فصلنامه علمی ـ پژوهشی مطالعات مدیریت
صنعتی سال ششم، شماره ۱۶، تابستان ۸۶
صفحات ۲۹ تا ۵۴

Motaleat-e modiriat-e sanati
Vol. 6,No.16, Summer 2008
Spring 2010

ارائه مدل زمانبندی گردش شغلی با ملاحظه هزینه خستگی ناشی از شباهت کارها و توسعه الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری برای حل آن

اشکان عیوق *
دکترمصطفی زندیه**
دکترهایده متقی***

چکیده

در این مقاله با توسعه مفهوم خستگی ناشی از کارهای یکسان به دو نوع خستگی مثبت و منفی ناشی از انجام کارهای مشابه و نه صرفاً یکسان، مدل جدید و منعطفی ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان کارها را به نحوی زمانبندی کرد که کارهای مشابه در کوچکترین دوره قابل برنامه‌ریزی و کارهای غیر مشابه در

* دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی دانشگاه شهید بهشتی
** استادیار گروه مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه شهید بهشتی
*** استادیار گروه مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۸۸/۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۰/۲۱

بزرگترین دوره قابل برنامه‌ریزی به هر اپراتور تخصیص داده شود، به نحوی که کل هزینه تخصیص (شامل هزینه کل انجام کار و هزینه کل خستگی) کمینه گردد. از آنجا که مدل زمانبندی گردش شغلی پیشنهادی از نوع تخصیص چند دوره‌ای بوده و به صورت مدل عدد صحیح غیر خطی فرموله می‌شود، در زمره مسائل بهینه‌سازی ترکیبیاتی قرار می‌گیرد. برای غلبه بر پیچیدگی الگوریتمی آن، دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری توسعه داده شده و کارائی آنها در مقایسه با نرم افزار لینگو که مدل‌های عدد صحیح غیر خطی را با رویکرد شاخه و حد در اندازه کوچک حل می‌نماید، تائید شده است. همچنین نشان داده شده که الگوریتم رقابت استعماری در مقایسه با الگوریتم ژنتیک از کیفیت بالاتری برخوردار است.

واژگان کلیدی: زمانبندی گردش شغلی، خستگی مثبت و منفی، برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری.

مقدمه

گردش شغلی از جمله استراتژی‌های طراحی شغل است که به منظور افزایش انگیزه شاغل در انجام کارها یا وظایف تکراری بکار گرفته می‌شود. اغلب سازمان‌ها از این استراتژی برای چند کارکردی و چند مهارته نمودن کارکنان در قالب برنامه‌های زمانبندی گردش شغلی بهره می‌جویند. با این حال مزیت گردش شغلی در بهبود عملکرد به یقین تائید نشده است (بهادری و رادویلسکی[1]، ۲۰۰۶). به باور بهادری و رادویلسکی (۲۰۰۶) استفاده از قواعد بسیار ساده و غیر ابتکاری مانند اختصاص کارهای مختلف نسبت به آنچه در دوره گذشته توسط اپراتور انجام شده است، به بهبود عملکرد نمی‌انجامد و لازم است مدل‌های مبتنی بر قواعد مبتکرانه توسعه داده شود، به نحوی که با اصلاح شیوه زمانبندی کارها، بهبود عملکرد نیز حاصل شود.

با توجه به ماهیت مسئله تعیین چگونگی گردش شغلی، مدل‌های عمومی آن که تحت عنوان مسئله زمانبندی گردش شغلی[2] (JRSP) شناخته می‌شوند از نوع مدل‌های

1- Bhadury and Rdovilsky
2- Job rotation scheduling problem (JRSP)

تخصیص چند دوره‌ای می‌باشند که با فرض استقلال تخصیص کارها به هر اپراتور، فضای موجه جواب‌ها که شامل گزینه‌های زمانبندی گردش شغلی است به شدت بزرگ خواهد بود و به این ترتیب استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی ریاضی برای حل مدل خصوصاً در مورد مسایل با ابعاد بزرگ غیر عملی بوده و توسعه روش‌های جستجوی ابتکاری را ضرورت می‌بخشد (اسکینر و کرت[1]، ۲۰۰۷).

در این مقاله برای مسئله زمانبندی گردش شغلی، یک مدل عدد صحیح غیر خطی پیشنهاد شده است که با معرفی خستگی[2] مثبت و منفی ناشی از شباهت کارهای[3] اختصاص داده شده به هر اپراتور، ایده‌ای جدید در خصوص محاسبه هزینه خستگی هر اپراتور پیشنهاد داده و از طریق آن می‌توان علاوه بر هزینه‌های تخصیص، هزینه خستگی را در تعیین زمانبندی گردش شغلی وارد نمود و کارایی تصمیمات را بهبود بخشید. همچنین الگوریتم‌های جستجوی فرا ابتکاری ژنتیک (GA)[4] و رقابت استعماری (ICA)[5] برای حل مدل توسعه و کارائی آنها مورد مقایسه قرارگرفته است.

ادبیات موضوع

مسئله زمانبندی گردش شغلی یکی از زیر مجموعه‌های مسئله زمانبندی منابع انسانی است که هدف آن تخصیص کارها به اپراتورها طی دوره‌های زمانی مشخص است، به نحوی که هزینه‌های ناشی از تخصیص شامل هزینه‌های انجام کار و هزینه‌های فرصت کمینه شود. منظور از هزینه‌های فرصت آن دسته از هزینه‌هایی است که در نتیجه کاهش بهره‌وری فردی، بروز مسایل ارگونومیکی و مرتبط با ایمنی و یا هر دو ایجاد می‌شوند. از جمله موارد بهره‌وری فردی می‌توان یادگیری، کسب مهارت‌های بیشتر، انگیزه و رضایت شغلی را نام برد و مخاطرات مواجه با محیط کار، کار با ماشین، مواد و غیره نیز از موارد قابل ذکر در حیطه مسایل

1- Sekiner and Kurt
2- Boring or boredom
3- Job similarity
4- Genetic algorithm (GA)
5- Imperialist competitive algorithm (ICA)

ارگونومیکی و مرتبط با ایمنی می‌باشد (اسکینر و کرت ۲۰۰۷، بورک و مور[1] ۲۰۰۰).

