پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صص ۱۲۹-۱۵۴
نوع مقاله: پژوهشی

تسطیح منابع پروژه تحت شرایط فازی- تصادفی

فرنوش خالدیان[۱]، منصور مؤمنی[۲*]

۱. دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی، گرایش تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

چکیده

با توجه به نقش مهمی که منابع در موفقیت یا شکست پروژه‌ها بازی می‌کنند، در ۶۰ سال اخیر پژوهش‌های بسیاری در زمینه تسطیح منابع انجام گرفته است. نخستین پژوهش‌ها شرایط اجرای پروژه را قطعی در نظر گرفتند ولی پژوهش‌های بعدی به سمت غیرقطعی بودن شرایط پروژه سوق پیدا کردند. برخی از این پژوهش‌های غیرقطعی شرایط اجرای پروژه را تنها فازی و برخی آن را تنها تصادفی فرض کردند. پس از معرفی تئوری فازی-تصادفی پژوهش‌های مدیریت پروژه شرایط اجرای یک پروژه را فازی-تصادفی دانستند. بنابراین با توجه به جای خالی این رویکرد در تسطیح منابع، پژوهش کمی و توسعه‌ای پیش‌رو یک مدل تسطیح منابع فازی-تصادفی چند هدفه توسعه داد. در این پژوهش زمان انجام پروژه به‌صورت یک متغیر فازی-تصادفی در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل ارائه شده که در زمره مدل‌های NP-hard قرار می‌گیرد، توسط یک الگوریتم NSGA-II توسعه داده شده، در نرم افزار Matlab حل شد. این الگوریتم توسط دو الگوریتم دیگر یعنی الگوریتم کنترل و الگوریتم آماده‌ساز متغیر تصمیم و یک حافظه کنترل‌کننده، برای حل مشکل تنوع پروژه‌ها، توسعه داده شد. نوآوری این پژوهش در دو مورد قابل ذکر است، اول اینکه مدل تسطیح منابع چندهدفه به صورت فازی-تصادفی ارائه شد و مورد دوم اینکه برای حل آن الگورتیم NSGA-II توسعه داده شد. در پایان نیز تکرارپذیری، همگرایی، کارآیی و اعتبار الگوریتم پیشنهادی آزمایش، مورد بحث و تأیید قرار گرفت.

کلیدواژه‌ها: تسطیح منابع، فازی-تصادفی، الگورتیم NSGA-II توسعه داده شده

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: mmomeni@ut.ac.ir

۱. مقدمه

مدیریت پروژه در واقع روش استفاده مناسب از منابع در راستای اجرای درست و به هنگام یک پروژه است [۱]. پروژه در صورتی موفق است که به تمام اهداف تعیین شده دست پیدا کند [۲,۳]. نحوه استفاده از منابع نیز اثر زیادی بر اهداف تعیین شده از جمله زمان و هزینه پروژه و نقش حیاتی در موفقیت آن بازی می‌کند. یکی از روش‌های اثربخش برای بهینه‌سازی استفاده از منابع، تسطیح است. هدف کلاسیک مسئله تسطیح، کمینه‌سازی نوسانات استفاده از منابع است. علاوه بر این، مطلوبیت در این مسائل، ثابت نگه داشتن زمان از پیش تعیین شده برای تکمیل پروژه است. باید توجه داشت در تسطیح منابع تاریخ اتمام پروژه تغییر نمی‌کند بلکه پروژه باید تا قبل از تاریخ مقرر تحویل داده شود. این هدف از طریق مشخص کردن زمان شروع فعالیت‌ها باوجود محدودیت در پیش‌نیاز فعالیت‌ها و محدودیت زمان نهایی پروژه محقق می‌گردد [۴]. پژوهش‌های نخستین در زمینه تسطیح منابع، محیط انجام پروژه را قطعی فرض می‌کردند [۵]. درصورتی که تحقیقات بعدی قطعی بودن محیط پروژه‌ها را رد و سعی کردند با ارائه مدل‌هایی که شباهت بیشتری به واقعیت دارد، در رابطه با منابع و زمان‌بندی تصمیم‌گیری کنند. در بسیاری از این تحقیقات نشان داده شد، دنیای واقعی اجرای پروژه‌ها پر از عدم قطعیت است. برای مثال، در ساده‌ترین حالت امکان دارد که زمان یک فعالیت زودتر یا دیرتر از زمان برنامه‌ریزی شده آن به طول بینجامد. بنابراین در طی زمان توجه بیشتری به انجام تسطیح منابع تحت شرایط عدم قطعیت صورت گرفت. بنابراین، برخی پژوهش‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های حاکم بر پروژه، مسائل را یا فقط با رویکرد فازی و یا فقط با رویکرد تصادفی حل کردند [۶]. این در حالی است که شرایط پروژه–از نظر زمان و منابع– در عین دربرداشتن مفهوم امکان، مفهوم احتمال را نیز هم زمان در بر دارد و برای حل مسائل مربوط به برنامه‌ریزی پروژه باید به هر دو مفهوم در کنار یکدیگر توجه کرد. بنابراین در پژوهش پیش‌رو مسئله تسطیح منابع، با فرض فازی–تصادفی بودن زمان پایان هر فعالیت و کل پروژه مدل‌سازی می‌گردد. برای روشن‌تر شدن بحث عدم قطعیت در پروژه شرایطی را فرض کنید که به درستی مشخص نیست کارفرما چه زمانی از کیفیت ارائه پروژه احساس رضایت دارد و در نتیجه این رضایت اتمام آن را اعلام می‌کند (با توجه به کیفیتی که پیمانکار از اتمام پروژه ارائه می‌دهد). یا وقتی که یک بزرگراه احداث می‌شود و به بهره‌برداری می‌رسد ولی هنوز زیباسازی آن ادامه دارد، آیا پروژه به اتمام رسیده است یا خیر؟ به‌علاوه، برای به سرانجام رساندن پروژه‌های بیان شده در عین

اینکه زمان اتمام آن‌ها مبهم است، با سناریوهای گوناگون ریسک روبه‌رو شویم که هر کدام با احتمال خاصی رخ خواهند داد. در این شرایط است که با مفهوم فازی-تصادفی روبه‌رو هستیم. بنابراین استفاده رویکرد فازی-تصادفی برای برنامه‌ریزی پروژه دید وسیع‌تری به مدیران می‌بخشد و منجر به پیش‌بینی دقیق‌تر آینده خواهد شد. این امر منجر به کاهش هزینه‌ها و بالا بردن احتمال موفقیت پروژه‌ها خواهد شد.

۲. پیشینه پژوهش

از آنجایی که زمان‌بندی صحیح پروژه‌ها نقش مهمی در موفقیت آن‌ها بازی می‌کند و یکی از وظایف اصلی مدیریت پروژه است [۷]، روش‌های گوناگون برای زمان‌بندی پروژه به وجود آمد. از جمله آن‌ها می‌توان به روش مسیر بحرانی[۱] و روش برنامه ارزیابی و بازبینی[۲] اشاره کرد. روش مسیر بحرانی که از دهه ۱۹۵۰ به بعد برای زمان‌بندی بسیاری از پروژه‌های ساخت مورد استفاده قرار گرفت، نقصان‌هایی دارد. برای مثال، روش مذکور منابع را نامحدود فرض می‌کند. بنابراین تمرکز پژوهش‌های بسیاری روی مدیریت منابع قرار گرفت. چنین پژوهش‌هایی در دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول مربوط به هدف اصلیِ به حداقل رسانیدن طول زمان پروژه است، درصورتی که برای منابع پروژه محدودیت وجود دارد. این نوع نگرش تخصیص منابع نامیده می‌شود. رویکرد دوم که با عنوان تسطیح منابع شناخته می‌شود، فرض می‌کند منابع به میزان کافی وجود دارند ولی زمان پروژه محدود است. هدف تسطیح منابع کاهش نوسانات نقاط فراز و فرود استفاده از منابع بدون اینکه زمان پروژه طولانی‌تر شود است.

