسترسی معین و دسترسی نامعین تقسیم می شود [۱۰]. در نوع اول زمان شروع فعالیت تعمیرات از قبل تعیین شده و ثابت می باشد. در حالی که در نوع دوم، فعالیت تعمیرات می بایست در یک بازه زمانی صورت پذیرد. عملیات نت برای زمان بندی جریان کارگاهی در تحقیقاتی همچون [۱۱،۱۲] در نظر گرفته شده و روش های مختلفی برای حل مسأله مذکور در شرایط متفاوت ارائه گردیده اند.

با تجزیه و تحلیل مطالعات انجام شده در زمینه زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار، موارد زیر را می توان بیان نمود:

۱. مسأله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با محدودیت دسترسی به ماشین ها در تحقیقات کمی بررسی شده است. در حالی که مدل سازی این مسأله برای محیط های تولیدی و خدماتی امری ضروری می باشد.
۲. مقالات موجود در زمینه زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با زمان آزادسازی برای کارها بدون در نظر گرفتن فرضیات واقعی از قبیل فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه انجام شده اند.
۳. در صنایعی مانند صنعت تولید مواد غذایی کنسرو شده و سایر صنایع مشابه با در نظر گرفتن زمان آزادسازی برای کارها مسأله به شرایط موجود در دنیای واقعی نزدیک تر می شود.
۴. مسأله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی کارها و فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه که برای برخی کاربردهای عملی مانند محیط های ساخت و تولید پیشرفته نیاز می باشد، تاکنون در هیچ تحقیقی در نظر گرفته نشده است.

باتوجه به این موارد و گپ تحقیقاتی ذکر شده، نوآوری های اصلی این مقاله به صورت زیر می باشند:

۱. در این مقاله برای نخستین بار مسأله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی کارها و فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در نظر گرفته شده است. این امر به گسترش مرزهای تحقیقاتی در حوزه تئوری زمان بندی کمک

مراحل مختلف قرار داشته و هر مرحله فقط شامل یک نوع ماشین می باشد. کارها ترتیب پردازش یکسانی روی تمام ماشین ها دارند که ثابت و از پیش تعیین شده است. در این مسأله فرض بر این است که تنها یک مسیر پردازش برای هر کار وجود دارد. مسأله جریان کارگاهی (FSP)<sup>۱</sup> در واقع زمان بندی مجموعه ای از کارها روی مجموعه ای از ماشین ها با هدف کاهش یک معیار معین است. این مسأله برای اولین بار توسط جانسون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۴ معرفی و فرمول بندی شد [۱]. همچنین جانسون الگوریتمی برای یافتن پاسخ بهینه مسأله مذکور در شرایط وجود ۲ ماشین و شرایط وجود سه ماشین در موارد محدود ارائه داد. از آنجا که مسأله FSP یک مسأله NP-Hard می باشد [۲]، تلاش های فراوانی برای توسعه الگوریتم های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسأله انجام شده است. به عنوان مثال می توان به الگوریتم ازدحام ذرات [۳] و الگوریتم ترکیبی بهینه سازی میرایی ارتعاش با الگوریتم های رقابت امپریالیستی و شبیه سازی تبرید [۴] اشاره نمود.

در سال های اخیر مسأله زمان بندی بدون انتظار به طور وسیعی گسترش یافته و در صنایع مختلفی همچون صنایع شیمیایی، صنایع غذایی، صنعت تولید ظروف بتنی و صنعت تولید فرآورده های دارویی مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. مسأله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار (NWFSP)<sup>۳</sup>، یک مسأله مهم در توالی عملیات در زمینه بهبود برنامه های تولید است. در این مسأله وقتی که پردازش یک کار بر روی اولین ماشین آغاز شد، آن کار باید بدون وقفه و پیوسته عملیات تکمیل فرایندها تا آخرین ماشین را ادامه دهد. به عبارت دیگر زمان شروع یک کار بر روی اولین ماشین ممکن است با تأخیر شروع شود تا اینکه شرط بدون انتظار بودن رعایت شود. مسأله مذکور در محیط تولیدی که فرآیندهای قطعه تولیدی باید از ابتدا تا انتها بدون هیچ گونه فاصله یا تأخیری بین عملیات ماشین ها صورت گیرد، روی می دهد. مسأله NWFSP، در زمره مسائل NP-hard طبقه بندی می شود [۶]. روش های مختلفی برای حل این مسأله ارائه گردیده اند که به ۴ دسته زیر قابل دسته بندی می باشند:

۱. روش های دقیق مانند روش شاخه و کران [۷].
  ۲. روش های ابتکاری مانند الگوریتم جستجوی پرتوی بهبود یافته [۷].
  ۳. روش های فراابتکاری مانند الگوریتم ازدحام ذرات گسسته [۸].
  ۴. روش های ترکیبی مانند روش کلونی مورچه های ترکیبی [۹].
- مسأله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با زمان آزادسازی از جمله مسائلی است که برای کمک به پیشبرد صنایع تولید مواد غذایی مورد استفاده قرار می گیرد. این مسأله برای بهینه سازی عملیات تولید مواد غذایی کنسرو شده و سایر صنایع مشابه کاربرد فراوانی دارد [۷]. در این مسأله محدودیتی برای شروع پردازش کارها در نظر گرفته شده و یک عملیات پردازش معین می تواند پس از یک زمان مشخص آغاز شود. استفاده از زمان آزادسازی برای بهینه سازی مؤثرتر زنجیره تأمین امری ضروری می باشد. یکی از مفروضات اصلی در اکثر مسائل

می‌نماید.

اضافه نمودن محدودیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در حالت دسترسی نامعین به مدل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با زمان آزادسازی کارها می‌باشد.

#### مفروضات مدل

- تمام کارها در زمان صفر برای پردازش موجود نبوده و برخی از کارها دارای زمان آزادسازی غیرصفر می‌باشند.
- همه ماشین‌ها در کل دوره زمان‌بندی در دسترس نبوده و هر ماشین در هر دوره یک‌بار نیاز به انجام عملیات نت پیشگیرانه در یک بازه زمانی از پیش تعیین شده دارد.
- تقاضای محصولات نهایی شناخته شده است.
- زمان موردنیاز برای انجام فعالیت نت، تابعی از مجموع زمان پردازش کارها می‌باشد.
- در صورت شروع یک فعالیت نت، انقطاع آن مجاز نیست.
- انقطاع کارها مجاز نیست. ( عملیات نت پیشگیرانه در زمان بیکاری انجام می‌شود).
- عملیات نت پیشگیرانه و عملیات انجام کار نمی‌توانند همزمان بر روی یک ماشین انجام شوند.
- زمان حمل‌ونقل بین مراحل مختلف ناچیز بوده و برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.
- هر کار در هر لحظه تنها روی یک ماشین پردازش می‌گردد.
- هر ماشین در هر لحظه تنها قادر به پردازش یک کار می‌باشد.

#### نمادها و پارامترهای مدل

نمادها و پارامترهای مدل به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$i$	اندیس ماشین $i = 1, 2, \dots, m$
$j$	اندیس کار $j = 1, 2, \dots, n$
$k$	اندیس موقعیت (جایگاه) کار در توالی $k = 1, 2, \dots, n$
$p_{ji}$	زمان پردازش کار $j$ روی ماشین $i$
$Ue_i$	زودترین زمان شروع فعالیت نت روی ماشین $i$
$Ul_i$	دیرترین زمان شروع فعالیت نت روی ماشین $i$
$t_{pm_i}$	مدت زمان مورد نیاز جهت انجام فعالیت نت روی ماشین $i$
$M$	عدد ثابت بزرگ
$r_j$	زمان آزادسازی کار $j$

#### متغیرهای تصمیم مدل

متغیرهای تصمیم مدل به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$C_{ki}$	زمان تکمیل کار در جایگاه $k$ روی ماشین $i$
$s_{pm_i}$	زمان شروع فعالیت نت روی ماشین $i$
$cp_{m_i}$	زمان تکمیل فعالیت نت روی ماشین $i$
$S_{ki}$	زمان شروع پردازش کار در جایگاه $k$ روی ماشین $i$
$C_{max}$	زمان تکمیل آخرین کار روی آخرین ماشین
$X_{jk}$	متغیر باینری ( $=1$ ) اگر کار $j$ در موقعیت $k$ ام از توالی باشد، در غیر این صورت ( $=0$ )
$Y_{ji}$	متغیر باینری ( $=1$ ) اگر کار $j$ زودتر از فعالیت نت روی ماشین $i$ انجام شود، در غیر این صورت ( $=0$ )

۲. به‌منظور تسهیل کاربردهای عملی مسأله مذکور، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط (MINLP)<sup>۱</sup> برای این مسأله توسعه داده شده است.

۳. باتوجه به پیچیدگی ذاتی موجود در مسأله موردنظر، یک الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی برای حل این مسأله به‌صورت مؤثر و کارآمد ارائه شده است.

ساختار مقاله به این صورت است که ابتدا در بخش ۲، مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌صورت کامل معرفی گردیده است. در بخش ۳ اصول و اجزای الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی برای مسأله موردنظر بیان گردیده و نحوه ایجاد جواب مسأله با استفاده از این الگوریتم توضیح داده شده است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم مذکور برای مسائل نمونه عددی در اندازه‌های مختلف در بخش ۴ به‌صورت کامل ارائه و تحلیل گردیده و در بخش ۵، نکات مهم انجام شده در مقاله به‌صورت خلاصه مرور و نتایج به‌دست آمده توضیح داده شده‌اند. همچنین در این بخش پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان گردیده است.

## ۲. مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

یک مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌تواند به‌صورت  $n$  کار  $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  توصیف گردد که بایستی با ترتیب مشخص و یکسانی از ماشین اول به آخر پردازش گردند. میان پردازش یک کار بر روی ماشین‌های متوالی نباید هیچ‌گونه توقفی صورت گیرد. محدودیتی برای زمان شروع پردازش هر کار در نظر گرفته شده و عملیات پردازش یک کار معین می‌تواند پس از یک زمان مشخص آغاز شود. همچنین محدودیت دسترسی به ماشین‌آلات از نوع قطعی تحت عنوان محدودیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و در حالت دسترسی نامعین وجود دارد. بدین معنا که فعالیت نت می‌بایست در یک بازه زمانی از پیش تعیین شده صورت پذیرد. هدف تعیین توالی عملیات کارها روی ماشین‌های مختلف و همچنین تعیین زمان انجام عملیات نت برای هر ماشین به‌نحوی است که مقدار زمان پردازش آخرین کار حداقل گردد.

