

مدیریت تولید و عملیات، دوره هفتم شماره (۱)، پیاپی (۱۲)، پاییز و زمستان ۱۳۹۵

دریافت: ۹۲/۹/۱۳ پذیرش: ۹۳/۶/۲۴

صص: ۲۴۶ - ۲۳۵

## ارائه مدلی برای بهینه‌سازی همزمان انتخاب پروژه‌ها و زمان‌بندی فعالیت‌ها در حالت محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات

ملیحه گنجی<sup>۱</sup>، مهدی علینقیان<sup>۲</sup>، سید مجتبی سجادی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله مساله ترکیبی انتخاب و زمان‌بندی پروژه در حالت محدودیت منابع، با معیار حداکثرکردن مقدار ارزش فعلی پروژه مدل‌سازی، تحلیل و حل می‌شود. در این پژوهش، وضعیت بررسی و مطالعه می‌شود که از بین چندین پروژه در دسترس و موجود، باید برخی انتخاب و اجرا شوند تا با توجه به محدودیت منابع بیشترین سود حاصل گردد. مدل‌های انتخاب پروژه عموماً زمان‌بندی پروژه‌ها را به عنوان بخشی از فرآیند انتخاب در نظر نمی‌گیرند. از طرفی، به جز مواردی که تنها یک پروژه در هر دوره فعال است، اولویت بندی پروژه‌های انتخاب شده بدون در نظر گرفتن زمان‌بندی آنها بهینه نیست. زمان‌بندی پروژه‌ها در سطح فعالیت‌های پروژه بر پیچیدگی تصمیم‌گیری در مورد انتخاب سبب می‌افزاید و فضای جستجو را برای انتخاب سبب از پروژه‌ها گسترش می‌دهد. در این مقاله برای حل مساله در ابعاد بزرگ، یک روش فراابتکاری مبتنی بر روش انبوه ذرات ارائه می‌گردد. به منظور صحت‌گذاری بر مدل ارائه شده، چندین مساله نمونه در ابعاد کوچک و بزرگ حل شده و نتایج بررسی شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب الگوریتم ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** ارزش فعلی خالص (NPV)، انتخاب پروژه، زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع

RCPSP، سبب پروژه، الگوریتم انبوه ذرات.

## ۱- مقدمه

در بسیاری از سازمان‌ها انتخاب سبد پروژه و فعالیت‌های مرتبط با مدیریت پروژه‌های انتخاب شده در طول چرخه حیات آنها، از جمله فعالیت‌های مهم محسوب می‌شود. انتخاب سبد پروژه‌ها، استراتژی و مسئولیت‌های مدیران ارشد شرکت را برای آینده میان مدت به شکل عملی تعیین می‌کند. در محیط چند پروژه‌ای، منابع کمیاب نقش محدود کننده مهمی را ارائه می‌کنند و تخصیص منابع یک عامل بسیار مهم در موفقیت است. منابع کمیاب ممکن است بودجه، تجهیزات، متخصصین و حتی فضای کار باشد.

انتخاب پروژه یک فرآیند ارزیابی و تجزیه و تحلیل پروژه‌های مستقل برای انتخاب بهترین پروژه‌ها و در نتیجه، تحقق اهداف سازمان است (فضلی و مدنی، ۱۳۸۹). مدل‌های زیادی برای کمک به سازمان‌ها در انتخاب سبد مناسبی از پروژه‌ها پیشنهاد شده است. پیش قدم این کار «مارکوویتز» یکی از نخستین و شناخته شده ترین مرجع مساله بهینه‌سازی سبد پروژه است. (مارکوویتز، ۱۹۵۲). اگرچه بعد از او نیز بسیاری از پژوهشگران مدل را توسعه داده آن را با شرایط دنیای واقعی تطبیق داده‌اند، اما بسیاری از شرایط هنوز چندان بررسی نشده است.

مدل‌های انتخاب پروژه عموماً زمان‌بندی پروژه را به عنوان بخشی از فرآیند انتخاب در محیط فازی در نظر نمی‌گیرند، از طرفی به جز مواردی که تنها یک پروژه در هر دوره فعال است، اولویت بندی پروژه‌های انتخاب شده بدون در نظر گرفتن زمان‌بندی آنها بهینه نیست.

## ۲- زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPS)

یکی از پرکاربردترین مسائل پژوهشی در حیطه مدیریت و برنامه‌ریزی پروژه‌ها، زمان‌بندی پروژه در حالت محدودیت منابع است که در سالیان اخیر توجه بسیاری را به خود جلب نموده است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۰). این مساله به طور وسیعی در حوزه‌های مدیریت پروژه‌های صنعتی، مهندسی ساخت و ساز، توسعه نرم افزار و همچنین زمان‌بندی تولید کاربرد دارد (امین ناصری و همکاران، ۱۳۹۱).

