

## ارائه راهکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چند معیاره برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود

آرمین منیرعباسی<sup>۱</sup>، باقر دستیار\*<sup>۲</sup>، مجتبی حکمیان<sup>۳</sup>، محمد مهدی قیصر<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، کرج

<sup>۳</sup> کارشناس مدیریت پروژه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران شمال

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، کرج

**چکیده** - زمان‌بندی پروژه یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه‌ی مدیریت پروژه محسوب می‌شود. این مسئله شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌ها، منابع، محدودیت‌ها و معیارهایی برای ارزیابی کارایی می‌باشد. در این مسئله باید ترتیب فعالیت‌ها و تخصیص منابع به آن‌ها به گونه‌ای دقیق با هم هماهنگ شوند که عملکرد سیستمی که با استفاده از یک یا چند معیار مشخص می‌شود، بهینه گردد. در این مقاله، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع از طریق ایجاد مدلی چند معیاره با در نظر گرفتن اهداف مهمی مانند زمان، هزینه و کیفیت حل شده است. در این روش پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک چند معیاره، جهت تولید راه‌حل‌های مناسب برای مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود استفاده شده است. شبیه‌سازی روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های پیشین نشان داد که روش پیشنهادی دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** مدیریت پروژه، زمان‌بندی پروژه، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چند معیاره.

### ۱- مقدمه

پروژه‌ها از عوامل مؤثر توسعه و رشد اقتصادی - اجتماعی کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه می‌باشند و در بخش خصوصی، ابزاری اساسی برای تأمین سودآوری به شمار می‌روند. امروزه استفاده از مدیریت پروژه در تحقق اهداف بسیاری از سازمان‌ها رو به افزایش است و مدیریت پروژه برای

\*۲ باقر دستیار Email: Bagher.Dastyar@gmail.com

رسیدن به نتایج ویژه با به کارگیری منابع محدود و در شرایط وجود محدودیت حساس زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمان‌بندی پروژه به صورت مبنایی برای نظارت و کنترل بر فعالیت‌های پروژه به کار می‌رود و ابزار عمده‌ای برای مدیریت پروژه‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر زمان‌بندی پروژه توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. دلیل این توجه، اهمیت ویژه فرایند طراحی محصول جدید، توسعه تولیدات تازه، راه‌اندازی تجهیزات جدید و اجرای سیستم‌های اطلاعاتی تازه می‌باشد.

مسئله زمان‌بندی پروژه<sup>۱</sup> از دیدگاه علمی و نظری دارای اهمیت قابل توجه می‌باشد. از دیدگاه علمی با بهبود زمان‌بندی پروژه به عنوان بخشی از فرایند مدیریت پروژه، می‌توان هزینه‌های مربوطه را به میزان زیادی کاهش داد. از جنبه نظری نیز این مسئله یک زمینه جذاب برای متخصصین تحقیق در عملیات و رشته‌های وابسته می‌باشد، زیرا بسیاری از مدل‌های معروف بهینه‌سازی حالت‌های خاصی از مدل‌های مطرح در زمان‌بندی پروژه می‌باشند (کولیناس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). در حقیقت، مسائل زمان-بندی پروژه یکی از مهم‌ترین مسائلی هستند که طرف‌های شرکت‌کننده ذینفعان پروژه، در مدیریت پروژه به آن می‌پردازند، بخصوص زمانی که آن‌ها نیاز به رسیدن به کارآمدترین کاربرد منابع را بدون افزایش زمان اتمام از پیش تعیین شده پروژه دارند.

در هر پروژه تعدادی فعالیت وابسته به هم وجود دارند. اجرای هر یک از این فعالیت‌ها نیازمند منابع متفاوتی است که بعضاً محدود می‌باشند. هر فعالیت پروژه می‌تواند در چندین حالت مختلف اجرا شود که اجرای هر حالت مستلزم زمان و به کارگیری منابع معین است. مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود<sup>۳</sup> یک مسئله NP است و برای نخستین بار در سال ۱۹۶۳ مطرح شد (ویست<sup>۴</sup>، ۱۹۶۳). هدف اصلی در مسئله برنامه‌ریزی پروژه با منابع محدود تعیین زمان شروع و حالت اجرای هر فعالیت به گونه‌ای است که زمان اجرای پروژه را کمینه کند. این مسئله "یکی از پیچیده‌ترین مسائل تحقیق در عملیات است که در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در تدوین روش‌های حل دقیق و ابتکاری آن به وجود آمده و اخیراً روش‌های جدید بهینه‌سازی در حل آن به کار گرفته شده‌اند"