### ۱-۲. مدل ریاضی مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

در این بخش، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط پیشنهادی تشریح خواهد شد. نوآوری‌های صورت گرفته در این مدل،

تابع هدف و محدودیت های مدل

تابع هدف و محدودیت های مدل به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\text{Min } Z = C_{max} \quad (1)$$

s.t

$$C_{k,1} \geq \sum_{j=1}^n X_{jk} \cdot (r_j + p_{j1}) \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$C_{ki} \geq C_{(k-1)i} + \sum_{j=1}^n X_{jk} \cdot p_{ji} \quad \forall k \in \{2, \dots, n\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (3)$$

$$C_{ki} = C_{k(i-1)} + \sum_{j=1}^n X_{jk} \cdot p_{ji} \quad \forall k \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall i \in \{2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$C_{ki} \geq \sum_{j=1}^n X_{jk} \cdot p_{ji} \quad \forall k \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (5)$$

$$C_{max} \geq C_{km} \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n X_{jk} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jk} = 1 \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (8)$$

$$cpm_i - spm_i = tpm_i \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (9)$$

$$Ue_i \leq spm_i \leq Ul_i \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (10)$$

$$(spm_i - S_{ki} - p_{ji}) \cdot X_{jk} \cdot Y_{ji} \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (11)$$

$$(S_{ki} - spm_i - tpm_i) \cdot X_{jk} \cdot (1 - Y_{ji}) \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (12)$$

$$C_{ki} - S_{ki} = \sum_{j=1}^n X_{jk} \cdot p_{ji} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (13)$$

$$C_{ki}, spm_i, cpm_i, S_{ki}, C_{max} \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (14)$$

$$X_{jk}, Y_{ji} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (15)$$

عبارت (۱) تابع هدف مسأله بوده و بیانگر این است که باید حداکثر زمان تکمیل آخرین کار کمینه سازی شود. محدودیت (۲) بیانگر آن است که کار در موقعیت  $k$  نمی تواند تا فرارسیدن زمان آزادسازی روی اولین ماشین پردازش شود. محدودیت (۳) تضمین می کند که زمان تکمیل کار در موقعیت  $k$  که توسط ماشین  $i$  پردازش می گردد، بزرگتر یا مساوی جمع زمان تکمیل کار قبلی توالی بر روی ماشین  $i$  و زمان پردازش کار در موقعیت  $k$  می باشد. محدودیت (۴) به محاسبه ی زمان تکمیل کار کمک می کند. باتوجه به اینکه میزان ذخیره های برای اقلام نیمه ساخته وجود ندارد، بنابراین زمان تکمیل کار بر روی ماشین  $i$  برابر است با زمان تکمیل آن کار بر روی ماشین  $i-1$  به علاوه ی زمان پردازش کار روی ماشین  $i$ . این محدودیت برای ماشین دوم به بعد برقرار

است. محدودیت (۵)، محدودیت زمان تکمیل کار بر روی یک ماشین مشخص است. براساس این محدودیت زمان تکمیل یک کار روی یک ماشین به خصوص بزرگ تر و یا مساوی زمان پردازش کار موردنظر روی آن ماشین می باشد. با استفاده از محدودیت (۶) زمان تکمیل آخرین کار ( $C_{max}$ ) محاسبه می شود.

محدودیت های (۷) و (۸) بیانگر آن است که فقط یک کار می تواند در یک موقعیت مشخص از توالی کار قرار گیرد. محدودیت (۹) تضمین می کند که بین زمان شروع و پایان فعالیت نت بر روی هر ماشین، توفقی صورت نگیرد. این به آن معناست که عملیات نت منقطع نخواهد شد. محدودیت (۱۰) تضمین کننده ی آن است که فعالیت نت در محدوده ی زمانی مشخص و ازپیش تعیین شده ای آغاز شود. محدودیت های (۱۱) و (۱۲) از انجام همزمان عملیات نت و عملیات کار بر روی یک ماشین به خصوص جلوگیری می کند. درواقع این محدودیت بیانگر آن است که در زمانی که کاری بر روی ماشین درحال پردازش است، عملیات نت نمی تواند بر روی آن ماشین انجام شود. بنابراین عملیات نت در زمان بیکاری ماشین ها انجام شده و باعث انقطاع عملیات پردازش کارها بر روی ماشین نمی شود. محدودیت (۱۳) نشان دهنده ی آن است که زمان تکمیل کار منهای زمان شروع پردازش آن، برابر با زمان پردازش کار بر روی یک ماشین به خصوص بوده و بنابراین بین زمان شروع پردازش کار و تکمیل آن انقطاعی صورت نمی گیرد. روابط (۱۴) و (۱۵) جهت تعریف متغیرهای تصمیم مسأله ایجاد گردیده اند.

## ۲-۲. خطی سازی مدل ریاضی ارائه شده

در مدل ارائه شده محدودیت های (۱۱) و (۱۲) به دلیل وجود ضرب دو متغیر صفر و یک  $X_{jk}$  و  $Y_{ji}$  غیرخطی بوده و باید خطی سازی گردند. طبق آنچه که در کتاب چن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳] گفته شده است، این رابطه غیرخطی به این صورت خطی سازی می گردد که به جای ضرب دو متغیر صفر و یک  $(Y_{ji} X_{jk})$  در محدودیت های (۱۱) و (۱۲) یک متغیر جدید صفر و یک  $XY_{jki}$  قرار گرفته و این دو محدودیت به صورت

زیر تغییر می یابند:

$$(spm_i - S_{ki} - p_{ji})XY_{jki} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (11)$$

$$(S_{ki} - spm_i - tpm_i)X_{jk} -$$

$$(S_{ki} - spm_i - tpm_i)XY_{jki} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (12)$$

همچنین سه معادله جدید زیر نیز به مدل اضافه می گردند:

$$XY_{jki} \leq X_{jk} \quad \forall i, j, k \quad (16)$$

$$XY_{jki} \leq Y_{ji} \quad \forall i, j, k \quad (17)$$

$$XY_{jki} \geq (X_{jk} + Y_{ji}) - 1 \quad \forall i, j, k \quad (18)$$

محدودیت های تغییر یافته (۱۱) و (۱۲) باز هم به دلیل وجود ضرب متغیر صفر و یک  $XY_{jki}$  و متغیرهای پیوسته  $spm_i$  و  $S_{ki}$  غیرخطی بوده و باید خطی سازی گردند. موارد دیگری که باعث غیرخطی بودن محدودیت تغییر یافته (۱۲) می گردند، ضرب متغیر صفر و یک  $X_{jk}$  و متغیرهای پیوسته  $spm_i$  و  $S_{ki}$  می باشند. این روابط غیرخطی به این

و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۱. ساختار و مراحل الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی یک راهکار بهینه‌سازی است که برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط گیم و همکاران<sup>۵</sup> ارائه شده است [۱۶]. این الگوریتم الهام‌گرفته از فرآیند بداهه‌نوازی است که نوازندگان برای ایجاد ملودی جدید با سازهای خود و دستیابی جمعی به هارمونی صحیح یا وضعیت تعادل سیستم دنبال می‌کنند. درست مانند هارمونی‌های موسیقی که با مقایسه و بداهه‌نوازی تک‌نوازندگان هر بار هارمونی‌های جدیدی برای بهبود ملودی‌ها ایجاد می‌کنند، به‌همین ترتیب راه‌حل‌های مسأله نیز پس از هر بار تکرار الگوریتم بهتر می‌شوند. در این الگوریتم، هر متغیر تصمیم مانند یک موسیقیدان و هر مقدار مانند یک نوت عمل می‌کند. مراحل الگوریتم عبارتند از:

۱. مقداردهی اولیه پارامترهای الگوریتم و ایجاد جمعیت اولیه. پارامترهای الگوریتم عبارتند از:

- $MaxIter$ : این پارامتر بیانگر حداکثر تعداد تکرار الگوریتم است.
- $HMS$ : پارامتر اندازه حافظه هارمونی که بیانگر تعداد هارمونی‌هایی است که در حافظه نگهداری می‌شوند.
- $HMCR^2$ : این پارامتر میزان احتمال استفاده از حافظه هارمونی را نشان می‌دهد. به‌طور مثال، اگر میزان آن برابر با ۰.۵ باشد به این معنی است که در هنگام ایجاد یک هارمونی جدید، ۵۰٪ احتمال دارد که از حافظه هارمونی استفاده شود. این ویژگی تقریباً مشابه با ویژگی انتخاب در الگوریتم ژنتیک می‌باشد.
- $PAR(Iter)^3$ : پارامتری است که میزان احتمال ایجاد تغییرات جزئی در یک جواب را در اجرای  $Iter$  از الگوریتم نشان می‌دهد. این ویژگی تقریباً مشابه با ویژگی جهش در الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

۲. راه‌اندازی حافظه هارمونی با اندازه  $HMS$  با استفاده از جمعیت اولیه ایجادشده.

۳. تولید یک هارمونی جدید به همراه احتمال استفاده از  $HM$  برابر با  $HMCR$ .

۴. تغییر دادن فرکانس با احتمال  $PAR$  و ارزیابی پاسخ‌های جدید.

۵. مقایسه کردن هارمونی جدید با هارمونی قبلی و افزودن جواب‌های آن به  $HM$  در صورت ایجاد بهبود.

۶. بررسی شرط توقف الگوریتم: در صورت عدم برقراری شرط توقف ( $iter < MaxIt$ )، الگوریتم از مرحله ۳ ادامه می‌یابد.

۳-۲. الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی توسعه داده شده

### برای مسأله مورد بررسی

در این بخش اجزای مهم الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی توسعه داده شده برای حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات

صورت خطی‌سازی می‌گردند که به‌جای ضرب متغیر صفر و یک  $XY_{jki}$  و متغیرهای پیوسته  $spm_i$  و  $S_{ki}$  به‌ترتیب متغیرهای جدید  $spmXY_{jki}$  و  $SXY_{jki}$  در نظر گرفته شده و در هر دو محدودیت قرار می‌گیرند. همچنین به‌جای ضرب متغیر صفر و یک  $X_{jk}$  و متغیرهای پیوسته  $spm_i$  و  $S_{ki}$  به‌ترتیب متغیرهای جدید  $spmX_{jki}$  و  $SX_{jki}$  در نظر گرفته شده و در محدودیت (۱۲) قرار گرفته و این دو محدودیت به‌صورت نهایی زیر تغییر می‌یابند:

$$spmXY_{jki} - SXY_{jki} - p_{ji} \times XY_{jki} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (11'')$$

$$SX_{jki} - spmX_{jki} - tpm_i \times X_{jk} - SXY_{jki} - spmXY_{jki} - tpm_i \times XY_{jki} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (12'')$$

در نهایت دوازده معادله جدید زیر به مدل اضافه می‌گردند:

$$spmXY_{jki} \leq spm_i \quad \forall i, j, k \quad (19)$$

$$spmXY_{jki} \leq XY_{jki} * M \quad \forall i, j, k \quad (20)$$

$$spmXY_{jki} \geq spm_i - M(1 - XY_{jki}) \quad \forall i, j, k \quad (21)$$

$$SXY_{jki} \leq S_{ki} \quad \forall i, j, k \quad (22)$$

$$SXY_{jki} \leq XY_{jki} * M \quad \forall i, j, k \quad (23)$$

$$SXY_{jki} \geq S_{ki} - M(1 - XY_{jki}) \quad \forall i, j, k \quad (24)$$

$$spmX_{jki} \leq spm_i \quad \forall i, j, k \quad (25)$$

$$spmX_{jki} \leq X_{jk} * M \quad \forall i, j, k \quad (26)$$

$$spmX_{jki} \geq spm_i - M(1 - X_{jk}) \quad \forall i, j, k \quad (27)$$

$$SX_{jki} \leq S_{ki} \quad \forall i, j, k \quad (28)$$

$$SX_{jki} \leq X_{jk} * M \quad \forall i, j, k \quad (29)$$

$$SX_{jki} \geq S_{ki} - M(1 - X_{jk}) \quad \forall i, j, k \quad (30)$$

### ۳. اجزای الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی برای

#### مسأله مورد بررسی

از آنجا که مسأله مورد نظر در این مقاله یک مسأله سخت می‌باشد، یک الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی ترکیبی جهت حل مسأله با ابعاد بزرگ توسعه داده شده است. دلیل انتخاب این الگوریتم برای مسأله مورد بررسی این است که الگوریتم جستجوی هارمونی با موفقیت جهت حل مسائل عملی بهینه‌سازی همچون زمان‌بندی جریان کارگاهی با در نظر گرفتن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات [۱۴] و زمان‌بندی جریان کارگاهی با محدودیت بافر [۱۵] به‌کار برده شده است. مزیت‌های این الگوریتم تعداد پارامتر و محاسبات ریاضیاتی کم و همین‌طور اجرای آسان آن است. همچنین این الگوریتم از تمامی راه‌حل‌های موجود در حافظه استفاده می‌نماید. دارا بودن این ویژگی، باعث شده تا انعطاف‌پذیری الگوریتم در جستجوی راه‌حل‌های بهتر افزایش یابد. علاوه بر آن یکی دیگر از ویژگی‌های جستجوی هارمونی این است که این جستجو در مدت زمان کمتری، فضاهای حل مناسب را شناسایی می‌کند. در این بخش در ابتدا ساختار و مراحل الگوریتم مذکور ارائه گردیده و سپس اجزای این الگوریتم جهت حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی

3. Pitch Adjustment Rate

1. Harmony Memory Size

2. Harmony Memory Consideration Rate

پیشگیرانه توضیح داده خواهد شد.