به طور کلی، RCPS در پی یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های یک پروژه است، به نحوی که محدودیت‌های تقدم و تاخر شبکه پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منبعی موجود در پروژه به طور همزمان ارضا شوند و معیار سنجش معینی از جمله زمان انجام پروژه، هزینه انجام، تعداد فعالیت‌های تاخیردار و غیره بهینه شوند. (خلیلی دامغانی و همکاران، ۱۳۹۰). محدودیت‌های اصلی این مدل شامل سطح دسترسی به منابع و روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه است. همچنین، تابع هدف آن اغلب کمینه کردن زمان ختم پروژه است (بساق زاده و همکاران، ۱۳۸۹). این مساله از نظر پیچیدگی یک مساله NP-Hard است (دمولمستر و هروئلن، ۲۰۰۲).

از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری که برای حل مساله RCPS استفاده شده می‌توان به الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> (والاس و همکاران، ۲۰۰۸)، شبیه سازی تبرید<sup>۶</sup> (بولیمن و لکوکا<sup>۷</sup>، ۲۰۰۳)، الگوریتم کلونی مورچگان<sup>۸</sup> (مارکل و همکاران، ۲۰۰۲)، جستجوی ممنوع<sup>۱۰</sup> (ننب و ایباراکی<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۲)، جستجوی

### ۳- الگوریتم PSO

الگوریتم انبوه ذرات که در سال ۱۹۹۵ از سوی ابرهارت و کندی<sup>۲</sup> ارائه شده است، یک پارادایم محاسباتی بر اساس ایده‌ای است که رفتار مشترک و حرکت گله‌ای جمعیت بیولوژیک با الهام از رفتار اجتماعی پرندگان مهاجم یا تجمع ماهیان ارائه شده است. (ابرهارت و کندی، ۱۹۹۵).

اساس کار الگوریتم بر این اصل استوار است که ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد تنظیم می‌کند. موقعیت اولیه هر ذره به شکل تصادفی در فضای جستجو با یک توزیع یکنواخت در محدوده تعریف مساله تعیین می‌شود. (جلائی و همکاران، ۱۳۹۲).

هر ذره به شکل چند بعدی (بسته به طبیعت مساله) با دو مقدار  $x_i^d(t)$  و  $v_i^d(t)$  که به ترتیب معرف وضعیت مکانی و سرعتی مربوط به بعد  $d$  ام از  $i$  امین ذره هستند تعریف می‌شود. در زمان‌های بعد موقعیت هر ذره بر مبنای تجربه خودش و نیز همسایگانش تعیین می‌شود. اگر  $x_i^d(t)$  موقعیت بعد  $d$  ام ذره  $i$  ام در زمان  $t$  باشد، موقعیت بعدی ذره از جمع موقعیت بعد  $d$  ام ذره  $i$  در زمان  $t$  با سرعت ذره  $i$  به دست می‌آید. ذرات از طریق بردار سرعت هدایت می‌شوند. در بردار سرعت هم، نتیجه تجربه اجتماعی ذره‌های همسایه و هم تجربه فردی هر ذره دخیل است. هر ذره، سرعت خود را با ترکیب خطی از جزء فردی که نشان دهنده‌ی استفاده از دانش و تجربه شخصی است و جزء اجتماعی که بیانگر

انتشاری<sup>۱۲</sup> (دبلس و همکاران<sup>۱۳</sup>، ۲۰۰۶)، ارتباط مسیر<sup>۱۴</sup> (رنجبر و کیانفر<sup>۱۵</sup>، ۲۰۰۹)، بهینه‌سازی توده ذرات<sup>۱۶</sup> (چن و همکاران<sup>۱۷</sup>، ۲۰۱۰) و الگوریتم‌های ترکیبی<sup>۱۸</sup> اشاره کرد.

هنگامی که جریان‌های نقدی مشخصی در طول پروژه و به شکل هزینه پرداخت می‌شوند و پرداخت‌های در جریان نیز برای تکمیل اجزاء پروژه شکل پذیرد، معیار ارزش خالص فعلی (NPV)<sup>۱۹</sup> یک معیار بسیار مهم و کاربردی در زمان‌بندی پروژه است (سیفی و همکاران، ۱۳۸۷).

تاریخچه مدیریت پروژه در جهان را معمولاً به مدیریت پروژه‌های عظیمی همچون ساخت اهرام مصر، دیوار چین و یا بنا نهادن تخت جمشید به دستور داریوش مربوط می‌دانند اما تاریخچه مدیریت پروژه در دنیای جدید به سال‌های ابتدایی دهه ۱۹۰۰ میلادی باز می‌گردد. امروزه با جهانی شدن تجارت، استفاده بهینه از منابع برای بقا در صحنه‌های جهانی، امری ضروری است. در همین راستا، مفاهیمی همچون پروژه، کنترل پروژه و زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و ... مطرح شده است.

با مروری بر تاریخچه فعالیت پژوهشگران در این زمینه، متوجه می‌شویم، اکثریت فقط به مساله زمان‌بندی پروژه با روش‌های متفاوت بدون در نظر گرفتن انتخاب پروژه توجه نموده‌اند. در واقع، مدلی جامع که شامل بهینه‌سازی انتخاب پروژه‌ها و زمان‌بندی پروژه‌ها در حالت محدودیت منابع باشد، تا کنون مشاهده نشده است.