نخستین مدل‌ها یعنی پژوهش‌های قطعی تسطیح منابع از حدود ۶۰ سال پیش اجرایی شدند [۸]. تسطیح منابع قطعی با مدل‌هایی مثل برنامه‌ریزی خطی [۹]، برنامه‌ریزی عدد صحیح [۱۰]، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط [۱۱]، برنامه‌ریزی پویا [۱۲]، برنامه‌ریزی غیرخطی [۱۳]، برنامه‌ریزی کوادراتیک [۱۲] فرموله شده است. پژوهش‌ها رفته رفته به سمت عدم قطعیت میل پیدا کردند و قطعی بودن محیط پروژه‌ها را زیر سؤال بردند. پژوهش‌های عدم قطعی موجود عمدتاً بر روی عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها تمرکز دارد، برخی از این پژوهشگران از رویکرد فازی [۱۴،۱۵] و برخی نیز از رویکرد تصادفی [۶] در پژوهش خود بهره بردند. با مطرح شدن تئوری فازی-تصادفی توسط پژوهش [۱۶] در سال ۲۰۱۲، برخی پژوهش‌های مربوط به مدیریت پروژه شرایط اجرای پروژه‌ها را فازی-تصادفی

دانستند. از جمله می‌توان به پژوهش علی‌پور و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد؛ آن‌ها یک مدل فازی-تصادفی برای زمان‌بندی پروژه با تخصیص منابع طرح‌ریزی کردند که در آن زمان پروژه یک متغیر فازی-تصادفی در نظر گرفته شد [۱۷]. به علاوه گنگ[۳] و همکاران (۲۰۱۳)، با به‌کارگیری رویکرد فازی-تصادفی منابع را میان چندین پروژه با هدف کمینه‌سازی زمان پروژه تخصیص دادند [۱۸]. فان و هانگ[۴] (۲۰۱۷) نیز یک مدل بهینه‌سازی فازی-تصادفی جهت تخصیص منابع ارائه دادند [۱۹]. این پژوهش‌ها نشان دادند، رویکرد فازی تصادفی دید کامل‌تری به مدیران می‌بخشد و منجر به اخذ تصمیمات درست خواهد شد. در میان تحقیقات مربوط به تسطیح منابع، جای پروژه‌ای که با رویکرد فازی-تصادفی به زمان‌بندی پروژه بپردازد، خالی است. بنابراین در این پژوهش یک مدل فازی-تصادفی چندهدفه جهت تسطیح منابع ارائه خواهد شد.

در رابطه با حل مدل تسطیح باید اشاره کرد، پژوهش‌های پیشین نشان دادند، مدل تسطیح به ویژه در توابع چندگانه از نوع NP-hard هستند [۲۰]. برای مثال ساوین[۵] و همکاران (۱۹۹۶) از الگوریتم ژنتیک با در استفاده از تابع هدف کمینه‌سازی به تسطیح منابع پرداختند [۲۱]. سان و سکیبنیوسکی[۶] (۱۹۹۹) یک مدل تسطیح منابع ترکیبی ارائه دادند که در آن یک بهینه‌ساز محلی را با یک شبیه‌ساز تبریدی برای کمینه‌سازی مقدار مربعات مصرف مواد روزانه ترکیب کردند [۲۲]. دوبی[۷] و همکاران (۲۰۱۱) الگوریتم یک ژنتیک توسعه دادند که اجازه جدا شدن فعالیت‌ها را می‌داد و هدف آن کمینه‌سازی مجموع انحرافات مطلق مصرف روزانه منابع از میانگین مصرف روزانه منابع بود [۲۳]. زهرایی و تاکالون[۸] (۲۰۰۹) و آشوری و تاکالون (۲۰۱۲) با استفاده از تئوری فازی الگوریتم NSGA-II و الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل مسئله چند هدفه فازی بهینه‌سازی زمان و هزینه منابع ارائه دادند [۲۴]. الی و دموآلمستر[۹] (۲۰۱۶) الگوریتم ژنتیک را برای تسطیح منابع استوار توسعه دادند [۲۵]. لی[۱۰] و همکاران (۲۰۱۵) برای برنامه‌ریزی نوعی استراتژی به‌کار گرفتند که براساس آن فعالیت‌ها به‌صورت پویا در هنگام اجرا برنامه‌ریزی شوند [۲۶]. لی و همکاران (۲۰۱۹) منابع را با هدف به حداقل رساندن تأخیرات زمانی تسطیح کردند و دو الگوریتم متاهیورستیک بت و تکاملی را برای تسطیح منابع طراحی کردند [۶]. در پژوهش حاضر نیز با الگوریتم NSGA-II توسعه یافته مسئله تسطیح ارائه شده حل خواهد شد. الگوریتم به نحوی توسعه داده خواهد شد که در پروژه‌های متفاوت، تنها با استفاده از ماتریس‌های ورودی متفاوت قابل اجرا و به‌کارگیری باشد.

۳. روش پژوهش

۱،۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش کمی پیش‌رو، پژوهشی توسعه‌ای است که به دنبال توسعه مدل بهینه‌سازی فازی-تصادفی برای برنامه‌ریزی (تسطیح) منابع است. به‌علاوه، از آنجایی که پژوهش حاضر به دنبال شناسایی متغیرها از جمله عدم‌اطمینان‌ها، زمان، منابع و تشریح و تبیین آن‌ها در وضعیت واقعی پروژه است، جزء پژوهش‌های توصیفی-تحلیلی به شمار می‌رود. پژوهش پیش‌رو فاقد جامعه و نمونه آماری می‌باشند و مراحل این پژوهش روی یک مورد مطالعاتی که پروژه ساخت عرشه فلزی پل بزرگ راه‌آهن باسمنج است، انجام خواهد گرفت. در این پژوهش به منظور گردآوری داده‌ها از دو روش کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شده است. با حضور محقق در محل دفتر پروژه ومصاحبه با مدیران پروژه اطلاعات مورد نیاز مربوط به پروژه دریافت شد. پس از دریافت داده‌ها به منظور استفاده کارآتر، برنامه زمان‌بندی و منابع پروژه وارد نرم افزار Msp شد. سپس مدل تسطیح منابع فازی-تصادفی ارائه و با استفاده از NSGA-II توسعه یافته در نرم‌افزار MATLAB پژوهش حل شد.

۲،۳. الگوریتم NSGA-II

الگوریتم NSGA-II یک الگوریتم جمعیت محور و چندمرحله‌ای است که برای بهینه‌سازی چند هدفه با دو مفهوم غلبه و فاصله ازدحامی استفاده می‌شود. برای یک فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه ایده آل، گام‌های زیر بایستی طی شود:

۱- چندین جواب بهینه مؤثر، با دامنه گسترده‌ای از مقادیر برای اهداف پیدا شود.

۲- یکی از جواب‌های بهینه با استفاده از اطلاعات سطح بالاتر انتخاب شود.

جواب‌های مؤثر مجموعه‌ای نقاط جواب است که هیچ کدام بر همدیگر غلبه نمی‌کنند. جواب x_1 بر جواب x_2 غالب است اگر: ۱) جواب x_1 در هیچ یک از اهداف بدتر از x_2 نباشد. ۲) جواب x_1 حداقل در یک هدف بهتر از جواب x_2 نباشد.

فاصله ازدحامی برای به‌دست آوردن جبهه جواب یکنواخت‌تر نسبت به سایر الگوریتم‌ها و تخمین نقاط حول جواب‌ها استفاده می‌شود. برای محاسبه فاصله ازدحامی برای پاسخ i به شکل روابط (۱) و (۲) زیر عمل می‌شود:

$$d_i^j = \frac{\left|f_j^{i+۱} - f_j^{i-۱}\right|}{f_j^{max} - f_j^{min}} \quad (۱)$$

$$d_i = \sum_{j=۱}^{m} d_i^j \quad (۲)$$

$f_j^{i+۱}$ مقدار تابع هدف jام در جواب i+۱، $f_j^{i-۱}$ مقدار تابع هدف jام در جواب i-۱، ، f_j^{max} بیشترین مقدار تابع هدف در هدف jام و f_j^{min} کمترین مقدار تابع هدف در هدف jام، d_i^j فاصله ازدحامی جواب iام در هدف jام، d_i فاصله ازدحامی جواب iام در تمام اهداف i است[۲۷].

۳،۳. ارائه و معرفی نحوه حل مدل تسطیح منابع با رویکرد فازی- تصادفی

در این مرحله با در نظر گرفتن مهلت تحویل پروژه به صورت فازی–تصادفی مدل تسطیح منابع ارائه شد. مفروضات، متغیرها، پارامترها و اندیس‌های مدل به شرح زیر هستند:

مفروضات: ۱) در این مدل امکان افزایش زمان پروژه طی فرآیند تسطیح منابع وجود ندارد. ۲) روابط پیش‌نیازی شروع–شروع و پایان–شروع بین فعالیت‌ها فرض خواهد شد. ۳) روابطی که از پیش‌نیاز شروع- شروع ناشی می‌شوند، کمترین میزان تأخیر بین دو فعالیت را دارند. ۴) فعالیت‌هایی که دارای روابط پیش‌نیازی پایان–شروع هستند، در زودترین زمان ممکن شروع شوند و شناوری میان آن‌ها تا حد امکان کم گردد. ۵) اولویت شروع با فعالیتی است که کمترین زمان را دارد. در نظر داشتن رویکرد فازی–تصادفی برای تاریخ تحویل منجر به فازی–تصادفی فرض شدن زمان هر فعالیت می‌شود.