نحوه نمایش جواب در الگوریتم توسعه داده شده: یکی از مؤلفه های مهم در الگوریتم های فراابتکاری نحوه نمایش جواب می باشد. ساختار نمایش جواب، در مسائل مختلف، متفاوت بوده و متناسب با ویژگی های مسأله مورد بررسی، تعریف می گردد. برای مسأله مورد بررسی در این پژوهش، از دو ماتریس  $II$  و  $Pm$  استفاده شده است. ماتریس  $II$  به صورت یک ماتریس  $1 \times n$  می باشد که در آن  $n$  بیانگر تعداد کل کارها است. همچنین ماتریس  $Pm$  یک ماتریس  $1 \times m$  می باشد که در آن  $m$  بیانگر تعداد کل ماشین ها است. به عنوان مثال در شکل (۱) این ماتریس ها برای مثالی با ۶ کار و ۳ ماشین نشان داده شده اند. در این شکل عدد ۵ در سطر اول و ستون اول از ماتریس  $II$  بیان کننده این است که کار شماره ۵، اولین کاری می باشد که به ترتیب و بدون انتظار روی تمامی ماشین ها پردازش می گردد. عدد ۴۷ در سطر اول و ستون دوم از ماتریس  $Pm$  بیانگر این است که عملیات نت ماشین شماره ۲ در زمان ۴۷ پایان می یابد. با در نظر گرفتن ترتیب کارها و زمان پایان عملیات نت روی ماشین ها، زمان بندی انجام کارهای مختلف روی هر ماشین تعیین می گردد. جهت ایجاد یک جواب امکان پذیر چهار شرط زیر بایستی برقرار باشند:

- هر کار در هر لحظه تنها روی یک ماشین پردازش گردیده و هر ماشین در هر لحظه تنها یک کار را پردازش نماید.
  - زمان شروع پردازش یک کار به خصوص روی تمام ماشین ها بزرگتر یا مساوی با زمان آزادسازی آن کار باشد.
  - پردازش یک کار به خصوص روی ماشین ها بدون وقفه انجام گردد.
  - زمان شروع عملیات نت ماشین  $i$  در بازه  $[ue_i, ul_i]$  قرار دارد.
- لازم به ذکر است که باتوجه به نحوه نمایش جواب تعداد توالی های ممکن با استفاده از ماتریس  $II$  برابر با  $n!$  بوده و تعداد کل حالات ممکن برای ایجاد ماتریس  $Pm$  برابر با  $\prod_{i=1}^m (ul_i - ue_i + 1)$  می باشد. در نتیجه اندازه فضای جستجو یا تعداد کل جواب ها برابر با  $n! \times \prod_{i=1}^m (ul_i - ue_i + 1)$  می باشد. البته لازم به ذکر است که درصد کمی از این جواب ها جزو جواب های امکان پذیر می باشند.
- نحوه ایجاد جمعیت اولیه در الگوریتم توسعه داده شده: لازم به ذکر است که اندازه حافظه هارمونی با پارامتر  $HMS$  تعیین می شود. در این مقاله از ۶ روش ابتکاری مناسب برای مسأله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با تابع هدف حداقل نمودن زمان تکمیل کارها [۱۷] برای ساختن ۶ تا از جواب های جمعیت اولیه استفاده شده است:
- روش GRH2 [۱۸]: در این روش کارهای با روند افزایشی در زمان

- پردازش (مجموعه A) قبل از کارهای با روند کاهشی در زمان پردازش (مجموعه B) انجام می گردند. بنابراین، کارهایی که به مجموعه A تعلق دارند به ترتیب صعودی زمان های پردازش مرتب می شوند، در حالی که کارهای مجموعه B به ترتیب نزولی زمان های پردازش مرتب می گردند.
- روش RAJ [۱۹]: در این روش کارها به ترتیبی پردازش می گردند که زمان بیکاری بین آن ها روی اولین ماشین و در نتیجه مقدار Makespan حداقل گردد.
- روش NEH [۲۰]: در این روش کارها براساس مجموع زمان های پردازش آن ها روی تمامی ماشین ها به صورت نزولی مرتب گردیده و فهرست اولیه را تشکیل می دهند. سپس در یک فرآیند تکراری، هر کار از فهرست اولیه انتخاب گردیده و به لیست کارهای تخصیص داده شده اضافه می گردد. سپس کار اضافه شده در تمام موقعیت های توالی کارها در نظر گرفته شده و در نهایت موقعیتی انتخاب می گردد که کمترین مقدار  $C_{max}$  را ایجاد نماید. این روال تا زمان تخصیص تمامی کارها ادامه می یابد.
- روش LWW [۲۱]: این روش شامل سه فاز می باشد. در فاز اول ماتریس فواصل نهایی برای جفت کارهای مختلف تشکیل می گردد که شامل فاصله بین زمان تکمیل دو کار مورد نظر می باشد در صورتی که در دو موقعیت پشت سرهم قرار گرفته باشند. اولین کار در توالی ابتدایی کاری می باشد که کمترین مجموع زمان پردازش را بین تمامی کارها داشته باشد. سپس برای دومین تا آخرین کار کار انتخاب گردیده و تخصیص داده می شود که کمترین فاصله نهایی را با آخرین کار تخصیص داده شده داشته باشد. در فاز دوم ساختاری شبیه به مکانیزم FL [۲۲] استفاده می گردد. در فاز سوم دوباره مکانیزم FL استفاده می گردد اما با این تفاوت که توالی نهایی فاز دوم به عنوان توالی ابتدایی این مکانیزم در فاز سوم در نظر گرفته می شود. فاز سوم حداکثر سه بار یا در صورت عدم بهبود جواب کمتر از سه بار تکرار می گردد.
- روش FCH [۲۳]: این روش نیز شامل ۳ فاز می باشد. در فاز اول روش ابتکاری NEH برای ایجاد یک توالی ابتدایی استفاده می گردد. در فاز دوم روشی شبیه به روش جستجوی محلی RZ [۲۴] استفاده می گردد. این فرآیند در صورت عدم بهبود جواب یا حداکثر ۱۰ تکرار متوقف می گردد. در فاز آخر از روش جستجوی محلی تعویض بازگشتی و ادامه<sup>۱</sup> (BSC) استفاده می گردد. این فرآیند در صورت عدم بهبود جواب یا حداکثر ۲۰ تکرار متوقف می گردد.

توالی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
محصول	۵	۶	۲	۱	۴	۳

ماتریس  $II$

ماشین	۱	۲	۳
زمان پایان عملیات	۲۳	۴۷	۱۹

ماتریس  $Pm$

شکل (۱). ماتریس های  $II$  و  $Pm$  برای مثالی با ۶ محصول و ۳ ماشین

تصادفی ایجاد گردیده و در صورت کمتر بودن عدد ایجاد شده از مقدار  $PAR(Iter)$  محاسبه شده تغییرات جزئی در یک جواب به‌خصوص از هارمونی اعمال گردیده و در نتیجه فرکانس هارمونی تغییر داده می‌شود. عملگرهای مورد استفاده در این مقاله جهت اعمال تغییرات جزئی روی ماتریس  $II$  شامل سه اپراتور زیر می‌باشند:

۱. عملگر جای‌گذاری<sup>۱</sup>: این عملگر بدین صورت عمل می‌کند که یک موقعیت به تصادف در ماتریس  $II$  انتخاب گردیده و کار موجود در موقعیت مذکور به یک موقعیت تصادفی دیگر (متفاوت از موقعیت اولیه) منتقل می‌گردد.

۲. عملگر  $PMX$ <sup>۲</sup>: در این عملگر که بر روی دو جواب اعمال می‌گردد دو موقعیت به تصادف انتخاب شده و تمام مقادیر ماتریس  $II$  بین این دو موقعیت برای دو جواب با یکدیگر جابجا می‌شوند. در نهایت مقادیر تکراری موجود در سایر موقعیت‌های این دو جواب اصلاح می‌گردند.

۳. عملگر معکوس: این عملگر بدین صورت عمل می‌کند که دو موقعیت به تصادف در ماتریس  $II$  انتخاب گردیده و کارهای موجود بین دو موقعیت مذکور با یکدیگر جابجا می‌گردند.

همچنین در این مقاله از عملگر تبادل<sup>۳</sup> جهت اعمال تغییرات جزئی روی ماتریس  $Pm$  استفاده گردیده است. در این عملگر یک موقعیت از ماتریس به تصادف انتخاب گردیده (به‌عنوان مثال موقعیت  $k$ ) و مقدار موجود در موقعیت مذکور به یک مقدار تصادفی دیگر (متفاوت از موقعیت اولیه) در بازه  $[Ue_i + tpm_i, Ue_i + tpm_i]$  تغییر داده می‌شود. تفاوت‌های الگوریتم  $HHS$  ارائه شده با الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک: دو تفاوت اصلی زیر بین الگوریتم  $HHS$  و الگوریتم  $HS$  به‌صورت زیر می‌باشد:

۱. در الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی ایجاد می‌گردد. در حالی که در الگوریتم ارائه شده جمعیت مذکور ترکیبی از جواب‌های ایجاد شده به‌صورت تصادفی و با استفاده از روش‌های ابتکاری مناسب برای مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با تابع هدف حداقل نمودن زمان تکمیل کارها می‌باشد.

۲. تفاوت اصلی بین الگوریتم  $HHS$  و روش  $HS$  کلاسیک در نحوه تنظیم پارامتر  $PAR$  می‌باشد. تغییر پارامتر مذکور به‌صورت پویا در الگوریتم ارائه شده منجر به ایجاد جواب‌های با کیفیت بهتر و پراکندگی بیشتر نسبت به الگوریتم  $HS$  می‌گردد.

تنظیم پارامترهای الگوریتم  $HHS$  توسعه داده شده: از آنجا که خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری به‌شدت به مقادیر ورودی آن‌ها وابسته است، در این مقاله برای تنظیم پارامترهای الگوریتم  $HHS$  از روش تاگوچی استفاده گردیده است. ۵ پارامتر قابل تنظیم در این الگوریتم عبارت از حداکثر تعداد تکرار الگوریتم ( $MaxIter$ )، اندازه حافظه هارمونی ( $HMS$ )، میزان احتمال استفاده از حافظه هارمونی ( $HMCR$ )، حداکثر

روش  $LCH$  [۲۳]: این روش شامل ۲ فاز می‌باشد. در فاز اول توالی اولیه در دو مرحله ایجاد می‌گردد. در مرحله اول کارها براساس مجموع زمان پردازش آن‌ها به‌صورت نزولی مرتب می‌گردند. سپس در مرحله دوم  $2 \times (n-1)$  همسایگی برای جواب مرحله اول با استفاده از جای‌گذاری کارها در موقعیتی متفاوت با موقعیت قبلی در توالی ایجاد می‌گردد. در نهایت توالی با کمترین مقدار  $Makespan$  به‌عنوان توالی اولیه در نظر گرفته می‌شود. در فاز دوم روش ابتکاری  $NEH$  برای هر زوج مرتب از کارها در توالی اولیه به‌کار برده شده و توالی نهایی ایجاد می‌گردد.

در صورتی که کارها در روش  $NEH$  به‌ترتیب تصادفی مرتب گردند، روش ابتکاری تصادفی به‌دست آمده که تحت عنوان روش  $NEH\_RAN$  شناخته شده و برای مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی به‌خوبی کار می‌کند [۲۵]. در الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، ۶ راه‌حل تولید شده توسط روش‌های ابتکاری فوق در جمعیت اولیه گنجانده شده  $6 - 0.5 \times HMS$  جواب با استفاده از روش  $NEH\_RAN$  ایجاد گردیده و باقی‌مانده جمعیت اولیه (یعنی نیمی از جمعیت اولیه) به‌صورت تصادفی ایجاد می‌گردند. این امر منجر به ایجاد جواب‌های اولیه با کیفیت و متنوع می‌گردد.