کاربرد گردش شغلی طیف وسیعی از شرکت‌های تولیدی با تنوع وظایف، سیستم‌های صنعتی پیشرفته همچون صنایع تولید سلولی و سازمان‌های خدماتی همچون بیمارستان‌ها، اداره پلیس، آتش نشانی، اتوبوسرانی و غیره را شامل می‌شود (بهادری و رادویلسکی ۲۰۰۶، اسکینر و کرت ۲۰۰۷). اما تحقیقات انجام شده در مورد بررسی اثرات بکارگیری گردش شغلی در عمل به نتایج ضد و نقیضی دست یافته است، به نحوی که بطور قاطع نمی‌توان مزیت آن را در بهبود عملکرد کارکنان اثبات شده دانست (بهادری و رادویلسکی، ۲۰۰۶). در اولین تحقیقات درباره گردش شغلی، ویلکینسون و ادواردز نشان داده‌اند که گردش کار در یک سیستم دو نفره به عملکرد بالاتر نسبت به یک سیستم سه نفره بدون اجرای گردش شغلی انجامیده است (اسکینر و کرت، ۲۰۰۸). پاول[2] و همکارانش (۱۹۹۹) با انجام یک تحقیق موردی به این نتیجه رسیده‌اند که گردش شغلی به کاهش بار کار اپراتورها منجر شده است. گریفین در تحقیقات خود، موفقیت گردش شغلی را در ارتقای سطح انگیزش و رضایت شغلی نامناسب ارزیابی کرده است (بهادری و رادویلسکی، ۲۰۰۶). بنابر گزارش بهادری و رادویلسکی (۲۰۰۶) از نتایج تحقیقات کانینگام و ابرل و همچنین دیویس و تیلور، اگرچه گردش شغلی سبب ارتقای سطح رضایت شغلی شده لیکن منجر به بهبود عملکرد نشده است.

علیرغم علاقه محققان به مطالعه اثرات گردش شغلی، تاکنون تحقیقات اندکی برای توسعه و حل مدل‌های زمانبندی گردش شغلی صورت گرفته است. مسئله زمانبندی گردش شغلی اولین بار توسط کراناهان[3] و همکارانش (۲۰۰۰) مدل‌سازی و حل شده است. این محققین مدل تخصیص چند دوره‌ای که با متغیرهای عدد صحیح برنامه‌ریزی می‌شود را طراحی و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک راه حل آنرا ارائه نموده‌اند. این مدل با وارد کردن پیش فرضیات مسئله زمانبندی تورهای

1- Burke and Moore
2- Paul
3- Carnahan

کاری و با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های بار کار توسط اسکینر و کرت (۲۰۰۷) توسعه داده شده و با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید (SA)[1] و کلونی مورچگان (ACO)[2] حل شده است. همانگونه که اشاره شد با وجود توسعه این مدل‌ها، مسئله اصلی این است که مدل‌های مورد استفاده در عمل، عملکرد مطلوبی در بهبود بهره‌وری فردی نداشته‌اند. به اعتقاد بهادری و رادویلسکی (۲۰۰۶) این موضوع به شیوه‌های زمانبندی کارها باز می‌گردد. این محققین معتقدند ضعف مدل‌های کنونی، استفاده از قواعد بسیار ساده و غیر ابتکاری برای تعیین نحوه گردش وظایف است. همچنین می‌توان چنین استدلال کرد که مدل‌سازی منابع ایجاد هزینه‌های فرصت علاوه بر اینکه نیازمند خلاقیت در تعریف تابع مدل است، چند هدفه بودن مدل زمانبندی گردش شغلی، تطابق بیشتر با واقعیات را موجب می‌شود. در این راستا بهادری و رادویلسکی (۲۰۰۶) سه مدل تخصیص چند دوره‌ای و دو هدفه و چند روش ساده ابتکاری برای به دست آوردن جواب‌های موجه مطلوب ارائه داده‌اند و مدعی شده‌اند که سه مدل مذکور نسبت به مدل‌های پیشین از اثربخشی بالاتری برخوردار بوده و به واقعیت نزدیک‌تر هستند. اهدافی که بهادری و رادویلسکی (۲۰۰۶) در مدل‌های ارائه شده گنجانده‌اند شامل کمینه‌سازی هزینه‌های انجام کار و کمینه سازی خستگی ناشی از تخصیص کارهای یکسان طی دوره برنامه‌ریزی به هر اپراتور است. این مقاله به توسعه مفهوم خستگی و مدل زمانبندی گردش شغلی پیشنهادی بهادری و رادویلسکی (۲۰۰۶) پرداخته و الگوریتم‌های ابتکاری کارا برای حل آن پیشنهاد شده است.

در ادامه مقاله ابتدا در بخش سوم به ارائه تعاریف و مدلسازی مسئله پرداخته و پس از بررسی اعتبار و کاربردی بودن مدل، نحوه طراحی الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری برای حل مدل به ترتیب در بخش‌های چهارم و پنجم تشریح خواهد شد. در بخش ششم نتایج محاسبات گزارش و مقایسه بین الگوریتم‌ها انجام می‌پذیرد.

1- Simulated annealing (SA)
2- Ant colony optimization(ACO)

تبیین ساختار و مدل‌سازی مسئله

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، اساس مدل‌هایی که تاکنون برای مسئله زمانبندی گردش شغلی پیشنهاد شده است، مدل تخصیص چند دوره‌ای[1] می‌باشد. تابع هدف در این مدل از نوع کمینه‌سازی هزینه کل ناشی از تخصیص و متغیرهای تصمیم از نوع عدد صحیح (صفر و یک) می‌باشد. در این مقاله با افزودن مفروضات و ارائه تعاریف جدید از خستگی، ساختار مدل تخصیص چند دوره‌ای برای فرموله کردن مسئله زمانبندی گردش شغلی مبتنی بر تخصیص کارها به اپراتورها طی چند دوره برنامه‌ریزی با هدف کمینه نمودن کل هزینه‌های تخصیص بسط داده شده است.

مفروضات مدل

مفروضاتی که برای مدلسازی مسئله زمانبندی گردش شغلی بکار گرفته شده‌اند عبارت است از:

۱. تعدادکارها از تعداد اپراتورها بیشتر است لذا به هر اپراتور در هر دوره برنامه‌ریزی حداقل یک کار تخصیص می‌یابد.
۲. هر کار در هر دوره برنامه‌ریزی تنها باید به یک اپراتور تخصیص یابد.
۳. هر کار در هر دوره برنامه‌ریزی تنها باید یکبار انجام شود.
۴. تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی از قبل مشخص و بیش از یک دوره است.
۵. تعداد اپراتورها و کارها در هر یک از دوره های برنامه‌ریزی ثابت می‌ماند.
۶. برای انجام تمامی کارها در یک دوره برنامه‌ریزی، تعداد اپراتور در دسترس کفایت می‌نماید.
۷. مجموعه تمامی کارها باید در هر دوره برنامه‌ریزی برای انجام تخصیص داده شوند و انجام هیچ کاری به دوره بعد موکول نخواهد شد.
۸. محدودیت زمان برای انجام مجموعه کارها در هر دوره برنامه‌ریزی وجود ندارد.

1- Multi-period assignment model

۹. محدودیتی برای زمان در دسترس بودن هر اپراتور در هر دوره برنامه‌ریزی وجود ندارد.
۱۰. تخصیص کارهای مشابه در هر دوره برنامه‌ریزی مطلوب و در چند دوره برنامه‌ریزی نامطلوب ارزیابی می‌شود.
۱۱. تمامی پارامترها و داده‌های مسئله قطعی و در هر دوره برنامه‌ریزی ثابت است.

