

مدیریت تولید و عملیات، دوره پنجم، پیاپی (۹)، شماره (۲) پاییز و زمستان ۱۳۹۳

دریافت: ۹۱/۴/۱۹ پذیرش: ۹۲/۳/۱۹

صص: ۷۴-۵۷

## زمان‌بندی پروژه با داده‌های فازی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

حسینعلی حسن‌پور<sup>۱</sup>، حمزه دانش‌پایه<sup>۲\*</sup>، محمد امیرخان<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

### چکیده

این مقاله، مساله زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع<sup>۱</sup> (RCPS) را در بخشی از یک پروژه احداث پالایشگاه در دنیای واقعی بررسی می‌کند. در فعالیت‌های دنیای واقعی، اکثر فعالیت‌ها جدید بوده و با عدم قطعیت در زمان انجام این فعالیت‌ها مواجه هستیم که این امر منجر به تغییرات زیادی در زمان اتمام پروژه می‌شود. در این تحقیق، به دلیل NP-hard بودن مساله RCPS، یک روش بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مساله زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع در شرایط عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها ارائه می‌شود. برای نمایش این عدم قطعیت از نظریه مجموعه‌های فازی استفاده شده است. برنامه تولید زمان‌بندی به کار رفته در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی، روش تولید زمان‌بندی موازی فازی می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی، حداقل زمان تکمیل پروژه را با در نظر گرفتن محدودیت منابع تجدیدپذیر و محدودیت روابط پیشنیازی فعالیت‌ها تولید می‌کند و این قابلیت را دارد که دقیقاً با اعداد فازی اجرا شده و جزئیات پروژه شامل زمان شروع، زمان پایان فعالیت‌ها و زمان تکمیل پروژه را به صورت اعداد فازی ارائه کند. در نهایت اعتبارسنجی الگوریتم مورد سنجش قرار خواهد گرفت و نشان می‌دهیم الگوریتم پیشنهادی، الگوریتمی کارا بوده و بسادگی قابل استفاده توسط مدیران و برنامه‌ریزان پروژه در پروژه‌های واقعی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** زمان‌بندی پروژه، محدودیت منابع، مجموعه فازی، شبیه‌سازی تبرید، روش تولید

زمان‌بندی موازی

## ۱- مقدمه

توسط افراد خبره. ج- سهولت حل روش‌های فازی. د- حجم کمتر محاسبات نسبت به روش‌های احتمالی. و عدم نیاز به مفروضاتی که در رویکرد احتمالی وجود دارد. بر همین اساس در این تحقیق، زمان انجام فعالیت‌ها به صورت عدد فازی ذوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است که به وسیله مصاحبه با خبرگان درگیر در پروژه و بر اساس نظرات آنها برآورد می‌گردند.

برخی از محققان مطالعاتی روی مساله زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع و عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها داشته‌اند که طی بررسی‌های انجام شده در ادامه چند تحقیق مرتبط انجام شده آورده می‌شود.

ایشی و همکاران از روش زمان‌بندی پیشرو برای حل زمان‌بندی مساله استفاده کردند. آنها برای سادگی استفاده از اعداد فازی از روش - برش فازی استفاده کرده و یک زمان تکمیل پروژه به صورت بازه بسته [a, b] ارائه کردند (ایشی و همکاران، ۱۹۹۸).

جویت وانگ یک مفهوم ریسک زمان‌بندی را پیشنهاد کردند و یک الگوریتم ژنتیک با استفاده از قانون اولویت برای حل مساله با هدف حداکثر کردن نیرومندی و استحکام زمان‌بندی ارائه دادند (وانگ و همکاران، ۲۰۰۲). باسکار و همکاران در مقاله ای یک روش ابتکاری برای حل مساله RSPS تحت زمان فازی فعالیت‌ها ارائه کردند. آنها روش مبنی بر قانون اولویت را برای نمایش حل استفاده کردند و روش تولید زمان‌بندی موازی را برای حل مساله بکار بردند (باسکار و همکاران، ۲۰۱۱).

لیو<sup>۱</sup> و وانگ<sup>۲</sup> یک چهارچوب شامل الگوریتم ژنتیک ترکیب با تابو، برای حل مساله زمان‌بندی تحت محدودیت منابع و رویکرد فازی ارائه کردند که منجر به یک حل بهینه تقریبی می‌شد (لیو و وانگ،

مساله زمان‌بندی پروژه عبارت از تعیین زمان انجام فعالیت‌های یک پروژه، با توجه به محدودیت‌های حاکم بر آن، برای رسیدن به یک هدف معین است. این هدف ممکن است جنبه مالی، زمانی و یا کیفی داشته باشد. در فعالیت‌های واقعی، دو مقوله مهم وجود دارد: حداقل کردن زمان اتمام پروژه (با توجه به ضرورت نیاز به استفاده از محصول پروژه) و محدودیت منابع. بر همین اساس، موضوع زمان‌بندی پروژه و به تبع آن زمان‌بندی بهینه پروژه بدلیل صرفه‌جوی اقتصادی، استفاده بهینه از منابع و تکمیل پروژه در بهترین زمان ممکن (زمان بهینه) جهت ارائه خدمات حاصل از پروژه دارای اهمیت زیادی می‌باشد.

در جهان واقعی، به دلیل تغییرات محیط بیرونی (مانند: آب و هوا، کمبود فضا، حوادث طبیعی و غیر تکراری بودن یا عدم مواجهه مدیران پروژه با فعالیت مشابه در تجربیات قبلی) عدم قطعیت در تعیین مدت زمان فعالیت‌های پروژه وجود دارد که این عدم قطعیت در فعالیت‌های پروژه احداث پالایشگاه بسیار پررنگ‌تر است. بنابراین این عدم قطعیت بایستی در مسائل زمان‌بندی پروژه در نظر گرفته شده و مدیریت شود. برای مواجهه با این عدم قطعیت، دو متدولوژی وجود دارد: رویکرد فازی و رویکرد احتمالی. رویکرد اول (تئوری فازی) برای نشان دادن عدم قطعیت در فعالیت‌های دنیای واقعی، به دلایل زیر دارای کارایی بیشتری می‌باشد (فورت‌مپس<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶)، (پان<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۳)، (اشتهدیان و همکاران، ۱۳۸۷): الف- نیاز کمتر رویکرد فازی به اطلاعات در مقایسه با رویکرد احتمالی. ب- عدم دسترسی و یا کمبود اطلاعات فعالیت‌های گذشته و مشابه در برآوردها

برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، چند مساله نمونه در ابعاد کوچک را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل کرده و با حل توسط نرم‌افزار GAMS مورد مقایسه قرار خواهیم داد.

## ۲- عدم قطعیت فازی

### ۲-۱- تئوری مجموعه‌های فازی

در ریاضیات کلاسیک مجموعه‌ها دارای مرزهای مشخص و روشن هستند. تعلق یک عضو به یک مجموعه بصورت صریح بوده و یک عضو می‌تواند به یک مجموعه تعلق داشته باشد و یا به آن تعلق نداشته باشد. در دنیای پیرامون ما برخی از مجموعه‌ها نظیر مجموعه افراد قد بلند وجود دارند که دارای مرزهای مشخص نیستند. بنابراین تعریف چنین مجموعه‌هایی در ریاضیات کلاسیک امکان‌پذیر نیست. برای حل این مشکل مجموعه‌های فازی تعریف شده‌اند. در نظریه فازی یک مجموعه فازی صورت تعمیم یافته یک مجموعه کلاسیک است که اجازه می‌دهد هر عضو مجموعه، مقدار تعلق را بین صفر و یک اختیار نماید. به عبارت دیگر، در یک مجموعه کلاسیک، هر عضو می‌تواند مقدار تعلق برابر صفر یا یک داشته باشد. در حالی که در یک مجموعه فازی، تابع تعلق بصورت یک تابع پیوسته در محدوده صفر و یک می‌باشد. حداکثر مقدار تابع تعلق یک مجموعه فازی را ارتفاع آن مجموعه گویند. به یک مجموعه فازی که ارتفاع آن برابر یک می‌باشد مجموعه فازی طبیعی گفته می‌شود.

بنابراین مجموعه فازی  $A$  در فضای جهانی  $U$  را می‌توان به صورت زوج‌های مرتبی از  $X$  و مقدار تابع تعلق آن  $(X)$  مغ مطابق رابطه (۱) نمایش داد.