تولید یک هارمونی جدید: در این مرحله  $HMCR \times HMS$  تا از جواب‌های هارمونی موجود انتخاب گردیده و به‌عنوان جواب‌های هارمونی جدید در نظر گرفته می‌شوند. همچنین  $(1 - HMCR) \times HMS$  جواب به‌صورت تصادفی ایجاد گردیده و به هارمونی جدید اضافه می‌گردند.

تغییر دادن فرکانس هارمونی با احتمال  $PAR$ : پارامتر  $PAR$  در الگوریتم  $HS$  پارامتر بسیار مهمی بوده و می‌تواند به‌طور بالقوه در تنظیم نرخ همگرایی الگوریتم به جواب بهینه مفید باشد. بنابراین تنظیم دقیق این پارامتر بسیار مورد توجه است. الگوریتم کلاسیک  $HS$  از یک مقدار ثابت و از پیش تعیین شده و غیرقابل تغییر برای پارامتر مذکور استفاده می‌کند. ایراد اصلی این کار در تعداد تکرارهایی است که الگوریتم برای یافتن راه‌حل بهینه نیاز دارد. مقادیر  $PAR$  کوچک می‌تواند باعث عملکرد ضعیف الگوریتم و افزایش قابل توجهی در تکرارهای مورد نیاز برای یافتن راه‌حل بهینه گردد. همچنین مقادیر  $PAR$  بزرگ به‌خصوص در تکرارهای اولیه الگوریتم معمولاً باعث همگرایی زودرس الگوریتم به جواب بهینه محلی می‌شود. به‌منظور بهبود کارایی الگوریتم  $HHS$  و حذف ایراد ذکر شده برای تغییر دادن فرکانس هارمونی از روش معرفی شده در [۲۶] استفاده گردیده است که در آن در هر مرحله ابتدا مقدار  $PAR(Iter)$  با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$PAR(Iter) = \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{MaxIter} \times Iter + PAR_{min} \quad (31)$$

که در آن  $PAR_{min}$  و  $PAR_{max}$  به‌ترتیب بیانگر مقادیر حداکثر و حداقل در نظر گرفته شده برای پارامتر  $PAR$  می‌باشند. سپس یک عدد

یک مقدار مشخص را بیان می کند. برای مسأله مورد بررسی در این مقاله با تابع هدف کمینه سازی هر چه این نسبت بیشتر باشد، پراکندگی کمتر بوده و در نتیجه اثر پارامتر مربوطه مهم تر می باشد. با توجه به این توضیحات و براساس مقادیر شکل (۲) و جدول (۳) بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم HHS عبارت از  $HMS = 50$ ,  $MaxItr = 100$ ,  $HMCR = 0.9$ ,  $PAR_{max} = 0.9$  و  $PAR_{min} = 0.4$  می باشند.

جدول (۱). پارامترهای الگوریتم HHS و سطوح هر یک از آنها

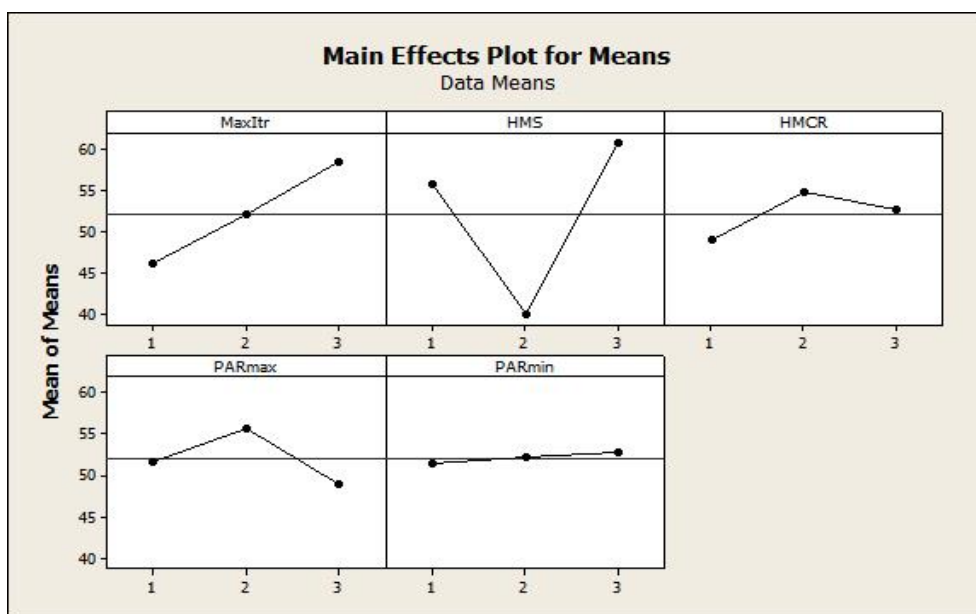
سطوح	MaxItr	HMS	HMCR	PAR <sub>max</sub>	PAR <sub>min</sub>
۱	۸۰	۴۰	۰.۷	۰.۷۹	۰.۳
۲	۹۰	۵۰	۰.۸	۰.۸۹	۰.۴
۳	۱۰۰	۶۰	۰.۹	۰.۹۹	۰.۵

مقدار پارامتر  $PAR$  ( $PAR_{max}$ ) و حداقل مقدار پارامتر  $PAR$  ( $PAR_{min}$ ) می باشند که برای هر یک از این پارامترها، ۳ سطح از مقادیر مختلف تعریف گردیدند (جدول (۱)). بنابراین تعداد حالات ایجاد شده عبارت از  $3^5$  یا ۲۴۳ حالت می باشد. روش تاگوچی برای یافتن بهترین مقادیر این پارامترها، این حالت ها را به ۲۷ حالت نشان داده شده در جدول (۲) کاهش می دهد [۲۷].

پس از اجرای حالت های پیشنهادی، مقادیر معیارها نرمال سازی شده و جمع وزنی آنها به نرم افزار Minitab داده شد. در نهایت پس از تحلیل این داده ها براساس نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup>، نرم افزار مینی تب بهترین حالت را از بین ۲۴۳ حالت اعلام نمود. خروجی های این نرم افزار در شکل (۲) و جدول (۳) نشان داده شده است. در تحلیل نسبت سیگنال به نویز، با استفاده از تغییر نتایج، بهترین و قوی ترین شرایط کاری تعیین می گردند. به عبارت دیگر، این نسبت پراکندگی در اطراف

جدول (۲). حالت های پیشنهادی روش تاگوچی به همراه سطوح مربوط به پارامترها در هر حالت

حالت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷
MaxItr	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
HMS	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
HMCR	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
PAR <sub>max</sub>	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
PAR <sub>min</sub>	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱



شکل (۲). نمودار پارامترهای اصلی ارائه شده توسط روش تاگوچی برای نسبت سیگنال به نویز

#### ۴. نتایج محاسباتی

در این مقاله به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی، نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم برای حل مثال های عددی ایجاد شده به صورت تصادفی با نتایج حاصل از اجرای نرم افزار

جدول (۳). بهترین مقادیر ایجاد شده توسط روش تاگوچی برای

پارامترهای الگوریتم HHS

پارامتر	MaxItr	HMS	HMCR	PAR <sub>max</sub>	PAR <sub>min</sub>
سطح	۳	۳	۲	۲	۳
مقدار بهینه	۱۰۰	۶۰	۰/۸	۰/۸۹	۰/۵

1. Signal to Noise Ratio



10×12=120 نمونه می‌باشد. در این گروه زمان پردازش کارها به صورت تصادفی در بازه [1,99] تولید می‌گردند.

۴. گروه چهارم که تحت عنوان ETA شناخته می‌شود در [۳۱] معرفی گردیده و جهت تحلیل عملکرد الگوریتم‌ها در حل مسائل نمونه خیلی بزرگ استفاده می‌شود. تعداد کارها برابر با  $m=20$  و تعداد ماشین‌ها برابر با  $n=\{1000,1500,2000\}$  ماشین می‌باشد. برای هر یک از ۳ ترکیب ممکن ۱۰ نمونه مجزا در نظر گرفته شده و در نتیجه این گروه شامل تعداد  $10 \times 3 = 30$  نمونه می‌باشد.

باتوجه به توضیحات ارائه شده تعداد کل نمونه‌های در نظر گرفته شده برابر با  $480+21+120+30=651$  نمونه می‌باشد. به منظور از بین بردن تبعات حاصل از تصادفی بودن نتایج، هر یک از مجموعه مسائل نمونه، ۱۰ بار اجرا شده و متوسط نتایج به دست آمده مبنای مقایسه‌ها قرار گرفته است. زمان حل نرم‌افزار GAMS بر روی ۳۶۰۰ ثانیه تنظیم شده است و در صورت عدم دستیابی به جواب بهینه تا زمان تنظیم شده، بهترین مقدار به دست آمده به عنوان جواب این نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شود. همچنین لازم به توضیح است که به منظور ایجاد زمان آزادسازی کارها مشابه مرجع [۱۱] با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$r_j = [0, 0/05 \times \sum_{j=1}^n p_{j,1}] \quad (۳۲)$$

که در آن مقدار  $p_{j,1}$  زمان پردازش کار  $j$  روی اولین ماشین می‌باشد. همچنین مقادیر زودترین و دیرترین زمان شروع فعالیت نت و مدت زمان موردنیاز جهت انجام فعالیت نت روی ماشین  $i$  با الهام از روشی مشابه مرجع [۱۱] به صورت زیر تعیین می‌گردند:

$$Ue_i = 0/4 \times \sum_{j=1}^n p_{j,i} \quad (۳۳)$$

$$Ul_i = 0/6 \times \sum_{j=1}^n p_{j,i} \quad (۳۴)$$

$$tmp_i = 0/1 \times \sum_{j=1}^n p_{j,i} \quad (۳۵)$$

در این روابط مقدار  $p_{j,i}$  زمان پردازش کار  $j$  روی ماشین  $i$  می‌باشد. در جداول (۴) تا (۶) نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های HHS و IBS و نرم‌افزار GAMS برای گروه‌های مختلف مسائل نمونه آورده شده است. در این جداول مقدار  $\overline{Time}$  بیانگر میانگین زمان حل (ثانیه) برای تمامی نمونه‌های یک مسأله به خصوص برای الگوریتم موردنظر می‌باشد. همچنین مقدار RPD نشان‌دهنده معیار انحراف درصد نسبی<sup>۳</sup> بوده و با استفاده از رابطه (۳۶) تعیین می‌گردد. در این رابطه مقادیر  $C_{Sol}$  و  $C_{Best}$  به ترتیب بیانگر بهترین مقدار Makespan حاصل از تمام اجراهای الگوریتم موردنظر و تمامی الگوریتم‌های مورد مقایسه می‌باشد. واضح است که مقادیر کمتر معیار مذکور بیانگر کارایی بهتر الگوریتم مورد مقایسه می‌باشد. مقدار  $\overline{RPD}$  بیانگر میانگین انحراف درصد نسبی یا RPD برای تمامی نمونه‌های یک مسأله به خصوص می‌باشد [۷].

$$RPD = \frac{C_{Sol} - C_{Best}}{C_{Best}} \times 100\% \quad (۳۶)$$

GAMS الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک (HS) و همچنین الگوریتم جستجوی پرتوی بهبودیافته (IBS) [۷] مقایسه می‌گردد. علت انتخاب الگوریتم جستجوی پرتوی بهبودیافته، مشابهت مسأله در نظر گرفته شده در مرجع مذکور با مسأله مورد بررسی در این مقاله می‌باشد. نوآوری اصلی مدل و روش حل ارائه شده در مقاله حاضر نسبت به مدل معرفی شده در مرجع [۷] در نظر گرفتن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد. لازم به ذکر است که پارامتر PAR در الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک برابر با ۰/۵ بوده و همچنین مقادیر پارامترهای  $HMS$ ،  $MaxIter$  و  $HMCR$  برای این الگوریتم مشابه الگوریتم HHS به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۶۰ و ۰/۸ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین پارامترهای عرض جستجو<sup>۱</sup> ( $\alpha$ ) و عرض خوشه<sup>۲</sup> ( $\beta$ ) برای الگوریتم IBS به ترتیب برابر با ۲ و ۶۰۰ تنظیم گردیده‌اند. لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای الگوریتم IBS به همان گونه‌ای در نظر گرفته شده است که توسط توسعه‌دهندگان آن تنظیم شده‌اند. برنامه تمامی الگوریتم‌ها با استفاده از نرم‌افزار Matlab نوشته شده و بر روی سیستمی با حافظه Intel Core i7 2.0 GHz CPU و 8 GB رم اجرا گردیده است.