کنترل سرعت‌های قبلی بر روی مقدار فعلی آن به کار گرفته می‌شود. موقعیت جدید هر ذره از مجموع موقعیت گذشته و سرعت جدید به دست می‌آید که طبق رابطه (۲) تعیین می‌شود:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2)$$

شبه کد زیر مراحل فوق را به شکل خلاصه نشان می‌دهد: (چن<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱)

```
Initialize ();
for t=1 to the limit of iterations ;
  for i=1:N;
    Fitnessit = EvaluationFitness ( Xi(t) );
    Update Velocity ( Vi(t+1) ) according to formula(2);
    LimitVelocity ( Vi(t+1) );
    Update Position ( Xi(t+1) ) according to formula(3);
    if needed , update Pi and Pg;
  End
  Terminate if Pg meets problem requirements;
End
```

#### ۴- مدل‌سازی مساله انتخاب و زمان‌بندی پروژه

در این بخش مساله انتخاب و زمان‌بندی پروژه مدل‌سازی می‌گردد. ابتدا فرضیات مدل را به شکل خلاصه بیان می‌شود و بر این اساس متغیرهای مدل را تعریف خواهد شد:

۱- هر پروژه از یک یا چند فعالیت مشخص تشکیل شده است.

۲- به منظور آغاز یک فعالیت، فعالیت پیشین (پیش‌نیاز) آن پروژه باید خاتمه یافته باشد به عبارت دیگر رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها از نوع FS<sup>۳</sup> است.

۳- هر دوره‌ی زمانی، دارای محدودیت منابع (برای هر یک از منابع به شکل مجزا) است.

تجربیات همسایه‌هاست به روز رسانی می‌کند. در جزء فردی بهترین موقعیت ذره p<sub>best</sub> که تا آن لحظه به آن دست یافته و درجه اجتماعی بهترین موقعیتی که کل ذرات g<sub>best</sub> به آن دست یافته‌اند لحاظ می‌شود. هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب سعی می‌کند موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات و روابط زیر تغییر دهد:

موقعیت کنونی  $x_{ij}(t)$ ، سرعت کنونی  $v_{ij}(t)$ ، فاصله بین موقعیت کنونی و p<sub>best</sub>، فاصله موقعیت کنونی و g<sub>best</sub>؛ بدین شکل سرعت هر ذره طبق رابطه زیر طبق رابطه (۱) تغییر می‌کند:

$$v_{ij}(t+1) = \omega \cdot v_{ij}(t) + c_1 \cdot r_1 (p_{best-ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 \cdot r_2 (g_{best-j}(t) - x_{ij}(t)) \quad (1)$$

که در آن  $v_{ij}(t)$ ، سرعت بعد از ام هر ذره در تکرار t ام است،  $c_1$  و  $c_2$  ثابت‌های مثبتی هستند که برای وزن دهی به اجزا شناختی و اجتماعی<sup>۳</sup> استفاده و ضرایب شتاب (اطمینان) نامیده می‌شوند.  $c_1$  در واقع ضریب اطمینان یک ذره به بهترین موقعیت خودش و  $c_2$  ضریب اطمینان یک ذره به بهترین موقعیت در بین کل ذرات است؛ بنابراین، به این پارامترها ضرایب اطمینان می‌گویند و مقدار آنها معمولاً برابر  $c_1 + c_2 = 4$  یا  $c_1 = c_2 = 2$  است.  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی با توزیع بین یکنواخت بین صفر و یک بوده  $(r_{1i}(t), r_{2i}(t) \cong u(0,1))$  که خاصیت تصادفی بودن الگوریتم و چگالی جمعیت را حفظ می‌کند.  $\omega$  پارامتر وزن اینرسی برای کنترل تعادل جستجوی الگوریتم میان اکتشاف و استخراج<sup>۳</sup> استفاده می‌شود؛ به بیان دیگر وزن اینرسی برای

متغیر تصمیم مدل را انتخاب یا عدم انتخاب پروژه در یک زمان مشخص تعریف می‌کنیم. فرض کنیم  $T$  کل محدوده زمانی برای انجام پروژه‌ها است.  $T$  دوره زمانی بعد از انجام پروژه‌ها و مدت سوددهی پروژه‌ها است. و سبد پروژه‌های مورد نظر از  $J$  پروژه تشکیل شده باشد که هر یک از پروژه‌ها نیز خود شامل  $I$  فعالیت باشند. سایر متغیرهای مدل را نیز به شکل ذیل تعریف می‌کنیم:

-  $x_{ijt}$ : برابر با شروع یا عدم شروع فعالیت  $i$  ام از پروژه  $j$  در زمان  $t$  می‌باشد. در شکلی که این فعالیت در زمان  $t$  شروع شود، مقدار این متغیر برابر یک و در غیر این شکل مقدار آن برابر صفر خواهد شد.

-  $y_j$ : برابر با انتخاب یا عدم انتخاب پروژه  $j$  ام می‌باشد. در شکلی که پروژه  $j$  انتخاب شود، مقدار آن برابر یک و در غیر این شکل مقدار آن برابر صفر خواهد شد.