سلطانی و حاجی یک روش زمانبندی پروژه با استفاده از تئوری اعداد فازی ارائه کردند که در آن محدودیت منابع را در نظر نگرفتند (سلطانی و حاجی، ۲۰۰۷).

با توجه به اینکه مساله  $RCPSP$  بعنوان یک مساله  $NP-hard$  شناخته شده است (بلاژوویچ، ۱۹۸۳). در نتیجه استفاده از روش‌های دقیق و نرم‌افزارهای مدیریت پروژه برای حل این مساله در ابعاد بزرگ توجیه‌پذیر نبوده و بشدت کارایی خود را از دست می‌دهند. لذا برای حل این مسائل از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری کمک رفته می‌شود. که نمونه‌هایی در بالا ذکر شد.

هدف این مقاله توسعه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ترکیب با تئوری مجموعه‌های فازی برای زمانبندی پروژه تحت محدودیت منابع و عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها می‌باشد که الگوریتمی کارا بوده و قابل استفاده توسط مدیران و برنامه‌ریزان پروژه در فعالیت‌های واقعی می‌باشد. در این الگوریتم، طول فعالیت‌ها با استفاده از اعداد فازی دوزنقه‌ای نمایش داده شده است. الگوریتم پیشنهادی، حداقل زمان تکمیل پروژه را با در نظر گرفتن محدودیت منابع اقتصادی و نیروی انسانی تولید می‌کند و این قابلیت را دارد که با اعداد فازی اجرا شده و جزئیات پروژه شامل زمان شروع، زمان پایان فعالیت‌ها و زمان تکمیل پروژه را بصورت اعداد فازی ارائه می‌کند.

در ادامه، ابتدا عدم قطعیت فازی، شرح مساله زمانبندی و الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی تبرید تشریح می‌گردد و سپس، اطلاعات بخش نصب سازه‌های فلزی از پروژه احداث پالایشگاه آورده شده و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی تبرید ترکیبی با مجموعه‌های فازی حل می‌شود. در نهایت

$$\tilde{A} = \left\{ (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in U \right\} \quad (1)$$

در این رابطه  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  نشان‌دهنده تابع تعلق (عضویت) یا درجه عضویت مجموعه  $A$  می‌باشد. به طوریکه برد این تابع شامل اعداد حقیقی غیر منفی در فاصله بسته  $[0,1]$  می‌باشد. چنانچه مقدار تابع تعلق برای یک عضو مجموعه برابر صفر باشد، آن عضو مجموعه به صورت مطلق به آن مجموعه تعلق نداشته و اگر مقدار تابع تعلق برای یک عضو مجموعه برابر یک باشد، آن عضو به صورت مطلق به مجموعه تعلق دارد. این درجه عضویت اصل بنیادی مجموعه‌های فازی محسوب می‌گردد و هیچ روش قطعی برای تعیین تابع عضویت وجود ندارد و برای اعداد فازی شکل‌های مختلفی متصور است. لذا تعیین شکل و تابع عضویت بیش از همه یک مقوله حسی و تجربی می‌باشد که توسط فرد خبره تعیین می‌شود. انجام محاسبات با اعداد فازی به دلیل ساختار خاص آنها بسیار زمان‌بر و پیچیده می‌باشد برای تسهیل و کاربردی نمودن اعداد فازی، اعداد فازی خاصی معمولاً به کار گرفته می‌شوند. این اعداد خاص معمولاً به صورت اعداد زنگوله‌ای<sup>۶</sup>، مثلثی<sup>۷</sup>، دوزنقه‌ای<sup>۸</sup> هستند (غضنفری و همکاران، ۲۰۰۹). در این تحقیق، از اعداد فازی دوزنقه‌ای استفاده می‌گردد که در ادامه توضیح داده می‌شود.

## ۲-۲- حساب فازی

برای اعداد فازی نیز همانند اعداد حقیقی می‌توان عملگرهای جمع، تفریق، ضرب، تقسیم، ماکسیم، مینیم، اشتراک و ... را تعریف نمود که در اینجا بر حسب کاربرد و نیاز فقط عملگرهای جمع، تفریق، ماکسیم و مینیم معرفی می‌گردد (غضنفری و رضایی، ۱۳۸۵).

## الف- جمع اعداد فازی دوزنقه‌ای

از مجموع دو عدد فازی دوزنقه‌ای  $\tilde{A} = (a, b, c, d)$  و  $\tilde{B} = (a', b', c', d')$  عدد فازی جدید  $\tilde{C} = \tilde{A} + \tilde{B}$  حاصل می‌شود که تابع عضویت آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu_{\tilde{C}}(Z) = \mu_{\tilde{A} + \tilde{B}}(Z) \quad (2)$$

و مجموعه فازی  $\tilde{C}$  به صورت زیر به دست می‌آید:  

$$\tilde{A} = \tilde{A} + \tilde{B} = (a + a', b + b', c + c', d + d') \quad (3)$$

## ب- تفریق دو عدد فازی

از تفریق دو عدد فازی دوزنقه‌ای  $\tilde{A} = (a, b, c, d)$  و  $\tilde{B} = (a', b', c', d')$  عدد فازی جدید  $\tilde{C} = \tilde{A} - \tilde{B}$  به دست می‌آید که تابع عضویت آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\mu_{\tilde{C}}(Z) = \mu_{\tilde{A} - \tilde{B}}(Z) \quad (4)$$

که مجموعه فازی  $\tilde{C}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:  

$$\tilde{C} = \tilde{A} - \tilde{B} = (a - d', b - c', c - b', d - a') \quad (5)$$

## ج- ماکسیم و مینیم دو عدد فازی

ماکسیم و مینیم دو عدد فازی دوزنقه‌ای  $(a, b, c, d)$  و  $(a', b', c', d')$  به صورت زیر معرفی می‌گردند:

$$\begin{aligned} \text{MAX}(\tilde{A}, \tilde{B}) &= (\max(a, a'), \max(b, b'), \max(c, c'), \max(d, d')) \\ \text{MIN}(\tilde{A}, \tilde{B}) &= (\min(a, a'), \min(b, b'), \min(c, c'), \min(d, d')) \end{aligned} \quad (6)$$

## ۲-۳- مقایسه (رتبه‌بندی) اعداد فازی

با توجه به بررسی ادبیات مرتبط، رتبه بندی نوع دوم (استفاده از روابط فازی) بر دو گونه است رتبه‌بندی

$$\frac{1}{4} [d^{\alpha} + b + d^{\alpha} + c + \alpha \times (a + b + c + d)] \quad (10)$$

جایکه  $\alpha \in [0, 1]$ ، و سطوح  $\alpha$ -برش از  $\tilde{D}$  به صورت مجموعه زیر تعریف می‌شود.

$$\tilde{D}^{\alpha} = \{ (x, \mu_{\tilde{D}}(x)) \geq \alpha \mid x \in X \}, \forall \alpha \in [0, 1] \quad (11)$$

و در نهایت برای دو عدد فازی  $\tilde{D}_1$  و  $\tilde{D}_2$  داریم:

$$I_T(\tilde{D}_1, \beta) > I_T(\tilde{D}_2, \beta) \Rightarrow \tilde{D}_1 > \tilde{D}_2 \quad (12)$$

ب. رتبه‌بندی اعداد فازی با استفاده از رویکرد فاصله‌ای چنگ یک روش مبتنی بر فاصله را برای مقایسه دو عدد فازی مبنی بر فاصله بین مرکز مختصا و مرکز جرم عدد فازی را توسعه داد (چنگ، ۱۹۹۸). فرض کنید که عددی خیلی کوچک، تقریباً معادل با صفر باشد. برای محاسبه مرکز جرم عدد فازی  $\tilde{D} = (a, b, c, d)$  به صورت زیر عمل می‌کنیم (پان و همکاران، ۲۰۰۴).

$$\bar{x}_0(\tilde{A}) = \frac{\int_a^b (x f_A^L) dx + \int_b^c x dx + \int_c^d (x f_A^R) dx}{\int_a^b (f_A^L) dx + \int_b^c dx + \int_c^d (f_A^R) dx} \quad (13)$$

$$\bar{y}_0(\tilde{A}) = \frac{\int_0^1 (y g_A^L) dy + \int_0^1 (y g_A^R) dy}{\int_0^1 (g_A^L) dy + \int_0^1 (g_A^R) dy} \quad (14)$$

که برای عدد فازی ذوزنقه‌ای، فرمول‌های فوق را به صورت ساده شده مطابق روابط زیر می‌توان نوشت:

$$\bar{x}_0 = \frac{d^2 + c^2 - b^2 - a^2 + (c \times d) - (a \times b)}{3 \times (d + c - b - a)} \quad (15)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{a + (2 \times b) + (2 \times c) + d}{3 \times (d + c + b + a)} \quad (16)$$

ضعیف و رتبه‌بندی قوی اعداد فازی که در ادامه به‌طور مختصر تشریح می‌گردند.