تعاریف و نمادهای مدل

در صورتی که تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی (بدون از دست رفتن عمومیت هر دوره از این پس یک روز کاری فرض می‌شود) برابر K، تعداد اپراتورها برابر I و تعداد کارها برابر J در نظر گرفته شود، اندیس‌های شمارنده پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله و پارامترها به شرح زیر نمادگذاری می‌شود.

اندیس‌ها:

i: شمارنده اپراتور $(i = 1, 2, ..., I)$
j: شمارنده کار $(j = 1, 2, ..., J)$
k: شمارنده روز $(k = 1, 2, ..., K)$

پارامترها:

c_{ij}^{k}: هزینه انجام کار j توسط اپراتور i در روز k
$p_{j'j}$: میزان یا درجه شباهت[1] دو کار j و j' به نحوی که:

$$\forall\ j, j' : p_{j'j} = p_{jj'};\ 0 \le p_{jj'} \le 1$$

DOR[2]: تعداد روزهایی که طی آن درجه شباهت کارهای اختصاص داده شده به هر اپراتور محاسبه می‌شود. یعنی اگر هدف محاسبه درجه شباهت کارهای اختصاص داده شده به اپراتور i تا روز kام باشد، باید روزهای $k - DOR + 1$ تا k در نظر گرفته شود. مشخصاً DOR از k کوچکتر انتخاب می‌شود.
a_i: هزینه ناشی از خستگی روزانه اپراتور i که در اثر تخصیص کارها طی کل دوره

1- Similarity degree
2- Days-of-ROTN

برنامه‌ریزی احساس شده است.

متغیرهای تصمیم

x_{ij}^{k}: در صورتی که کار j به اپراتور i در روز k اختصاص یابد برابر یک و در غیر این‌صورت برابر صفر خواهد بود.

z_i: در صورتی که مقدار خستگی کل اپراتور منفی شود برابر صفر و در غیر این صورت برابر یک است.

در ادامه تعاریفی که منجر به محاسبه هزینه خستگی ناشی از تخصیص کارهای مشابه طی دوره‌های برنامه‌ریزی به هر اپراتور خواهد شد، ارائه می‌شود.

تعریف(۱) ـ درجه تشابه دو کار

میزان یا حدی که یک کار به کار دیگر شباهت دارد و طبیعتاً عددی بین صفر (در حالت عدم وجود تشابه) و یک (درحالت وجود تشابه کامل که مشخصاً برای دو کار یکسان برقرار است) است.

از شباهت می‌توان منظورهای متنوعی با اهداف مختلف استنباط کرد. به عنوان نمونه سرپرست واحد تولید می‌تواند به منظور مقایسه کارها از نظر درجه استاتیکی یا دینامیکی بودن و با هدف تخصیص کارها به نحوی که تناسب مشترکی بین کارهای اختصاص یافته به اپراتورها از نظر استاتیکی یا دینامیکی وجود داشته باشد، درجه تشابه هر دو کار را تعیین نماید. همچنین ممکن است شباهت میان دو کار به لحاظ کار با دستگاه از یک خانواده، تعداد وظایف یکسان در حین اجرای آنها، دقت یا تخصص مورد نیاز و غیره بررسی و تخمین زده شود. از نظر محققین درجه آزادی ممکن در تعریف و نحوه محاسبه درجه شباهت به انعطاف‌پذیری مدل و کاربردی بودن آن می‌افزاید. تعیین درجه شباهت بدین صورت تاکنون در مدل‌های تخصیص توسعه داده نشده است، اما مشابه رویه‌ای است که در تعیین سلول‌های کاری در سیستم انعطاف‌پذیر تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از تعیین درجه تشابه دو به دوی کارها، ماتریس درجه شباهت کارها $P_{J\times J}$ به دست خواهد آمد.

تعریف(۲)ـ خستگی مثبت (مطلوب)[1] اپراتور

الف) **خستگی مطلوب برای هر اپراتور در هر روز** $B^{+}(i,k)$ به سبب شباهت کارهای تخصیص داده شده به او در آن روز ایجاد می‌گردد. اگر به اپراتور تنها یک کار در یک روز به خصوص تخصیص داده شود، خستگی مطلوب برای او معادل یک است (معادله (۱)).

$$\forall\, k = 1, 2, \ldots, K;\ \forall\, i = 1, 2, \ldots, I$$

$$B^{+}(i,k) = \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{u=1}^{J-j} x_{ij}^{k} \cdot x_{ij+u}^{k} \cdot p_{jj+u} \qquad (1)$$

ب) **خستگی مطلوب برای هر اپراتور طی دوره برنامه‌ریزی** $B^{+}(i)$ برابر کمینه مقادیر خستگی مطلوب اپراتور در هر روز قرار داده می‌شود (معادله(۲)).

$$B^{+}(i) = \min_{k=1,2,\ldots,K} \{B^{+}(i,k)\} \qquad \forall\, i = 1, 2, \ldots, I \qquad (2)$$

تعریف(۳)ـ خستگی منفی (نامطلوب)[2] اپراتور

الف) خستگی منفی (نامطلوب) برای هر اپراتور در هر روز $B^{-}(i,k)$ بر اساس شباهت کارهای تخصیص داده شده از روز kام تا $DOR-1$ روز قبل از آن محاسبه می‌شود (معادله (۳)).

$$\forall\, k = 1, 2, \ldots, K;\ \forall\, i = 1, 2, \ldots, I$$

$$B^{-}(i,k) = \sum_{t=1}^{Min\{k-1,\, DAYS-OFF-ROTN-1\}} \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{u=0}^{J-j} x_{ij}^{k} \cdot x_{ij+u}^{k-t} \cdot p_{jj+u} \qquad (3)$$

بنابراین برای محاسبه خستگی نامطلوب برای هر اپراتور در روز kام باید بازه زمانی شامل چند روز متوالی به شرح یکی از روابط زیر بررسی شود:

$$if \quad k \geq DAYS - OFF - ROTN(DOR) \Rightarrow DAYS : k - DOR + 1, \ldots, k;$$

$$Otherwise \quad DAYS : 1, 2, \ldots, k$$

ب) خستگی منفی (نامطلوب) برای هر اپراتور طی دوره‌ی برنامه‌ریزی $B^{-}(i)$،

1- Positive boring
2- Negative boring

برابربیشینه‌ی مقادیر خستگی مطلوب اپراتور در هر روز قرار داده می‌شود (معادله‌ی(۴)).

$$B^{-}(i) = \underset{k=1,2,...,K}{Max}\{B^{-}(i,k)\} \quad \forall i = 1, 2, ..., I \qquad (4)$$

تعریف(٤) ـ خستگی کل اپراتور $BORIN(i)$

خستگی‌ای است که اپراتور در طی پریود برنامه‌ریزی احساس می‌کند و برابر با تفاوت سهم هر روز از حداکثر خستگی ناشی از شباهت کارهای تخصیص داده شده در DOR روز متوالی و حداقل خستگی مطلوب به جهت تخصیص کارهای مشابه است (معادله (۵)).

$$\forall\, k = 1, 2, ..., K;\ \forall\, i = 1, 2, ..., I$$

$$BORING(i) = \frac{\underset{k}{Max}\{B^{-}(i,k)\}}{DOR} - \underset{k}{Min}\{B^{+}(i,k)\} \Rightarrow BORING(i) = \frac{B^{-}(i)}{DOR} - B^{+}(i) \qquad (5)$$

در صورتی که مقدار خستگی کل **اپراتور** منفی شود هزینه‌ای نخواهد داشت.