متغیرها: k مصرف منبع ، k_i میزان مصرف منبع در یک روز خاص، S زمان شروع فعالیت، F زمان اتمام فعالیت، δ تأخیرات زمانی بین فعالیت‌های پروژه، Ls دیرترین زمان شروع فعالیت، Es زودترین زمان شروع فعالیت، r میزان مصرف نوع منبع، $\tilde{s}_{h+۱}$ آخرین روز پروژه، $\tilde{s}_j$ زمان شروع فعالیت j به صورت فازی–تصادفی، $\tilde{f}_j$ زمان پایان فعالیت j به صورت فازی–تصادفی

پارامترها: C هزینه منبع، u_k مجموع منابع مورد مصرف، R کل منابع استخدام شده (منبع در دسترس)، $\tilde{D}$ زمان تحویل پروژه (فازی–تصادفی)، ∂ و β احتمال وقوع، δ تأخیرات زمانی

اندیس‌ها: i اندیس روزهای پروژه، j اندیس فعالیت‌های پروژه، a اندیس منابع پروژه

روابط (۳) تا (۱۴) مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه تسطیح منابع با رویکرد فازی-تصادفی را نشان می‌دهند. روابط (۳) و (۴) دو تابع هدف به‌کار گرفته شده در مدل را در بردارند. رابطه (۳) نشان دهنده حداقل‌سازی میزان مصرف مجموع منابع در دو روز متوالی است. رابطه (۴) میزان بیکاری منابع را به حداقل می‌رساند. رابطه (۵) میزان مصرف منابع و رابطه (۶) مجموع مصرف منابع را نشان می‌دهد. طبق رابطه (۷) میزان مصرف منابع نمی‌تواند بیشتر از مقدار مشخص R باشد، یعنی میزان در دسترس هر منبع. با توجه به روابط تعریف شده میان فعالیت‌های پروژه برای روابط شروع شروع که مقداری تأخیرات زمانی نیاز دارند، میزان این تأخیرات براساس رابطه (۸) باید به کمترین مقدار ممکن برسد. به علاوه، با توجه به شرایط تورمی حاکم بر پروژه، بهتر است حتی زمانی که فعالیت‌ها دارای شناوری هستند، در زودترین زمان ممکن رخ دهند و از زمان دیرترین زمان شروع به نفع زودترین زمان شروع تا حد امکان فاصله گیرند. از این بابت روابط (۹) و (۱۰) متضمن زودترین شروع فعالیت‌ها در میان فعالیت‌های هستند که روابط پایان شروع دارند. روابط (۱۱) و (۱۲) نیز زمان‌های زودترین شروع و زودترین پایان را تعریف می‌کنند. رابطه (۱۳) نشان می‌دهد، پروژه نمی‌تواند دیرتر از زمان $\tilde{D}$ به پایان برسد. با توجه به اینکه زمان پروژه فازی-تصادفی فرض شده است، تمامی متغیرهای مربوط به زمان پروژه یعنی زمان پایان و شروع فعالیت‌ها و زمان نهایی پروژه و زودترین و دیرترین زمان شروع یک فعالیت در مدل مذکور فازی-تصادفی در نظر گرفته خواهد شد. به علاوه، با توجه به ارتباط نحوه مصرف منابع با ترتیب اجرا شدن فعالیت‌ها u_k به صورت یک متغیر غیرقطعی مطرح خواهد شد.

$$minz = \sum_{i=1}^{\tilde{s}_{h+1}} (k_i + k_{i+1})^2 \tag{۳}$$

$$minz = \sum_{a=1}^{n} \sum_{i=1}^{\tilde{s}_{h+1}} C_a |R_a - r_i^a| \tag{۴}$$

$$pr(k_i = \sum_{a=1}^{n} \sum_{i=1}^{\tilde{s}_{h+1}} r_{ai}) \geq \partial \tag{۵}$$

$$pr\left(u_k = \sum_{i=1}^{\tilde{s}_{h+1}} k_i\right) \geq \partial \tag{۶}$$

$u_{aj} \leq R_a$ (۷)

$\tilde{s}_j - \tilde{s}_{j+1} \geq \delta_{nm}$ (۸)

$pr(\widetilde{Es}_j \leq \tilde{s}_j)\beta$ (۹)

$pr(\tilde{s}_j \leq \widetilde{Ls}_j - \widetilde{Es}_j)\beta$ (۱۰)

$pr(\widetilde{Es}_j \leq \tilde{f}_{j-1})\beta$ (۱۱)

$pr(\widetilde{Ls}_j + \widetilde{D}_j \leq \tilde{s}_{j+1})\beta$ (۱۲)

$pr(\tilde{s}_{h+1} \leq \widetilde{D})\beta$ (۱۳)

$ALL>=0$ (۱۴)

در رابطه با مدل نهایی ارائه شده باید گفت که توابع هدف مدل ادبیات پژوهش به صورت قطعی به کار گرفته شده‌اند. از جمله می‌توان به پژوهش [۲۸] اشاره کرد. در این پژوهش با بررسی ادبیات پژوهش و همخوانی این توابع با شرایط پروژه مورد مطالعه به صورت چند هدفه و با رویکرد فازی-تصادفی ارائه شده‌اند. محدودیت شماره ۶ با در نظر گرفتن [۶] به مدل اضافه شد، این محدودیت به صورت یک محدودیت تصادفی در پژوهش سابق به کار گرفته شده بود. سایر محدودیت‌های این مسئله نیز با توجه به بررسی شرایط پروژه مورد مطالعه برای اولین بار به صورت فازی-تصادفی ارائه شده‌اند.

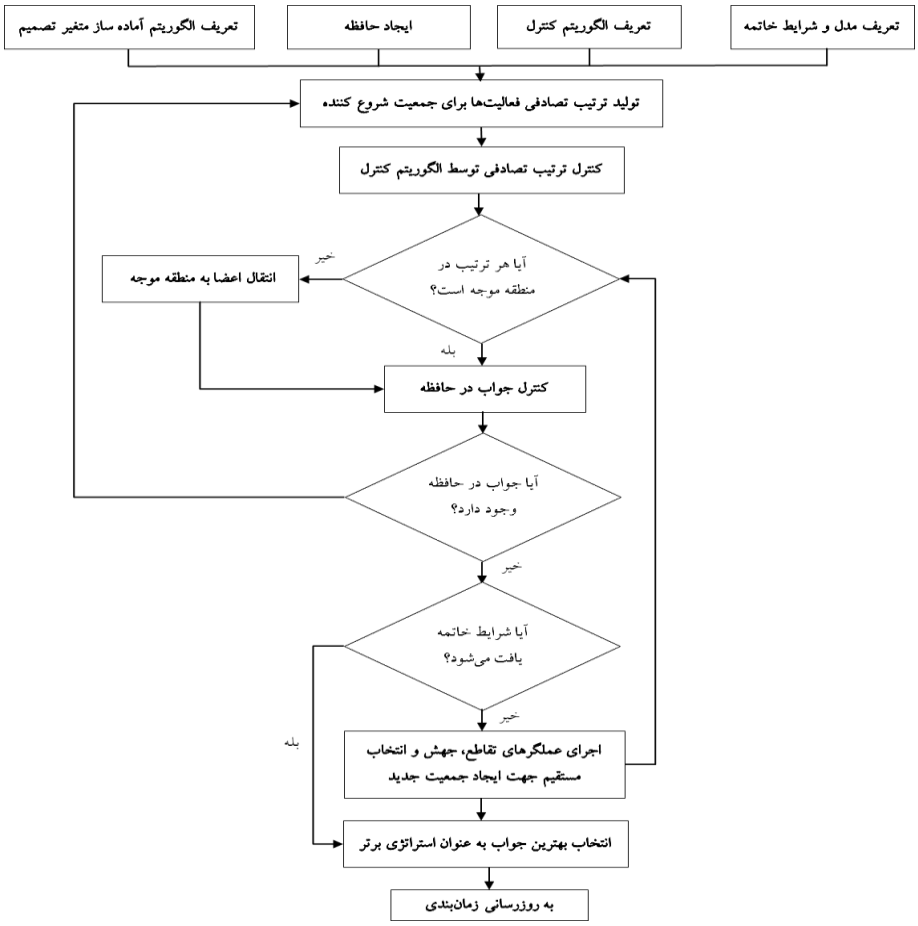
۴. یافته‌های پژوهش

۱,۴. معرفی پروژه مورد مطالعه

مراحل پژوهش روی پروژه ساخت عرشه فلزی پل بزرگ راه‌آهن باسمنج در آذربایجان شرقی انجام گرفته است. عرشه روی ۲۰ دهانه که با فاصله ۵۰ متری از یکدیگر قرار دارند، در حال انجام است. برای هر دهانه ۸ قطعه طراحی و ساخته و پس از حمل مونتاژ و بر روی آن قرار گرفت. پیمانکار پروژه شرکت فولاد آزمون سپیدان است. عرشه طی ۲۰۰ فعالیت که شامل مراحل ساخت، رنگ‌آمیزی، بارگیری، مونتاژ و پیش‌رانی است، انجام می‌گیرد.