۲-۳-۱- رتبه‌بندی قوی اعداد فازی<sup>۹</sup> (SCR)

در حالت رتبه‌بندی قوی اعداد فازی، برای مقایسه دو عدد فازی  $\tilde{A}$  و  $\tilde{B}$  رابطه زیر را وجود دارد (لین و همکاران، ۲۰۰۷).

$$\tilde{A} \gg \tilde{B} \Leftrightarrow \max(\tilde{A}, \tilde{B}) = \tilde{A}$$

۲-۳-۲- رتبه‌بندی ضعیف اعداد فازی<sup>۱۱</sup> (WCR)

الف. رتبه‌بندی با استفاده از مقدار انتگرال

رویکرد مقدار انتگرال که توسط چن برای مقایسه دو عدد فازی توسعه داده شد، به‌صورت زیر توصیف می‌شود (پان و همکاران، ۲۰۰۴).

فرض کنید عدد فازی  $\tilde{D} = (a, b, c, d)$  داده شده است. توابع  $g_D^L(y)$  و  $g_D^R(y)$  بترتیب توابع معکوس تابع چپ و راست عدد فازی  $\tilde{D}$  فرض می‌شوند. مقدار انتگرال چپ و راست عدد فازی  $\tilde{D}$  به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$I_L(\tilde{D}) = \int_0^1 g_D^L(y) dy \quad (7)$$

$$I_R(\tilde{D}) = \int_0^1 g_D^R(y) dy \quad (8)$$

سپس مقدار انتگرال کل عدد فازی  $\tilde{D}$  به صورت مجموع وزن داده شده از توابع  $I_L(\tilde{D})$  و  $I_R(\tilde{D})$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I_T(\tilde{D}, \beta) = \beta \times I_L(\tilde{D}) + (1 - \beta) \times I_R(\tilde{D}) \quad (9)$$

به طوری که  $\beta \in [0, 1]$ ، اندیس خوش‌بینی می‌باشد که توسط مدیران پروژه تعریف می‌شود. اگر  $\beta = 0.5$  باشد، فرمول (۹) به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I_T(\tilde{D}, 0.5) =$$

هیچ فعالیتی بر فعالیت دیگر ارجحیت ندارد. هر فعالیتی که آغاز می‌شود باید بدون وقفه تا انتها انجام شود و قطع فعالیت‌ها جایز نیست. منابع به صورت تجدیدپذیر در نظر گرفته شده‌اند. به این معنی که هر منبع در هر پریود زمانی دارای سقف استفاده مشخصی است و بیش از آن نمی‌توان از آن منبع استفاده کرد و منابع در ابتدای هر پریود زمانی کاملاً در دسترس هستند. با توجه به این مفروضات، مدل ریاضی مساله به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\text{Min } \tilde{S}_{n+1} \quad (21)$$

$$\text{Subject to: } \tilde{S}_0 = 0 \quad (22)$$

$$\tilde{S}_i + \tilde{d}_i \leq \tilde{F}_i \quad \forall j, \forall i \in P_j \quad (23)$$

$$\sum_{j \in I_k} r_{jk} \leq b_k \quad (24)$$

$$k = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$\tilde{d}_0 = 0 \quad (26)$$

$$\tilde{S}_i + \tilde{d}_i = \tilde{F}_i \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (27)$$

$$A_t = \{j \in V | \tilde{S}_j \leq t \leq \tilde{F}_j\} \quad \forall j \quad (28)$$

$$\tilde{S}_j \geq \max\{\tilde{F}_i\} \quad \forall i \in P_j, j = 1, \dots, n \quad (29)$$

$$\tilde{S}_j \in TFN \quad j = 1, \dots, n.$$

پارامترهای مورد استفاده در مدل، به صورت تعریف شده‌اند.

$V$ : مجموعه رأسهای گراف (گره‌ها)

$J = \{0, 1, \dots, n+1\}$ : مجموعه فعالیت‌های پروژه

$\tilde{d}_j$ : مدت زمان انجام فعالیت  $j$  که به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای می‌باشد.

$\tilde{S}_j$ : زودترین زمان شروع فعالیت  $j$  که به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای می‌باشد.

$\tilde{F}_j$ : زودترین زمان پایان فعالیت  $j$  که به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای می‌باشد.

و با استفاده از معادله‌های فوق، فاصله عدد فازی  $\tilde{D}$  از مرکز مختصات به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$R(\tilde{A}) = \sqrt{(\bar{y}_o)^2 + (\bar{x}_o)^2} \quad (17)$$

و در نهایت برای مقایسه دو عدد فازی  $\tilde{D}_1$  و  $\tilde{D}_2$  به روش فاصله‌ای خواهیم داشت:

$$\text{if } R(\tilde{D}_1) > R(\tilde{D}_2) \Rightarrow \tilde{D}_1 > \tilde{D}_2 \quad (18)$$

$$\text{if } R(\tilde{D}_1) < R(\tilde{D}_2) \Rightarrow \tilde{D}_1 < \tilde{D}_2 \quad (19)$$

$$\text{if } R(\tilde{D}_1) = R(\tilde{D}_2) \Rightarrow \tilde{D}_1 = \tilde{D}_2 \quad (20)$$

### ۳- تشریح مساله

مساله برنامه‌ریزی (زمان‌بندی) پروژه با منابع محدود را با توجه به شرایط متفاوت، می‌توان به صورت‌های مختلفی مدل‌سازی کرد. شبکه‌های پروژه<sup>۱۱</sup> که نشان‌دهنده پروژه خواهند بود، به دو شکل، فعالیت بر روی گره‌ها<sup>۱۲</sup> (AOA) و فعالیت‌ها بر روی کمان‌ها<sup>۱۳</sup> (AON)، نشان داده می‌شوند. در این مقاله فرض می‌گردد که شبکه پروژه به صورت فعالیت بر روی گره (AON)، مانند گراف  $G(V, E)$  است که در آن  $V$  مجموعه‌ی گره‌ها، و بیانگر فعالیت‌های پروژه بوده و  $E$  مجموعه یال‌های<sup>۱۴</sup> گراف و بیانگر رابطه منطقی پایان به شروع بدون تأخیر زمانی بین فعالیت‌ها (روابط پیشین‌سازی بین فعالیت‌ها) می‌باشد.

روابط پیش‌نیازی از نوع پایان به شروع<sup>۱۵</sup> در نظر گرفته شده است. محدودیت‌های روابط پیش‌نیازی بیان می‌کنند که هیچ فعالیتی را نمی‌توان در زمان  $t$  زمان‌بندی کرد مگر آن که تا زمان  $t$ ، تمام پیش‌نیازهای آن اتمام یافته باشند. فرض شده است که تمام فعالیت‌ها در زمان صفر آماده هستند و نیز زمان آماده‌سازی برای فعالیت‌ها متصور نیست و جزئی از زمان انجام فعالیت در نظر گرفته شده است. مابین فعالیت‌ها اولویت وجود ندارد. به عبارت دیگر

#### ۴- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید فازی پیشنهادی

استفاده از فرآیند سرمایه‌گذاری در مباحث بهینه‌سازی، اولین بار توسط کرک پاتریک<sup>۱۸</sup> در سال ۱۹۸۰ تحت عنوان شبیه‌سازی تبرید<sup>۱۹</sup> (SA) پیشنهاد شد (پاتریک، ۱۹۸۰). این روش با استفاده از قواعد علم فیزیک آماری به وجود آمده و به دنبال یافتن راهی برای استفاده از این قواعد در بستر بهینه‌سازی ترکیبی<sup>۲۰</sup> می‌باشد. فرآیند این الگوریتم همانند شکل‌گیری کریستال‌های فلز گداخته در حین خنک شدن است. شبیه‌سازی تبرید، الگوریتمی است که بوسیله حرکت تدریجی از یک جواب قابل قبول به جواب دیگر، به سمت بهینه کردن تابع هدف می‌رود. در شبیه‌سازی تبرید در هر تکرار، تفاوت بین مقدار تابع هدف به ازای جواب داوطلب و میزان تابع هدف به ازای جواب جاری محاسبه می‌شود ( $\delta$ )، اگر این تفاوت مطلوب بود، جواب داوطلب پذیرفته می‌شود و جایگشت دیگری انتخاب می‌شود. تا این قسمت از فرآیند، همانند الگوریتم‌های بهبود دهنده محلی می‌باشد. ولی آنچه متفاوت است اینکه در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید اگر مطلوب نبود، جواب داوطلب حتماً رد نمی‌شود بلکه با احتمالی از پیش تعیین شده، ممکن است پذیرفته می‌شود. به این ترتیب، شبیه‌سازی تبرید، علاوه بر حرکت در یک سراسیمه، ممکن است در یک مسیر سربالایی هم حرکت کند و با این فرآیند الگوریتم شبیه‌سازی تبرید امکان فرار از دام بهینه‌های محلی را فراهم می‌آورد (کومار، ۲۰۰۸).