مدل پیشنهادی

با توجه به مفروضات و تعاریف ارائه شده در قسمت قبل، ساختار مدل تخصیص چند دوره‌ای برای فرموله‌کردن مسئله زمانبندی گردش شغلی به شکل زیر توسعه داده می‌شود. تابع هدف در این مدل (معادله ۶) از دو عبارت تشکیل شده که عبارت اول هزینه کل انجام کار توسط هر تخصیص و عبارت دوم جمع هزینه خستگی هر اپراتور ناشی از احساس خستگی او به دلیل اختصاص کارهای مشابه در طی افق برنامه‌ریزی بوده که به‌صورت غیر خطی فرموله شده است.

$$Min \quad Z = (\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} c_{ij}^{k} x_{ij}^{k} + z_i \sum_{i} a_i . BORING(i)); s.t: \qquad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{I} x_{ij}^{k} = 1 \qquad \forall j = 1,2\ldots,J \quad \forall k = 1,2\ldots,K; \qquad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{J} x_{ij}^{k} \geq 1 \qquad \forall i = 1,2\ldots,I \quad \forall k = 1,2\ldots,K; \qquad (8)$$

$$x_{ij}^{k} = 0,1 \qquad (9)$$

$$z_i = 0,1 \qquad (10)$$

$$(1 - z_i)M + BORING(i) \geq 0 \qquad \forall i = 1,2\ldots,I \qquad (11)$$

$$-z_i M + BORING(i) \leq 0 \qquad \forall i = 1,2\ldots,I \qquad (12)$$

معادله (۷) بر مبنای فرض (۲) و نامعادله (۸) مستقیماً ارضا کننده فرض (۱)، معادلات (۹) و (۱۰) مبین عدد صحیح (از نوع صفر و یک) بودن مدل می‌باشد. نامعادلات (۱۱) و (۱۲) نیز محدودیت مثبت بودن خستگی اپراتور جهت محاسبه هزینه مرتبط را عملیاتی می‌نمایند.

اعتبارسنجی[1] مدل

در این بخش از مقاله، با انتخاب ۸ مسئله در ابعاد کوچک که داده‌های آن به صورت تصادفی تولید شده است، کاربردی بودن[2] مدل با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی شاخه و حد[3] که توسط نسخه ۱۱ نرم افزار لینگو[4] محاسبات آن انجام شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسایل نمونه در جدول ۱ از نظر ابعاد به نحوی انتخاب شده‌اند که نرم افزار لینگو قادر به پیدا نمودن یک جواب بهینه محلی برای آنها باشد. در این جدول، محاسبه اندازه هر مسئله که در واقع تعداد نقاط موجه آن می‌باشد، به کمک نظریه اشغال[5] و قاعده ترتیب تکراری انجام شده است که در اینجا از ذکر جزئیات در این‌باره خودداری می‌شود.

1- Validation
2- Applicability
3- Branch & bound (B&B)
4- Lingo software
5- Occupation theory

جدول ۱. مسائل نمونه جهت سنجش اعتبار مدل

شماره مسئله	ابعاد مسئله‌نمونه				داده‌های مسئله			
	K	J	I	اندازه	DOR	ماتریس شباهت کارها	ماتریس هزینه‌انجام کار	هزینه خستگی
1	۳	3	2	$(6)^3$	2	$\begin{bmatrix} 1 & 0.95 & 0.8 \\ 0.95 & 1 & 0.45 \\ 0.8 & 0.45 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10 & 15 & 25 \\ 5 & 20 & 30 \end{bmatrix}$	[14 12]
2	5	3	2	$(6)^5$	2	$\begin{bmatrix} 1 & 0.6 & 0.4 \\ 0.6 & 1 & 0.9 \\ 0.4 & 0.9 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20 & 15 & 10 \\ 12 & 10 & 13 \end{bmatrix}$	[55 42]
3	5	3	2	$(6)^5$	3	$\begin{bmatrix} 1 & 0.6 & 0.4 \\ 0.6 & 1 & 0.9 \\ 0.4 & 0.9 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20 & 15 & 10 \\ 12 & 10 & 13 \end{bmatrix}$	[55 42]
4	5	5	3	$(150)^5$	2	$\begin{bmatrix} 1 & 0.7 & 0.8 & 0.2 & 0.95 \\ 0.7 & 1 & 0.9 & 0.6 & 0.85 \\ 0.8 & 0.9 & 1 & 0.5 & 0.6 \\ 0.2 & 0.6 & 0.5 & 1 & 0.7 \\ 0.95 & 0.85 & 0.6 & 0.7 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20 & 3 & 10 & 40 & 12 \\ 12 & 10 & 13 & 45 & 20 \\ 30 & 10 & 15 & 35 & 25 \end{bmatrix}$	[100 140
5	5	5	3	$(150)^5$	3	$\begin{bmatrix} 1 & 0.7 & 0.8 & 0.2 & 0.95 \\ 0.7 & 1 & 0.9 & 0.6 & 0.85 \\ 0.8 & 0.9 & 1 & 0.5 & 0.6 \\ 0.2 & 0.6 & 0.5 & 1 & 0.7 \\ 0.95 & 0.85 & 0.6 & 0.7 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20 & 3 & 10 & 40 & 12 \\ 12 & 10 & 13 & 45 & 20 \\ 30 & 10 & 15 & 35 & 25 \end{bmatrix}$	[100 140
6	3	6	4	$(1560)_3$	2	$\begin{bmatrix} 1 & 0.88 & 0.99 & 0.46 & 0.45 & 0.93 \\ 0.88 & 1 & 0.71 & 0.55 & 0.44 & 0.96 \\ 0.99 & 0.71 & 1 & 0.90 & 0.98 & 0.58 \\ 0.46 & 0.55 & 0.90 & 1 & 0.58 & 0.46 \\ 0.45 & 0.44 & 0.98 & 0.58 & 1 & 0.68 \\ 0.93 & 0.96 & 0.53 & 0.46 & 0.68 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 59 & 110 & 128 & 134 & 155 & 176 \\ 58 & 117 & 124 & 149 & 155 & 166 \\ 80 & 115 & 129 & 135 & 154 & 162 \\ 92 & 105 & 119 & 155 & 153 & 180 \end{bmatrix}$	[276 308 147 200]