۲,۴. تسطیح منابع

شکل (۱) نمودار مراحل تشکیل الگوریتم NSGA-II توسعه یافته را نشان می‌دهد. بر این اساس به عنوان نخستین گام ورودی‌های الگوریتم تعریف و سپس شبه کدهای به کاررفته و مراحل آن ارائه می‌شود.



شکل ۱: مراحل اجرای الگوریتم NSGA-II توسعه‌یافته

طراحی ورودی‌های الگوریتم

زمان فعالیت‌ها و زمان نهایی (تحویل) پروژه: زمان اجرای پروژه حتی اگر ریسک بحرانی اتفاق نیفتد، سه سناریوی اجرای خوش‌بینانه، بدبینانه و محتمل (به عنوان متغیرهای زبانی فازی) نسبت به برنامه مبنا وجود دارد. بنابراین، بر اساس این سه سناریو و با نظرخواهی از مدیران زمان فازی هر فعالیت و البته زمان پایان پروژه به صورت فازی بدون در نظر گرفتن منابع تخمین زده شد. حال آنکه اگر ریسکی در پروژه اتفاق بیفتد، احتمال اینکه

زمان فعالیت‌ها و کل پروژه (زمان تخمین زده شده فازی) تحت تأثیر قرار بگیرند، وجود دارد. بنابراین سناریوهای فازی را در یک بازه نرمال تا ۳۰ درصد قابل تغییر دانستیم. زمان اجرای فازی هر فعالیت به صورت یک ماتریس دو سطری که سطر اول آن شماره فعالیت و سطر دوم زمان آن فعالیت است، به نام ماتریس d وارد الگوریتم می‌شود. بر اساس روابط پیش‌نیازی طراحی شده در هر سناریو زمان تحویل D که زمانی فازی-تصادفی است، تخمین زده شده و وارد الگوریتم می‌شود. براساس نظرات خبرگان پروژه زمان D تنها می‌تواند تا ۳۰ درصد دیرتر از زمان اعلام شده طبق برنامه مبنای قطعی دریافت شده از کارخانه، تحویل داده شود.

روابط پیش‌نیازی: پس از دریافت برنامه مبنای پروژه و مکتوب شدن آن توسط نرم-افزار Msp، روابط پیش‌نیازی با استفاده از برنامه مبنا پروژه استخراج گردید. روابط پیش‌نیازی باید به‌صورت یک ماتریس وارد الگوریتم شوند. در این پژوهش، پیش‌نیازها به صورت یک ماتریس ۲۰۰ در ۲۰۰ بالامثلثی به شکل زیر طراحی شدند. در ماتریس b هر سطر و ستون نشان دهنده فعالیت‌های پروژه است که سطرهای ماتریس پیش‌نیاز هر ستون از ماتریس را نشان می‌دهد. برای مثال، آرایه b(۱,۲) برابر با ۱ است، به‌معنای این است که فعالیت ۱ پیش‌نیاز فعالیت ۲ است.

$$b=\begin{pmatrix} - & ۱ & ۰ & & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & - & ۱ & \cdots & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰ & - & & ۰ & ۰ & ۰ \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ ۰ & ۰ & ۰ & & - & ۱ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۰ & \cdots & ۰ & - & ۱ \\ ۰ & ۰ & ۰ & & ۰ & ۰ & - \end{pmatrix}$$

منابع مورد نیاز: در این پژوهش یک منبع برای تسطیح در نظر گرفته شده است، جدول (۱) فعالیت‌ها و منبع به کارگرفته شده در آن‌ها را برای دهانه اول پل نشان می‌دهد. وضعیت استفاده از منابع برای دهانه‌های بعدی نیز به همین منوال است و جهت جلوگیری از اطناب از درج تمامی دهانه‌ها صرف نظر شد. منابع هر فعالیت توسط ماتریس u وارد الگوریتم شدند.

جدول ۱: میزان استفاده از منابع

شماره فعالیت	شرح فعالیت	میزان منبع
۱	تخلیه ورق خام	۵
۲	برش‌کاری و سایز زدن	۱۲
۳	سوراخ کاری	۹
۴	مونتاژ و ساخت تیر جعبه	۵
۵	جوشکاری اولیه	۷
۶	جوشکاری کامل	۱۳
۷	رنگ‌آمیزی قطعات دهانه اول	۷
۸	حمل قطعات دهانه اول	۱۸
۹	مونتاژ قطعات دهانه اول	۱۸
۱۰	پیش‌رانی	۱۸

حداکثر منبع در دسترس: بیشترین مقداری از منبع را که در یک روز قابل استفاده است، نشان می‌دهد. حداکثر منبعی که برای پروژه استخدام شده‌اند، در این پژوهش R=۵۰ است.

ریسک‌ها: براساس چهارمین ویرایش راهنمای جامع دانش مدیریت پروژه ریسک‌های پروژه مورد مطالعه دسته‌بندی و مهم‌ترین آن‌ها از طریق نظر خواهی از خبرگان شناسایی شد. بر این اساس ریسک "عدم تخصیص به موقع منابع مالی" بحرانی‌ترین ریسک پروژه است که بر اساس نظر مدیران و در صورت بروز زمان تحویل پیشنهادی را تا ۳۰ درصد تغییر می‌دهد.

تأخیرات زمانی: میزان تأخیرات زمانی برای هر دو فعالیتی که به صورت موازی انجام شوند، به صورت یک ماتریس بالا مثلثی مانند ماتریس b طراحی می‌شود. با تفاوت اینکه به جای اینکه عدد ۱ برای فعالیت‌های مرتبط در درایه مربوطه قرار بگیرد، زمان واقعی این تأخیرات قرار خواهد گرفت. ماتریس تأخیرات زمانی δ نامیده شد.

تعداد کل فعالیت‌ها: این عدد شمارنده کلی فعالیت‌ها را نشان می‌دهد (O=۲۰۰).

شرط خاتمه: ۱) همگرا شدن توابع هدف در هر جمعیت. ۲) اجرای حداکثر تکرارها MaxIt=۱۰۰.