احتمال پذیرش «جواب غیر بهبود دهنده» به عوامل بستگی دارد که عبارت از موارد زیر است.

الف. درجه نزدیکی جواب داوطلب به جواب بهینه جاری.

$A_t$ : مجموعه فعالیت‌هایی که در دوره  $t$ ، در حال انجام هستند و از آنها به عنوان مجموعه فعالیت‌های فعال<sup>۱۶</sup> یاد می‌شود.

$P(j)$ : مجموعه فعالیت‌های پیشیناز فعالیت  $j$

$Q(j)$ : مجموعه کل فعالیت‌های پسیناز فعالیت  $j$

$b_k$ : حداکثر مقدار موجود از منبع نوع  $K$

$b_{ik}$ : مقدار لازم از منبع نوع  $K$  برای انجام فعالیت  $i$

$T$ : حداکثر مدت زمان تکمیل پروژه

$R$ : تعداد منابع تجدیدپذیر

در مدل برنامه ریزی بالا، رابطه (۲۱) تابع هدف نشان دهنده کمینه‌سازی زمان اتمام فعالیت  $n+1$  می‌باشد. در واقع، زمان اتمام این فعالیت برابر است با زمان اتمام همه فعالیت‌های پروژه که برابر با زمان اتمام پروژه<sup>۱۷</sup> خواهد بود. محدودیت‌های مسئله عبارتند از: محدودیت (۲۲) بیان‌کننده زمان شروع پروژه می‌باشد. محدودیت (۲۳) مربوط به روابط تقدمی و تأخیری (بدون تأخیر زمانی) بین فعالیت‌های پروژه می‌باشد. بدین ترتیب که هیچ فعالیتی نمی‌تواند زودتر از اتمام تمامی فعالیت‌های پیش‌نیازی خود شروع شود. محدودیت (۲۴) مربوط به منابع در دسترس برای انجام فعالیت‌ها در بازه‌های زمانی افق برنامه‌ریزی پروژه می‌باشد. محدودیت (۲۵) و (۲۶) بیان‌کننده این مفهوم هستند که فعالیت‌های صفر و  $n+1$  فعالیت‌های مجازی پروژه (با زمان انجام صفر) هستند و محدودیت (۲۷) و (۲۸) بیان می‌کند که فعالیت‌های پروژه بدون انقطاع می‌باشند. محدودیت (۲۹) بیانگر این مطلب است که زمان شروع فعالیت فعالیت  $j$ ام بزرگتر یا مساوی با بیشترین زمان اتمام فعالیت‌های پیشینازی خودش می‌باشد این یعنی اینکه فعالیت  $j$ ام زمانی شروع می‌شود که تمام فعالیت‌های پیشینازیش تمام شده باشند.

ب. درجه حرارت مساله

توجه به این دو عامل، احتمال پذیرفتن جوابی که بهبود دهنده نیست (با افزایش فاصله از بهینه جاری) کاهش می‌یابد و هر چه درجه حرارت مساله پایین‌تر باشد، باید با احتمال کمتری جواب نامطلوب را بپذیریم تا هنگامی که به یک مرحله فریز شده برسیم جواب جدید را امتحان می‌کنیم. مشخصات یک مرحله فریز شده عبارتند از: تعداد جواب‌های امتحان شده در یک دما از حد مورد نظر گذشته باشد و یا اینکه تعداد از پیش تعیین شده‌ای از جوابها چک شوند بدون اینکه هیچ یک از آنها شرایط پذیرش را داشته باشند. پارامترهای کنترلی SA، شامل حداکثر تکرار جواب در هر درجه حرارت (معیار خروج از حلقه درونی)، حداکثر دفعات تغییر درجه حرارت (معیار خروج از حلقه بیرونی)، دمای اولیه، دمای نهایی و ضریب سردی است که بر اساس تحقیق دانش‌پایه (۱۳۹۰) به ترتیب برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ۵، صفر و ۰/۹۵ انتخاب می‌شود.

در شکل (۱) گام‌های اساسی الگوریتم پیشنهادی آورده شده است پارامترهای به کار رفته در این فلوچارت، به صورت زیر تعریف می‌شود:  $T_0$  درجه حرارت اولیه،  $\alpha$  ضریب سردی،  $K$  شمارنده تغییر درجه حرارت،  $K_n$  تعداد مجاز تغییر درجه حرارت (معیار خروج از حلقه بیرونی یا توقف الگوریتم)،  $L$  شمارنده تکرار همسایگی در هر درجه حرارت،  $L_n$  تعداد تکرار همسایگی در هر درجه حرارت (معیار خروج از حلقه درونی)،  $Z$  جواب شدنی،  $F(Z)$  مقدار تابع هدف به ازای جواب شدنی  $Z$  و  $Z_{Best}$  بهترین جواب شناخته شده است. در ادامه، استخوان‌بندی الگوریتم SA، شامل نحوه نمایش جواب، تولید

جواب اولیه، نحوه تولید جواب همسایه به طور مختصر شرح داده می‌شوند.