1. Project Scheduling Problem (PSP)
2. Koulinas et al, 2014
3. Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)
4. Wiest, 1963

(موهرینگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). در این مسئله، پروژه به کمک روش‌هایی مانند روش شکست کار به تعدادی فعالیت تجزیه می‌شود. این فعالیت‌ها به لحاظ روابط منطقی متفاوتی که حاکم بر آن‌هاست با یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند. رابطه‌های منطقی و بلافصل بین هر دو فعالیت به کمک یک یا چند رابطه کنترل‌کننده مانند رابطه پایان به شروع، رابطه شروع به شروع، رابطه پایان به پایان، و رابطه شروع به پایان تبیین می‌شوند. البته در پروژه‌های پیچیده‌تر امکان تعریف رابطه‌های کنترل‌کننده بیشتری مانند اجرای موازی بین دو فعالیت وجود دارد (کلنبریک و هلبر<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵). این مسئله یکی از مسائل تحقیق در عملیات است که در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در تدوین روش‌های حل دقیق و ابتکاری آن به وجود آمده و اخیراً روش‌های جدید بهینه‌سازی در حل آن به کار گرفته شده‌اند (ژنگ و وانگ<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵). مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در واقع کلی‌ترین مسئله زمان‌بندی است که مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی، جریان کارگاهی، زمان‌بندی و ... همگی زیر مجموعه این مسئله به حساب می‌آیند (جدرزویچ و روپل<sup>۴</sup>، ۲۰۱۴).

محققان در دهه‌های اخیر ابزارها و تکنیک‌های زیادی را برای زمان‌بندی پروژه معرفی کرده‌اند، اما بیشتر به مسئله زمان‌بندی پروژه‌های تک معیاره پرداخته‌اند. با وجود اینکه مسئله زمان‌بندی پروژه ذاتاً مسئله‌ای چند معیاره می‌باشد، اغلب اوقات روش‌های ارائه شده تنها برای کمینه ساختن زمان اجرا پروژه به کار رفته‌اند. به منظور حل این مشکل در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع از طریق ایجاد مدلی چند معیاره با در نظر گرفتن اهداف مهمی از قبیل کمینه کردن زمان اتمام پروژه و بیشینه کردن شانس انجام پروژه و کمینه کردن هزینه کل پروژه که از مهم‌ترین اهداف در دنیای واقعی است و همواره مدیران پروژه در جستجوی بهترین نقطه در این مثلث مدیریت پروژه (زمان - هزینه - شانس موفقیت) می‌باشند، در نظر گرفته شده است. با توجه به چند معیاره بودن و پیچیدگی محاسباتی مدل به دست آمده، از یک الگوریتم تکاملی با نام الگوریتم ژنتیک چند معیاره برای حل مدل مسئله استفاده شده است.

1. Mohring et al, 2003
2. Kellenbrink and Helber, 2015
3. Zheng and Wang, 2015
4. Jędrzejowicz and Ratajczak-Ropel, 2014

در ادامه این مقاله در بخش دوم به مرور روش‌های پیش‌تر ارائه شده برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پرداخته می‌شود، در بخش سوم به بیان مفاهیم اصلی الگوریتم ژنتیک چند معیاره پرداخته می‌شود، در بخش چهارم روش پیشنهادی معرفی می‌شود، در بخش پنجم، به بحث و بررسی آزمایش‌ها و نتایج پرداخته می‌شود و در نهایت بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

## ۲- پیشینه پژوهش

تحقیقاتی که در گذشته بر روی مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود صورت گرفته که به سه دسته قابل تقسیم هستند:

(۱) زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع.

(۲) مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و در نظرگیری هزینه‌های زودکرد و دیرکرد.

(۳) زمان‌بندی پروژه با در نظرگیری مفهوم حجم کار.

مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پیشینه‌ای بیش از ۴۰ سال دارد. برای حل این مسئله دو رویکرد بهینه و ابتکاری وجود دارند. حل مصادیق واقعی این مسئله به دلیل پیچیدگی، گستردگی و دشواری با رویکردهای بهینه نظیر برنامه‌ریزی ریاضی، برنامه‌ریزی پویا و یا شاخه و کران غیرعملی است (بورکر و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸). البته در ادبیات موضوع کاربرد رویکردهای بهینه در حل مصادیق کوچک‌تر این مسئله نیز گزارش شده است. به عنوان نمونه، می‌توان در خصوص برنامه‌ریزی ریاضی (دکرو و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۱)، به روش‌های شمارشی مثل برنامه‌ریزی پویا (ایسملی و روم<sup>۳</sup>، ۱۹۹۶) و در خصوص روش‌های شاخه و کران ارجاع داده شود (دمولمستر و هرولن<sup>۴</sup>، ۱۹۹۷). به دلیل ناکارآمد بودن رویکردهای بهینه، اکثر مسائل واقعی زمان‌بندی پروژه با رویکردهای ابتکاری حل می‌شوند.

- 
1. Brucker et al, 1998
  2. Deckro et al, 1991
  3. Icmeli and Rom, 1996
  4. Demeulemeester and Herroelen, 1997

بسیاری از رویکردهای ابتکاری حل مسئله برنامه‌ریزی پروژه با منابع محدود در سال ۲۰۰۶ میلادی مورد بررسی قرار گرفتند (کولیش و هارتمن<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶). آن‌ها این رویکردها را در چهار گروه تقسیم‌بندی کردند:

- ۱) رویکردهای مبتنی بر قواعد اولویت‌بندی مانند روش نمونه‌گیری تصادفی.
- ۲) رویکردهای مبتنی بر روش‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جستجوی ممنوع، الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی، الگوریتم مورچه‌ها.
- ۳) رویکردهای مبتنی بر روش‌های ابتکاری غیرمتعارف مانند روش‌های مبتنی بر جستجوی محلی، روش‌های تکاملی و مبتنی بر جمعیتی از جواب مثل الگوریتم جستجوی پراکنده.
- ۴) رویکردهای مبتنی بر سایر روش‌های ابتکاری مانند بهسازی پیشرو پسرو و روش‌های تجزیه شبکه.

### ۳- الگوریتم ژنتیک چند معیاره

مسائل بهینه‌سازی از نظر تعداد توابع هدف و معیارهای بهینه‌سازی، به دو دسته تقسیم‌پذیر هستند:

- ۱) مسائل بهینه‌سازی تک معیاره.
  - ۲) مسائل بهینه‌سازی چند معیاره.
- در مسائل بهینه‌سازی تک معیاره، هدف از حل مسئله، بهبود یک شاخص عملکرد یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه آن، کیفیت پاسخ به دست آمده را به طور کامل منعکس می‌کند. اما در برخی موارد، نمی‌توان صرفاً با اتکا به یک شاخص، یک پاسخ فرضی برای مسئله بهینه‌سازی را امتیازدهی نمود. در این نوع مسائل، ناگزیر چندین تابع هدف یا شاخص عملکرد تعریف می‌شود و به طور همزمان، مقدار همه آن‌ها بهینه می‌گردد. بهینه‌سازی چند معیاره، یکی از زمینه‌های بسیار فعال و پرکاربرد تحقیقاتی در میان مباحث بهینه‌سازی است. روش‌های فراوانی تاکنون برای حل بهینه‌سازی چند معیاره، ارائه شده‌اند که در حالت کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم نمود:
- ۱) روش‌های کلاسیک: که اغلب مسئله چند معیاره را به یک مسئله تک معیاره تقلیل می‌دهند.

1. Kolisch and Hartmann, 2006

۲) روش‌های تکاملی: که اغلب مسئله بهینه‌سازی چند معیاره را واقعا به صورت چند معیاره حل می‌نمایند.