اجرای الگوریتم NSGA-II توسعه یافته

از آنجایی‌که ماهیت پروژه‌ها و نحوه زمان‌بندی که از پروژه‌ای به پروژه دیگر متنوع

است، برای تولید جمعیت هر نسل از دو الگوریتم دیگر یعنی الگوریتم کنترل و آماده‌ساز متغیر تصمیم که در پژوهش پیش‌رو طراحی شد و البته از یک حافظه برای تنوع بخشیدن به جواب‌ها، کمک گرفته شد. در الگوریتم NSGA-II توسعه یافته برای تولید هر نسل از جمعیت به جای تولید مستقیم متغیرهای تصمیم، ابتدا ترتیب فعالیت‌ها در برداری به نام rp تولید شد. متغیرهای تصمیم پژوهش پیش‌رو، پس از حرکت rp در الگوریتم کنترل و چک شدن جواب‌های کنترل در حافظه طراحی شده و در نهایت عبور این جواب‌ها از الگوریتم آماده‌ساز متغیر تصمیم، طراحی خواهند شد. متغیرهای تصمیم این پژوهش مقدار مصرف منابع طی هر روز است. بنابراین، برای تولید نسل شروع کننده که تعداد جمعیت آن به صورت pop=50 تعریف شد، برای هر عضو از جمعیت یک ترتیب تصادفی rp از فعالیت‌ها به صورت یک بردار که اعداد آن ما بین یک تا O است، تولید شد. از آنجایی که هر تولید تصادفی حتماً منجر به یک سناریوی قابل اجرا نمی‌شود (چراکه در پروژه عوامل بسیاری بر نحوه چینش ترتیب فعالیت‌ها اثر دارد. برای مثال پیش‌نیاز هر فعالیت، طول زمان هر فعالیت، میزان تأخیرات زمانی بین فعالیت‌ها و هزینه‌ای که از ترتیب‌های زمانی مختلف ایجاد می‌شود.) باید آن‌ها را با یک پردازش اساسی تبدیل به سناریوهای قابل اجرایی که تمام محدودیت‌های مسئله را رعایت می‌کنند، کرد. اضافه کردن این قابلیت به الگوریتم NSGA-II سنتی، آن را تبدیل به NSGA-II توسعه یافته کرده که با استفاده از ورودی‌های متفاوت مربوط به پروژه‌های متفاوت می‌توان بدون دستکاری الگوریتم میزان توابع هدف را تخمین و بهترین سناریوهای زمان‌بندی را شناسایی کرد. پس از تولید ترتیب تصادفی فعالیت‌ها به الگوریتم کنترل وارد شدند. الگوریتم کنترل پس از تولید هر بردار جدید از ترتیب فعالیت‌ها جدا از اینکه در چه مرحله‌ای تولید شده باشند (مرحله آماده‌سازی یا مرحله تقاطع یا جهش) یکبار باید به‌کار گرفته شود. با این کار چنانچه ترتیب ارائه شده خارج از محدودیت‌های پروژه مورد نظر باشد، آن را شناسایی و ترتیب‌ها را جابه‌جا می‌سازد. به بیان دیگر الگوریتم کنترل هر ترتیب را تبدیل به کدی قابل اجرا از یک سناریو از یک پروژه مورد نظر در واقعیت می‌سازد. شبه کد الگوریتم کنترل به شکل زیر است:

الگوریتم کنترل: هر عضو از جمعیت را تبدیل به یک کد از یک سناریوی قابل اجرا می‌کند.
ورودی‌ها: O،rp ،b
خروجی: یک بردار شامل کد سناریوی قابل اجرا در واقعیت h

$h = \vec{\cdot}$
rp = ۱ را پیدا کن و جایگاه آن را در a قرار بده
$rp_a \leftarrow rp_۱$
و $rp_۱ = ۱$
و $h_۱ = ۱$
شروع حلقه برای i (i=2:O)
t=0
تا زمانیکه t=1 شود ادامه بده
اگر rp_i فقط یک فعالیت پیش‌نیازی داشت و یا پیش‌نیازی نداشت
rp_i را در ماتریس b پیدا کن
*اگر $b(:,rp_i)$ در بردار h تا کنون قرار داشت و یا پیش‌نیازی نداشت
$rp_i = h_i$
و t=1
در غیر این‌صورت $rp_{i+۱}$ را در b چک کن
$b(:,rp_{i+۱})$ در بردار h تا کنون قرار داشت
ابتدا جای rp_i و $rp_{i+۱}$ را عوض کن
و $rp_i = h_i$
و t=1
انتهای نزدیک‌ترین اگر
در غیراین صورت
تمام پیش‌نیازهای باقیمانده rp_i را پیدا کن
پیشنیازها و خود rp_i را در rp مرتب کن مانند * ادامه بده
انتهای اگر
انتهای تازمانیکه
انتهای حلقه برای

امکان دارد پس از کنترل هر عضو و تبدیل آن به عضوی که در فضای موجه قرار دارد، این عضو تبدیل به جوابی شود که قبل‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین یک حافظه

طراحی شد که تمام جواب‌ها چه در مرحله آماده‌سازی و چه در مراحل تولید جمعیت توسط تقاطع و جهش را در خود نگه دارد. چنانچه یک عضو پس از کنترل در این حافظه قرار داشت، از آن صرف نظر کرده و الگوریتم مجدداً اجرا می‌شود تا جایی که جواب خارج از حافظه باشد و مراحل بعدی اجرا شوند. سپس باید ورودی‌های توابع هدف را که همان متغیرهای تصمیم هستند، آماده‌سازی کرد. برای این کار از الگوریتم آماده‌سازی متغیر تصمیم استفاده شد. این الگوریتم برای هر عضو قابل اجرا چه در مرحله آماده‌سازی و چه در مراحل تقاطع و جهش به‌کار گرفته می‌شود. شبه کد الگوریتم آماده‌سازی متغیر تصمیم به شکل زیر است:

الگوریتم آماده‌ساز متغیر تصمیم: متغیرهای تصمیم هر سناریوی قابل اجرا را محاسبه می‌کند تا این متغیرها وارد توابع هدف شوند.

ورودی‌ها: h، d، δ، u، R، D و O

خروجی: متغیرهای تصمیم الگوریتم مصرف منابع در هر روز K و کد شکسته شده زمان‌بندی فعالیت‌ها A (به روز رسانی زمان‌بندی)

$K = \vec{\cdot}$

$A = [\cdot]$

شروع حلقه برای j (j=1:O)

h_j را در سطر اول u پیدا کن و شماره ستون را به عنوان a نگه‌دار

h_j را در سطر اول d پیدا کن و شماره ستون را به عنوان c نگه‌دار

براساس δ تأخیر زمانی میان h_j و فعالیت‌ها را در e نگهدار

شروع حلقه برای i (i=1:ceil(c)-1)

اگر تا i مورد بررسی براساس ماتریس A تا کنون تأخیر زمانی میان h_j و فعالیت‌ها محقق شده باشد

آنگاه e

در غیر این صورت e=0

انتهای اگر

اگر $K_{(1,i+e)} + u_{(2,a)} \leq$ R

$K_{(1,i+e)} = R_{(1,i+e)} + u_{(2,a)}$

$A_{(j,i+e)=h_j}$

در غیر اینصورت

اولین جایی را پیدا کن که $K + u_{(۲,a)} \leq \mathrm{R}$ باشد و آن را l نام گذاری کن و

$K_{(۱,l)} = K_{(۱,l)} + u_{(۲,a)}$

$A_{(j,l)=h_j}$

انتهای اگر

انتهای نزدیک‌ترین حلقه برای

شروع حلقه برای i (i= ceil(c):ceil(c))

اولین جایی را پیدا کن که $K + u_{(۲,a)} * (u_{(۲,a)} - \mathrm{floor}(u_{(۲,a)})) \leq \mathrm{R}$ باشد و آن را l نام گذاری کن و

$K_{(۱,l)} = K_{(۱,l)} + u_{(۲,a)} * (u_{(۲,a)} - \mathrm{floor}(u_{(۲,a)}))$

$A_{(j,l)=h_j}$

انتهای نزدیک‌ترین حلقه برای

اگر *size(A,2)>1.3*D*

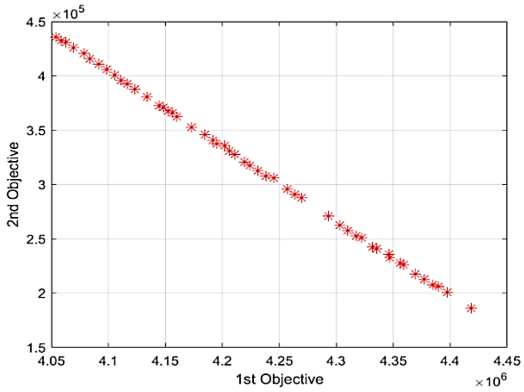
j=j-1

انتهای اگر

انتهای حلقه برای

الگوریتم آماده‌ساز متغیر تصمیم در حین در نظر گرفتن تأخیرات زمانی، میزان مصرف منابع در طول روز را مشخص می‌کند. از آنجایی که الگوریتم برای اجرای هر فعالیت از اولین روز شروع به بررسی می‌کند، هر فعالیت در زودترین زمان ممکن اجرا و به علاوه تأخیرات زمانی به حداقل ممکن خواهد رسید. در این الگوریتم امکان شکست فعالیت‌ها البته برای فعالیت‌هایی که امکان شکست در آن‌ها وجود دارد، در نظر گرفته شده است. پس از اینکه متغیرهای تصمیم مسئله مشخص شدند، میزان آن‌ها در تابع هدف قابل اندازه‌گیری خواهد بود و میزان هر دو تابع هدف برای هر عضو از جمعیت به دست خواهد آمد. برای هر نسل ۰/۷ جمعیت قبلی برای عملگر تقاطع و ۰/۴ برای جهش انتخاب شدند. در عملگر تقاطع برای تولید هر دو عضو جدید در جمعیت جدید دو عضو از جمعیت قبلی به عنوان والدین به تصادف انتخاب شدند و قسمتی از ژنوم هر کدام انتخاب و با دیگری تلفیق شد و دو عضو جدید توسط ژنوم‌های والدین به این ترتیب معرفی شدند. در پژوهش فعلی عملگر تقاطع روی ترتیب تصادفی فعالیت‌ها یعنی ماتریس rp و نه متغیرهای تصمیم صورت گرفت. پس از تشکیل rpهای جدید هر کدام وارد الگوریتم کنترل و الگوریتم آماده‌ساز متغیر تصمیم شدند