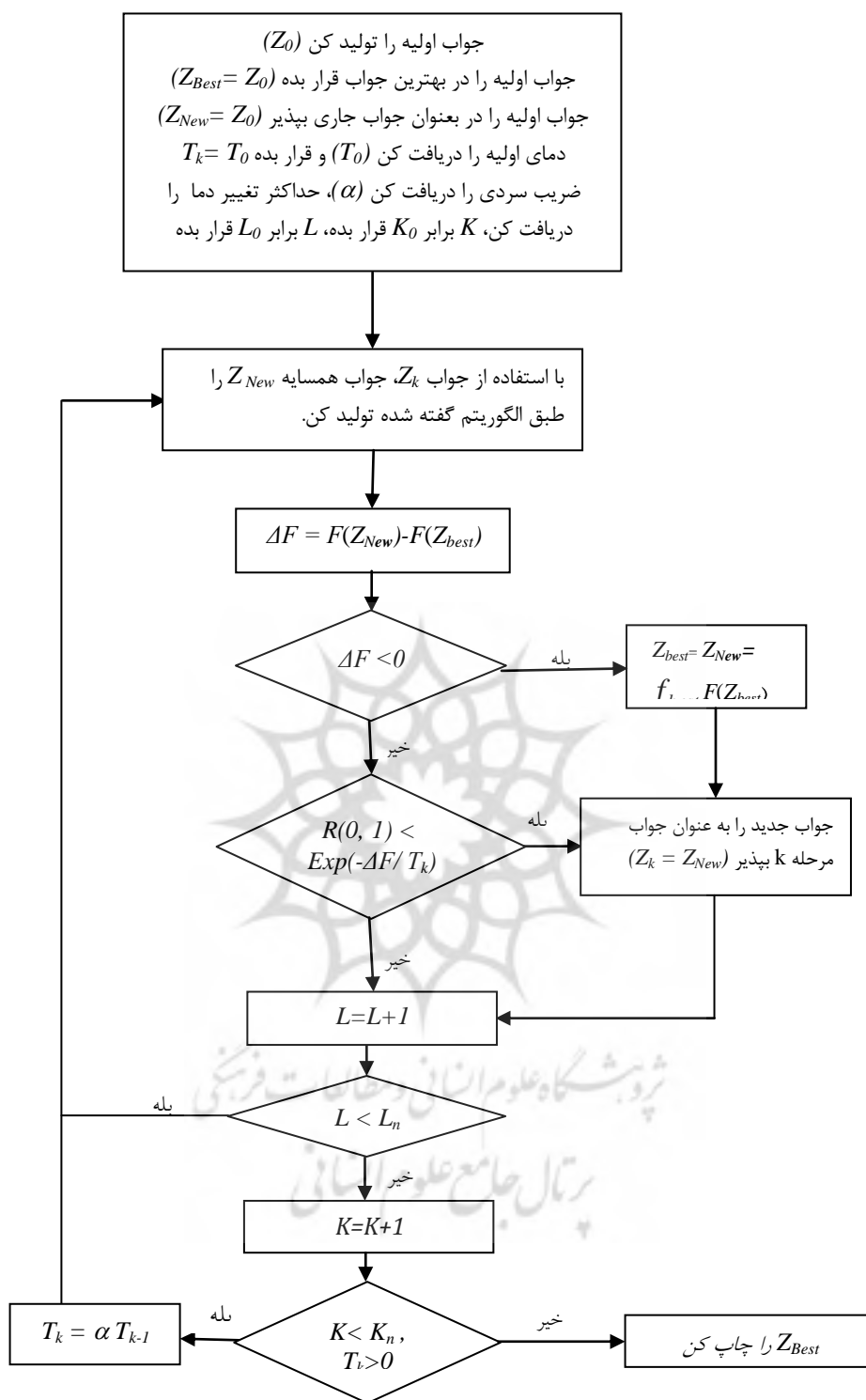
#### ۴-۱- نحوه نمایش جواب

در تمام الگوریتم‌های فراابتکاری، به دلیل نیاز به حل شدنی در شروع کار، لازم است حل شدنی بر طبق ساختار مشخصی ذخیره گردد که به این ساختار، نحوه نمایش جواب می‌گویند. یک حل شدنی برای مسأله مورد نظر، در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل یک ماتریس یک بعدی با ابعاد  $n \times 1$  است و این سطر ترتیب فعالیت‌ها را بگونه‌ای نشان می‌دهد که از چپ به راست، فعالیت‌ها به ترتیب در اولویت اجرا هستند.

#### ۴-۲- تولید جواب اولیه

در مساله زمان‌بندی پروژه، برای تولید جواب اولیه از روشی استفاده می‌شود که آن را روش تولید زمان‌بندی می‌نامند. این روش نقش بسیار مهمی در اکثر روش‌های ابتکاری و فراابتکاری و حل این مساله ایفا می‌کند. این روش یک فهرست نمایش مانند لیست فعالیت، کلید تصادفی یا نمایش قانون اولویت<sup>۲۱</sup> را گرفته و آن را به یک برنامه زمان‌بندی تبدیل می‌کند. دو نوع مختلف از این روش وجود دارد؛ برنامه تولید زمان‌بندی سری<sup>۲۲</sup> و برنامه تولید زمان‌بندی موازی<sup>۲۳</sup>. در این تحقیق، با توجه به مطالعات انجام شده توسط مسیح و همکاران (۲۰۰۲)، از روش زمان‌بندی موازی که کارایی بهتری دارد، استفاده می‌گردد. همچنین براساس تحقیق کولیش (۱۹۹۶)، برای تبدیل یک شکل نمایش جواب به یک زمان‌بندی شدنی، در اینجا از یک روش زمان‌بندی موازی فازی استفاده شده است که روش زمان‌بندی موازی آن از مرجع (کولیش و همکاران، ۱۹۹۶) گرفته شده و فازی شده است.





شکل (۱): فلوچارت SA پیشنهادی

۱	۲	۴	.....	N
---	---	---	-------	---

شکل (۲): نحوه نمایش جواب

شبه کد برنامه تولید زمان بندی موازی (PSS) در شکل (۳) آمده است:

```

PSS
Initialisation:  $n = 1, \bar{t}_n = 0, D_n = \{1\},$ 
 $A_n = C_n := \emptyset, K_{r,remain} = K_r, \forall r \in R,$ 
Go to Step(2);
While  $|A_n \cup C_n| < J$  Do
(1)  $\bar{t}_n = \min\{\bar{F}T_j | j \in A_{n-1}\};$ 
 $A_n = A_{n-1} \setminus \{j | j \in A_{n-1}, \bar{F}T_j = \bar{t}_n\};$ 
 $C_n = C_{n-1} \cup \{j | j \in A_{n-1}, \bar{F}T_j = \bar{t}_n\}$ 
Compute  $D_n, K_{r,remain}, \forall r \in R;$ 
(2)  $j^* := \min_{j \in D} \{j | \alpha(j) = \min_{i \in D_n} \{\alpha(i)\}\};$ 
 $\bar{F}T_{j^*} := \bar{t}_n + \bar{d}_{j^*};$ 
 $A_n = A_n \cup \{j^*\};$ 
Compute  $D_n, K_{r,remain}, \forall r \in R;$ 
If  $D_n \neq \emptyset$  then go to step(2) Else  $n = n + 1;$ 
End;
```

شکل (۳) شبه کد برنامه تولید زمان بندی موازی

برخی پارامترهای مورد استفاده در این شبه کد، به شرح زیر می باشند:

$A_n$ : مجموعه فعالیت های که تا زمان  $\bar{t}_n$  زمان بندی شده اند ولی هنوز تکمیل نشده اند و به مجموعه فعال معروف می باشند.

$C_n$ : مجموعه فعالیت های که تا زمان  $\bar{t}_n$  به اتمام رسیده اند.

$D_n$ : مجموعه فعالیت هایی که پیش نیازهای آن ها تا زمان  $\bar{t}_n$  به اتمام رسیده اند. یعنی پیش نیازهای آن ها در مجموعه  $A_n$  قرار دارند.

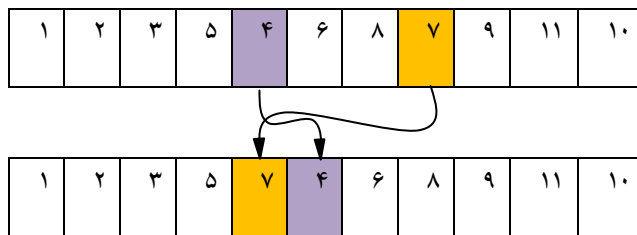
$\alpha(j)$ : قانون اولویت فعالیت ها را نمایش می دهد.

#### ۴-۳- تولید جواب همسایه

در این بخش، تولید جواب همسایه از جواب جاری تشریح می گردد. برای تولید جواب همسایه (بعد از تولید جواب اولیه)، یک فعالیت به تصادف انتخاب می شود. زودترین زمان آغاز آن و همچنین دیرترین زمان اتمام آن با توجه به توالی فعالیت ها در جواب جاری به دست می آید. سپس یکی از مکان های ممکنه (بعد از نزدیک ترین پیشنهاد و قبل از نزدیک ترین پس نیاز) زمان بندی می شود. برای توضیح بیشتر، فرض کنید که جواب اولیه ای توسط الگوریتم به صورت شکل (۴) تولید شده است. کار ۷ را در نظر بگیرید. تنها پیشنهاد این فعالیت، فعالیت ۵ بوده است. پس کار ۷ می تواند بلافاصله بعد از کار ۵ آغاز شود. همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است فعالیت ۷ به بعد از کار ۵ انتقال داده شده است.