-  $d_{ij}$ : طول مدت لازم برای اجرای فعالیت  $i$  ام از پروژه  $j$

-  $es_{ij}$ : زودترین زمان شروع فعالیت  $i$  ام از پروژه  $j$

-  $ls_{ij}$ : دیرترین زمان شروع فعالیت  $i$  ام از پروژه  $j$

-  $r_{ijh}$ : میزان منبع مورد نیاز از منبع  $h$  برای اجرای فعالیت  $i$  ام از پروژه  $j$

-  $R_h$ : مقدار ظرفیت موجود منبع  $h$

-  $b_{ij}$ : مقدار سود یا عایدی حاصل از اتمام پروژه  $j$  ام در زمان  $t$

-  $priority(i, j)$ : مجموعه فعالیت‌های پس

ظرفیت موجود منبع در روزهای مختلف یکسان است.

۴- امکان عدم انتخاب حتی یک فعالیت از هر پروژه‌ای (به علت محدودیت منابع یا هر علت دیگری)، در یک دوره‌ی زمانی مشخص وجود دارد.

۵- هر فعالیت پروژه تنها یکبار انجام می‌شود.

۶- زمانی که یک فعالیت انتخاب می‌شود این فعالیت تا مدت زمان مشخصی انجام می‌شود و تا اتمام آن فعالیت، مراحل اجرای آن متوقف نمی‌شود، به عبارت دیگر فعالیت‌ها غیر قابل انقطاع هستند.

۷- از انجام هر پروژه سود یا عایدی ایجاد می‌شود که این سود در یک دوره‌ی مشخص پس از اتمام پروژه حاصل می‌شود.

۸- هدف از انجام پروژه‌ها به دست آوردن بیشترین ارزش خالص فعلی سود (NPV) ممکن از انجام پروژه‌ها است.

۹- منابع از نوع تجدید پذیر هستند. بدین مفهوم که در هر دوره پس از مصرف منبع، این منبع در دوره‌ی بعدی احیا خواهد شد و مجدد می‌توان از آن استفاده نمود.

۱۰- به علت ماهیت مساله انتخاب پروژه، یا تمام فعالیت‌های آن پروژه کنار گذاشته می‌شود و به بیان دیگر آن پروژه انتخاب نمی‌شود.

#### ۴-۱- ارائه مدل

در قدم بعد مدل فوق را به شکل ریاضی مدل‌سازی می‌کنیم. بدین منظور لازم است متغیرهای مدل را تعریف کنیم.

$$\Rightarrow \max \sum_{j=1}^J y_j \sum_{t=1}^T \sum_{t'=1}^{T'} \sum_{i \in \text{end activity of project } j} (b_{t'j}) x_{ijt} - (t + d_{ij} + t' - 1) x_{ijt} (1 + a)$$

Subject to

$$\sum_{t=es_{ij}}^{ls_{ij}} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$\sum_{t=es_{ij}}^{ls_{ij}-1} X_{ijt} = 0 \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$\sum_{t=es_{ij}+1}^T X_{ijt} = 0 \quad \forall i, j \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T (t + d_{ijt}) X_{ijt} \leq \sum_{t=1}^T t x_{i'jt} \quad \forall (i, i', j) \in \text{priority} \quad (11)$$

$$U_{ijt} = \sum_{t''=t-d_{ij}+1}^t x_{ijt}'' \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_j u_{ijt} r_{ij} \leq R_h \quad t = 1 \dots T, h = 1 \dots H \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^T (x_{ijt} + x_{i'jt}) = 2y_j \quad \forall (i, i', j) \in \text{priority} \quad (14)$$

در این مرحله، محدودیت‌های مدل توضیح داده می‌شود:

تابع هدف: بیانگر بیشینه سود یا عایدی مورد انتظار از اجرای پروژه‌ها است.

محدودیت (۱): هر فعالیت از پروژه تنها یکبار می‌تواند انتخاب شود.

محدودیت (۲) و (۳): هر فعالیت فقط در بازه زمانی  $[es_{ij}, ls_{ij}]$  انتخاب می‌شود.

نیازی فعالیت  $i$  از پروژه  $j$

$U_{ijt}$ : از زمان شروع تا زمان اتمام فعالیت

$X_{ijt}$  برابر یک است و نشان می‌دهد که فعالیت

در بازه زمانی  $[es_{ij}, ls_{ij}]$  از منابع استفاده می‌کند و پس از اتمام فعالیت منابع را بازگردانی می‌کند.

$\text{end activity of project } j$ : آخرین فعالیت

انجام شده پروژه  $j$

$a$ : درصد نرخ بهره یا بازگشت سرمایه است و در هر واحد زمان انجام پروژه، تنزیل می‌شود.

پارامترهای مورد استفاده در مدل، به جز نرخ تنزیل  $a$  به شکل عدد صحیح تعریف می‌گردند.

در این قدم، محدودیت‌های مساله را به شکل ریاضی مدل می‌کنیم. لذا مدل عمومی این مساله را می‌توان به شکل ذیل نوشت:

(۳)

$$\max \sum_{j=1}^J y_j \sum_{t=1}^T \sum_{t'=1}^{T'} \sum_{i \in \text{end activity of project } j} b_{t'j} (1+A)^{-(t+d_{ij}+t'-1)} x_{ijt}$$

این تابع هدف غیرخطی با انجام عملیات ریاضی به شکل ذیل بدل می‌شود:

(۴)

$$\max \sum_{j=1}^J y_j \sum_{t=1}^T \sum_{t'=1}^{T'} \sum_{i \in \text{end activity of project } j} \log(b_{t'j}) x_{ijt} - (t + d_{ij} + t' - 1) x_{ijt} \log(1 + A)$$

و با تعاریف

$$\log(b_{t'j}) x_{ijt} = b_{t'j} x_{ijt} \quad (5)$$

$$(1+a) = \log(1+A) \quad (6)$$

به شکل ذیل تبدیل می‌شود:

(۷)

از ۲۰ نمونه مثال مربوط به مساله انتخاب و زمانبندی پروژه مطابق با جدول (۱) بهره گرفته شد.