و متغیرهای تصمیم جدید تولید شدند. در رابطه با جهش نیز برای تولید هر عضو جدید یک عضو از جمعیت قبلی انتخاب شد و ترتیب تصادفی فعالیت‌های آن به صورت کاملاً تصادفی به هم ریخته شد، تا با ورود آن به الگوریتم کنترل و آماده‌ساز متغیر تصمیم، متغیرهای تصمیم جدید شناسایی و الگورتیم ادامه پیدا کند. گفتنی است، هر کدام از این اعضا یک‌بار در حافظه پایش شدند تا در آن موجود نباشد. درنهایت پس از ادغام جمعیت حاصل از تقاطع و جهش و جمعیت قبلی و مرتب‌سازی آن‌ها با استفاده از دو مفهوم غلبه و فاصله ازدحامی [۲۷] اعضای جمعیت جدید انتخاب شدند تا درصورتی که شرط توقف را رعایت نمی‌کنند، وارد مرحله بعد شوند. در پایان اجرای الگوریتم، مجموعه‌ای از جواب‌ها که در جبهه یک قرار گرفته‌اند و توسط هیچ جوابی مغلوب نشده‌اند، به دست آمد. شکل (۲) این مجموعه جواب را براساس دو تابع هدف ذکر شده نشان می‌دهد.

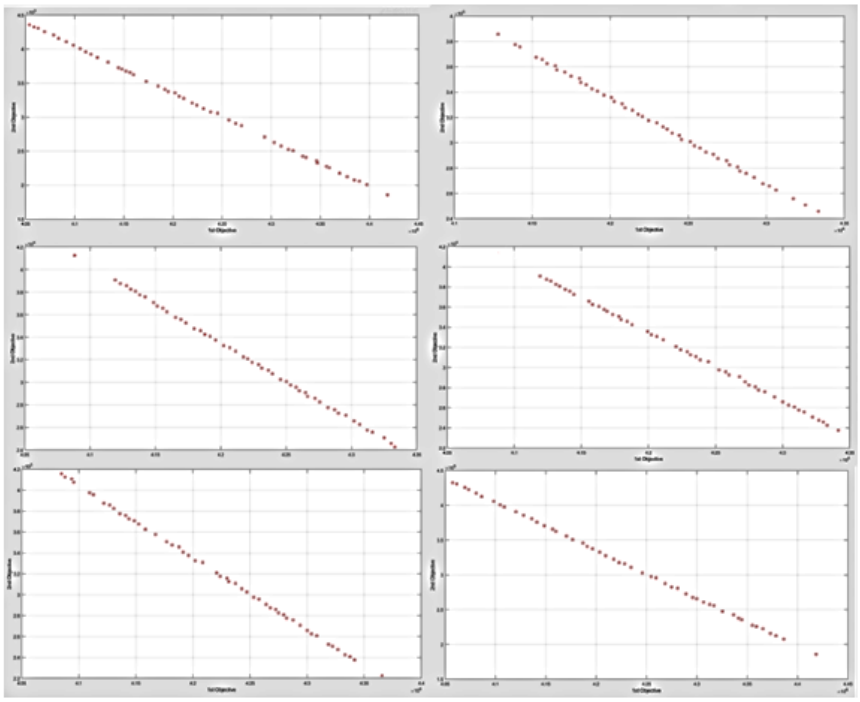


شکل ۲. مجموعه جواب‌های جبهه اول خارج شده از الگوریتم NSGA-II توسعه‌یافته

پس از بدست آمدن جواب‌های نهایی الگوریتم NSGA-II توسعه یافته که شرایط خاتمه را رعایت کردند، جواب‌ها با قید نتایج توابع هدف در هر سناریو به مدیریت ارائه و براساس نظر آن‌ها سناریوی مورد نظر انتخاب شد (در این مورد مدیران سناریویی را ترجیح دادند که در میان سایر جواب‌ها تابع هدف دوم را به کمترین مقدار خود تقلیل داده باشد). پس از آن توسط ماتریس A که در الگوریتم آماده‌ساز متغیر تصمیم تشکیل شد، سناریوها را به‌-صورت کدشکنی شده تحویل مدیریت داده می‌شوند. در واقع با استفاده از این ماتریس هر عضو از جمعیت به‌صورت یک زمان‌بندی قابل فهم ارائه می‌شود.

بررسی آزمایش‌های الگوریتم فراابتکاری ارائه شده

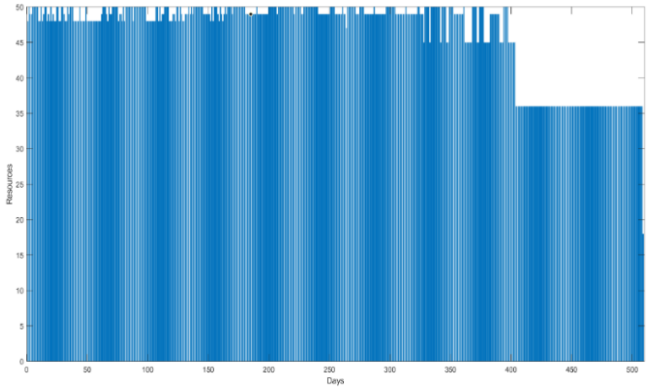
الف) آزمایش تکرارپذیری: از آنجایی که در الگوریتم‌های فراابتکاری جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، ممکن است نتایج هر بار اجرا متفاوت باشد. بنابراین از برخی آزمایش‌ها برای سنجیدن وضعیت پایداری جواب استفاده می‌شود. مهم‌ترین این روش‌ها آزمایش تکرارپذیری است. برای انجام تست تکرارپذیری، الگوریتم با جمعیت اولیه و تعداد تکرار یکسان چندین بار اجرا می‌شود. در صورتی که الگوریتم به درستی تنظیم شده باشد، جواب‌های یکسان تولید می‌شود. نیازی نیست جواب‌های به دست آمده ۱۰۰ درصد یکی باشند بلکه در صورتی که ۷۰ درصد مشابه باشند، جواب مورد نظر قابل قبول است [۲۹]. بنابراین، الگوریتم ارائه شده با جمعیت اولیه ۵۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ عدد ۶ دفعه مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل شماره (۳) نشان داده شده است، تغییرات جبهه جواب‌ها در اجراهای متفاوت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند و البته به‌طور متوسط ۸۳ درصد همپوشانی برای الگوریتم تخمین زده شد، این مقدار دلالت بر تکرارپذیری الگوریتم دارد.



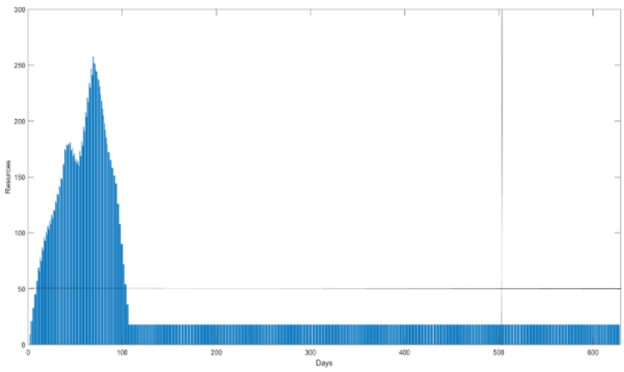
شکل ۳: نتایج از ۶ بار تست تکرارپذیری الگوریتم

ب) بررسی کارآیی روش ارائه شده در مقایسه با برنامه مبنا و الگوریتم NSGA-II سنتی: برای سنجش کارایی الگوریتم ارائه شده الگوریتم NSGA-II سنتی نیز اجرا شد. به‌علاوه پروژه مورد مطالعه با داده‌های فازی-تصادفی یک‌بار دیگر بر اساس پیش‌فرض‌های دریافتی از کارخانه (بدون تسطیح منابع) شبیه‌سازی شد. محاسبات در هر سه روش با استفاده از داده‌های فازی-تصادفی طراحی شده در بخش قبل انجام گرفت، تا نتایج قابل مقایسه شوند. شکل (۴) وضعیت منابع پس از تسطیح و شکل (۵) وضعیت منابع را با شبیه‌سازی بر اساس برنامه مبنای کارخانه و شکل (۶) وضعیت منابع را با الگوریتم NSGA-II سنتی نشان می‌دهد. طبق جدول شماره ۲ که وضعیت توابع هدف و زمان تحویل هر ۳ روش را نشان می‌دهد، روش پیشنهادی این پژوهش می‌تواند پروژه را با زمان کوتاه‌تر و البته هزینه (منابع و بیکاری) کمتر زمان‌بندی کند، که همین مورد نشان دهنده کارآیی بالاتر