در میان این دو دسته، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند (الگوریتم‌های تکاملی) جایگاه ویژه‌ای دارند؛ زیرا اغلب، برخلاف روش‌های کلاسیک در ریاضیات کاربردی، مسائل بهینه‌سازی چند معیاره را به همان شکل که هستند، مورد حل قرار می‌دهند و از تبدیلات هندسی و مشابه آن استفاده نمی‌کنند. یکی از روش‌های تکاملی که برای حل مسائل بهینه‌سازی چند معیاره مورد استفاده قرار گرفته است، الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین است و براساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی استوار است. یک کاربرد متداول الگوریتم ژنتیک، استفاده از آن به عنوان تابع بهینه کننده است. اگرچه کارهایی توسط یک زیست‌شناس به نام فراشر در زمینه مدل‌سازی تکامل در سیستم‌های بیولوژیک در دهه ۶۰ میلادی صورت گرفت ولی الگوریتم ژنتیک برای کاربردهای مهندسی و به صورت امروزی آن نخستین بار توسط جان هلند متخصص علوم کامپیوتر دانشگاه میشیگان پیشنهاد گردید (هلند<sup>۱</sup>، ۱۹۹۲). کار وی آغاز تمامی کوشش‌ها برای کاربرد الگوریتم ژنتیک در مهندسی است.

الگوریتم ژنتیک چند معیاره با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۲</sup> یکی از الگوریتم‌های شاخص و پرکاربرد در زمینه بهینه‌سازی چند معیاره است. پس از ارائه نسخه اول این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ (سرنیواس و دب<sup>۳</sup>، ۱۹۹۵)، معرفی کنندگان این الگوریتم، نسخه دوم آن را در سال ۲۰۰۲ با نام اختصاری NSGA-II ارائه نمودند (دب و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۲). این الگوریتم یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چند معیاره است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. ویژگی‌های عمده این الگوریتم عبارت‌اند از:

- تعریف فاصله تراکمی به عنوان ویژگی جایگزین برای شیوه‌هایی مانند اشتراک برزندگی.
- استفاده از عملگر انتخاب تورنمنت دو-دویی.

---

1. Holland, 1992  
 2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm  
 3. Srinivas and Deb, 1995  
 4. Deb et al, 2002

- ذخیره و آرشو کردن جواب‌های نامغلوب که در مراحل قبلی الگوریتم به دست آمده‌اند (نخبه‌گرایی).

در الگوریتم NSGA-II از میان جواب‌های هر نسل، تعدادی از آن‌ها با استفاده از روش انتخاب تورنمنت دودویی انتخاب می‌شوند. معیارهای انتخاب در الگوریتم NSGA-II در درجه اول، رتبه جواب و در درجه دوم فاصله تراکمی مربوط به جواب است. هر چه قدر رتبه جواب کمتر باشد و دارای فاصله تراکمی بیشتری باشد، مطلوب‌تر است. با تکرار عملگر انتخاب دودویی بر روی جمعیت هر نسل، مجموعه‌ای از افراد آن نسل برای شرکت در تبادل و جهش انتخاب می‌شوند. بر روی بخشی از مجموعه افراد انتخاب شده، عمل تبادل و بر روی بقیه، عمل جهش انجام می‌شود و جمعیتی از فرزندان و جهش‌یافتگان ایجاد می‌شود. در ادامه، این جمعیت با جمعیت اصلی ادغام می‌شود. اعضای جمعیت تازه تشکیل یافته، ابتدا برحسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شوند. اعضای از جمعیت که دارای رتبه یکسانی هستند، برحسب فاصله تراکمی و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. حال اعضای جمعیت در درجه اول برحسب رتبه، و در درجه دوم برحسب فاصله تراکمی مرتب سازی شده‌اند. برابر با تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضای از بالای فهرست مرتب شده انتخاب می‌شوند و بقیه اعضای جمعیت دور ریخته می‌شوند. اعضای انتخاب شده جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند و چرخه مذکور در این بخش، تا محقق شدن شرایط خاتمه، تکرار می‌شود. جواب‌های نامغلوب به دست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی چند معیاره، غالباً به نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند. هیچ کدام از جواب‌های جبهه پارتو، بر دیگری ارجحیت ندارند و بسته به شرایط، می‌توان هر کدام را به عنوان یک تصمیم بهینه در نظر گرفت.