#### ۵-۱- حل مدل با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات

در این قسمت به تشریح الگوریتم ذرات برای حل مساله زمانبندی و انتخاب پروژه می‌پردازیم:

۱- قدم یک: ایجاد یک ترتیب ممکن از انجام فعالیت‌ها با رعایت پیش‌نیازها و محدودیت منابع برای شروع به کار الگوریتم PSO، ابتدا باید یک لیست شدنی از ترتیب انجام فعالیت‌ها را به عنوان جواب اولیه تعیین شود. انتخاب مناسب جواب اولیه تاثیر زیادی بر سرعت همگرایی و کیفیت جواب نهایی الگوریتم PSO دارد.

در این قدم بدین شکل عمل می‌گردد که ابتدا به تعداد فعالیت‌های پروژه‌ها اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌شود، سپس این اعداد مرتب گردیده و در یک لیست ذخیره می‌شوند و همچنین، لیست این ترتیب مرتب شده که نماینده شماره فعالیت است، در لیست دیگری ذخیره می‌گردد. واضح است که این جواب به علت رعایت نکردن پیش‌نیازها، نشدنی باشد؛ لذا بدین شکل عمل می‌شود: نخستین فعالیت از لیست دوم انتخاب و در صورتی که پیش‌نیازی نداشته، و یا این که پیش‌نیازهایش انجام گرفته باشد آن فعالیت انجام می‌گیرد و در غیر این صورت این روند بر روی فعالیت بعدی در لیست ذکر شده انجام می‌پذیرد. پس از این که فعالیت انجام گرفت، زمان شروع (ST)<sup>۲۶</sup> و پایان (FT)<sup>۲۷</sup> و Cmax فعالیت‌ها ذخیره می‌گردد و این فعالیت‌ها از لیست پیش‌نیازها<sup>۲۸</sup> و پس‌نیازها<sup>۲۹</sup> سایر فعالیت‌ها، حذف می‌شود.

محدودیت (۴): برای آغاز یک فعالیت لازم است که فعالیت‌های قبلی پیش نیاز آن فعالیت پایان یافته باشد.

محدودیت (۵): فعالیت  $x_{ijt}$  در بازه زمانی  $[es_{ij}, ls_{ij}]$  از منابع استفاده می‌کند و پس از اتمام فعالیت منابع را بازگردانی می‌کند.

محدودیت (۶): هر یک از منابع دارای ظرفیت فازی در هر بازه زمانی هستند.

محدودیت (۷): فعالیت‌های یک پروژه یا تمامی آنها انتخاب می‌شوند یا تمامی آنها کنار گذاشته می‌شوند.

جدول ۱- مسائل نمونه

ابعاد کوچک			ابعاد بزرگ		
مساله	تعداد پروژه	تعداد فعالیت	مساله	تعداد پروژه	تعداد فعالیت
A1	۳	۲۲	B1	۷	۸۷
A2	۴	۳۳	B2	۹	۱۲۷
A3	۵	۴۱	B3	۱۱	۱۶۵
A4	۴	۳۰	B4	۱۲	۱۷۴
A5	۵	۳۸	B5	۱۳	۱۸۵
A6	۴	۳۸	B6	۱۴	۱۹۸
A7	۳	۴۲	B7	۱۵	۲۱۲
A8	۵	۴۰	B8	۱۶	۲۳۴
A9	۴	۳۷	B9	۱۷	۲۴۱
A10	۳	۳۳	B10	۱۸	۲۵۴

#### ۵- نتایج

برای اندازه‌گیری کارایی مدل، لازم است پروژه‌های استاندارد تولید شوند. نمایش شبکه مورد استفاده در این نوشتار به شکل برداری AOA<sup>۲۵</sup> در نظر گرفته شده است. برای بررسی روش‌های حل

همین ترتیب این کار ادامه می‌یابد تا تمام فعالیت‌ها انتخاب گردند و لیست  $P_2$  کامل شود.

بر این اساس با توجه به پیش‌نیازها در مثال مورد بررسی از چپ به راست تنها در ابتدا فعالیت ۱ قابل انجام خواهد بود که در آخر لیست  $P$  است. لذا این فعالیت انتخاب می‌گردد و لیست  $P_2$  به شکل زیر خواهد شد:

$$P_2 = [1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$$

حال فعالیت ۱ از لیست پیش‌نیازها و یا پس‌نیازهای سایر فعالیت‌ها حذف و این لیست‌ها به روز می‌گردد و دوباره از چپ به راست از لیست  $P$  انتخاب فعالیت شکل می‌گیرد. با توجه به شبکه پروژه واضح است که بعد از فعالیت ۱ تنها، فعالیت‌های ۲ و ۳ قابل اجرا خواهند بود که به علت اینکه فعالیت ۳ در لیست  $P$  جلوتر از فعالیت ۲ است این فعالیت انتخاب می‌گردد و لیست  $P_2$  به شکل زیر خواهد شد:

$$P_2 = [1\ 3\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$$

این موارد آنقدر تکرار می‌گردد تا لیست  $P_2$  به شکل زیر کامل گردد:

$$P_2 = [1\ 3\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7]$$

همانطور که مشهود است این جواب، کاملاً شدنی است. برای انتخاب زمان شروع یک فعالیت بدین گونه عمل شده است؛ که فعالیتی از لیست  $P_2$  برای انجام گرفتن انتخاب می‌گردد که تمامی پیش‌نیازهایش بررسی شده و ماکزیمم زمان اتمام پیش‌نیازهایش به عنوان زمان شروع فعالیت انتخابی به شرط در دسترس بودن منابع مورد نیاز در نظر گرفته می‌شود و در شکل در دسترس نبودن منابع،

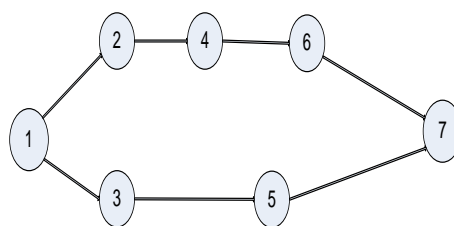
۲\_ قدم دوم: ذخیره بهترین جواب تولید شده در قدم یک

بهترین جواب تولید شده در قدم یک در محلی به نام Best Sol ذخیره می‌گردد.

۳\_ قدم سوم: تکرار الگوریتم

این مراحل تا زمانیکه تمام فعالیت‌ها در لیست شدنی زمان‌بندی قرار بگیرند ادامه خواهد داشت.

برای بررسی نحوه عملکرد الگوریتم ذکر شده یک مساله نمونه از مسائل استاندارد انتخاب شده است، شبکه پروژه آن در زیر آورده شده است.



شکل ۱- شبکه مثال نمونه

ابتدا فعالیت‌ها به شکل تصادفی در لیستی تحت عنوان  $P$  ذخیره می‌گردند، نمایش این لیست به شکل زیر خواهد بود:

$$P = [6\ 4\ 5\ 3\ 2\ 7\ 1]$$

مشخص است که این لیست و این ترتیب اجرای فعالیت‌ها به علت روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع قابل انجام نخواهد بود و ممکن است شدنی نباشد، لذا تغییراتی باید شکل گیرد تا این جواب به یک جواب شدنی تبدیل گردد. برای این منظور از لیست  $P$  به ترتیب از چپ به راست فعالیت‌ها تک تک مورد بررسی قرار می‌گیرند و نخستین فعالیتی که پیش‌نیازهایش رعایت شده باشد انتخاب می‌گردد و در لیست جدیدی به نام  $P_2$  ذخیره می‌گردد. و به



پارامترهای الگوریتم پیشنهادی از روش سعی و خطا بهره برده شد و با حل یک نمونه مساله به تنظیم پارامترها پرداخته شد. لذا مقدار  $\omega = 0.9$ ، در ابتدا برای افزایش تنوع و گسترش فضای جواب، و در مراحل پایانی  $\omega = 0.4$  به منظور رسیدن به یک ناحیه مطلوب از فضای جستجو با سرعت کمتر، و سایر مقادیر  $c_1 = c_2 = 2$ ،  $\max\text{iteration} = 100$ ،  $\text{np} = 50$  تنظیم شدند.

نتایج حاصل از حل مسائل در ابعاد کوچک و بزرگ در جدول‌های (۲) و (۳) بیان شده است.

جدول ۲- نتایج محاسباتی مسایل با ابعاد کوچک

مسائل	GAMS		PSO		
	جواب	زمان	جواب	زمان	خطا
A1	۱۳۰	۰/۰۹۴	۱۳۰	۱/۶۳	۰
A2	۲۰۱	۰/۱۰۹	۲۰۱	۱/۶۳۵	۰
A3	۲۶۴	۰/۱۱۱	۲۶۴	۱/۷۶	۰
A4	۱۹۱	۰/۰۹۴	۱۹۲	۱/۶۳۵	۰/۰۱
A5	۲۳۹	۰/۳۲۴	۲۴۰	۱/۷۵	۰/۰۱
A6	۲۹۹	۴/۱۰۹	۲۹۹	۱/۷۴	۰
A7	۱۹۵	۳۴/۱۱۳	۱۹۵	۱/۷۷	۰
A8	۲۵۱	۸۷/۱۱۲	۲۵۴	۱/۷۵	۰/۰۳
A9	۲۹۶	۱۲۷/۰۱۹۴	۲۹۹	۱/۷۵	۰/۰۳
A10	۲۴۵	۶۲۴/۱۰۹	۲۴۷	۱/۷۴	۰/۰۱

زمان شروع به زودترین زمانی که منابع در دسترس باشد انتقال پیدا می‌کند.