چهار گروه مختلف از مسائل نمونه برای انجام تست‌های عددی در نظر گرفته شده‌اند که به صورت زیر می‌باشند:

۱. گروه اول که تحت عنوان VRF شناخته می‌شود برگرفته از مرجع [۲۸] در زمینه مسائل زمان‌بندی جریان کارگاهی می‌باشد. مسائل این گروه شامل دو دسته مسائل با اندازه کوچک و بزرگ می‌باشد. مسائل کوچک شامل  $n=\{10,20,30,40,50,60\}$  کار و  $m=\{5,10,15,20\}$  ماشین بوده و مسائل بزرگ شامل  $n=\{100,200,300,400,500,600,700,800\}$  کار و  $m=\{20,40,60\}$  ماشین می‌باشند. برای هر ترکیبی از تعداد کارها و ماشین‌ها ۱۰ نمونه مجزا در نظر گرفته شده و در نتیجه این گروه شامل تعداد  $10 \times (6 \times 4) + 10 \times (8 \times 3) = 480$  نمونه می‌باشد.

۲. گروه دوم که تحت عنوان REC شناخته می‌شود اولین بار در [۲۹] معرفی گردیده و در کتابخانه تحقیق در عملیات در دسترس می‌باشد. مسائل این گروه شامل ۷ ترکیب از ۱۶ ترکیب ممکن برای  $n=\{20,30,50,70\}$  کار و  $m=\{5,10,15,20\}$  ماشین می‌باشد. برای هر یک از این ۷ ترکیب ۳ نمونه مجزا در نظر گرفته شده و در نتیجه این گروه شامل تعداد  $3 \times 7 = 21$  نمونه می‌باشد.

۳. گروه سوم از مسائل نمونه که تحت عنوان TA شناخته می‌شود در [۳۰] معرفی گردیده و شامل ۱۲ ترکیب از ۱۵ ترکیب ممکن برای  $n=\{20,50,100,200,500\}$  کار و  $m=\{5,10,20\}$  ماشین می‌باشد. برای هر یک از این ۱۲ ترکیب ۱۰ نمونه مجزا در نظر گرفته شده و در نتیجه این گروه شامل تعداد

### 3. Relative Percentage Deviation

1. Search width
2. Cluster width

نرم افزار گمز حتی پس از ۳۶۰۰ ثانیه نیز قادر به یافتن یک جواب امکان پذیر برای مسائل مورد بررسی نمی باشد. این امر مؤید برتری الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی پیشنهادی نسبت به نرم افزار مذکور به خصوص برای حل مسائل با اندازه بزرگ می باشد. مقادیر نشان داده شده به صورت پررنگ در جدول (۴) برتری الگوریتم مذکور را نسبت به سه روش دیگر تأیید می نماید.

طبق نتایج حاصل از جدول (۴) دسته مسائل با اندازه بزرگ از گروه اول مسائل نمونه (L-VRF) تنها با استفاده از الگوریتم های HHS و HS و IBS حل گردیده و نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است. نتایج بیانگر این می باشد که الگوریتم HHS برای تمام مسائل نمونه این جدول قادر به یافتن بهترین جواب ها بوده و بنابراین الگوریتم مذکور از لحاظ معیار کیفیت جواب های ایجاد شده عملکرد بهتری نسبت به سایر روش ها دارد. هرچند این الگوریتم نسبت به الگوریتم HS نیاز به زمان اجرای بیشتری دارد که این امر به دلیل زمان بر بودن روش های ابتکاری مورد استفاده برای ایجاد جمعیت اولیه و تنظیم پارامتر PAR به صورت پویا در الگوریتم HHS می باشد.

طبق جدول (۴) جواب بهینه توسط نرم افزار گمز تنها برای مسائل نمونه با تعداد ۱۰ کار در کمتر از ۳۶۰۰ ثانیه حاصل گردیده است که برای این مسائل متوسط زمان اجرا برابر با ۲۲۰.۸ ثانیه می باشد که به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از متوسط زمان اجرا توسط الگوریتم های مورد مقایسه است. همچنین باتوجه به اجرای ۱۰ نمونه مجزا برای هر مسأله مشاهده می گردد که الگوریتم های IBS HS به ترتیب برای ۱۷ و ۲۵ تا از ۴۰ مسأله مربوط به تعداد ۱۰ کار به جواب بهینه رسیده اند. در حالی که الگوریتم HHS در ۳۱ تا از این ۴۰ مسأله موفق به یافتن جواب های بهینه گردیده است. باتوجه به در نظر گرفتن محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه برای زمان حل نرم افزار گمز جواب های حاصل توسط این نرم افزار برای مسائل با تعداد ۲۰ کار جواب های بهینه نبوده و بهترین جواب امکان پذیر ایجاد شده توسط این نرم افزار در ۳۶۰۰ ثانیه اجرای آن می باشد. الگوریتم HHS با داشتن زمان های اجرای کمتر در مقایسه با نرم افزار گمز و الگوریتم IBS از نظر کیفیت جواب های ایجاد شده برای تمامی مسائل نیز دارای عملکرد بهتری نسبت به تمامی روش های مورد مقایسه می باشد. برای مسائل با تعداد بیش از ۲۰ کار

جدول (۴). نتایج محاسباتی عملکرد نرم افزار GAMS و الگوریتم های HHS و HS و IBS در مسائل اندازه کوچک از گروه اول مسائل نمونه (S-VRF)

نتایج HHS		نتایج IBS		نتایج HS		نتایج GAMS		اطلاعات مسأله	
$\overline{Time}$	$\overline{RPD}$ (%)	$\overline{Time}$	$\overline{RPD}$ (%)	$\overline{Time}$	$\overline{RPD}$ (%)	$\overline{Time}$	$\overline{RPD}$ (%)	(n, m)	شماره مسأله
۰/۱۸۷	۰/۵۱۷(۷)	۰/۲۱۷	۰/۶۰۷(۵)	۰/۱۶۹	۳/۷۱۶(۳)	۳۵/۹	۰/۰۰۰	(۱- ۵)	۱
۰/۱۳۶	۰/۵۹۸(۸)	۰/۱۶۲	۰/۷۰۸(۶)	۰/۱۱۵	۴/۶۴۵(۴)	۱۱۳/۸	۰/۰۰۰	(۱- ۱۰)	۲
۰/۲۵۹	۰/۴۵۵(۷)	۰/۳۰۶	۰/۵۳۸(۶)	۰/۱۹۹	۲/۴۷۵(۵)	۳۰۹/۱	۰/۰۰۰	(۱- ۱۵)	۳
۰/۲۲۹	۰/۲۴۷(۹)	۰/۲۷۴	۰/۲۹۵(۸)	۰/۱۶۵	۱/۵۷۴(۵)	۳۹۸/۱	۰/۰۰۰	(۱- ۲۰)	۴
۲/۱۰۳	۰/۰۰(۱۰)	۲/۱۴۶	۲/۸۸۷(۵)	۲/۰۲۹	۳/۱۱۵(۰)	۳۶۰۰	۳/۰۷۲	(۲- ۵)	۵
۲/۳۱۱	۰/۰۰(۱۰)	۲/۴۱۵	۴/۶۴۶(۶)	۲/۲۱۷	۵/۰۴۴(۱)	۳۶۰۰	۷/۶۵۴	(۲- ۱۰)	۶
۲/۴۰۶	۰/۰۰(۱۰)	۲/۵۹۶	۴/۰۵۴(۵)	۲/۲۹۸	۴/۳۵۵(۰)	۳۶۰۰	۱۲/۹۰۸	(۲- ۱۵)	۷
۲/۵۱۳	۰/۰۰(۱۰)	۲/۷۰۵	۶/۷۱۳(۶)	۲/۳۱۸	۷/۲۹۹(۰)	۳۶۰۰	۱۷/۸۷۹	(۲- ۲۰)	۸
۴/۱۹۱	۰/۰۰۰	۴/۳۹۸	۲/۱۱۳	۴/۱۶۵	۲/۹۶۴	-	-	(۳- ۵)	۹
۴/۶۱۵	۰/۰۰۰	۴/۸۸۴	۲/۹۴۹	۴/۴۰۲	۴/۱۳۲	-	-	(۳- ۱۰)	۱۰
۴/۹۸۹	۰/۰۰۰	۵/۳۳۶	۲/۵۲۱	۴/۵۷۱	۳/۵۳۷	-	-	(۳- ۱۵)	۱۱
۵/۰۱۳	۰/۰۰۰	۵/۷۰۲	۲/۸۶۲	۴/۷۳۱	۴/۰۲۴	-	-	(۳- ۲۰)	۱۲
۶/۳۱۹	۰/۰۰۰	۶/۷۳۸	۱/۵۶۴	۶/۱۲۶	۲/۲۷۲	-	-	(۴- ۵)	۱۳
۶/۹۷۸	۰/۰۰۰	۷/۷۷۴	۲/۵۸۹	۶/۶۱۸	۳/۷۶۷	-	-	(۴- ۱۰)	۱۴
۷/۲۹۱	۰/۰۰۰	۸/۵۰۸	۲/۹۲۱	۶/۸۱۹	۴/۲۶۳	-	-	(۴- ۱۵)	۱۵
۷/۷۵۴	۰/۰۰۰	۹/۴۰۹	۲/۳۱۶	۷/۰۸۷	۳/۳۷۸	-	-	(۴- ۲۰)	۱۶
۸/۸۹۱	۰/۰۰۰	۹/۳۷۶	۱/۹۵۴	۸/۳۸۴	۲/۸۰۷	-	-	(۵- ۵)	۱۷
۹/۲۱۳	۰/۰۰۰	۱۰/۷۴۱	۲/۲۴۴	۸/۸۱۲	۳/۲۱۷	-	-	(۵- ۱۰)	۱۸
۱۰/۹۱۷	۰/۰۰۰	۱۲/۱۳۷	۲/۵۶۸	۹/۱۹۲	۳/۶۸۹	-	-	(۵- ۱۵)	۱۹
۱۱/۲۵۷	۰/۰۰۰	۱۳/۵۷۶	۳/۲۶۴	۹/۵۳۹	۴/۶۹۲	-	-	(۵- ۲۰)	۲۰
۱۱/۰۷۱	۰/۰۰۰	۱۲/۲۵۸	۱/۹۸۵	۱۰/۴۳۷	۲/۸۲۹	-	-	(۶- ۵)	۲۱
۱۱/۹۷۵	۰/۰۰۰	۱۴/۵۶۹	۲/۷۹۹	۱۱/۰۷۹	۳/۹۸۸	-	-	(۶- ۱۰)	۲۲
۱۳/۰۵۷	۰/۰۰۰	۱۶/۵۳۳	۲/۹۷۳	۱۱/۳۳۳	۴/۲۴۶	-	-	(۶- ۱۵)	۲۳
۱۴/۵۵۴	۰/۰۰۰	۱۸/۹۲۸	۳/۰۵۵	۱۱/۸۳۵	۴/۳۵۱	-	-	(۶- ۲۰)	۲۴

جدول (۵). نتایج محاسباتی عملکرد الگوریتم‌های HS HHS و IBS در دسته مسائل بزرگ از گروه اول مسائل نمونه (L-VRF)