#### ۴- روش پژوهش: الگوریتم ژنتیک چند معیاره برای حل مسئله RCSP

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در دهه اخیر روش‌های زیادی برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود ارائه شده است. در اکثر روش‌های پیشین مسئله زمان‌بندی پروژه به عنوان یک مسئله زمان‌بندی تک معیاره در نظر گرفته شده است و هدف اصلی در این روش کاهش زمان انجام پروژه است. این در حالی است که مسئله زمان‌بندی پروژه ذاتاً یک مسئله چند معیاره است. اگر مسئله زمان‌بندی پروژه

با منابع محدود به عنوان یک مسئله چند معیاره در نظر گرفته شود، می‌توان آن را به عنوان بهینه سازی سه هدف زیر در نظر گرفت:

(۱) کمینه سازی زمان کل پروژه.

(۲) کمینه سازی هزینه کل پروژه.

(۳) بیشینه سازی شانس موفقیت پروژه.

این سه هدف به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) نشان داده شده‌اند:

$$\text{Minimize } C_{max} = \text{Max} \sum_{i=1}^N l_i \quad (1)$$

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{j=1}^K c_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$\text{Maximize } 1/N \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{j=1}^K P_{ij} x_{ijm}}{\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{j=1}^K q_{ijm}} \right) \quad (3)$$

محدودیت‌های این مسئله به صورت روابط زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{j=1}^K x_{ijm} q_{ijm} \leq R_j, \quad j = 1, \dots, k \quad (4)$$

$$S_j \geq \text{Max}_{p \in PR_i} \left( S_p \left( \sum_{m=1}^{m_p} \left( \frac{\sum_{j=1}^k x_{pjm}}{|m|} \right) d_{pm} \right) \right), \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} 1/|m| \sum_{j=1}^k x_{ijm} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$x_{ijm} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, N, \quad m = 1, \dots, M_i, \quad j = 1, \dots, k. \quad (7)$$

که در اینجا  $N$  تعداد وظایف را نشان می‌دهد. همچنین در این روابط محدودیت منابع که با استفاده از رابطه (۴) نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که برای هر وظیفه  $i$  که از منبع  $k$  استفاده می‌کند نباید مقدار استفاده از این منبع از  $R_k$  فراتر برود. رابطه (۵) بیان می‌کند که وظیفه  $i$  زمانی شروع خواهد شد که تمام وظایف پیش از آن تمام شده باشند. رابطه (۶) تضمین می‌کند که هر وظیفه فقط



به یک ترکیب از منابع نیاز دارد. همچنین رابطه (۷) متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. در این حالت اگر منبع  $j$  به این وظیفه  $i$  کمک کند  $x_{ij} = 1$  و در غیر این صورت  $x_{ij} = 0$  خواهد بود. در روش پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک NSGA-II مجموعه‌ای از راه‌حل‌های ممکن تولید می‌کند. هر یک از این راه‌حل‌ها با استفاده از تابع برازندگی که براساس سه هدف بیان شده تنظیم شده است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. آنگاه تعدادی از بهترین حل‌ها، باعث تولید راه‌حل‌های جدیدی می‌شوند که این کار باعث تکامل جواب‌های حل مسئله می‌شود. در هر مرحله تعدادی از اعضای جمعیت قبل به همان صورت برای نسل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند و برخی با استفاده از عملگرهای ژنتیکی نظیر تبادل و جهش برای تولید فرزندان به کار می‌روند.