شماره مسئله	ابعاد مسئله‌نمونه				داده‌های مسئله			
	K	J	I	اندازه	DOR	ماتریس شباهت کارها	ماتریس هزینه‌انجام کار	هزینه خستگی
7	3	6	3	$(570)^3$	2	$\begin{bmatrix} 1 & 0.88 & 0.99 & 0.46 & 0.45 & 0.93 \\ 0.88 & 1 & 0.71 & 0.55 & 0.44 & 0.96 \\ 0.99 & 0.71 & 1 & 0.90 & 0.98 & 0.58 \\ 0.46 & 0.55 & 0.90 & 1 & 0.58 & 0.46 \\ 0.45 & 0.44 & 0.98 & 0.58 & 1 & 0.68 \\ 0.93 & 0.96 & 0.53 & 0.46 & 0.68 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 59 & 110 & 128 & 134 & 155 & 176 \\ 58 & 117 & 124 & 149 & 155 & 166 \\ 80 & 115 & 129 & 135 & 154 & 162 \end{bmatrix}$	[276 368 229]
8	4	6	3	$(570)^4$	3	$\begin{bmatrix} 1 & 0.88 & 0.99 & 0.46 & 0.45 & 0.93 \\ 0.88 & 1 & 0.71 & 0.55 & 0.44 & 0.96 \\ 0.99 & 0.71 & 1 & 0.90 & 0.98 & 0.58 \\ 0.46 & 0.55 & 0.90 & 1 & 0.58 & 0.46 \\ 0.45 & 0.44 & 0.98 & 0.58 & 1 & 0.68 \\ 0.93 & 0.96 & 0.53 & 0.46 & 0.68 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 59 & 110 & 128 & 134 & 155 & 176 \\ 58 & 117 & 124 & 149 & 155 & 166 \\ 80 & 115 & 129 & 135 & 154 & 162 \end{bmatrix}$	[276 368 229]

جدول ۱: نتایج و زمان انجام محاسبات توسط نرم افزار لینگو را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج و زمان انجام محاسبات توسط نرم افزار لینگو برای مسائل نمونه

شماره مسئله	ابعاد مسئله نمونه				DOR	جواب و زمان محاسبه توسط Lingo	
	K	J	I	اندازه		Z	زمان
1	3	3	2	$(6)^3$	2	163.250	00:00:02
2	5	3	2	$(6)^5$	2	208.650	00:00:40
3	5	3	2	$(6)^5$	3	319.533	00:00:14
4	5	5	3	$(150)^5$	2	647.050	00:02:11
5	5	5	3	$(150)^5$	3	741.483	00:02:25
6	3	6	4	$(1560)^3$	2	2447.050	00:01:15

شماره مسئله	ابعاد مسئله نمونه				DOR	جواب و زمان محاسبه توسط Lingo	
	اندازه	I	J	K		Z	زمان
7	$(570)^3$	3	6	3	2	2763.250	00:34:31
8	$(570)^4$	3	6	4	3	4215.073	00:15:12

طراحی الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری

مسئله زمانبندی گردش شغلی که در این مقاله توسعه داده شده است، مدلی غیر خطی و عدد صحیح است که بنابر گزارش اسکینر و کرت (۲۰۰۸) و بهادری و رادویلسکی (۲۰۰۶) دارای پیچیدگی الگوریتمی[1] از نوع NP-Hard است و جزء مسایل بهینه‌سازی ترکیبیاتی[2] قلمداد می‌شود. لذا حل مدل حداقل در زمان محاسباتی معقول به کمک روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل برای دستیابی به جواب‌های نزدیک به بهینه که در زمان معقولی محاسبه شوند با طراحی دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و رقابت استعماری بر پیچیدگی الگوریتمی مسئله غلبه شده است. در ادامه نحوه طراحی این دو الگوریتم تشریح می‌شود.

طراحی الگوریتم‌هایی ژنتیک

الگوریتم ژنتیک جزء کلاس الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی قرار دارد. این الگوریتم به‌خصوص برای بهینه‌سازی مسایل پیچیده با فضای جستجوی ناشناخته مناسب است. این الگوریتم از تکامل ژنتیکی به عنوان الگوئی برای حل مسئله استفاده می‌کند (عالم تبریز و همکاران، ۱۳۷۸). نحوه عمل الگوریتم توسعه داده شده برای حل مسئله زمانبندی گردش شغلی در شبه کد شکل ۱ نشان داده شده است.

1- Algorithmic complexity
2- Combinatorial optimization problems (COPs)

ورودی: داده‌های مسئله زمانبندی گردش شغلی (ماتریس‌های شباهت کارها، هزینه انجام کار و خستگی و DOR) و پارامترهای الگوریتم ژنتیک (حجم جامعه، تعداد نسل، درصد تقاطع، درصد جهش و درصد تولید مجدد)

خروجی: بهترین برنامه زمانبندی

در متغیر t قرار دهید صفر

$P(t)$ را با استفاده از روش کددهی مبتنی بر کروموزوم تصادفی به وجود آورید.

$P(t)$ را با استفاده از روش کدگشایی مبتنی بر کروموزوم تصادفی ارزیابی نمائید.

تا زمانی که شرط پایان محقق نشده:

$C(t)$ را از $P(t)$ توسط عملگر تقاطع دو سطر- دو ستون ایجاد کنید.

$C(t)$ را از $P(t)$ توسط عملگر جهش تقارن قائم- افقی ایجاد کنید.

$C(t)$ را از $P(t)$ توسط عملگر تولید مجدد ایجاد کنید.

$C(t)$ را با استفاده از روش کدگشایی مبتنی بر کروموزوم تصادفی ارزیابی نمائید.

$P(t+1)$ را از $P(t)$ و $C(t)$ با استفاده از روش گزینش چرخه رولت به وجود آورید.

در متغیر t قرار دهید $t+1$

خروجی: بهترین برنامه زمانبندی گردش شغلی

شکل ۱. شبه کد الگوریتم ژنتیک مبتنی بر کلید تصادفی برای مسئله زمانبندی گردش شغلی

در این شکل $P(t)$ بیانگر والدین و $C(t)$ بیانگر فرزندان می‌باشد. روش‌ها یا استراتژی‌های مطرح در شبه کد بالا در دو دسته کلی قابل تقسیم‌بندی است: (۱) کددهی و کدگشائی کروموزوم‌های تصادفی (نمایش ژنتیکی) و (۲) عملگرهای ژنتیک. در ادامه به تشریح این روش‌ها پرداخته می‌شود.

نمایش ژنتیک[1]

هریک از اعضای فضای جواب در الگوریتم ژنتیک باید در ساختار یک کروموزوم تعریف شوند. این کار در شبه کد الگوریتم تحت عنوان روش کددهی ذکر شده که به وسیله آن هر عضو فضای جواب به یک کروموزوم تبدیل می‌شود. ساختار کروموزوم در مسئله زمانبندی گردش شغلی به صورت یک ماتریس $J \times K$ از اعداد ۱ تا I که به صورت تصادفی تولید شده‌اند، در نظر گرفته شده است. از آنجا که ممکن است تعداد تکرار هر یک از اعداد ۱ تا I در هر سطر ماتریس صفر باشد، باید موجه بودن هر کروموزوم قبل از ورود به دیگر مراحل الگوریتم بررسی شود. شکل ۲ یک کروموزوم تصادفی برای مسئله نمونه ۵ در جدول ۱ می‌باشد. استخراج مقادیر $J \times K \times I$ متغیر تصمیم از هر کروموزوم و محاسبه تابع هدف، که در الگوریتم ژنتیک برازندگی کروموزوم نامیده می‌شود، توسط روش کدگشایی انجام می‌شود. به عنوان مثال در مورد کروموزوم شکل ۲ $x^1_{12} = 0$ و $x^1_{15} = 1$.