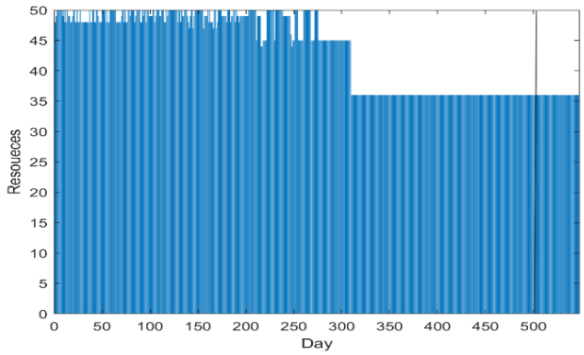
روش پیشنهادی است.



شکل۴: تسطیح منبع پس از اجرای تسطیح با استفاده از NSGA-II توسعه یافته
(زمان نهایی تخمینی ۵۰۹ روز)



شکل ۵: وضعیت منبع بر اساس شبیه‌سازی پروژه بر اساس برنامه مبنا: خط عمودی در شکل عدد ۵۰۹ را نشان می‌دهد، همان عددی است که در شکل شماره ۴ زمان تحویل اعلام شده است.خط افقی نیز حداکثر منبع ۵۰ را نشان می‌دهد. با استفاده از این شبیه‌سازی پروژه ۶۲۸ روز طول می‌کشد.



شکل ۶: تسطیح منبع پس از اجرای تسطیح با استفاده از NSGA-II سنتی(زمان نهایی تخمینی ۵۷۷ روز)

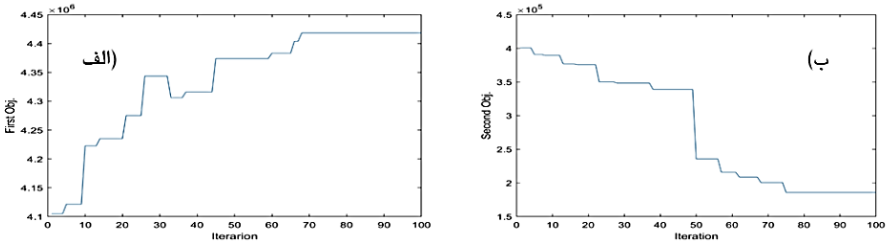
جدول ۲: وضعیت توابع هدف و زمان تخمینی بر اساس سه روش مورد بررسی

روش	زمان تحویل تخمینی	تابع هدف اول	تابع هدف دوم
NSGA-IIتوسعه‌داده‌شده	۵۰۹	۴۴۱۸۳۴۴	۱۸۵۸۰۰
NSGA-II ساده	۵۷۷	۴۷۸۳۱۲۶	۳۴۷۶۰۰
شبیه‌سازی برنامه مبنا	۶۲۸	۱۱۱۴۲۰۹۳	۲۷۰۶۰۰۰

ج) نظر خبرگان پروژه: مدیران پروژه پیش از ارائه زمان‌بندی مبنای اصلی کارخانه زمان تحویل پروژه را ۴۶۰ روز اعلام کردند. آن‌ها بیان داشتند، بر اساس عدم قطعیت‌هایی که ممکن است اتفاق بیفتد، پروژه می‌تواند تا ۳۰ درصد نسبت به زمان اعلام شده تغییر داشته باشد. از آنجایی که روش ارائه شده در پژوهش مذکور نسبت به سایر روش‌های محاسبه شده، همان‌طور که در جدول ۲ نیز دیده می‌شود، زمان تحویل نزدیک‌تری به زمان درخواستی مدیران تخمین زده است، می‌توان به دقت بالاتر مدل نسبت به دو مدل دیگر اشاره کرد. به علاوه با توجه به اینکه با استفاده از مدل و روش حل ارائه شده زمان در بازه مورد نظر مدیران تخمین زده شده است و اینکه تمام مراحل پژوهش زیر نظر مدیران پروژه مورد مطالعه انجام شد، درستی تحقق توسط آن‌ها تأیید شده است.

د) آزمایش همگرایی: بر اساس این آزمایش چنانچه الگوریتم همگرا شود، در تکرارهای بعدی تغییر معنی‌داری در مقادیر تابع هدف صورت نمی‌گیرد و ادامه تکرارها ضرورتی ندارد [۳۰]. در این پژوهش دو تابع هدف در هر نسل در ۱۰۰ تکرار مورد بررسی قرار گرفت،

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تقریباً از تکرار ۷۰ به بعد توابع هدف همگرا شده‌اند که این مورد نشان‌دهنده همگرا بودن الگوریتم است.



شکل ۷: بررسی وضعیت همگرایی در دو تابع هدف در ۱۰۰ تکرار: الف) تابع هدف اول مدل و ب) تابع هدف دوم را نشان می‌دهد. تقریباً هر دو تابع هدف از تکرار ۷۰ به بعد همگرا شده‌اند. گفتنی است، هر دو تابع هدف کمینه‌سازی هستند. ولی کاملاً در جهت عکس یکدیگر حرکت می‌کنند، با زیاد شدن یکی دیگر کم و بالعکس عمل می‌کنند. برای مدیران پروژه مورد مطالعه تابع هدف دوم از اهمیت بیشتری برخوردار بود.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نقش مهمی که منابع در زمان‌بندی و دستیابی به اهداف پروژه بازی می‌کنند، تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه منابع صورت گرفته است. تسطیح منابع یکی از مدل‌هایی است که جهت زمان‌بندی پروژه‌ها با استفاده از منابع به کار گرفته می‌شود. از ۶۰ سال پیش تاکنون که پژوهش‌هایی در این زمینه صورت گرفته است، تغییرات زیادی بر نحوه مدل کردن منابع پروژه ایجاد شده است. نخستین پژوهش‌ها شرایط اجرای پروژه را قطعی در نظر گرفتند و رفته رفته پژوهش‌ها به سمت غیرقطعی بودن شرایط پروژه سوق پیدا کردند. پس از معرفی تئوری فازی-تصادفی برخی پژوهش‌های مدیریت پروژه شرایط اجرای یک پروژه فازی-تصادفی دانستند [۱۷]. با بررسی بیشتر پیشینه پژوهش جای خالی مدلی فازی-تصادفی که به تسطیح منابع بپرازد، حس می‌شد. بنابراین در این پژوهش مدل چند هدفه تسطیح منابع با رویکرد فازی-تصادفی ارائه شد. استفاده رویکرد فازی-تصادفی برای تسطیح منابع دید وسیع‌تری به مدیران می‌بخشد و منجر به کاهش هزینه‌ها و بالا بردن احتمال موفقیت پروژه‌ها خواهد شد. این مدل توسط الگوریتم NSGA-II توسعه یافته حل شد که بر اساس جدول ۲ کارآیی بهتری از دو روش، الگوریتم NSGA-II سنتی و شبیه‌سازی پروژه با در نظر گرفتن برنامه مبنا بدون تسطیح، از خود نشان می‌دهد. همان-

طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، براساس شبیه‌سازی برنامه مبنا نه تنها ظرفیت منبع رعایت نشده است و برای پیشبرد پروژه براساس برنامه داده شده حتماً نیاز به استخدام منبع می‌شود، بلکه حتی زمان تحویل نیز بسیار طولانی‌تر از زمانی است که روش پیشنهادی ارائه می‌دهد. گفتنی است این زمان بازه اعلام شده زمان تحویل از سمت مدیریت پروژه را هم نقض می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، الگوریتم NSGA-II سنتی از روز ۳۰۰ به بعد حجم استفاده از منابع را به قدری کم می‌کند که ناچارا روز تحویل پروژه نسبت به روز تحویلی که NSGA-II توسعه یافته ارائه می‌دهد، طولانی‌تر می‌شود. اگرچه روز تحویل پروژه اعلام شده در الگوریتم NSGA-II سنتی از بازه‌ای که مدیران پروژه اعلام کرده‌اند، تخطی نمی‌کند ولی زمان تحویلی که NSGA-II توسعه یافته ارائه داده است، به زمان درخواستی آن‌ها نزدیک‌تر و دقیق‌تر است. به علاوه آزمایش‌های تکرارپذیری و همگرایی نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده، با ۶۰ درصد همپوشانی تکرارپذیر است و از تکرار ۷۰ به بعد همگرا می‌شود؛ این موارد نشان دهنده درستی پارامترها و صحت الگوریتم دارد. علاوه بر این مدل ارائه شده و الگوریتم حل آن از ابتدا تا انتهای پژوهش بر روی یک مورد مطالعاتی صورت گرفت که مدیران پروژه مذکور درستی کار را تأیید کردند.