برای جستجوی همسایگی از روش swap استفاده شده که به شکل زیر است:

در روش swap از جواب شدنی که از تکرار قبلی به دست آمده دو تا از فعالیت‌ها به تصادف انتخاب شده و جایشان عوض می‌گردد، سپس این لیست همانند روشی که در مثال گفته شد، به یک لیست شدنی تبدیل می‌گردد. به عنوان نمونه اگر در همان مثال نمونه دو فعالیت ۳ و ۴ به شکل تصادفی انتخاب گردند و جایشان عوض شوند لیست زیر حاصل می‌شود که لیست نشدنی است:

$$P_2 = [1 \ 4 \ 5 \ 2 \ 3 \ 6 \ 7]$$

لذا طبق روش مثال، فعالیت‌ها به ترتیب وارد لیست می‌گردند و لیست، از فعالیتی که قابل انجام نباشد می‌گذرد. بدین شکل لیست  $NP_2$  که لیست شدنی است به شکل زیر است.

$$NP_2 = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7]$$

همانطور که در بالا بیان شد لیست  $NP_2$  یک لیست شدنی خواهد بود لذا سایر موارد طبق قبل بر روی این جواب اجرا می‌گردد.

مواردی که بیان گردید قابل تعمیم برای کل پروژه‌ها است. بدین شکل که فعالیت تمام پروژه‌ها در قالب یک پروژه شماره گذاری و زمانبندی می‌گردند. در نهایت پروژه‌ای که بر روی فعالیت‌هایش زمانبندی و تخصیص منبع شکل پذیرد؛ با توجه به محدودیت منابع و بازه زمانی، انتخاب و به سود دهی می‌رسد. به منظور تنظیم

جدول ۳- نتایج محاسباتی مسایل با ابعاد بزرگ

مسائل	GAMS		PSO		
	جواب	زمان	خطا	زمان	جواب
B1	۲۴۵	۱۰۰۵/۵	۰	۰/۹۳۶	۲۴۵
B2	۲۵۶	۱۱۲۵/۵	۰/۰۴	۱۲۴/۵	۲۶۰
B3	۲۹۵	۱۳۵۰/۲	۰	۲۱۹/۶	۲۹۵
B4	۳۱۹	۱۸۶۴/۴	۰	۲۴۶	۳۱۹
B5	۲۹۰	۲۶۴۰/۹	۰	۲۷۶/۵	۲۹۰
B6	۳۲۷	۲۷۵۶/۴	۰/۰۱	۲۸۲	۳۲۸
B7	۳۷۰	۲۹۴۷/۶	۰	۲۸۵	۳۷۰
B8	۳۱۲/۶	۳۳۹۱/۴	۰/۰۱۴	۲۹۴	۳۱۳
B9	۳۷۵/۸	۳۵۲۵/۶	۰/۰۱۲	۲۹۴/۳	۳۷۷
B10	۳۷۱/۴	۳۵۶۲/۷	۰/۰۰۶	۲۹۵/۷	۳۷۲

پیش‌نیازی هستند، به جز محدودیت منابع در دسترس در دوره‌های زمانی بایستی محدودیت‌های پیش‌نیازی فعالیت‌ها لحاظ گردند، چرا که اگر تنها محدودیت منابع در نظر گرفته شود ممکن است پروژه‌ای انتخاب شود که از نظر در دسترس بودن منابع مورد نیاز، مشکلی ندارد؛ اما هنوز فعالیت(های) پیش‌نیازی آن فعالیت انجام نشده باشد. لذا تصمیم‌گیرنده ضمن این که یک زیرمجموعه از پروژه‌ها را انتخاب می‌کند، بایستی به زمان‌بندی اجزای آنها نیز پردازد.

در واقع در این نوشتار سعی شد مساله ترکیبی انتخاب و زمان‌بندی پروژه، به طور همزمان با هدف پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی با فرض محدود بودن منابع، بررسی شود. ضمن مرور اجمالی بر پژوهش‌ها و مقالات ارائه شده، مدل برنامه‌ریزی مساله انتخاب و زمان‌بندی پروژه معرفی گردید. در ادامه با ذکر مسائل نمونه و با استفاده از نرم‌افزار GAMS و الگوریتم فراابتکاری PSO مساله در زمان مناسبی حل و نتایج آن بررسی و تجزیه و تحلیل گردید.

#### منابع

امین ناصری، محمد رضا؛ مختاری، هادی؛ نخعی کمال آبادی، عیسی، (۱۳۹۱)، « ارائه الگوریتم تلفیقی برای مساله زمان‌بندی پروژه مبتنی بر تخفیف قیمت با استفاده از رویکرد رگرسیون چند مرحله‌ای برای تنظیم پارامترها »، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۱، (۲۳)، ۱۰۷ - ۹۴.

همان‌گونه که در جدول‌ها نشان داده شده است در اکثر موارد؛ اختلاف بین جواب‌های بهینه تولید شده توسط نرم افزار GAMS و الگوریتم PSO صفر است. در نتیجه الگوریتم PSO در ۷۰٪ موارد جواب بهینه تولید کرده است. از نظر زمان حل نیز الگوریتم پیشنهادی توانسته است مساله را در زمان قابل قبولی حل نماید.