روزها (در مسئله نمونه۵)	کارها(در مسئله نمونه۵)				
	کار ۱	کار ۲	کار ۳	کار ٤	کار ۵
روز ۱	۱	۳	۲	۲	۱
روز ۲	۲	۳	۱	۲	۳
روز ۳	۱	۱	۱	۲	۳
روز ٤	۱	۳	۳	۲	۱
روز ۵	۲	۲	۳	۳	۱

شماره اپراتورها

(در مسئله نمونه۵)

شکل ۲. یک کروموزوم تصادفی برای مسئله نمونه ۵

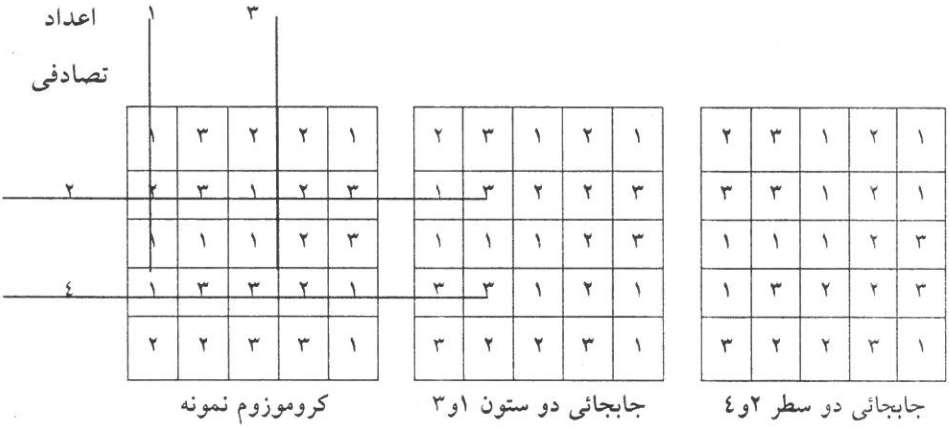
1- Genetic presentation

عملگرهای ژنتیک

در الگوریتم ژنتیک طراحی شده برای حل مسئله زمانبندی گردش شغلی، همانگونه که در شبه کد شکل ۱ اشاره شده است برای تولید نسل‌های بعدی جواب یا کروموزوم‌ها، عملگر تقاطع دو سطر ـ دو ستون، عملگر جهش تقارن قائم- افقی و عملگر تولید مجدد مورد استفاده قرار گرفته است. در ضمن در این الگوریتم دو عملگر تقاطع و جهش در هر بار اجرا تنها روی یک کروموزوم از نسل جاری عمل می‌نمایند، بدین معنی که از تقاطع دو والد یک فرزند ایجاد نمی‌شود بلکه تقاطع صرفاً روی یک کروموزوم انجام می‌شود. در ادامه نحوه عملکرد این عملگرها تشریح خواهد شد.

عملگر تقاطع دو سطر ـ دو ستون

این عملگر در هر نسل کروموزومی را به تصادف با استفاده از چرخ رولت انتخاب و سپس با تولید ۲ عدد تصادفی بین ۱تا J دو ستون کروموزوم را جابجا می‌کند. سپس با تولید ۲ عدد تصادفی بین ۱تا K به همین ترتیب در مورد دو سطر کروموزوم عمل می‌نماید. شکل ۳ تولید فرزند از کروموزوم نمونه در شکل ۲ توسط این عملگر را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تولید فرزند از کروموزوم نمونه شکل ۲ توسط عملگر تقاطع دو سطر ـ دو ستون

عملگر جهش قائم ـ افقی

این عملگر در هر نسل کروموزومی را به تصادف انتخاب و ابتدا کروموزوم را نسبت به محور قائم و سپس نسبت به محور افقی تقارن می‌دهد. شکل ۴ تولید فرزند از کروموزوم نمونه در شکل ۲ توسط این عملگر را نشان می‌دهد.

۲	۲	۳	۳	۱
۱	۳	۳	۲	۱
۱	۱	۱	۲	۳
۲	۳	۱	۲	۳
۱	۳	۲	۲	۱

تقارن نسبت به محور افقی

۱	۳	۲	۲	۱
۲	۳	۱	۲	۳
۱	۱	۱	۲	۳
۱	۳	۳	۲	۱
۲	۲	۳	۳	۱

تقارن نسبت به محور قائم

۱	۲	۲	۳	۱
۳	۲	۱	۳	۲
۳	۲	۱	۱	۱
۱	۲	۳	۳	۱
۱	۳	۳	۲	۲

کروموزوم نمونه

شکل ٤. تولید فرزند از کروموزوم نمونه در شکل ۲ توسط عملگر جهش قائم ـ افقی

عملگر تولید مجدد

درصدی از بهترین‌های جمعیت هر نسل بر اساس میزان برازندگی به نسل بعدی منتقل می‌شوند. این عملگر مخاطره از دست رفتن کروموزوم‌های مناسب در اثر تقاطع و یا جهش را از میان می‌برد.

طراحی الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی است که از تکامل اجتماعی انسان ملهم شده است. این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه شروع می‌شود. در این الگوریتم هر عنصر جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره[1] و استعمارگر[2] تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر بسته به

1- Colony
2- Imperialist

قدرت خود تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آنها را کنترل می‌کند سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. سیاست جذب به نزدیک کردن هرچه بیشتر مستعمرات یک امپراطوری به آن مطابق یک رابطه خاص صورت می‌پذیرد. اگر در حین حرکت، یک مستعمره نسبت به استعمارگر به موقعیت بهتری برسد، جای آن دو با هم عوض می‌شود. در ضمن، قدرت کل یک امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت میانگین مستعمرات آن تعریف می‌شود. در طی رقابت استعماری، امپراطوری‌های ضعیف به تدریج قدرت خود را از دست داده و به مرور زمان با تضعیف شدن از بین می‌روند. رقابت استعماری باعث می‌شود به مرور زمان به حالتی رسید که در آن تنها یک امپراطوری در دنیا وجود دارد که آن را اداره می‌کند. این حالت زمانی است که الگوریتم رقابت استعماری با رسیدن به نقطه بهینه محلی تابع هدف متوقف می‌شود (آتش پز، گرگری و لوکس[1] ۲۰۰۷). شکل (۵) شبه کد الگوریتم رقابت استعماری توسعه داده شده جهت حل مسئله‌ی زمانبندی گردش شغلی را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی سیاست جذب[2] در الگوریتم رقابت استعماری

سیاست جذب یا همسان‌سازی در درون هر امپراطوری انجام می‌شود و طبق آن کشورهای مستعمره به سمت کشور استعمارگر حرکت و شباهت بیشتری با آن پیدا می‌کنند. در الگوریتم رقابت استعماری توسعه داده شده برای حل مسئله زمانبندی گردش شغلی، سیاست جذب در دو مرحله و به شرح شکل ۶ عمل می‌نماید. لازم به ذکر است که جمعیت اولیه جواب‌ها به‌صورت تصادفی و عیناً مشابه الگوریتم ژنتیک تولید می‌شود.