جهت ایجاد کروموزوم، ابتدا دو جزء ۱- پروفایل حجم کار. ۲- لیست توالی فعالیت‌ها تشکیل می‌شود. بخش اول مربوط به پروفایل حجم کار، یک ماتریس دارای  $n$  سطر و  $m$  ستون است که سطرها بیانگر فعالیت‌ها و ستون‌ها بیانگر زمان می‌باشد. درایه  $ij$  این ماتریس بیانگر مقدار حجم کاری تخصیص داده شده به فعالیت  $i$  در روز  $j$  ام اجرای آن است. تولید پروفایل حجم کار به اینگونه است که می‌بایست مجموع سطر  $i$  ام پروفایل برابر حجم کار مشخص شده فعالیت  $i$  ام شود و هر درایه سطر  $i$  ام پروفایل عضو  $Z_{\geq 0}$  و بین حد بالا و پایین استفاده از منبع حجم کار آن باشد. بخش دوم لیست توالی فعالیت‌ها است که بیانگر ترتیب فعالیت‌ها در تولید کروموزوم مربوطه است. این لیست می‌بایست به نحوی تهیه شود که پیش‌نیازهای هر فعالیت درایه‌های قبلی قرار گیرند. با در نظرگیری دو بخش یاد شده هر کروموزوم از طریق زمان‌بندی فعالیت‌ها به روش تولید زمان‌بندی موازی استخراج می‌گردد. با توجه به بخش اول، کروموزوم به نحوی که محدودیت منابع رعایت شود تعیین شده و با استفاده از بخش دوم، پروفایل استفاده فعالیت از منابع استخراج می‌گردد، سپس تمام کروموزوم‌ها توسط تابع برازش ژنتیک که در این مسئله همان تابع چند معیاره می‌باشد، براساس زمان کل و هزینه کل و شانس موفقیت پروژه مورد سنجش قرار می‌گیرند. در مرحله بعد عملگرهای ژنتیکی انتخاب، تبادل و جهش بر روی کروموزوم‌ها اعمال شده و نسل بعدی تولید خواهد شد. یکی از مزایای الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای حل مسائل بهینه‌سازی این است که به علت استفاده از عملگر جهش ژنتیکی امکان گیر افتادن این الگوریتم در بهینه محلی بسیار کاهش پیدا می‌کند. در واقع عملگر جهش استفاده شده باعث می‌شود که شانس رسیدن به بهینه سراسری تا اندازه زیادی بالا رود.

در این مقاله برای اولین بار از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای بهینه سازی روابط (۱) تا (۳) استفاده شده است و انتظار می‌رود با توجه به قابلیت‌های این الگوریتم در جستجوی بهینه سراسری عملکرد این روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین دارای برتری باشد.

### ۵- یافته‌ها (نتایج)

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی در حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین نتایج روش پیشنهادی با جدیدترین و شناخته شده‌ترین روش‌های قبلی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی از زبان برنامه نویسی C# استفاده شده است. همچنین تمام آزمایش‌ها بر روی یک سیستم با پردازنده Core i3 2.3 GHz و ۲ گیگابایت حافظه داخلی (RAM) اجرا شده است.

برای ارزیابی روش پیشنهادی از یک مجموعه مسائل زمان‌بندی بانام Paterson's test problems استفاده شده است (پترسون<sup>۱</sup>، ۱۹۸۴). این مجموعه شامل ۱۱۰ مسئله زمان‌بندی مختلف است که هر مسئله شامل ۳ تا ۵۰ فعالیت و ۱ تا ۴ منبع است. برای مقایسه با روش پیشنهادی از روش‌های ابتکاری مبتنی بر قواعد اولویت<sup>۲</sup> استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات این روش‌ها نشان داده شده‌اند. همچنین نتایج مقایسه روش پیشنهادی با این روش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. در جدول ۲ حداقل خطا، حداکثر خطا، میانگین خطا و انحراف معیار به ترتیب نشان دهنده کمترین، بیشترین، میانگین و انحراف معیار خطا در ده اجرای مختلف روش‌های مورد مقایسه هستند. همان‌طور که داده‌های این جدول نشان می‌دهد در تمام حالت‌ها روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر دارای عملکرد بهتر می‌باشد. برای نمونه روش پیشنهادی دارای میانگین خطای ۱,۵ درصد است. در حالی که میانگین خطا برای سه روش LST، LFT، SLK و PSO به ترتیب برابر ۲,۲، ۲۴,۶ و ۱۲,۶ درصد است.

جدول ۱: روش‌های ابتکاری مبتنی بر قواعد اولویت برای زمان‌بندی پروژه با منابع محدود

قانون	بهینه	تعریف
-------	-------	-------

1. Patterson, 1984
2. priority rule-based heuristics

$LS_j$	کمینه	Latest start time (LST)
$LS_j + p_j$	کمینه	Latest finish time (LFT)
$LS_j + ES_j$	کمینه	Minimal slack (SLK)
$LS_j + ES_j$	کمینه	PSO

جدول ۲: مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های ابتکاری مبتنی بر قواعد اولویت برای