نتایج HHS		نتایج IBS		نتایج HS		اطلاعات مسأله	شماره مسأله
(s)Time	RPD (%)	(s)Time	RPD (%)	(s)Time	RPD (%)	تعداد نمونه مجزا	(n, m)
۱۳/۳۴۲	۰/۰۰۰	۱۵/۵۳۸	۲/۳۴۸	۱۱/۷۲۶	۳/۵۳۷	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۱۴/۳۱۳	۰/۰۰۰	۱۸/۶۵۷	۲/۲۷۸	۱۲/۵۸۴	۳/۴۲۲	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۱۵/۰۹۸	۰/۰۰۰	۲۱/۸۶۶	۲/۵۶۲	۱۲/۹۶۶	۳/۸۶۵	۱۰	(۱۰۰۶۰)
۳۱/۳۲۴	۰/۰۰۰	۴۲/۹۶۹	۱/۶۹۴	۲۷/۳۳۳	۲/۵۹۶	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۳۵/۹۸۷	۰/۰۰۰	۶۲/۵۰۹	۲/۱۱۲	۲۷/۳۹۸	۳/۲۵۸	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۳۶/۹۰۱	۰/۰۰۰	۸۴/۹۳۵	۱/۹۲۳	۲۸/۹۵۶	۲/۹۴۲	۱۰	(۱۰۰۶۰)
۵۸/۹۸۱	۰/۰۰۰	۹۴/۲۹۸	۱/۳۱۶	۳۸/۷۸۳	۲/۲۲۲	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۶۸/۶۵۲	۰/۰۰۰	۱۶۲/۹۳۲	۱/۶۱۸	۴۲/۷۴۲	۲/۷۴۷	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۷۳/۷۸۱	۰/۰۰۰	۲۶۰/۰۹۸	۱/۶۷۳	۴۵/۶۵۱	۲/۸۴۱	۱۰	(۱۰۰۶۰)
۱۰۹/۲۱۱	۰/۰۰۰	۲۲۳/۳۵۹	۱/۴۴۸	۵۶/۳۱۵	۲/۰۷۴	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۱۱۲/۸۷۶	۰/۰۰۰	۴۰۸/۹۴۴	۱/۶۷۶	۶۲/۵۹۳	۲/۴۱۵	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۱۲۹/۴۳۲	۰/۰۰۰	۶۲۶/۴۸۹	۱/۵۰۴	۶۷/۶۸۱	۲/۱۷۲	۱۰	(۱۰۰۶۰)
۱۴۵/۳۲۱	۰/۰۰۰	۱۵۹/۵۹۷	۰/۱۷۸	۱۲۸/۵۳۶	۰/۲۴۴	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۱۶۵/۶۵۴	۰/۰۰۰	۲۱۲/۸۱۸	۰/۳۸۲	۱۴۴/۸۶۵	۰/۵۳۶	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۱۹۲/۹۰۸	۰/۰۰۰	۲۷۰/۱۳۴	۰/۴۸۳	۱۵۹/۱۸۸	۰/۶۸۶	۱۰	(۱۰۰۶۰)
۱۷۱/۴۳۲	۰/۰۰۰	۲۱۰/۳۹۶	۰/۲۵۱	۱۵۸/۳۸۹	۰/۳۶۲	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۲۱۹/۹۰۸	۰/۰۰۰	۲۹۸/۳۶۲	۰/۳۴۶	۱۸۲/۵۶۴	۰/۵۰۲	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۲۵۶/۷۸۲	۰/۰۰۰	۳۹۰/۶۳۴	۰/۵۲۷	۲۰۱/۷۲۳	۰/۷۶۴	۱۰	(۱۰۰۶۰)
۲۰۳/۳۲۴	۰/۰۰۰	۲۷۵/۹۱۷	۰/۲۶۸	۱۹۲/۸۸۸	۰/۳۰۶	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۲۶۷/۷۶۱	۰/۰۰۰	۴۰۹/۴۵۶	۰/۳۵۸	۲۲۳/۳۲۲	۰/۵۴۶	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۲۹۱/۹۸۰	۰/۰۰۰	۵۵۳/۴۱۴	۰/۴۳۵	۲۵۰/۰۷۳	۰/۶۶۷	۱۰	(۱۰۰۶۰)
۲۵۹/۸۷۶	۰/۰۰۰	۳۵۹/۹۳۷	۰/۱۵۶	۲۲۸/۳۳۹	۰/۲۴۲	۱۰	(۱۰۰۲۰)
۳۰۱/۰۳۲	۰/۰۰۰	۵۴۲/۲۶۷	۰/۳۲۷	۲۶۶/۰۹۳	۰/۴۹۶	۱۰	(۱۰۰۴۰)
۳۵۷/۹۰۸	۰/۰۰۰	۷۵۱/۷۶۵	۰/۴۱۵	۳۰۲/۰۵۸	۰/۶۲۶	۱۰	(۱۰۰۶۰)

#### ۴-۱. تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری و تایید عملکرد برتر الگوریتم HHS نسبت به الگوریتم‌های HS و IBS آزمون آماری غیرپارامتریک کروسکال-والیس [۳۲] برای تشخیص تفاوت معنادار بین رفتار این سه الگوریتم استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که آزمون‌های پارامتریک به‌دلیل فرضیات آن‌ها در مورد استقلال، نرمال بودن و همسانی متغیرها در اینجا قابل استفاده نمی‌باشند [۳۳]. آزمون تحلیل واریانس یک طرفه کروسکال-والیس<sup>۱</sup> یک آزمون غیر پارامتریک مقایسه زوجی و یک آنالیز واریانس یک طرفه پارامتری<sup>۲</sup> است [۳۲]. در این بخش ۴۶ تست با استفاده از جواب‌های حاصل از ۱۰ بار اجرای هر الگوریتم برای دسته مسائل بزرگ از گروه اول مسائل نمونه (L-VRF) و مسائل نمونه گروه‌های دوم تا چهارم

مقادیر حاصل برای معیارهای عملکردی موردنظر در مسائل نمونه گروه‌های دوم تا چهارم در جدول (۶) نشان داده شده است. بررسی جدول مویید برتری قابل ملاحظه الگوریتم HHS نسبت به دو الگوریتم موردمقایسه دیگر در حل مسائل مذکور می‌باشد. بنابراین، الگوریتم پیشنهاد شده برای مسأله مورد بررسی در این مقاله عملکرد بهتری داشته و قادر به یافتن جواب‌های بهتر در زمان کمی بیشتر یا کوتاهتری نسبت به روش‌های مورد مقایسه می‌باشد. در اشکال (۳) و (۴) چهار روش به‌صورت گرافیکی مقایسه گردیده‌اند. براساس نتایج نشان داده شده در جداول (۴) تا (۶) و شکل‌های (۳) و (۴) این نتیجه حاصل می‌گردد که الگوریتم HHS توسعه داده شده بهتر از سه روش دیگر عمل می‌نماید.

2. Parametric one-way ANOVA

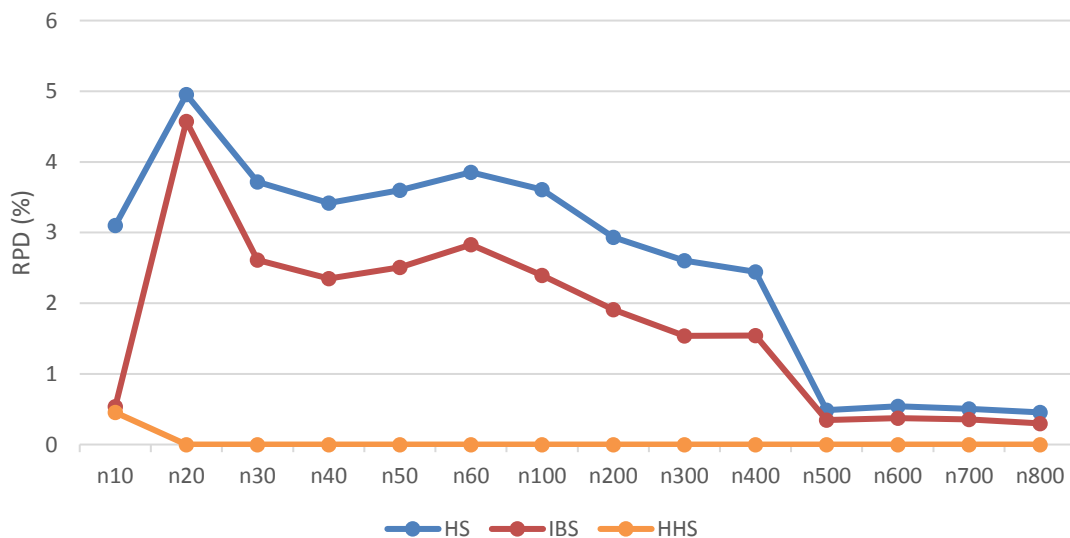
1. Kruskal-Wallis one-way analysis of variance by ranks test

معیار به‌خصوص (یعنی در صورتی که  $\alpha < p\text{-value}$  باشد)، الگوریتم HHS برای مسأله و معیار موردنظر به‌صورت تصادفی برتر از الگوریتم HS یا IBS می‌باشد.

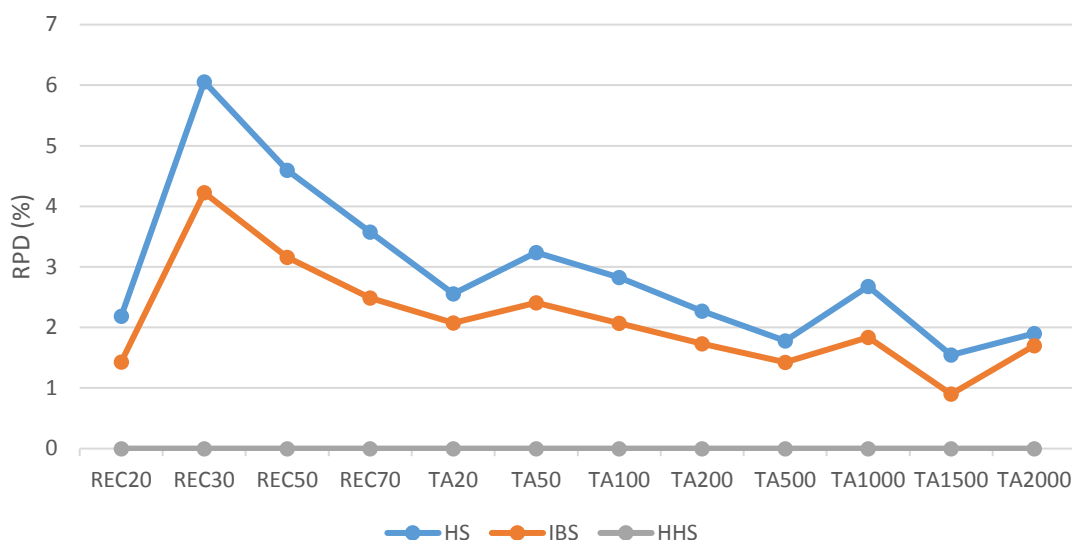
به‌عنوان جمعیت تست روش موردنظر استفاده می‌گردند. فرض صفر درنظر گرفته شده عبارت از این است که "عملکرد الگوریتم HHS برای شماره مسأله  $i$  و معیار عملکردی  $Z$  معادل عملکرد الگوریتم‌های HS و IBS می‌باشد". در صورت رد فرض صفر برای یک مسأله و یک

جدول (۶). نتایج عملکرد الگوریتم‌های HHS و IBS در مسائل نمونه گروه‌های دوم تا چهارم