1- Atashpaz-Gargari and Lucas
2- Assimilation policy

شکل ۵. شبه کد الگوریتم رقابت استعماری توسعه داده شده جهت حل مسئله زمانبندی گردش شغلی

ورودی: داده‌های مسئله زمانبندی گردش شغلی (ماتریس‌های شباهت کارها، هزینه انجام کار و خستگی و DOR) و پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری (تعداد کشورها، تعداد امپراطوری‌های اولیه، درصد انحراف حین جذب پیش از تشکیل امپراطوری واحد، درصد انحراف حین جذب پس از تشکیل امپراطوری واحد)

خروجی: بهترین برنامه زمانبندی

ایجاد جمعیت اولیه

تشکیل امپراطوری‌های اولیه

تا زمان تشکیل یک امپراطوری واحد:

انجام سیاست جذب در هر امپراطوری

انجام رقابت استعماری

تا زمانی که شرط پایان محقق نشده:

انجام سیاست جذب در امپراطوری واحد

خروجی: بهترین برنامه زمانبندی گردش شغلی

شکل ٦. سیاست جذب برای الگوریتم رقابت استعماری

ورودی: جمعیت اولیه و مستعمرات در تکرارهای الگوریتم و پارامترهای سیاست جذب برای الگوریتم رقابت استعماری (درصد انحراف حین جذب پیش از تشکیل امپراطوری واحد، درصد انحراف حین جذب پس از تشکیل امپراطوری واحد)

خروجی: مستعمرات همسان شده با استعمارگر

درصد از پیش تعیین شده‌ای از جواب‌ها (به عنوان مستعمرات) بطور تصادفی برگزیده می‌شود.

بطور تصادفی اعدادی از سطرهای ماتریس مستعمره برابر با سطرهای متناظر در ماتریس استعمارگر قرار داده می‌شود

شروع انحراف در جذب

درصد از پیش تعیین شده‌ای از مستعمرات جذب شده بطور تصادفی برگزیده می‌شود.

بطور تصادفی یکی از دو انحراف زیر در آن اعمال می شود:

ماتریس مستعمره جذب شده کاملاً نسبت به محور قائم خود تقارن داده می‌شود

یک سطر ماتریس مستعمره جذب شده با سطری کاملاً تصادفی ایجاد شده تعویض و جای دو ستون آن نیز جابجا می‌شود

پایان انحراف در جذب

خروجی: مستعمرات همسان شده با استعمارگر

الگوریتم رقابت استعماری می‌تواند تا یکسان شدن تمامی جواب‌ها در امپراطوری واحد ادامه یابد. با این حال برای انجام مقایسه دقیق‌تر با الگوریتم ژنتیک زمان توقف آن با زمان اتمام عملیات الگوریتم ژنتیک برابر قرار داده شده است.

جداول ۳ و ۴ محدوده پارامترهای دو الگوریتم را که برای تنظیم استفاده شده است، نشان می‌دهد. برای تنظیم پارامترها برای هر دو الگوریتم، ابتدا سطح فاکتورهای ردیف اول را ثابت نگه‌داشته و آزمایشات متنوعی با سطوح مختلف پارامترهای دیگر انجام می‌شود. سطحی از این فاکتور که بهترین جواب‌ها را به دست دهد تثبیت و در تعیین سطوح بهینه پارامترهای دیگر به روش مشابه آنچه ذکر شد بکار می‌رود.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

شماره	پارامتر	تعداد سطوح	سطوح	سطح بهینه
۱	(حجم هر نسل، تعداد نسل‌ها)	4	(120,1000)-(220,800)-(320,500)-(420,400)	(320,500)
۲	درصد تقاطع	4	0.55-0.60-0.63-0.66	0.63
۳	درصد جهش	4	0.10-0.15-0.20-0.25	0.25

جدول ٤. پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری

شماره	پارامتر	تعداد سطوح	سطوح	سطح بهینه
۱	تعدادکشورها	4	200-250-300-350	320
۲	تعداد امپراطوری‌های اولیه	3	4-5-6	5
۳	درصد انحراف در جذب قبل از تشکیل امپراطوری واحد	3	0.0008-0.0010-0.0015	0.0015
٤	درصد انحراف در جذب پس از تشکیل امپراطوری واحد	3	0.04-0.07-0.10	0.07

نتایج محاسبات

در این بخش از مقاله ابتدا نتایج حل مسایل نمونه ۸ گانه که مشخصات آنها در جدول ۱ آورده شده است، با الگوریتم‌های توسعه داده شده ارائه و مقایسه بین نتایج دو الگوریتم و نرم افزار لینگو صورت خواهد گرفت. سپس چند مورد از نمودارهای همگرایی دو الگوریتم برای مسایل نمونه و مسایل در ابعاد بزرگتر برای مقایسه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتهای بخش مقایسه آماری بین نتایج دو الگوریتم برای ۳۰ مشاهده از محاسبات انجام می‌شود.

حل مسایل نمونه با الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری

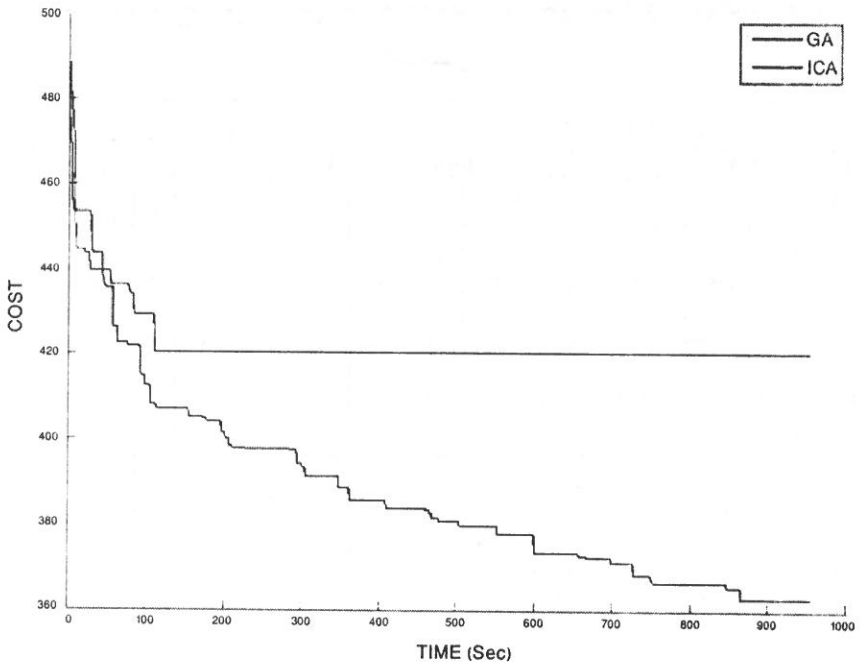
جدول ۵ نتایج حل مسایل نمونه جدول ۱ با الگوریتم‌های توسعه داده شده را به جدول ۲ اضافه نموده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در مورد تمامی مسایل از نظر کیفیت جواب‌ها رابطه زیر برقرار است:

$$ICA \geq GA > LINGO\ 11.0$$

جدول ۵. نتایج حل مسایل نمونه جدول ۱ با الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری

شماره مسئله	ابعاد مسئله‌ی نمونه				DOR	جواب و زمان حل				
						Lingo		ICA	GA	GA/ICA
	K	J	I	اندازه		Z	زمان	Z	Z	زمان
1	3	3	2	$(6)^3$	2	163.250	00:00:02	144.425	144.425	00:03:07
2	5	3	2	$(6)^5$	2	208.650	00:00:40	181.150	186.150	00:04:37
3	5	3	2	$(6)^5$	3	319.533	00:00:14	218.214	222.467	00:04:45
4	5	5	3	$(150)^5$	2	647.050	00:02:11	612.351	635.112	00:04:53
5	5	5	3	$(150)^5$	3	741.483	00:02:25	708.469	683.688	00:05:06
6	3	6	4	$(1560)^3$	2	2447.050	00:01:15	2225.000	2250.000	00:05:39
7	3	6	3	$(570)^3$	2	2763.250	00:34:31	2352.2	2381.7	00:5:20
8	4	6	3	$(570)^4$	3	4215.073	00:15:12	3844.700	3863.400	00:06:29

یک نمونه از نمودارهای همگرائی به جواب بهینه در ارتباط با مساله نمونه ۹ با ابعاد ۱۰ روز ، ۱۰ کار و ۶ اپراتور و $DOR = 5$ در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ٦. نمودار همگرایی دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری برای مسئله نمونه شماره ۹

آزمون آماری برای مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری

در مورد ۳۰ زوج داده که از تکرار انجام مسئله نمونه ۹ به دست آمد، فرضیه برابری میانگین دو الگوریتم در برابر فرضیه مقابل بزرگتر بودن میانگین الگوریتم ژنتیک از میانگین الگوریتم رقابت استعماری به صورت زیر مورد آزمون قرار گرفت.

$$\begin{cases} \mu_{GA} = \mu_{ICA} \\ \mu_{GA} > \mu_{ICA} \end{cases}$$

با انجام این آزمون در محیط نرم افزار MINITAB 15، آماره آزمون t برابر ۱۶/۷۳، حاسبه و با توجه به اینکه $P-value$ برابر ۰,۰۰۰۰ به دست آمد، فرضیه صف در سطح معنی‌داری ۰,۰۰۰۱ به نفع فرضیه دوم رد می‌شود. رد قاطع این فرضیه، بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده برای مسئله زمانبندی گردش شغلی می‌باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی

در این مقاله با توسعه مفهوم خستگی ناشی از کارهای یکسان به دو نوع خستگی مثبت (مطلوب) و منفی (نامطلوب) ناشی از انجام کارهای مشابه و نه صرفاً یکسان، مدل جدید و منعطفی ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان در شیوه زمانبندی کارهای تخصیص داده شده به هر اپراتور طی دوره‌های برنامه‌ریزی (که مسئله زمانبندی گردش شغلی نامیده می‌شود) نسبت به مدل‌های دیگر تحول ایجاد کرد. همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری کارائی برای غلبه بر پیچیدگی الگوریتمی مسئله زمانبندی گردش شغلی پیشنهاد شد و کیفیت الگوریتم رقابت استعماری در این مسئله تائید شد که می‌تواند محققین دیگر را در بکارگیری این الگوریتم، دست‌کم برای حل مدل‌های تخصیص چند دوره‌ای که کاربردهای متنوعی دارد، ترغیب نماید. از آنجا که مدل پیشنهادی مفاهیم جدید و منعطفی برای طراحی مسئله زمانبندی گردش شغلی ایجاد می‌کند، باز تعریف و تعمیق مفهوم شباهت دو کار، هزینه‌های ناشی از خستگی و غیره می‌تواند موارد کاربرد بیشتر و واقعی‌تری به مدل بیافزاید. همچنین از جمله محدودیت‌های مدل توسعه داده شده در این مقاله، در نظر نداشتن اهداف غیر هزینه‌ای همچون تسطیح بار کارهای اختصاص داده شده به اپراتورها است که توسعه مدل به مدلی چند هدفه را ایجاب می‌نماید. آزاد سازی فرض عدم وجود محدودیت زمانی و لحاظ کردن ثاثیر خستگی‌ها یا یادگیری بر زمان انجام کار توسط هر اپراتور از دیگر زمینه‌های توسعه این مدل می‌باشد. با توجه به اینکه محققین دیگر نتایج قابل قبولی از کارایی شبیه‌سازی تبرید و کلونی مورچگان در مورد مسئله زمانبندی گردش شغلی گزارش کرده‌اند، توسعه این الگوریتم‌ها برای مدل ارائه شده در این مقاله و مقایسه کارائی آنها با دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری می‌تواند زمینه تحقیق دیگری باشد.

منابع و ماخذ

عالم تبریز، اکبر، مصطفی زندیه، علیرضا محمد رحیمی، (۱۳۷۸)، *الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه سازی ترکیبی*، چاپ اول، تهران: انتشارات صفار ـ اشراقی.

Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C., (2007), Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimisation inspired by imperialistic competition. ***IEEE Congress on Evolutionary Computation*** (CEC 2007), 4661–4667.

Bhadury, J., Rdovilsky, Z., (2006), Job Rotation Using The Multi-period Assignment Model, ***International Journal of Production Research*** 44 (20): 4431-4444.

Burke, L., Moore, J.E., (2000), The Reverberating Effects of Job Rotation: A Theoretical Exploration of Nonrotaters' Fairness Perceptions, ***Human Resource Management Review*** 10 (2): 127-152.

Carnahan, B.J., Redfern, M.S., Norman, B., (2000), Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search, ***Ergonomics*** 43 (4): 543–560.

Paul, P., Kuijer, F.M., Bart, K., (1999), Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department, ***Ergonomics*** 42 (9): 1167–1178.

Sekiner, S.U., Kurt, M., (2007), A Simulated Annealing Approach To The Solution of Job Rotation Scheduling Problems, ***Applied Mathematics and Computation*** 188: 31-45.

Sekiner, S.U., Kurt, M., (2008), Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem, ***Applied Mathematics and Computation*** 201: 149–160.