#### ۶- نتیجه و جمع‌بندی

در این نوشتار شرایطی در نظر گرفته شده است که پروژه‌های متنوعی برای اجرا باشند. در عمل زمانی که قصد انتخاب پروژه‌ها در طول دوره زمانی را داشته و نیز فعالیت‌های پروژه‌ها دارای روابط

- Bouleimen K. & Lecocq H.(2003),"A new efficient algorithm for the resource-constrained project scheduling problem". *European Journal of Operational Research*, 149(2),.268–281.
- Chen RM., Wu CL., Wang CM. & Lo ST.(2010)," Using novel particle swarm optimization scheme to solve resource-constrained project scheduling problem in PSPLIB". *Expert Systems with Applications*, 37, .,1899–1910.
- Debles D., De reyck B., Leus R. & Vanhoucke M.,(2006)." A hybrid scatter search/electromagnetism metaheuristic for project scheduling". *European Journal of Operational Research*, 169, .368–653.
- Demeulemeester, E LHerroelen, W S.(2002),"Project Scheduling", *Kluwer Academic Publishers*: 500-526.
- Kennedy, J., Eberhart, R., (1995) ," Particle swarm optimization I : Neural Networks ", *IEEE International Conference on Proceedings* , 40, 1442 – 1948.
- Markle D., Middendorf M. & Schmeck H .(2002)." Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1),.333–346.
- Markowitz H,(1952).Portfolio Selection.*Journal of Finance* ,1, 77-91.
- Nonobe K. & Ibaraki T.(2002). "Formulation and tabu search algorithm for the resource constrained project scheduling problem (RCPSP)". In: *Riberior CC, Hansen R (Eds), Essays and Surveys in Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, 557–588.
- Ranjbar M & Kianfar F.(2009). "A hybrid scatter search for the RCPSP". *Scientia Iranica Transaction E: Industrial Engineering*, 16(1),.11–18.
- Ruey-Maw Chen, (2011),"Particle swarm optimization with justification and designed mechanisms for resource-constrained project scheduling
- بساق زاده، ایمان ؛ حجازی، سید رضا؛ احسان، امیرموسی، (۱۳۸۹)، « توسعه مدل زمانبندی پروژه با اهداف زمان ختم و مقاومت زمانبندی »، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، ۱ (۴۴)، ۲۴ – ۱۳.
- جلائی، سید عبدالمجید؛ قاسمی نژاد، امین؛ کریمیان، علی اکبر، (۱۳۹۲)، « بررسی تاثیر تکانه‌های نفتی بر رشد اقتصادی ایران با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و بهینه‌سازی ذرات (PSO)»، فصلنامه علمی- پژوهشی مطالعات اقتصادی کاربردی ایران، ۷ (۲)، ۱۲۷-۱۱۱
- خلیلی دامغانی، کاوه و توکلی مقدم، رضا و طبری، مجتبی، (۱۳۹۰)، « حل مسائل زمانبندی پروژه‌ها با منابع محدود با استفاده از الگوریتم مورچگان اصلاح شده »، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، ۱ (۴۵)، ۶۵ – ۵۹.
- سیفی، مسعود و توکلی مقدم، رضا و جولای، فریبرز (۱۳۸۷)، «به کارگیری الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل مساله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع در حالت چند مد و با جریان‌های نقدی تنزیل یافته»، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران، ۴، ۸۵-۹۱.
- صادقی، امیر و صفی صمغ آبادی، اعظم دخت و برزین پور، فرناز، (۱۳۹۰)، « حل مساله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع چند حالت (MRCPSP) با الگوریتم زنبورهای عسل»، فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سال ششم، ۱۵
- فضلی، صفر و مدنی، سید سینا، (۱۳۸۹)، « انتخاب پروژه بر اساس تخصیص بهینه منابع با استفاده از رویکرد ترکیبی فرآیند تحلیل شبکه‌ای و برنامه‌ریزی آرمانی»، مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۱(۸-۱)، ۹۹ – ۱۲۱

problem", *Expert Systems with Application*, 38.7102-7111

Vallas V., Ballestin F. & Quintanilla S., (2008). "A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem". *European Journal of Operational Research*, 185, 495-508.

### پی‌نوشت

- 
- 1-Markowitz
  - 2-Resource Constrained Project Scheduling Problem(RCPSP)
  - 3- Demeuleester & Herroelen
  - 4- Genetic Algorithm(GA)
  - 5- Vallas, Ballestin & Quintanilla
  - 6- Simulated Annealing(SA)
  - 7- Bouleimen & Lecocq
  - 8- Ant Colony Optimization(ACO)
  - 9- Markle, Middendorf & Schmeck
  - 10- Tabu Search(TS)
  - 11- Nonobe & Ibaraki
  - 12- Scatter Search(SS)
  - 13- deblès, De reyck, Leus & Vanhoucke
  - 14- Path Relinking(PR)
  - 15- Ranjbar & Kianfar
  - 16- Particle Swarm Optimization(PSO)
  - 17-Chen, Wu CL, Wang & Lo ST
  - 18- Hybrid Algorithm(HA)
  - 19- Net Present Value (NPV)
  - 20- Kennedy & Eberhart
  - 21- Cognitive and Social Parameters
  - 22- Exploration and Exploitation
  - 23- Chen
  - 24- Finish to Start(FS)
  - 25- Activity on Arrow(AOA)
  - 26- Start Time
  - 27- Finish Time
  - 28- Predecessors List
  - 29- Successor List