نتایج HHS		نتایج IBS		نتایج HS		اطلاعات مسأله	
$(s)Time$	$RPD$ (%)	$(s)Time$	$RPD$ (%)	$(s)Time$	$RPD$ (%)	(n, m)	شماره مسأله
۱/۹۱۳	۰/۰۰۰	۲/۲۷۷	۱/۲۲۸	۱/۷۷۷	۱/۷۶۸	(۲۰ ۵)	۱
۱/۷۶۳	۰/۰۰۰	۲/۳۸۸	۰/۹۲۹	۱/۳۷۷	۱/۳۳۶	(۲۰ ۱۰)	۲
۱/۷۸۶	۰/۰۰۰	۲/۴۸۹	۲/۱۲۹	۱/۳۷۹	۳/۰۴۶	(۲۰ ۱۵)	۳
۳/۳۲۱	۰/۰۰۰	۴/۸۵۴	۳/۷۵۸	۲/۷۸۶	۵/۳۸۶	(۳۰ ۱۰)	۴
۳/۵۳۴	۰/۰۰۰	۵/۲۹۷	۴/۶۸۹	۲/۷۷۷	۶/۷۲۸	(۳۰ ۱۵)	۵
۷/۶۵۲	۰/۰۰۰	۱۰/۳۵۹	۳/۱۵۹	۵/۳۵۶	۴/۵۹۸	(۵۰ ۱۰)	۶
۱۰/۲۹۰	۰/۰۰۰	۲۵/۷۸۷	۲/۴۸۷	۸/۹۸۷	۳/۵۷۸	(۷۰ ۲۰)	۷
۱/۹۸۷	۰/۰۰۰	۲/۵۷۸	۱/۹۹۸	۱/۴۹۶	۲/۸۹۸	(۲۰ ۵)	۸
۱/۸۹۱	۰/۰۰۰	۲/۶۶۳	۱/۲۴۳	۱/۴۸۶	۱/۷۷۷	(۲۰ ۱۰)	۹
۲/۰۳۲	۰/۰۰۰	۲/۴۶۶	۲/۹۸۶	۱/۵۶۴	۲/۹۸۶	(۲۰ ۲۰)	۱۰
۶/۰۹۸	۰/۰۰۰	۷/۹۶۹	۱/۹۵۶	۵/۸۵۸	۲/۵۶۴	(۵۰ ۵)	۱۱
۶/۰۴۳	۰/۰۰۰	۸/۸۵۹	۲/۲۷۶	۵/۵۸۴	۳/۴۵۹	(۵۰ ۱۰)	۱۲
۶/۱۹۸	۰/۰۰۰	۹/۷۳۶	۲/۹۸۷	۵/۸۵۹	۳/۶۸۷	(۵۰ ۲۰)	۱۳
۱۳/۳۹۸	۰/۰۰۰	۱۸/۶۸۷	۱/۶۴۸	۱۱/۳۷۵	۱/۹۵۶	(۱۰ ۵)	۱۴
۱۴/۴۳۷	۰/۰۰۰	۱۹/۹۶۴	۱/۷۶۸	۱۱/۹۵۹	۲/۵۷۶	(۱۰ ۱۰)	۱۵
۱۵/۴۰۹	۰/۰۰۰	۲۲/۶۵۷	۲/۷۸۶	۱۲/۸۶۸	۳/۹۳۸	(۱۰ ۲۰)	۱۶
۲۹/۹۴۳	۰/۰۰۰	۴۸/۷۶۷	۱/۰۷۸	۲۵/۴۷۴	۱/۵۶۴	(۲۰ ۱۰)	۱۷
۳۴/۳۴۹	۰/۰۰۰	۶۱/۹۷۶	۱/۶۷۹	۲۷/۵۵۵	۲/۹۷۸	(۲۰ ۲۰)	۱۸
۱۰۲/۳۹۱	۰/۰۰۰	۴۰۰/۹۹۴	۱/۴۲۶	۷۷/۴۶۴	۱/۷۷۸	(۵۰ ۲۰)	۱۹
۱۸۱/۵۶۴	۰/۰۰۰	۱۹۶/۸۶۸	۱/۸۳۸	۱۷۵/۳۴۳	۲/۶۷۶	(۱۰۰ ۲۰)	۲۰
۳۵۲/۷۸۹	۰/۰۰۰	۴۷۸/۸۸۹	۰/۸۹۹	۳۰۱/۹۹۸	۱/۵۴۴	(۱۵۰ ۲۰)	۲۱
۵۰۳/۶۴۷	۰/۰۰۰	۹۶۰/۸۳۳	۱/۶۹۹	۴۷۱/۷۲۲	۱/۸۹۸	(۲۰۰ ۲۰)	۲۲



شکل (۳). مقایسه متوسط معیار  $RPD$  برای الگوریتم‌های HHS و IBS در مسائل نمونه گروه اول



شکل (۴). مقایسه متوسط معیار RPD برای الگوریتم‌های HS و IBS در مسائل نمونه گروه‌های دوم تا چهارم

مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار در نظر گرفته شده می‌باشد.

#### ۵. نتیجه و جمع‌بندی

در این مقاله مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بررسی گردید. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این مسأله توسعه داده شده و یک الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی ترکیبی برای این مسأله ارائه گردید. از آنجا که خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری به شدت به مقادیر ورودی آن‌ها وابسته است، برای تنظیم پارامترهای الگوریتم HHS از روش تاگوچی استفاده گردید. نتایج الگوریتم HHS در مثال‌های عددی با اندازه‌ها و داده‌های مختلف با نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک و الگوریتم جستجوی پرتوی بهبودیافته براساس معیارهای میانگین زمان اجرا و میانگین مقدار انحراف درصد نسبی یا RPD برای تمامی جواب‌های یافت شده مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم ارائه شده نسبت به نرم‌افزار گمز و سه الگوریتم دیگر می‌باشد. برای مطالعات آتی، می‌توان مسأله زمان‌بندی معرفی شده را با در نظر گرفتن مفروضات واقعی مانند قابلیت انقطاع کارها یا زمان آماده‌سازی وابسته به توالی مدل‌سازی نمود. همچنین می‌توان مسأله مورد بررسی را در حالت چندهدفه بررسی نمود. در نظر گرفتن سایر فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مانند نت اصلاحی (Emergency Maintenance (EM یا نت اضطراری Corrective Maintenance (CM)) و یا فعالیت تعمیر و نگهداری احتمالی پیشنهادات دیگری برای تحقیقات آتی می‌باشند. در این مقاله محدودیت‌های مربوط به منابع نت در نظر گرفته نشده‌اند. بنابراین در نظر گرفتن مواردی مانند زمان تأخیر تدارکات (Logistics Delay Time (LDT)) و زمان تأخیر مدیریتی (Administrative Delay

نحوه کار بدین صورت است که ابتدا مقدار تمام معیارهای عملکردی بدون در نظر گرفتن الگوریتم ایجادکننده این مقادیر مرتب‌سازی گردیده و سپس رتبه نسبی هر مقدار به الگوریتم مربوطه تخصیص داده می‌شود. بعد از آن مجموع رتبه‌ها برای هر الگوریتم محاسبه گردیده و سپس یک آماره H با استفاده از فرمولی که بیانگر واریانس رتبه‌های الگوریتم‌ها بوده و تقریباً دارای توزیع مربع کای می‌باشد، محاسبه می‌گردد. در نهایت مقدار  $p$ -value به صورت  $Pr(\chi_1^2 \geq H)$  تعیین گردیده و در صورتی که کمتر از مقدار  $\alpha$  باشد، فرض صفر رد می‌گردد. در این پژوهش مقدار  $\alpha$  برابر با ۰.۵ در نظر گرفته شده است.

نتایج محاسباتی حاصل از اجرای تست کروسکال-والیس برای سه الگوریتم HHS، IBS و HS، ۴۶ مسأله و ۲ معیار در جدول (۷) نشان داده شده است. از آنجا که معیارها از نوع حداقل‌سازی می‌باشند، مقادیر رتبه کمتر از ۱ (که به صورت پررنگ نشان داده شده‌اند) بیانگر برتری الگوریتم HHS نسبت به الگوریتم HS یا IBS در معیار و مسأله مورد بررسی می‌باشد. همچنین مقدار  $(1 - p)$  بیانگر سطح اطمینان برتری یک الگوریتم نسبت به الگوریتم دیگر می‌باشد. مقادیر پررنگ این جدول نشان‌دهنده برتری الگوریتم HHS نسبت به الگوریتم مورد مقایسه در معیار مورد نظر در سطح اطمینان ۰.۹۵ می‌باشد. نتایج جدول (۷) بیانگر این امر است که الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی توسعه داده شده در این مقاله با سطح اطمینان ۰.۹۵/۸۰٪ برای تمامی مسائل و معیارها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم جستجوی پرتوی بهبودیافته دارد. همچنین عملکرد الگوریتم HHS معرفی شده از نظر معیار  $RPD$  در سطح اطمینان ۰.۹۰/۴٪ برای تمامی مسائل بهتر از الگوریتم HS می‌باشد. این نتایج کاملاً در تناسب و انطباق با نتایج جداول (۴) تا (۶) و اشکال (۳) و (۴) بوده و براساس تمامی این تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم HHS معرفی شده در این مقاله، یک روش مناسب برای حل

الگوریتم‌های فراابتکاری جهت حل مسأله موردنظر استفاده نمود.

Time (ADT) جهت نزدیک نمودن مسأله مورد بررسی به شرایط دنیای واقعی مفید می‌باشند. به‌عنوان پیشنهاد آخر می‌توان از سایر

جدول (۷). نتایج تجزیه و تحلیل آماری عملکرد الگوریتم‌های HHS, HS و IBS در گروه مسائل مختلف

معیار عملکردی				مقاله شماره مقاله نمونه	مقدار	معیار عملکردی				مقاله شماره مقاله نمونه	
IBS با HHS	مقایسه HHS با HS	Time	RPD (%)			IBS با HHS	مقایسه HHS با HS	Time	RPD (%)		
9/99	9/86	10/97	9/46	۱	رتبه	8/95	8/79	10/63	9/47	۱	رتبه
11/01	11/14	10/03	11/54			12/05	12/21	10/37	11/53		
0/050	0/040	0/066	0/009			p	0/006	0/014	0/061		
8/69	9/66	11/45	9/60	۲	رتبه	9/10	9/63	11/38	8/88	۲	رتبه
12/31	11/34	9/55	11/40			11/90	11/37	9/62	12/12		
0/019	0/027	0/070	0/002			p	0/042	0/045	0/009		
9/89	8/75	10/97	10/69	۳	رتبه	9/40	9/97	10/98	9/49	۳	رتبه
11/11	12/25	10/03	10/31			11/60	11/03	10/02	11/51		
0/047	0/009	0/047	0/067			p	0/008	0/019	0/006		
10/27	9/67	11/12	8/71	۴	رتبه	9/38	10/22	11/13	10/28	۴	رتبه
10/73	11/33	9/88	12/29			11/62	10/78	9/87	10/72		
0/007	0/021	0/006	0/018			p	0/035	0/008	0/069		
10/29	9/94	10/67	8/59	۵	رتبه	10/09	9/12	12/08	5/22	۵	رتبه
10/71	11/06	10/33	12/41			10/91	11/88	8/92	5/78		
0/082	0/023	0/072	0/014			p	0/068	0/009	0/061		
9/62	9/84	11/01	9/88	۶	رتبه	9/74	8/80	10/63	9/81	۶	رتبه
11/38	11/16	9/99	11/12			11/26	12/20	10/37	11/19		
0/009	0/046	0/057	0/022			p	0/043	0/045	0/061		
9/16	10/50	11/18	9/68	۷	رتبه	9/75	10/25	10/98	8/97	۷	رتبه
11/84	10/50	9/82	11/32			11/25	10/75	10/02	12/03		
0/004	0/087	0/039	0/004			p	0/019	0/019	0/008		
10/22	8/16	12/47	9/71	۸	رتبه	9/68	9/23	11/12	8/04	۸	رتبه
10/78	12/84	8/53	11/29			11/32	11/77	9/88	12/96		
0/031	0/044	0/009	0/038			p	0/092	0/064	0/074		
9/80	9/84	10/65	10/19	۹	رتبه	8/17	8/83	10/92	9/02	۹	رتبه
11/20	11/16	10/35	10/81			12/83	12/17	10/08	11/98		
0/002	0/021	0/025	0/045			p	0/029	0/038	0/092		
10/09	9/69	11/23	10/23	۱۰	رتبه	7/85	9/01	12/13	9/51	۱۰	رتبه
10/91	11/31	9/77	10/77			13/15	11/99	8/87	11/49		
0/027	0/032	0/076	0/006			p	0/046	0/047	0/009		
8/64	8/69	11/49	9/32	۱۱	رتبه	9/86	9/13	11/04	10/32	۱۱	رتبه
12/36	12/31	9/51	11/68			11/14	11/87	9/96	10/68		
0/016	0/037	0/009	0/038			p	0/026	0/082	0/092		
9/95	9/91	10/92	9/07	۱۲	رتبه	10/37	7/82	10/69	8/36	۱۲	رتبه
11/05	11/09	10/08	11/93			10/63	13/18	10/31	12/64		
0/036	0/007	0/002	0/019			p	0/009	0/008	0/005		
10/10	10/39	11/46	8/95	۱۳	رتبه	9/79	9/19	12/65	8/97	۱۳	رتبه
10/90	10/61	9/54	12/05			11/21	11/81	8/35	12/03		
0/042	0/040	0/009	0/036			p	0/014	0/007	0/009		
10/40	10/47	10/60	10/10	۱۴	رتبه	9/63	9/82	11/33	9/45	۱۴	رتبه
10/60	10/53	10/40	10/90			11/37	11/18	9/67	11/55		
0/035	0/005	0/002	0/042			p	0/055	0/003	0/076		