زمان‌بندی پروژه با منابع محدود

روش	حداقل خطا (درصد)	حداکثر خطا (درصد)	میانگین خطا (درصد)	انحراف معیار
Latest start time (LST)	صفر	۷۵,۰	۲۷,۲	۱۳,۳
Latest finish time (LFT)	صفر	۷۵,۰	۲۴,۶	۱۳,۱
Minimal slack (SLK)	صفر	۳۵,۰	۱۲,۶	۹,۰
PSO	صفر	۲۷,۰	۹,۸	۴,۲
روش پیشنهادی	صفر	۱۷,۰	۱,۵	۲,۵

## ۶- نتیجه‌گیری

زمان‌بندی پروژه یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه‌ی مدیریت پروژه محسوب می‌شود. این مسئله شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌ها، منابع، محدودیت‌ها و معیارهایی برای ارزیابی کارایی می‌باشد. در این مسئله باید ترتیب فعالیت‌ها و تخصیص منابع به آن‌ها به گونه‌ای دقیق با هم هماهنگ شوند که عملکرد سیستمی که با استفاده از یک یا چند معیار مشخص می‌شود، بهینه شود. با توجه به اینکه مسئله زمان-بندی پروژه ذاتاً یک مسئله چند معیاره می‌باشد که در آن هدف بهینه‌سازی فاکتورهای زمان، هزینه و کیفیت است، این نیاز وجود دارد که این مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند معیاره در نظر گرفته شود. در بیشتر روش‌های قبلی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، این مسئله به صورت یک بهینه-

سازی تک معیاره در نظر گرفته شده است، اما در این مقاله این مسئله به صورت بهینه‌سازی چند هدف مختلف مانند زمان، هزینه و شانس موفقیت پروژه در نظر گرفته شده است. در این مقاله از یک روش بهینه‌سازی چند معیاره مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب روش ارائه شده را برای حل مسائل زمان‌بندی نشان دادند. همچنین مقایسه و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های قبلی نشان دهنده برتری روش پیشنهادی بود.

### مراجع

1. Brucker, P., Schoo, A. and Thiele, O. (1998). A branch and bound algorithm for the resource constrained project scheduling problem. *European Journal of O.R.*, 17, 143-158.
2. Deb, K., et al., (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2): p. 182-197.
3. Deckro, R. F., Winkofsky, E. P., Hebert, J. E. and Gagnon, R., (1991). A decomposition approach to multi-project scheduling, *European Journal of O.R.*, 51, 110-118.
4. Demeulemeester, E. and Herroelen, W., (1997). New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem, *Management Science*, 43, 1485-1492.
5. Holland, J.H., (1992). *Adaptation in natural and artificial systems*, MA: MIT Press,.
6. Icmeli, O. and Rom, W. O. (1996). solving the resource-constrained project scheduling problem with optimization subroutine library. *Computers and O. R.*, 23, 801-817.
7. Jędrzejowicz, P. and E. Ratajczak-Ropel, (2014). Reinforcement Learning strategies for A-Team solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Neurocomputing*, 146: p. 301-307.
8. Kellenbrink, C. and S. Helber, (2015). Scheduling resource-constrained projects with a flexible project structure. *European Journal of Operational Research*, 246(2): p. 379-391.

9. Kolisch, R., and Hartmann, S. (2006), Experimental Investigation of Heuristics for Resource-Constrained Project Scheduling: An Update. *European Journal of Operations Research*, 174, 23-37.
10. Koulinas, G., L. Kotsikas, and K. Anagnostopoulos, (2014). A particle swarm optimization based hyper-heuristic algorithm for the classic resource constrained project scheduling problem. *Information Sciences*, 277(0): p. 680-693.
11. Mohring, R., Schulz, A., Stork, F., and Uetz, M, (2003). Solving project scheduling problems by minimum cut computations. *Management Science*, pp. 250-330.
12. N. Srinivas and K. Deb, (1995). Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms, *Evol. Comput.*, vol. 2, no. 3, pp. 221-2..
13. Patterson, J.H., (1984). A Comparison of Exact Approaches for Solving the Multiple Constrained Resource, Project Scheduling Problem. *Management Science*, 30, 854-867.
14. Wiest, J. D. (1963), The scheduling of large projects with limited resources. Ph.D. dissertation, Carnegie Institute of Technology.
15. Zheng, X.-l. and L. Wang, (2015). A multi-agent optimization algorithm for resource constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 42(15-16): p. 6039-6049.