#### ۵- اجرای الگوریتم پیشنهادی

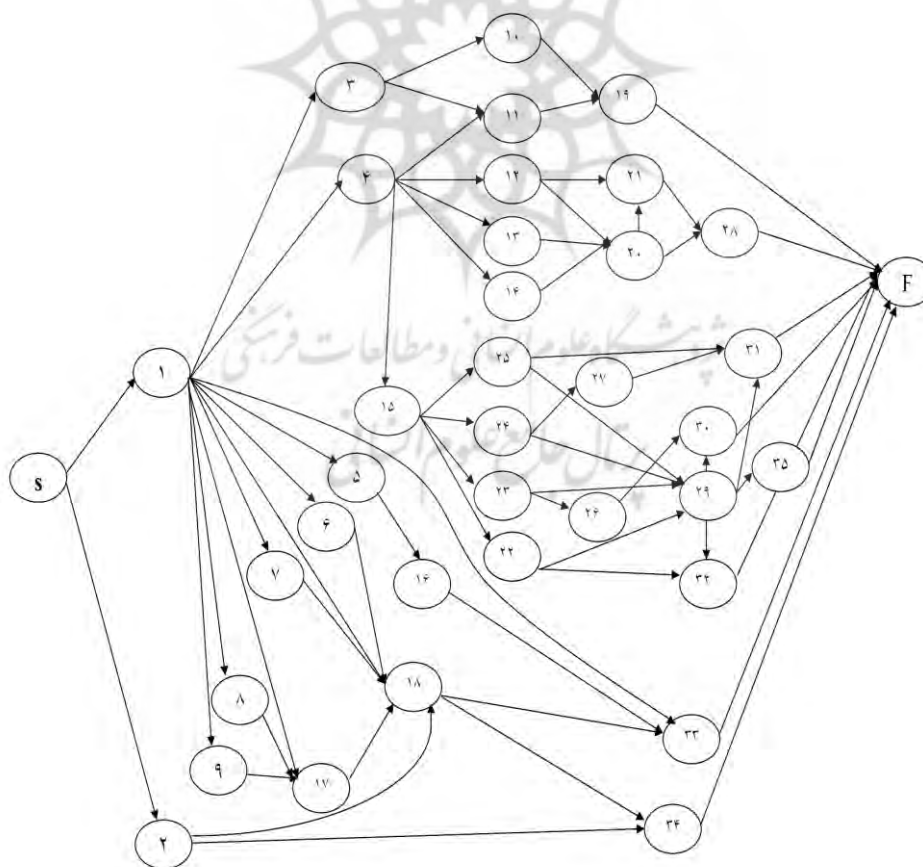
برای نشان دادن جواب ارائه شده توسط الگوریتم طراحی شده، بخش نصب سازه های فلزی شامل ۳۵ فعالیت، یک پروژه احداث پالایشگاه در دنیای واقعی به عنوان مساله نمونه این تحقیق انتخاب شد. داده های مورد نیاز برای زمان بندی این بخش از پروژه، از خبرگان پروژه احصاء شد که این اطلاعات در جدول (۱) به پیوست آورده شده است. فعالیت های S و E فعالیت های شروع و پایان پروژه می باشند که به صورت مجازی تعریف شده اند.



شکل (۴): روش تولید جواب همسایه

زمان انجام این فعالیت برابر با  $a$ ، و در بدترین حالت زمان انجام فعالیت برابر با  $d$  خواهد بود. منابع تجدیدپذیر برای این مساله به دو دسته نیروی انسانی و ماشین‌آلات تقسیم می‌شوند و مقدار موجود از این منابع به ترتیب ۱۵۰ نفر و ۱۰۰ دستگاه می‌باشد.

در این مساله، زمان فعالیت‌ها به صورت اعداد فازی ذوزنقه‌ای در نظر گرفته شده که توسط افراد خبره برآورد شده‌اند و به این صورت تعریف شده‌اند که به طور مثال، برای عدد فازی ذوزنقه‌ای  $\tilde{D} = (a, b, c, d)$ ، با احتمال زیاد زمان انجام فعالیت  $j$  در بازه  $[b, c]$  قرار دارد و در بهترین حالت



شکل (۵): گراف روابط پیشینازی مساله نمونه

جدول (۲): زمان نهایی شروع فعالیت‌ها

فعالیت	زمان شروع بهینه فعالیت	فعالیت	زمان شروع بهینه فعالیت
۱	(۰ ۱ ۲ ۳)	۲۰	(۶۴۹ ۶۷۳ ۷۰۴ ۷۲۸)
۲	(۰ ۱ ۲ ۳)	۲۱	(۶۶۱ ۶۸۷ ۷۲۰ ۷۴۵)
۳	(۴۳ ۴۶ ۴۷ ۴۹)	۲۲	(۶۷۳ ۷۰۰ ۷۳۷ ۷۶۳)
۴	(۰ ۱ ۲ ۳)	۲۳	(۶۰۹ ۶۳۰ ۶۵۹ ۶۸۰)
۵	(۴۳ ۴۶ ۴۷ ۴۹)	۲۴	(۶۲۷ ۶۴۶ ۶۷۲ ۶۹۴)
۶	(۵۰۹ ۵۵۲ ۵۴۰ ۵۵۴)	۲۵	(۶۵۳ ۶۷۴ ۷۰۴ ۷۲۸)
۷	(۱۲ ۱۴ ۱۶ ۱۷)	۲۶	(۶۹۳ ۷۱۷ ۷۵۰ ۷۵۵)
۸	(۴۳ ۴۶ ۴۷ ۴۹)	۲۷	(۱۲۳۶ ۱۲۷۷ ۱۳۴۹ ۱۳۸۹)
۹	(۵۳ ۵۹ ۶۳ ۶۹)	۲۸	(۷۱۶ ۷۴۴ ۷۴۸ ۸۱۱)
۱۰	(۵۰۹ ۵۲۲ ۵۴۰ ۵۵۴)	۲۹	(۷۱۶ ۷۴۴ ۷۴۸ ۸۱۱)
۱۱	(۱۲ ۱۵ ۱۸ ۲۰)	۳۰	(۷۵۶ ۷۸۷ ۸۲۹ ۸۵۹)
۱۲	(۵۳۵ ۵۴۹ ۵۷۱ ۵۸۶)	۳۱	(۱۲۹۳ ۱۳۳۵ ۱۴۱۲ ۱۴۵۴)
۱۳	(۵۷۶ ۵۹۲ ۶۱۷ ۶۳۳)	۳۲	(۱۲۳۶ ۱۲۷۷ ۱۳۴۹ ۱۳۶۹)
۱۴	(۵۰۹ ۵۲۲ ۵۴۰ ۵۵۴)	۳۳	(۱۲۳۶ ۱۲۷۷ ۱۳۴۹ ۱۳۶۹)
۱۵	(۵۵۱ ۵۶۶ ۵۷۸ ۶۰۳)	۳۴	(۶۴۰ ۶۷۳ ۷۰۶ ۷۲۹)
۱۶	(۵۹۷ ۶۱۶ ۶۴۳ ۶۶۲)	۳۵	(۶۰۹ ۶۳۰ ۶۵۹ ۶۸۰)
۱۷	(۵۶۴ ۵۷۹ ۶۰۱ ۶۱۹)	۳۶	(۱۳۰۵ ۱۳۴۸ ۱۳۲۹ ۱۴۷۲)
۱۸	(۶۰۶ ۶۲۳ ۶۴۶ ۶۶۶)	۳۷	(۱۲۶۳ ۱۳۰۶ ۱۳۷۹ ۱۴۲۴)
۱۹	(۷۹ ۸۷ ۹۵ ۱۰۴)	-	

در جدول (۱) اطلاعات پروژه شامل پیشنیازهای فعالیت‌ها به همراه میزان استفاده هر فعالیت از دو منبع در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، با استفاده از الگوریتم SA پیشنهادی، در محیط نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۰۹ کدنویسی شده است و در یک کامپیوتر پنتیوم ۴ با ۲٫۴ گیگا هرتز، اجرا شده است. جواب نهایی تولید شده توسط الگوریتم، در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول زمان آغاز فعالیت‌ها به عنوان جواب نهایی تولید شده، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان‌های شروع به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای می‌باشند که از جمع زمان‌های شروع با زمان انجام فعالیت‌ها، زمان پایان هر فعالیت به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای به دست می‌آید. با استفاده از نتایج به دست آمده برای فعالیت مجازی ۳۷ در جدول (۲) مشاهده می‌گردد که زمان تکمیل بهینه پروژه توسط الگوریتم برابر (۱۴۲۴ ۱۳۷۹ ۱۳۰۶ ۱۲۶۳) است که برابر زمان شروع فعالیت ۳۷م بعلاوه زمان انجام این فعالیت می‌باشد که به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای بیان شده است.

در جدول (۱) اطلاعات پروژه شامل پیشنیازهای فعالیت‌ها به همراه میزان استفاده هر فعالیت از دو منبع در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، با استفاده از الگوریتم SA پیشنهادی، در محیط نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۰۹ کدنویسی شده است و در یک کامپیوتر پنتیوم ۴ با ۲٫۴ گیگا هرتز، اجرا شده است. جواب نهایی تولید شده توسط الگوریتم، در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول زمان آغاز فعالیت‌ها به عنوان جواب نهایی تولید شده، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان‌های شروع به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای می‌باشند که از جمع زمان‌های شروع با زمان انجام فعالیت‌ها، زمان پایان هر فعالیت به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای به دست می‌آید. با استفاده از نتایج به دست آمده برای فعالیت مجازی ۳۷ در جدول (۲) مشاهده می‌گردد که زمان تکمیل بهینه پروژه توسط الگوریتم برابر (۱۴۲۴ ۱۳۷۹ ۱۳۰۶ ۱۲۶۳) است که برابر زمان شروع فعالیت ۳۷م بعلاوه زمان انجام این فعالیت می‌باشد که به صورت عدد فازی دوزنقه‌ای بیان شده است.