REC

L-VRF

TA

9/38	10/16	10/69	9/40	رتبه		8/97	10/13	11/67	9/97	رتبه	
11/62	10/84	10/31	11/60		۱۵	12/03	10/87	9/33	11/03		۱۵
0/035	0/004	0/067	0/035	p		0/028	0/029	0/091	0/047	p	
10/09	9/34	10/71	10/38	رتبه		10/22	9/82	12/33	10/12	رتبه	
10/91	11/66	10/29	10/62		۱۶	10/78	11/18	8/67	10/88		۱۶
0/008	0/033	0/068	0/035	p		0/031	0/028	0/005	0/006	p	
9/74	9/73	10/59	10/09	رتبه		10/12	10/13	10/65	9/67	رتبه	
11/26	11/27	10/41	10/91		۱۷	10/88	10/87	10/35	11/33		۱۷
0/043	0/043	0/064	0/068	p		0/009	0/015	0/089	0/072	p	
8/75	10/37	10/88	8/74	رتبه		9/80	10/19	10/15	10/01	رتبه	
12/25	10/63	10/12	12/26		۱۸	11/20	10/81	10/85	10/99		۱۸
0/019	0/034	0/072	0/043	p		0/035	0/091	0/049	0/047	p	
9/68	9/00	10/68	9/75	رتبه		9/25	9/80	11/65	9/18	رتبه	
11/32	11/00	10/32	11/25		۱۹	11/75	11/20	9/35	11/82		۱۹
0/092	0/025	0/004	0/019	p		0/019	0/005	0/019	0/039	p	
10/17	8/82	10/71	9/68	رتبه		10/23	8/13	10/97	8/47	رتبه	
10/83	12/18	10/29	11/32		۲۰	10/77	12/87	10/03	12/53		۲۰
0/029	0/046	0/068	0/042	p		0/054	0/025	0/011	0/009	p	
8/85	10/19	12/19	10/17	رتبه		7/83	9/76	11/05	9/65	رتبه	
12/15	10/81	8/81	10/83		۲۱	13/17	11/24	9/95	11/35		۲۱
0/046	0/035	0/055	0/029	p	ETA	0/018	0/049	0/083	0/025	p	
10/43	9/98	11/23	8/85	رتبه		10/01	9/98	10/99	10/23	رتبه	
10/57	11/02	9/77	12/15		۲۲	10/99	11/02	10/01	10/77		۲۲
0/009	0/044	0/006	0/046	p		0/037	0/012	0/003	0/076	p	
						9/13	8/23	11/09	9/49	رتبه	
						11/87	12/77	9/91	11/51		۲۳
						0/016	0/009	0/085	0/009	p	
						8/82	9/09	10/77	8/92	رتبه	
						12/18	11/91	10/23	12/08		۲۴
						0/030	0/038	0/006	0/003	p	

## مراجع

- [7] Pourhejazy, P., et al., Improved beam search for optimizing no-wait flowshops with release times. IEEE Access, 2020. 8: p. 148100-148124.
- [8] Pan, Q.-K., M.F. Tasgetiren, and Y.-C. Liang, A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem. Computers & Operations Research, 2008. 35(9): p. 2807-2839.
- [9] Riahi, V. and M. Kazemi, A new hybrid ant colony algorithm for scheduling of no-wait flowshop. Operational Research, 2018. 18(1): p. 55-74.
- [10] Gao, J., M. Gen, and L. Sun, Scheduling jobs and maintenances in flexible job shop with a hybrid genetic algorithm. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006. 17(4): p. 493-507.
- [11] Miyata, H.H., M.S. Nagano, and J.N. Gupta, Integrating preventive maintenance activities to the no-wait flow shop scheduling problem with dependent-sequence setup times and makespan minimization. Computers & Industrial Engineering, 2019. 135: p. 79-104.
- [۱۲] قندی بیدگلی، سمیه و بنرودی، ریحانه (۲۰۲۳). مدل‌سازی ریاضی و حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس و محدودیت دسترسی به ماشین‌ها. نشریه پژوهش‌های
- [1] Johnson, S.M., Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. Naval research logistics quarterly, 1954. 1(1): p. 61-68.
- [2] Abdel-Basset, M., et al., A hybrid whale optimization algorithm based on local search strategy for the permutation flow shop scheduling problem. Future Generation Computer Systems, 2018. 85.
- [۳] الفت، لعیا (۲۰۱۷). حداقل دیرکرد در زمان‌بندی مسائل جریان کارگاهی با موعد تحویل میانی. پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری، دوره ۲ شماره ۳ صفحه ۲۵-۴۷.
- [۴] علاقه‌بندها (۲۰۱۸). مدل‌سازی زمان‌بندی و اندازه انباشته اقتصادی در جریان کارگاهی جایگشتی توزیع‌شده با کارخانه‌های متفاوت پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری، دوره ۳ شماره ۳ صفحه ۱۲۹-۱۵۵.
- [5] Hall, N.G. and C. Sriskandarajah, A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process. Operations research, 1996. 44(3): p. 510-525.
- [6] Hartmanis, J., Computers and intractability: a guide to the theory of np-completeness (michael r. Garey and david s. Johnson). Siam Review, 1982. 24(1): p. 90.

- scheduling in a flowshop to minimize total weighted flowtime of jobs. *European Journal of Operational Research*, 1997. 103(1): p. 129-138.
- [25] Deng, G., H. Yang, and S. Zhang, An enhanced discrete artificial bee colony algorithm to minimize the total flow time in permutation flow shop scheduling with limited buffers. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. 2016.
- [26] Mahdavi, M., M. Fesanghary, and E. Damangir, An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied mathematics and computation*, 2007. 188(2): p. 1567-1579.
- [۲۷] قندی بیدگلی، سمیه و امینی، مرضیه (۲۰۲۱). ارائه مدل زمان‌بندی چندعاملی در محیط جریان کارگاهی با فرض زوال‌پذیری کارها، زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و زمان آزادسازی کارها با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولیدی دور [۹] شماره ۱۸ صفحه ۵۹-۷۹.
- [28] Vallada, E., R. Ruiz, and J.M. Framinan, New hard benchmark for flowshop scheduling problems minimising makespan. *European Journal of Operational Research*, 2015. 240(3): p. 666-677.
- [29] Reeves, C.R. Genetic algorithms and neighbourhood search. in *Evolutionary Computing: AISB Workshop Leeds, UK, April 11-13, 1994 Selected Papers*. 2005. Springer.
- [30] Taillard, E., Benchmarks for basic scheduling problems. *European journal of operational research*, 1993. 64(2): p. 278-285.
- [31] Lin, S.-W. and K.-C. Ying, Optimization of makespan for no-wait flowshop scheduling problems using efficient matheuristics. *Omega*, 2016. 64: p. 115-125.
- [32] Kruskal, W.H. and W.A. Wallis, Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*, 1952. 47(260): p. 583-621.
- [33] Derrac, J., et al., A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2011. 1(1): p. 3-18.
- مهندسی صنایع در سیستم‌های تولیدی، دور [۱۰] شماره ۲۱ صفحه ۱-۱۷.
- [13] Chen, D.-S., R.G. Batson, and Y. Dang, *Applied integer programming*. Hoboken, NJ, 2010.
- [14] Branda, A., et al., Metaheuristics for the flow shop scheduling problem with maintenance activities integrated. *Computers & Industrial Engineering*, 2021. 151: p. 106989.
- [15] Wang, L., Q.-K. Pan, and M.F. Tasgetiren, Minimizing the total flow time in a flow shop with blocking by using hybrid harmony search algorithms. *Expert Systems with Applications*, 2010. 37(12): p. 7929-7936.
- [16] Geem, Z.W., J.H. Kim, and G.V. Loganathan, A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *simulation*, 2001. 76(2): p. 60-68.
- [17] Nagano, M.S. and H.H. Miyata, Review and classification of constructive heuristics mechanisms for no-wait flow shop problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016. 86: p. 2161-2174.
- [18] Gangadharan, R. and C. Rajendran, Heuristic algorithms for scheduling in the no-wait flowshop. *International Journal of Production Economics*, 1993. 32(3): p. 285-290.
- [19] Rajendran, C., A no-wait flowshop scheduling heuristic to minimize makespan. *Journal of the Operational Research Society*, 1994. 45(4): p. 472-478.
- [20] Nawaz, M., E.E. Enscore Jr, and I. Ham, A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega*, 1983. 11(1): p. 91-95.
- [21] Li, X., Q. Wang, and C. Wu, Heuristic for no-wait flow shops with makespan minimization. *International Journal of Production Research*, 2008. 46(9): p. 2519-2530.
- [22] Framinan, J.M. and R. Leisten, An efficient constructive heuristic for flowtime minimisation in permutation flow shops. *Omega*, 2003. 31(4): p. 311-317.
- [23] Li, X. and C. Wu, Heuristic for no-wait flow shops with makespan minimization based on total idle-time increments. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2008. 51(7): p. 896-909.
- [24] Rajendran, C. and H. Ziegler, An efficient heuristic for





DOI: <https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5564>

## Mathematical Modeling and Solving the no-Wait Flow Shop Scheduling Problem Considering the Release Times and Preventive Maintenance Activities

Pariya Khaksari<sup>1</sup>, Somayeh Ghandi Bidgoli<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

### ARTICLE INFO

#### **Article history:**

Received 25 August 2023

Accepted 31 January 2024

#### **Keywords:**

No-Wait Flow Shop Scheduling  
Task Release Time  
Preventive Maintenance Activity  
Hybrid Harmony Search (HHS)  
Algorithm

### ABSTRACT

Due to the special position of the no-wait flow shop scheduling in production centers, this problem has received much attention in recent years. In this type of scheduling, there is no waiting time between the processing of a job on consecutive machines. This problem is raised in many industries, including the production of perishable foods. One common assumption in this problem is the availability of tasks at the zero moment. In many cases, some tasks have a non-zero release time. Also, in the field of operation scheduling, one of the common assumptions is the availability of machines in the planning horizon. It is clear that in practice, a machine is temporarily unavailable due to various reasons such as breakdown or preventive maintenance activities. Due to the importance of this issue, in the present study the no-wait flow shop scheduling problem considering the task release times and the preventive maintenance is investigated. For the mentioned problem, a Mixed Integer Non Linear Programing (MINLP) model is presented. The General Algebraic Modeling System (GAMS) software is used to solve the model. Also, in order to verify the validity of the presented model, sensitivity analysis has been performed on the important parameters. Due to the complexity of the model and the NP-hardness of the proposed problem, the Hybrid Harmony Search (HHS) metaheuristic algorithm is proposed to solve large-scale problems. In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, numerical sample problems are solved using this algorithm, the GAMS software as well as the classic Harmony Search and the Improved Beam Search (IBS) algorithm. Computational results confirm the effectiveness of the proposed algorithm for the considered problem.

\* Corresponding author. S. Ghandi Bidgoli  
Tel.: 031-55912416; E-mail address: [s.ghandi@kashanu.ac.ir](mailto:s.ghandi@kashanu.ac.ir)