در ادامه به پژوهشگران آتی پیشنهاد می‌گردد: ۱) در این تحقیق، تنها از بحرانی‌ترین ریسک پروژه جهت پیش برد مراحل تحقیق استفاده شد، پژوهشگران آتی می‌توانند چندین ریسک را انتخاب کنند و روشی ارائه کنند که بتواند تأثیرات آن‌ها را زمانی که تمام ریسک‌ها با هم رخ می‌دهند، بر پروژه سنجید. ۲) پژوهشگران می‌توانند مدلی در حالت چند منبعی ارائه و روشی برای حل آن ارائه دهند. البته میزان پیچیدگی مدل بیان شده نیز در این صورت بسیار بیشتر خواهد شد. ۳) با توجه به ماهیت متغیر پروژه‌ها، تأیید نهایی الگوریتم مطرح شده نیازمند این است که در انواع پروژه‌ها به کار گرفته شود، بنابراین می‌توان این الگوریتم را در انواع پروژه‌های ساخت، داروسازی، عمرانی و سایر پروژه‌ها به کار گرفت. ۴) پژوهشگران می‌توانند منابع را نیز در کنار زمان به صورت فازی-تصادفی در نظر بگیرند و مدل جدیدی برای این نوع رویکرد ارائه دهند. ۵) به‌علاوه می‌توان الگوریتم ارائه داده شده را در کنار سایر الگوریتم‌های فراابتکاری به کار گرفت تا میزان کارآیی هر یک را نسبت به دیگران سنجید.

۶. پی‌نوشت‌ها

۱. Critical Path Metod (CPM)
۲. Program Evaluation and Review Technique (PERT)
۳. Gang
٤. Fan & Huang
٥. Savin
٦. Skibniewski
۷. Doulabi
۸. Tavakolan
۹. Li & Demeulemeester
۱۰. Li

۷. منابع

[1] Aliyeh, K. F., Sarvandy. (2018). Mathematical modeling of project scheduling problem with resource constraint approach and solving it using meta-heuristic algorithms. *Modern Research in Decision Making* .

[2] Zamani, A., Khanzadi, M., Jabal Ameli, M. S & ,.Sarhadi, M. (2017). Developing a Framework for Applying Risk Management in a Fuzzy Environment for Implementing Construction Projects Value Engineering: Case of Khorramshahr Port. *Management Research in Iran*, *21*(3), 139-166 .

[3] Abbasnejad, T., Behboudi, M. R., Sahelizadegan, F., & Mahmoodi, J. (2017). Strategic performance measurement of employees based on project efficiency and effectiveness. *Iranian Journal of Management Studies*, *10*(1), 207-2۳٦ .(In Persian).

[4] Neumann, K., Schwindt, C., & Zimmermann, J. (2012). *Project scheduling with time windows and scarce resources: temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions*: Springer Science & Business Media.

[5] Ameer, A. A. A., & Mohammed, S. R. (2011). Optimization Of Resource Allocation And Leveling Using Genetic Algorithms. *Journal of Engineering*, ۱۷(٤), ۹۲۹-۹٤۷ .

[6] Li, H., Wang, M., & Dong, X. (2019). Resource leveling in projects with stochastic minimum time lags. *Journal of construction engineering and management*, *145*(4), 04019015 .

[7] Yousefi Hanoomarvar, A., Amiri, M., Olfat, L., & Naser Sadrabadi, A. (2021). Time-Cost-Quality Trade Off in PERT Networks Using Neural Network and Evolutionary Algorithms. *Modern Research in Decision Making, 6*(1), 92-1۲۲ .

[8] Burgess, A., & Killebrew, J. B. (1962). Variation in activity level on a cyclical arrow diagram. *Journal of Industrial Engineering, 13*(2), 76-83 .

[9] Mattila, K. G., & Abraham, D. M. (1998). Resource leveling of linear schedules using integer linear programming. *Journal of construction engineering and management, 124*(3), 232-244 .

[10] Rieck, J., Zimmermann, J., & Gather, T. (2012). Mixed-integer linear programming for resource leveling problems. *European Journal of Operational Research.*

[11] Coughlan, E. T., Lübbecke, M. E., & Schulz, J. (2015). A branch-price-and-cut algorithm for multi-mode resource leveling. *European Journal of Operational Research* .۲٤٥(۱), ۷۰-۸۰.

[12] Bandelloni, M., Tucci, M., & Rinaldi, R. (1994). Optimal resource leveling using non-serial dyanamic programming. *European Journal of Operational Research, 78*(2), 162-177.

[13] Geng, J.-q., Weng, L.-p., & Liu, S.-h. (2011). An improved ant colony optimization algorithm for nonlinear resource-leveling problems. *Computers & Mathematics with Applications, 61*(8), 2300-2305 .

[14] Leu, S.-S., & Hung, T.-H. (2002). An optimal construction resource leveling scheduling simulation model. C*anadian Journal of Civil Engineering. 275-2*67, *(2)29.*

[15] Leu, S.-S., Chen, A.-T., & Yang, C.-H. (1999). A fuzzy optimal model for construction resource leveling scheduling. *Canadian Journal of Civil*

Engineering, *26*(6), 673-684 .

[16] Wang, S., & Watada, J. (2012). *Fuzzy stochastic optimization: theory, models and applications*: Springer Science & Business Media.

[17] Alipouri, Y., Sebt, M. H., Ardeshir, A., & Zarandi, M. H. F. (2020). A mixed-integer linear programming model for solving fuzzy stochastic resource constrained project scheduling problem. *Operational Research*, 1-21 .

[18] Gang, J., Xu, J., & Xu, Y. (2013). Multiproject resources allocation model under fuzzy random environment and its application to industrial equipment installation engineering. *Journal of Applied Mathematics, 2013*.

[19] Fan, G.-M., & Huang, H.-J. (2017). *A novel binary differential evolution algorithm for a class of fuzzy-stochastic resource allocation problems.* Paper presented at the 2017 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA).

[20] Leu, S.-S., Yang, C.-H., & Huang, J.-C. (2000). Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application. *Automation in Construction*, *10*(1), 27-41.

[21] Savin, D., Alkass, S., & Fazio, P. (1996). Construction resource leveling using neural networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *23*(4), 917-925 .

[22] Son, J., & Skibniewski, M. J. (1999). Multiheuristic approach for resource leveling problem in construction engineering: Hybrid approach. *Journal of construction engineering and management*, *125*(1), 23-31 .

[23] Hossein Hashemi Doulabi, S., Seifi, A., & Shariat, S. Y. (2011). Efficient hybrid genetic algorithm for resource leveling via activity splitting. *Journal of construction engineering and management*, *137*(2), 137-146 .

[24] Ashuri, B., & Tavakolan, M. (2012). Fuzzy enabled hybrid genetic algorithm–particle swarm optimization approach to solve TCRO problems in construction project planning. *Journal of construction engineering and management*, *138*(9), ۱۰۶۵-۱۰۷٤ .

[25] Li, H., & Demeulemeester, E .(2016) .A genetic algorithm for the robust resource leveling problem. *Journal of Scheduling, 19*(1), 43-60 .

[26] Li, H., Xu, Z., & Demeulemeester, E. (2015). Scheduling policies for the stochastic resource leveling problem. *Journal of construction engineering and management, 141*(2), 04014072 .

[27] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation, 6*(2), 182-197 .

[28] Heon Jun, D., & El-Rayes, K. (2011). Multiobjective optimization of resource leveling and allocation during construction scheduling. *Journal of construction engineering and management, 137*(12), 1080-1088 .

[29] Masoomi, Z., Mesgari, M. S., & Hamrah, M. (2013). Allocation of urban land uses by Multi-Objective Particle Swarm Optimization algorithm. *International Journal of Geographical Information Science, 27*(3), 542-566 .

[30] Deb, K. (2011). Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction. In *Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing* (pp. 3-34): Springer.