### ۱-۵- اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

به منظور اثبات کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج حل این الگوریتم با نتایج حل بوسیله نرم‌افزار GAMS که یک نرم‌افزار بهینه‌سازی دقیق می‌باشد، مقایسه می‌شوند. البته پروژه مورد بررسی در این تحقیق، یک پروژه از مسائل دنیای واقعی می‌باشد که هم‌اکنون در حال اجرا می‌باشد. پس از تکمیل پروژه، نتایج حاصله از اجرای پروژه می‌تواند با نتایج ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی مقایسه گردد اما در تحقیق حاضر، برای اثبات کارایی الگوریتم پیشنهادی، چند مساله نمونه در ابعاد کوچک که شامل زیر مجموعه‌هایی از مساله واقعی تحقیق می‌باشند را در

نظر گرفته و با الگوریتم پیشنهادی و نرم‌افزار GAMS، حل نموده و نتایج مورد مقایسه و ارزیابی قرار خواهند گرفت. همان گونه که از جدول مشاهده می‌گردد نتایج به دست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به صورت عدد فازی ذوزنقه‌ای می‌باشند که برای ایجاد حالت مقایسه ایی نتایج، از روش رتبه‌بندی فاصله‌ای اعداد فازی، با استفاده روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷)، کمک گرفته شده است. در جدول (۳) جزئیات حل مسائل نمونه در ابعاد کوچک بوسیله نرم‌افزار GAMS و الگوریتم پیشنهادی آورده شده است.

جدول (۳): مقایسه نتایج الگوریتم SA پیشنهادی با نرم‌افزار GAMS در ابعاد کوچک

روش حل		SA	GAMS	درصد انحراف
شماره مساله				
j=۸	مقدار بهینه	$(58\ 74\ 91\ 112) = 83/9686$	۸۵	۱/۲۱
	زمان اجرا (ثانیه)	۰/۸۷۰۸۶۵	۱۷/۷۸۲	
j=۱۰	مقدار بهینه	$(554\ 574\ 596\ 616) = 585$	۵۸۶/۰	۰/۱۷
	زمان اجرا (ثانیه)	۰/۵۰۱۴	۲۱۲/۶۲۴	
j=۱۴	مقدار بهینه	$(580\ 603\ 628\ 650) = 615/2107$	۶۱۷	۰/۲۹
	زمان اجرا (ثانیه)	۰/۵۸۰۶۴۹	۴۷۳/۶۹۷	
j=۱۶	مقدار بهینه	$(55\ 73\ 91\ 120) = 85/2705$	۸۳	۲/۷۳
	زمان اجرا (ثانیه)	۰/۶۱۸۷۷۶	۸۳۵/۷۹۱	
j= ۱۸	مقدار بهینه	۶۴۵/۲۱۴	۶۴۹	۳/۷۸۶
	زمان اجرا (ثانیه)	۱/۰۳۷	۱۴۳۲/۴۳۲	
			میانگین انحراف	۱/۶۳۷



شکل (۶): زمان حل مسائل نمونه در الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار GAMS

زمان تکمیل پروژه را به صورت عدد فازی ارائه کند. در این تحقیق، از نظریه مجموعه های فازی برای نمایش عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها استفاده شده است. در الگوریتم پیشنهادی برای تولید برنامه زمان‌بندی، از روش تولید زمان‌بندی موازی فازی استفاده شده است. برای مقایسه اعداد فازی مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی، از روش رتبه‌بندی فاصله‌ای استفاده شده است. یک مساله نمونه در دنیای واقعی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی زمان‌بندی شد. در نهایت برای سنجش کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج حل ۵ مساله نمونه در ابعاد کوچک را با نتایج حل نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS مقایسه کردیم و مشاهده نمودیم که الگوریتم پیشنهادی جواب‌های با میانگین انحراف  $1/63$  از جوابهای دقیق تولید می‌کند و این در حالی است که زمان حل برای نرم‌افزار دقیق (با افزایش ابعاد مساله)، به صورت نمایی افزایش می‌یابد در صورتی که زمان حل الگوریتم پیشنهادی به صورت تقریباً ثابت و کمتر از ۲ ثانیه می‌باشد و این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی همگرا بوده و قابلیت رسیدن به جواب بهینه را دارد. از آنجاکه الگوریتم پیشنهادی، قابلیت حل مسائل با داده های غیر قطعی را دارد و

از نتایج به دست آمده در جدول (۳) مشاهده می‌گردد که میانگین درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم دقیق،  $1/63$  می‌باشد. همچنین مطابق نتایج جدول (۳) و شکل (۶) زمان رسیدن به جواب در الگوریتم پیشنهادی تقریباً ثابت بوده ولی در نرم‌افزار GAMS به صورت تابع درجه دو افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم همگرا به جواب بهینه و کارا می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل فازی برای مساله زمان‌بندی پروژه تحت عدم قطعیت فعالیت‌ها و محدودیت منابع ارائه گردید و چون مساله RSPS در گروه مسایل سخت دسته‌بندی می‌شود، استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی جهت دستیابی به جواب‌های بهینه سراسری یا موضعی، امری زمان‌بر بوده و از پیچیدگی زمان محاسباتی برخوردار می‌باشد. لذا جهت حل این مساله از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید ترکیبی با داده‌های فازی کمک گرفته شد. هدف این الگوریتم، حداقل کردن زمان تکمیل پروژه است و این الگوریتم قادر است ضمن استفاده مستقیم از اعداد فازی، زمان شروع و

- with Fuzziness ", Fuzzy Sets and Systems,. 95 ,307-317.
- Kirkpatrick S, Gelatt CD Jr, Vecchi MP,(1983), "Optimization by Simulated Annealing, Science 220(4598): 671-680.
- Kolisch R., (1996), Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation , European Journal of Operational Research, 90, .320-333.
- Kumar Shukla S. Y.Jun Son, M.K. Tiwari, (2008), "Fuzzy-based adaptive sample-sort simulated annealing for resource-constrained project scheduling", Int Adv Manuf Technol 36:982-995.
- Liou T.S., M.J. Wang,( 1992) Ranking fuzzy numbers with integral value , Fuzzy Sets and Systems,50(6) .247-255.
- Maciej H; Andrzej J;Roman S;(2002), "Fuzzy project scheduling with multi criteria" *project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models*", European Journal of Operational Research,1277-1282.
- Pan H.Q., C.H. Yeh, (2003) Fuzzy Project Scheduling , The IEEE International Conference on Fuzzy System, .339-347.
- Shixin Lin, k.L.Yung, W.H.Ip,( 2007), "Genetic Local Search for Resource-Constrained Project Scheduling under Uncertainty", Information and management sciences, 18, Number 4,.374-363.
- Soltani A., R. Haji, (2007), "A Project Scheduling Method Based on Fuzzy Theory", journal of industrial and SYSTEM Engineering,vol.1,.1, 70-80, spring .
- Wang C., C-H. (1998), "New Approach for Ranking Fuzzy Numbers by Distance Method". Fuzzy Sets and Systems,. 95, 307-317.
- Wang J.,( 2002), A Fuzzy Project Scheduling Approach to Minimize Schedule Risk for Product Development , Fuzzy Sets and Systems,127(4),.99-116.
- کارایی آن اثبات شد، الگوریتمی کاربردی بوده و به‌سادگی قابل استفاده برای مدیران پروژه در فعالیت‌های جهان واقعی می‌باشد.
- ### منابع
- اشتهاردیان، احسان، عباس‌نیا، رضا، افشار، عباس، " موازنه هزینه-زمان با در نظر گرفتن زمان‌بندی غیر قطعی"، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت استراتژیک پروژه‌ها، ۱۳۸۷.
- غضنفری، مهدی، رضایی، محمود، سال ۱۳۸۵، "مقدمه‌ای بر نظریه مجموعه‌های فازی"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- دانش‌پایه حمزه، (۱۳۹۰)، " زمان‌بندی پروژه تحت عدم قطعیت مدت فعالیت‌ها با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری"، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده فنی و مهندسی، اسفند ۱۳۹۰.
- Bhaskar T., Manabendra N. Pal, Asim K.(2011). "A heuristic method for RCPSP with fuzzy activity times", European journal of operation research, 208,57-66,.
- B azewicz J., J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kan.(1983). "Scheduling subject to resource constraints", Discrete Applied mathematics 5, 11-24.
- Cheng, C-H.(1998). "New Approach for Ranking Fuzzy Numbers by Distance Method", Fuzzy Sets and Systems,. 95 , 307-317.
- Fortemps P.(1997). "Jobshop Scheduling with Imprecise Duration: A Fuzzy Approach", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 5, .557-569.
- Ghazanfari.A M., Yousefli. M, A.Bozorgi-Amiri,(2009), "A new approach to solv time-cost trade-off problem with fuzzy decision variable", Int J Adv Manuf Technol, 42:408-414.
- Hongqi Pan, Robert J;Chung-Hsing Y; (2004), "Resource-constrained Poroject Scheduling

جدول (۱): اطلاعات هر فعالیت شامل زمان انجام، منابع مورد نیاز و فعالیت‌های پیشنهادی هر فعالیت

نام فعالیت	کد فعالیت	مدت فعالیت	فعالیت پیشنهادی	منابع مورد نیاز	
				$r_1$	$r_2$
شروع	۱	(۰۰۰۰)	-	-	-
Arr.on SITE STEEL STRUCTURE CDU Unit 01	۲	(۱۲ ۱۴ ۱۶ ۱۷)	۱	۲۰	۲۳
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-004 up to First Level	۳	(۴۱ ۴۳ ۴۶ ۴۹)	۱	۴۱	۳۰
MEDIUM-HEAVY STR. STR-51-002 up to First Level	۴	(۲۶ ۲۸ ۳۱ ۳۵)	۲	۲۷	۲۳
Arr.on SITE STEEL STRUCTURE CDU Unit 51	۵	(۱۲ ۱۴ ۱۶ ۱۷)	۲	۳۳	۲۹
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-002 up to Intemed.Level	۶	(۵۵ ۵۸ ۶۲ ۶۵)	۲	۳۸	۳۴
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-005 up to Top	۷	(۲۲ ۲۳ ۲۶ ۲۷)	۲	۳۲	۲۲
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-006 up to TOP	۸	(۱۲ ۱۴ ۱۶ ۱۷)	۲	۲۳	۱۵
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-002 up to First Level	۹	(۲۶ ۲۸ ۳۱ ۳۵)	۲	۳۴	۱۸
ERECT.MED.-HEAVY PR-01-003 to Closed Blowdown	۱۰	(۲۷ ۲۸ ۳۱ ۳۳)	۲	۳۶	۱۹
MEDIUM-HEAVY STR-51-002 up to Intermediate Level	۱۱	(۵۵ ۵۸ ۶۲ ۶۵)	۴	۵۹	۴۷
MEDIUM-HEAVY STR. STR-51-004 up to First Level	۱۲	(۴۱ ۴۳ ۴۶ ۴۹)	۵و۴	۴۴	۳۸
MEDIUM-HEAVY STR.STR-51-005 up to First Level	۱۳	(۲۱ ۲۴ ۲۶ ۲۷)	۱۲ و ۵	۳۹	۱۸
MEDIUM-HEAVY STR-51-003 up to Intermediate Level	۱۴	(۴۱ ۴۳ ۴۶ ۴۹)	۵	۳۷	۲۶
MEDIUM-HEAVY STR. STR-51-006 up to TOP	۱۵	(۱۲ ۱۴ ۱۶ ۱۷)	۵	۲۱	۱۶
Arr.on SITE STEEL STRUCTURE CDU Unit 71.	۱۶	(۱۲ ۱۴ ۱۶ ۱۷)	۵	۲۹	۲۵
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-003 up to Intemed.Level	۱۷	(۴۱ ۴۳ ۴۶ ۴۹)	۶	۳۹	۴۰
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-005 up to First Level	۱۸	(۲۱ ۲۴ ۲۶ ۲۷)	۲ و ۳ و ۹	۵۵	۳۴
ERECT.MEDIUM-HEAVY STR. CDU Unit 01	۱۹	(۴۲۸ ۴۳۵ ۴۴۵ ۴۵۰)	۲ و ۷ و ۸	۹۷	۷۸
MEDIUM-HEAVY STR. STR-51-002 up to TOP	۲۰	(۱۲ ۱۴ ۱۶ ۱۷)	۱۳ و ۱۴ و ۱۵	۳۴	۱۴
ERECT.MEDIUM-HEAVY STR. CDU Unit 51	۲۱	(۱۲ ۱۴ ۱۷ ۱۸)	۱۱ و ۲۰	۱۲	۱۶
MEDIUM-HEAVY STR. STR-51-004 up to Top	۲۲	(۴۲ ۴۳ ۴۷ ۴۹)	۲۰ و ۱۳	۲۳	۴۵
MEDIUM-HEAVY STR-71-003 up to Intermediate Level	۲۳	(۴۲ ۴۴ ۴۷ ۴۹)	۱۶	۱۹	۲۱



ادامه جدول (۱)

نام فعالیت	کد فعالیت	مدت فعالیت	فعالیت‌های پیشنهادی	منابع مورد نیاز	
				$r_1$	$r_2$
MEDIUM-HEAVY STR. STR-71-002 up to First Level	۲۴	(۲۶ ۲۸ ۳۱ ۳۵)	۱۶	۳۴	۲۳
MEDIUM-HEAVY STR. STR-71-004 up to First Level	۲۵	(۴۰ ۴۳ ۴۷ ۴۹)	۲۴ و ۱۶	۲۳	۱۳
MEDIUM-HEAVY STR.STR-71-005 up to First Level	۲۶	(۲۰ ۲۳ ۲۶ ۲۹)	۲۵ و ۱۶	۲۷	۲۳
MEDIUM-HEAVY STR-71-002 up to Intemediate Level	۲۷	(۵۷ ۵۸ ۶۲ ۶۵)	۲۵	۴۳	۳۴
MEDIUM-HEAVY STR. STR-71-004 up to Top	۲۸	(۴۰ ۴۳ ۴۷ ۴۹)	۲۴	۲۳	۱۳
MEDIUM-HEAVY STR. STR-51-005 up to Top	۲۹	(۲۰ ۲۳ ۲۶ ۲۹)	۲۲ و ۲۰	۱۸	۱۲
ERECT.MEDIUM-HEAVY STRUCT.ST.CDU Unit 71	۳۰	(۴۸۰ ۴۹۰ ۵۲۰ ۵۲۵)	۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶	۱۲۰	۷۹
MEDIUM-HEAVY STR.STR-71-002 up to TOP	۳۱	(۱۲ ۱۴ ۱۷ ۱۸)	۳۰ و ۲۷	۲۳	۱۲
MEDIUM-HEAVY STR. STR-71-005 up to Top	۳۲	(۲۲ ۲۴ ۲۶ ۲۸)	۳۰ و ۲۸ و ۲۶	۳۶	۲۲
MEDIUM-HEAVY STR. STR-71-003 up to Top	۳۳	(۲۷ ۲۹ ۳۰ ۳۲)	۳۰ و ۲۳	۱۹	۲۱
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-003 up to Top	۳۴	(۲۷ ۲۹ ۳۰ ۳۲)	۱۹ و ۱۷	۲۱	۲۸
ERECT.MED.-HEAVY STR-01-004 up to Top	۳۵	(۴۰ ۴۳ ۴۷ ۴۹)	۱۹ و ۳	۶۵	۴۵
OTHER MEDIUM-HEAVY STR. U71 CDU-3	۳۶	(۲۳۳ ۲۳۷ ۲۴۵ ۲۴۷)	۳۰	۹۵	۷۶
پایان	۳۷	(۰۰۰۰)	۲۱ و ۲۸ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶	-	-

پانوشته‌ها

- 1 Resource-constrained Porject Scheduling Problem
- 2 Fortemps
- 3 Pan
- 4 Liao
- 5 Wang
- 6 bell
- 7 Triangle
- 8 Trapezodial
- 9 Weak Comparison rule
- 10 Strong Comparison rule
- 11 Project networks
- 12 Activity ° on ° node
- 13 Activity ° on ° arc
- 14 Arc
- 15 Finish to Start
- 16 Active set at time t
- 17 makespan
- 18 Kirkpatrick
- 19 Simulated Annealing
- 20 Combinatorial Optimization
- 21 priority rule
- 22 Serial Scheduling Generation Scheme
- 23 Parallel Scheduling Generation Scheme



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی