

بهینه‌سازی مدل دوهدفه مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با وجود چند حالت اجرایی و امکان قطع فعالیت‌ها

حمزه امین طهماسبی^{۱*}، الهیار داغبندان^۲، رؤیا باقرپور^۳

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان

۲. استادیار گروه مهندسی شیمی دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع مؤسسه آموزش عالی کوشیار رشت

(تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۵/۱۲/۱۲، تاریخ تصویب: ۹۶/۱/۲۰)

چکیده

مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با وجود چند حالت اجرایی (MRCPS) ^۱، به دنبال یافتن بهترین توالی انجام‌دادن فعالیت‌هاست، به نحوی که با وجود انواع محدودیت منابع، باید محدودیت‌های تقدم و تأخر پروژه ارضا شود و فعالیت‌ها نیز بیش از یک نوع حالت اجرایی داشته باشند. در هر یک از این حالت‌های اجرایی، مقدار منابع و زمان اجرایی فعالیت‌ها مشخص و متفاوت است. در مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و چند حالت اجرایی با امکان قطع فعالیت‌ها (P-MRCPS) ^۲، فعالیت‌ها می‌توانند در هر حالت اجرایی قطع و در هر زمانی بدون اضافه‌شدن هزینه دوباره شروع شوند. در این پژوهش کمینه‌ساختن زمان تکمیل پروژه در کنار بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پروژه در مسئله P-MRCPS مدنظر قرار گرفته است. پس از حل مسئله با استفاده از روش محدودیت پس‌یون، با توجه به NP-hard بودن مسئله و چندهدفه بودن مدل، الگوریتم تکاملی چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO) ^۳ برای دستیابی به زمان‌بندی بهینه توسعه داده شده است. به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، نتایج براساس شاخص‌های طراحی شده با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGAI) ^۴ مقایسه می‌شود. برای تنظیم پارامترهای دو الگوریتم از روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. نتایج حل مدل نشان‌دهنده قوت الگوریتم MOPSO است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات، تعدد حالات اجرایی، روش‌های فرا ابتکاری، زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، قطع فعالیت.

مقدمه

است. در این مسائل، فعالیت‌ها بیش از یک نوع حالت اجرایی دارند. در هر یک از حالت‌های اجرایی، مقدار منابع و زمان اجرایی فعالیت‌ها مشخص است. فرض قطع فعالیت‌ها در حالت‌های اجرایی موجب نزدیک‌تر شدن مدل به مسائل واقعی زمان‌بندی پروژه می‌شود. این فرض ممکن است در اثر عواملی مانند خرابی تجهیزات و کمبود منابع به وجود آید. در مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منبع و چند حالت اجرایی با امکان قطع فعالیت‌ها (P-MRCPS) فعالیت‌ها می‌توانند در هر حالت اجرایی قطع و در هر زمانی بدون اضافه‌شدن هزینه دوباره شروع شوند. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد مطالعات قبلی به‌طور عمده در حوزه زمان‌بندی پروژه با محدودیت منبع و چند حالت اجرایی و امکان قطع فعالیت‌ها با این دو هدف اجرایی (کمینه‌کردن

مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPS) از مسائل مهم در حوزه زمان‌بندی پروژه است. مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و روابط پیش‌نیازی بسیار متنوع است. تمام مسائل مطرح‌شده به‌صورت مدل پایه یا ترکیبی از مدل‌های پایه با اضافه‌کردن فرضیه‌های جدید به مدل هستند. تابع هدف مسئله RCPS اغلب کمینه‌کردن زمان تکمیل پروژه بوده است. زمانی که در پروژه محدودیت سرمایه وجود داشته باشد یا هزینه سرمایه‌گذاری بالا باشد، اهمیت استفاده از معیار ارزش خالص فعلی نمایان می‌شود.

تعمیم‌یافته مسئله RCPS، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با وجود چند حالت اجرایی (MRCPS)

زمان تکمیل پروژه و بیشینه کردن ارزش خالص فعلی) تحقیقی صورت نگرفته است.

در زمینه مسئله زمان بندی پروژه با منابع محدود و در نظر گرفتن جریانان نقدی مثبت و منفی، اولین بار راسل [۱] در سال ۱۷۷۴ ایده حداکثر کردن ارزش خالص فعلی جریانان نقدی پروژه را به عنوان یک معیار در زمان بندی پروژه مطرح کرد. راسل یک مسئله را بدون محدودیت منابع در نظر گرفت و فرض کرد فعالیت های پروژه در یک شبکه فعالیت برداری ارائه شده است و جریانان نقدی مثبت و منفی در ارتباط با رویدادهای پروژه وجود دارد. وی یک مدل برنامه ریزی غیر خطی با تنزیل پیوسته تابع هدف ارائه کرد و برای استخراج یک تابع هدف خطی از تقریب سری های تیلور استفاده کرد. راسل فرم ثانویه این مدل برنامه ریزی خطی را به صورت یک مسئله جریان شبکه تفسیر کرد و سپس روش حل بهینه آن را استخراج کرد. وی کاربرد این الگوریتم را با یک مثال ساده تشریح کرده است.

گرینولد [۲] از مدل غیر خطی راسل استفاده کرد و نشان داد این مدل ممکن است به طور مستقیم به یک مدل برنامه ریزی خطی تبدیل شود. وی با به کارگیری یک ساختار ویژه، دو الگوریتم حل بهینه برای مسئله ارائه داد. الگوریتم اول مسئله را برای یک فرجه ثابت برای مسئله حل می کند، در حالی که الگوریتم دوم، مسئله را به صورت پارامتریک برای تمام فرجه های ممکن پروژه حل می کند. امین طهماسبی و همکاران [۳] برنامه ریزی پروژه با وجود منابع محدود را از طریق الگوریتم ایمن حل کردند و سپس جواب های حاصل از حل مسائل نمونه را با جواب های الگوریتم های پیشین ارائه شده در رتبه بندی آقای کولیش و هارتمن مقایسه کردند. خلیلی دامغانی و همکاران [۴] رویکردی بر اساس بهینه سازی توسط کلونی مورچگان برای حل مسئله زمان بندی پروژه ها با منابع محدود ارائه دادند. از جمله تفاوت های اصلی رویکرد ارائه شده در این پژوهش می توان به تعریف قانون انتخاب احتمالی به شکل نوین، تغییر عوامل الگوریتم به شکل تطبیقی، جلوگیری از بروز رفتارهای نامناسب و تعیین رفتار کلی الگوریتم در تکرارهای بالا اشاره کرد. تالبوت [۵] مدل ریاضی برای مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع با وجود چند حالت اجرایی ارائه داد.

در مسائل واقعی، زمان بندی پروژه مسئله چند هدفه است، زیرا نمی توان با توجه به یک شاخص به جواب بهینه برای مسئله رسید. الفاغان و هاوری [۶] مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع را با وجود دو هدف کمینه سازی زمان تکمیل پروژه و بیشینه کردن پایداری با روش فرا ابتکاری جستجوی ممنوع حل کردند. سیفی و توکلی مقدم [۷] یک مدل ریاضی دومعیاره برای مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع با چند حالت اجرایی با دو هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی و کمینه کردن هزینه نگهداری فعالیت های تکمیل شده تا زمان تکمیل نهایی پروژه ارائه کردند. پتقم و ونهوک [۸] مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع و چند حالت اجرایی و امکان قطع فعالیت ها را با الگوریتم ژنتیک دو جمعیتی حل کردند. چن و چنگ [۹] یک تابع هزینه ای با هدف یافتن یک زمان بندی شدنی ارائه دادند که در آن هزینه های استفاده از منابع تجدیدناپذیر مورد نظر بود و در نهایت این مسئله را با یک الگوریتم ابتکاری از گروه الگوریتم ممتیک حل کردند. کولهو و ونهوک [۱۰] یک رویکرد حل جدید برای مسئله MRCPSPP ارائه دادند. هدف آن ها انتخاب یک حالت از هر فعالیت از مجموعه حالت های در دسترس به منظور ساخت یک روابط تقدمی و زمان بندی پروژه منابع ممکن (منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) به منظور حداقل سازی زمان کل بوده است.

عظیمی و همکاران [۱۱] مدل زمان بندی پروژه با هدف مینیمم کردن زمان اجرای پروژه و ماکزیمم کردن ارزش خالص فعلی با جریان های نقدی مثبت و منفی ارائه کردند که به منظور حل مدل ارائه شده از الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات چند هدفه بهره بردند. وانگ و فنگ [۱۲] در پژوهش خود یک الگوریتم توزیع تخمینی برای حل مسئله MRCPSPP پیشنهاد دادند. لی و ژانگ [۱۳] مسئله زمان بندی پروژه منابع محدود چندحالتی را در حالت های منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر با الگوریتم کلونی مورچگان حل کردند. هاوو و همکاران [۱۴] مسئله MRCPSPP را با در نظر گرفتن زمان غیرقطعی برای طول فعالیت ها بررسی کردند. آن ها در مسئله خود دو هدف حداقل کردن مقاومت و همچنین حداقل سازی زمان کل پروژه را در نظر گرفتند و مسئله خود را با الگوریتم توزیع

محدودیت منابع با وجود چند حالت اجرایی و امکان قطع فعالیت‌ها با دو هدفه کمینه‌کردن زمان تکمیل پروژه و بیشینه‌کردن ارزش خالص فعلی است. از نظر محاسباتی، حل مدل‌های زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، به دلیل تخصیص منابع محدود به فعالیت‌ها نسبت به مدل‌های قبلی بسیار سخت‌تر است، به طوری که محاسبات برای پیدا کردن جواب بهینه مسئله، با بزرگ‌شدن ابعاد مسئله به طور نمایی افزایش می‌یابد و به شدت به سمت NP-hard میل می‌کند. در نتیجه، برای حل مسئله از روش‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود. این روش‌ها نسبت به روش‌های حل دقیق و بسیاری از روش‌های ابتکاری کارایی بالاتری دارند. این کارایی هم در زمان حل مسئله (به دلیل وسعت فضای جست‌وجوی حل بهینه) و هم خطرپذیری جواب نزدیک به بهینه خودنمایی می‌کند. همچنین، در دهه اخیر الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه در محیط‌های مختلف کاربردهای متنوعی داشته است. در این زمینه، می‌توان به حل مسئله زمان‌بندی flowshop جایگشتی [۲۴]، RCPSO [۲۵] و Jobshop [۲۶] اشاره کرد. از آنجا که در ادبیات موضوع استفاده از الگوریتم MOPSO برای حل مسئله MRCPSP با وجود امکان قطع فعالیت‌ها مشاهده نشد، در پژوهش حاضر، از این الگوریتم استفاده شد و نتایج با حل حاصل از الگوریتم NSGA-II ارائه شده توسط امیری و همکاران [۲۷] مقایسه شده است.

همچنین، به منظور نمایش جواب دو الگوریتم فرا ابتکاری NSGAII و MOPSO استفاده شده برای حل مسئله، از روشی جدید استفاده شده است که متضمن ارضای تمام محدودیت‌ها و ایجاد جواب‌های موجه و شدنی است.

در قسمت‌های بعدی این پژوهش به ترتیب بیان مسئله و توصیف مدل ریاضی، تولید مسائل نمونه، نتایج محاسباتی حاصل از تنظیم پارامترهای الگوریتم، مقایسه مقادیر شاخص‌های عملکردی به دست آمده توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی ارائه می‌شود.

بیان مسئله

یک پروژه از n فعالیت تشکیل شده است که یک شبکه گره‌ای AON و به صورت گراف $G=(V,E)$ ارائه می‌دهد. در

تخمین مؤثر حل کردند. سادات حسینی و همکاران [۱۵] مسئله زمان‌بندی پروژه را با دو هدف کمینه‌کردن زمان دیرکرد پروژه و بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی جریان‌های مثبت و منفی با امکان قطع فعالیت ارائه دادند. چنگ و همکاران [۱۶] مسئله RCPSO را با در نظر گرفتن امکان قطع و عدم امکان قطع فعالیت‌ها بررسی کردند. آن‌ها در مسئله خود هر دو منبع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را در نظر گرفتند.

شو و همکاران [۱۷] یک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی برای حل RCPSO با امکان قطع فعالیت‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها در مسئله خود حداکثر یک وقفه در فعالیت‌ها را مجاز دانسته‌اند. موکریم و همکاران [۱۸] نیز مسئله RCPSO را با امکان قطع فعالیت‌ها و در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر در نظر گرفتند و آن را با الگوریتم شاخه و قیمت حل کردند. فرشیدی و زیارتی [۱۹] حل مسئله MRCPSP را با استفاده از الگوریتم حریصانه بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب این الگوریتم برای مسائل سایز بزرگ بود. آستا و همکاران [۲۰] مسئله MRCPSP را با ترکیب روش مونت کارلو و الگوریتم ممتیک حل کردند و نتایج رضایت‌بخشی را به دست آوردند. الومی و همکاران [۲۱] یک الگوریتم تکاملی و یک روش ابتکاری چندهدفه واکنشی را به منظور حل مسئله MRCPSP در شرایط اختلال در تغییر حالات مختلف ارائه کردند.

به منظور نزدیک‌شدن مدل‌های زمان‌بندی پروژه به شرایط واقعی مسئله، باید اهداف، فرضیات و محدودیت‌هایی به مدل‌های موجود در ادبیات موضوع اضافه شود. بالستین و بلانکو [۲۲] اعلام داشتند در تحقیقات اندکی مسئله زمان‌بندی پروژه چندهدفه با محدودیت منابع در چند حالت اجرایی بررسی شده است. همچنین، برای نمونه‌های چندحالتی، بودهاکولسمسیری و کیم [۲۳] ثابت کردند انقطاع در بهبود زمان تکمیل پروژه مؤثر است. در نتیجه، در این تحقیق واقعیاتی همچون امکان قطع فعالیت‌ها در زمان‌های گسسته و همچنین چند حالت اجرایی بودن فعالیت‌ها به مدل اضافه شده است؛ بنابراین، مدل ریاضی ارائه شده بهبودی بر مدل‌های ریاضی موجود در ادبیات موضوع برای مسئله زمان‌بندی پروژه با

۱۱. در هر فعالیت از یک یا چند منبع استفاده می‌شود؛
۱۲. منابع مورد استفاده در پروژه از نوع تجدیدپذیر است؛
۱۳. مدت زمان لازم برای انجام دادن هر فعالیت مشخص است و در مدت انجام دادن پروژه ثابت است؛
۱۴. زمان پرداخت هزینه‌ها در ابتدای پروژه مشخص شده است؛
۱۵. زمان پرداخت‌های مالی از طرف کارفرما به پیمانکار در پایان انجام دادن هر فعالیت مشخص شده است؛
۱۶. محدودیت بودجه وجود ندارد.

مدل‌سازی مسئله

پارامترها و اندیس‌های مسئله به شرح زیر هستند:

اندیس‌ها:

$A_i, i \in \{0, \dots, n\}$: مجموعه فعالیت‌های پروژه

A_0 : گره مجازی شروع

A_n : گره مجازی پایان

$(A_i, A_j) \in E$: وجود رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌های

A_j و A_i

$G = (A, E, d)$: گراف پیش‌نیازی‌ها

i, j : شماره فعالیت‌ها (از ۱ تا N)

m : شماره حالت‌های (mode) اجرایی (از ۱ تا M)

k : شماره منابع تجدیدپذیر (از ۱ تا K)

$t \in \{1, \dots, T_{\max}\}$: شماره زمان شروع فعالیت‌ها

$$T_{\max} = \sum_{i=1}^n \max(d_{im_1}, d_{im_2}, \dots, d_{im_M})$$

پارامترها:

d_{im} : زمان انجام دادن فعالیت i ام در حالت m ام

r_{imk} : مقدار منابع لازم از نوع k ام برای اجرای فعالیت i

ام در حالت m ام

R_k : مقدار منبع تجدیدپذیر موجود از نوع k در هر

مقطع از زمان

α : نرخ تنزیل

cf_i : جریان نقدی هر فعالیت

متغیر تصمیم:

در این پژوهش در مدل‌سازی ریاضی، هفت متغیر تصمیم

این گراف، گره‌ها نشان‌دهنده فعالیت و یال‌ها بیانگر روابط پیش‌نیازی هستند. هر یک از فعالیت‌ها به یک یا چند واحد از m منبع مختلف نیاز دارند که این منابع ممکن است مواد، ماشین‌آلات یا نیروی انسانی باشند. در این مدل، برای هر فعالیت چندین حالت اجرایی در نظر گرفته شده است که هر فعالیت فقط در یک حالت اجرایی انجام می‌گیرد و تکمیل می‌شود، اما ممکن است برخی از فعالیت‌ها در حین انجام دادن متوقف شوند و پس از مدتی دوباره از سر گرفته شوند. از این‌رو، انقطاع (شکست) نیز در مدل اعمال شده است. در این حالت، با مسئله زمان‌بندی پروژه چندهدفه با محدودیت منابع با امکان قطع فعالیت‌ها در حالت قطعی مواجه می‌شویم. الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مدل الگوریتم فرا ابتکاری MOPSO و NSGAI است. هدف از طراحی روش یادشده، دستیابی هرچه بیشتر به جواب‌های بهینه سراسری یا پارتو است.

مفروضات مدل

مسئله مورد بررسی در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با در نظر گرفتن انقطاع در فعالیت‌هاست که به دو هدف کمینه‌سازی زمان پایان پروژه و افزایش ارزش خالص فعلی در آن به‌طور هم‌زمان توجه شده است. مفروضات مسئله به‌صورت زیر است:

۱. شبکه تقدم و تأخر فعالیت‌ها جهت‌دار است؛
۲. هر زمان که پیش‌نیازهای یک فعالیت انجام گرفته باشند، آن فعالیت قابل اجراست؛
۳. فعالیت‌ها به زمان آماده‌سازی احتیاج ندارد؛
۴. ارتباط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها از نوع پایان به شروع است؛
۵. فعالیت‌های اول و آخر (۱ و N) موهومی در نظر گرفته می‌شوند؛
۶. از انتخاب یک حالت برای فعالیت‌ها، فعالیت‌ها باید فقط در همان حالت تا پایان مدت زمان اجرا شوند؛
۷. پس از شروع فعالیت توقف در آن‌ها مجاز است؛
۸. فعالیت‌ها فقط در بازه زودترین زمان شروع و دیرترین زمان پایان خودشان انجام می‌گیرند؛
۹. ظرفیت منابع مشخص و محدود است؛
۱۰. سطح موردنیاز منابع برای انجام دادن هر فعالیت مشخص و ثابت است؛

در همان حالت اجرایی پایان یابد. محدودیت ۷ تضمین می‌کند مجموع زمانی که فعالیت i در حالت اجرایی m_i در زمان t در حال انجام است، برابر با مدت زمانی است که در حالت اجرایی m_i انجام می‌گیرد. محدودیت ۸ زمان شروع فعالیت را نشان می‌دهد. محدودیت ۹ زمان پایان فعالیت را محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۰ کمترین زمان تکمیل پروژه را محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۱ روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها را تضمین می‌کند. محدودیت ۱۲ معین می‌کند سطح دسترسی منابع تجدیدپذیر از مقدار مشخص شده بیشتر نشود و بالاخره محدودیت ۱۳ نشان‌دهنده صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم مسئله است.

الگوریتم MOPSO

در الگوریتم MOPSO از عملگرهای PSO استفاده می‌شود. کوئلو کوئلو و همکاران [۲۸] این الگوریتم را در سال ۲۰۰۲ معرفی کردند و در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ آن را توسعه دادند. در این الگوریتم، بهترین جواب‌های نامغلوب در یک حافظه خارجی نگهداری می‌شود. ساختار عمومی الگوریتم به صورت زیر است:

برای هر ذره موجود در جمعیت موقعیت ذره جاری را به طور تصادفی مقاردهی اولیه کنید. سرعت ذره جاری را به طور تصادفی مقاردهی اولیه کنید یا آن را معادل با صفر در نظر بگیرید. بهترین موقعیت شخصی (بهترین موقعیت محلی) ذره جاری را برابر با موقعیت ذره جاری در نظر بگیرید. با استفاده از تابع برازش، برازش هر یک از ذرات موجود در جمعیت را ارزیابی کنید و بهترین موقعیت شخصی در بین آن‌ها را بهترین موقعیت سراسری در نظر بگیرید. تا هنگامی که شرایط همگرایی برآورده نشده است، برای هر ذره موجود در جمعیت، سرعت ذره جاری را به روز کنید. موقعیت ذره جاری را به روز کنید. با استفاده از تابع برازش، برازش ذره جاری را ارزیابی کنید. بهترین موقعیت شخصی (بهترین موقعیت محلی) ذره جاری را به روز کنید. بهترین موقعیت سراسری را به روز کنید.

شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات در زیر نشان داده می‌شود. فرایند به‌روزرسانی مقادیر مربوط به سرعت و موقعیت ذرات در هر دو حلقه اصلی این الگوریتم صورت می‌گیرد. علاوه بر این، مجموعه Repository

به شرح زیر تعریف شده‌اند:

C_{max} : زمان پایان پروژه؛

$NPVT_{it}$: ارزش فعلی خالص موقت فعالیت i ام در

لحظه t ام؛

NPV_i : ارزش فعلی خالص فعالیت i ام؛

S_i : زمان شروع فعالیت i ام؛

C_i : زمان پایان فعالیت i ام؛

X_{imt} : اگر فعالیت i ام در حالت m ام در زمان t ام

در حال اجرا باشد ۱ و در غیر این صورت صفر؛

Y_{im} : اگر فعالیت i ام در حالت m ام انجام گیرد ۱ و در

غیر این صورت صفر.

ارائه مدل ریاضی

این مدل دو هدف اصلی دارد که هدف اول (معادله ۱) کمینه کردن زمان تکمیل پروژه را نشان می‌دهد و تابع هدف دوم (معادله ۲) ارزش خالص فعلی پروژه را نشان می‌دهد که باید ماکزیمم شود.

$$\text{Min } Z_1 = C_{\max} \quad (1)$$

$$\text{Max } Z_2 = \sum_{i=1}^n NPV_i \quad (2)$$

$$\text{s.t. } NPVT_{it} = \sum_{m=1}^M cf_i * e^{-at} * x_{imt} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$NPV_i = \max_t VT_{it} \quad \forall i \quad (4)$$

$$NPV_i \geq NPVT_{it} \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{im} = 1 \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^{T_{max}} x_{imt} = y_{im} * d_{im} \quad \forall i, m \quad (7)$$

$$S_i \leq t * x_{imt} + (1 - x_{imt}) * M \quad \forall i, m, t \quad (8)$$

$$C_i \geq t * x_{imt} \quad \forall i, m, t \quad (9)$$

$$C_{max} \geq C_i \quad \forall i \quad (10)$$

$$C_i \leq S_j \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M r_{imk} * x_{imt} \leq R_k \quad \forall k, t \quad (12)$$

$$x_{imt} = \{0,1\}, y_m = \{0,1\} \quad \forall i, m, t \quad (13)$$

محدودیت ۳ ارزش خالص فعلی هر فعالیت را محاسبه می‌کند. محدودیت ۴ بیشترین مقدار ارزش خالص فعلی هر فعالیت را مشخص می‌کند. محدودیت ۵ نشان‌دهنده آن است که مقدار ارزش خالص فعلی هر فعالیت از ارزش فعلی خالص موقت آن در هر لحظه، بیشتر است. محدودیت ۶ مشخص می‌کند هر فعالیت باید در یک حالت اجرا شود و

با استفاده از مفهوم غلبه در تکرارهای متوالی به‌روزرسانی می‌شود و بهترین جبهه Repository نیز خروجی الگوریتم گزارش می‌شود.

```

Begin
Input n-Particle, C1, C2, W and Max-iteration
Generate initial particles
Evaluate fitness values of the initial particles
Create the best personal memory
Create the best global memory
Create grid index for solution dimension
Find repository member
Find grid for repository members
For it=1: Max-iteration do
For j=1: n-Particle do
Select the leader particle
Update particle position
Evaluate particle's fitness value
Apply mutation and update particle
position
Update the best personal memory
Update the best global memory
End For
Find repository members
Combine new repository member with repository
member  $rep = Rep \cup Rep_{new}$ 
Update repository member using the dominance-
sorting algorithm
Update grid index for solution dimension
Find grid for repository members
Delete extra repository members
End For
Output: extract repository front
End

```

نمایش جواب می‌گویند. تولید جواب اولیه در مسئله زمان‌بندی پروژه، روش تولید زمان‌بندی نامیده می‌شود. این روش نقش بسیار مهمی در بیشتر روش‌های فرا ابتکاری و حل مسئله ایفا می‌کند. نحوه نمایش جواب در این تحقیق، به صورت اعداد تصادفی در بازه صفر و یک، در دو سطر می‌باشد. طول این سطرها برابر مجموع زمان فعالیت‌ها بوده که سطر اول مربوط به تخصیص مدهای اجرایی است و سطر دوم مربوط به فعالیت‌هاست. برای تشریح بهتر و مناسب‌تر روش نمایش جواب و رمزگشایی آن، مثال زیر ارائه می‌شود.

فرض کنیم یک مسئله با سه فعالیت و سه مد اجرایی داریم که به ترتیب داده‌های آن در جدول ۱ ارائه می‌شود. با توجه به داده‌های مثال، مجموع زمان انجام‌دادن فعالیت‌ها برابر ۸ است. پس روش نمایش جواب این مسئله در دو سطر به طول ۸ است و به صورت شکل ۱ ارائه می‌شود.

برای تعیین مدهای بهینه انجام‌دادن هر فعالیت، ابتدا به تعداد فعالیت از سطر اول روش نمایش جواب انتخاب می‌شود. این اعداد در تعداد مد اجرایی هر فعالیت ضرب می‌شود و به سمت بالا گرد می‌شود. اعداد حاصل بیانگر مدهای اجرای فعالیت هستند. این فرایند به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده می‌شود.

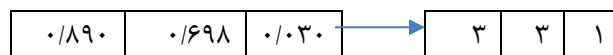
جدول ۱. داده‌های اولیه مثال

زمان	پیش‌نیاز	فعالیت
۳	-	فعالیت ۱
۲	فعالیت ۱	فعالیت ۲
۳	فعالیت ۱	فعالیت ۳

به دلیل نیاز به حل شدن، ابتدا باید حل شدنی طبق ساختار مشخصی ذخیره شود که به این ساختار، نحوه

V1	۰/۸۹۰	۰/۶۹۸	۰/۰۳۰	۰/۵۰۰	۰/۹۰۴	۰/۶۱۷	۰/۸۰۵	۰/۱۸۲
V2	۰/۳۳۴	۰/۱۹۷	۰/۷۴۴	۰/۴۷۹	۰/۶۰۹	۰/۸۵۹	۰/۵۷۶	۰/۲۳۹

شکل ۱. روش نمایش به صورت عدد تصادفی بین صفر و یک



شکل ۲. روش به کاررفته به منظور تعیین مد انجام‌دادن فعالیت‌ها

المان‌های مجموعه activity ضرب می‌شود و اعداد حاصل به سمت بالا روند می‌شود و n امین عضو مجموعه activity تخصیص داده می‌شود. اگر تمام بخش‌های یک فعالیت تخصیص داده شود، باید آن را جزء فعالیت‌های تخصیص یافته به حساب آورد. این روند تا تخصیص آخرین بخش یک فعالیت ادامه می‌یابد. شکل ۳ نشان می‌دهد فعالیت‌ها به ترتیب باید در مدهای ۳، ۳ و ۱ انجام گیرند. این ساختار جواب برای هر دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II اجرا شده است.

۰/۳۳۴	۰/۱۹۷	۰/۷۴۴	۰/۴۷۹	۰/۶۰۹	۰/۸۵۹	۰/۵۷۶	۰/۲۳۹
۱	۱	۱	۲	۳	۳	۳	۲

شکل ۳. روش به کاررفته به منظور تعیین تخصیص فعالیت‌ها

جدول ۲. مسائل تولیدشده

شماره مسئله	i	m	k
۱	۳	۲	۳
۲	۵	۲	۳
۳	۸	۲	۴
۴	۱۰	۳	۴
۵	۱۲	۳	۴
۶	۱۵	۳	۴
۷	۱۸	۳	۴
۸	۲۰	۳	۵
۹	۲۲	۴	۵
۱۰	۲۵	۴	۵
۱۱	۲۸	۴	۵
۱۲	۳۰	۴	۶
۱۳	۳۲	۴	۶
۱۴	۳۵	۴	۶
۱۵	۳۸	۵	۶
۱۶	۴۰	۵	۶
۱۷	۴۲	۵	۷
۱۸	۴۵	۵	۷
۱۹	۴۸	۵	۸
۲۰	۵۰	۵	۸

داده‌های مسائل ارائه شده در این تحقیق به صورت تصادفی از طریق نرم‌افزار متلب تولید شده‌اند. اطلاعات مربوط به این داده‌ها به صورت زیر است:

از آنجاکه وقفه در انجام دادن فعالیت‌ها مجاز است، روش نمایش جواب باید به صورت گسسته باشد؛ بنابراین، برای تعیین توالی انجام دادن کارها هر فعالیت برحسب زمان‌های انجام دادن آن فعالیت‌ها تقسیم‌بندی می‌شود و برای زمان هر فعالیت یک بخش جداگانه در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله برای هر بخش یک مجموعه به نام activity تعریف می‌شود. در این مجموعه، فعالیت‌هایی تعریف می‌شوند که مجموعه پیش‌نیازی تهی دارند. سپس در هر مرحله اعداد واقع در لایه دوم شکل ۱ در تعداد

براساس تحقیق فرانسیسکو [۲۲]، الگوریتم NSGA-II در مقایسه با الگوریتم‌های قدرتمندی از قبیل SPEA-II، PSA و... عملکرد بهتری در حل مسائل چندهدفه RCPSP داشته است؛ بنابراین، از این الگوریتم برای مقایسه با الگوریتم MOPSO به کاررفته در این پژوهش استفاده شده است.

نتایج محاسبات

تولید مسائل نمونه

از آنجاکه کتابخانه خاص مسائل P-MRCPSP وجود ندارد و مدل ارائه شده ماهیتی متفاوت با سایر مسائل کلاسیک در حوزه مسائل زمان‌بندی پروژه دارد، استفاده از داده‌های مسائل استاندارد موجود در کتابخانه خاص مسائل زمان‌بندی پروژه به دلیل تغییر در ماهیت مسائل تعریف شده کمکی به مقایسه و ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها نمی‌کند؛ بنابراین، در این قسمت ۲۰ مسئله تصادفی به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه شده‌اند. این مسائل براساس پیچیدگی در سه سایز مختلف کوچک، متوسط و بزرگ طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین، این مسائل براساس تعداد فعالیت‌های پروژه، تعداد حالات ممکن اجرای هر فعالیت و تعداد منابع به کاررفته در فعالیت‌های مختلف پروژه طبقه‌بندی می‌شوند. این مسائل در جدول ۲ نمایش داده می‌شوند.

تنظیم پارامترها به روش تاگوچی

کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ارتباط مستقیمی با تنظیم پارامترهای آن دارد، به طوری که انتخاب صحیح مقادیر پارامترها، سبب افزایش کارایی الگوریتم می‌شود. روش‌های آماری متنوعی برای طراحی آزمایش‌ها مطرح شده است، اما در استفاده از رویکرد جامعی مانند آزمایش‌های عاملی کامل با افزایش تعداد عامل‌های مورد بررسی، انجام‌دادن محاسبات، پیچیده و بسیار زمانبر می‌شود.

۱. زمان انجام‌دادن هر فعالیت در یک دوره زمانی مشخص از توزیع یکنواخت پیوسته در بازه [۲...۷] پیروی می‌کند؛
۲. مقدار منابع لازم از نوع k ام برای اجرای فعالیت i ام در حالت m ام از توزیع یکنواخت در بازه [۱...۳] پیروی می‌کند؛
۳. مقدار منبع تجدیدپذیر موجود از نوع k در هر مقطع از زمان از توزیع یکنواخت در بازه [۴...۶] پیروی می‌کند؛
۴. میزان جریان نقدی به‌طور تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه [۳۰۰۰...۴۰۰۰۰] پیروی می‌کند؛
۵. نرخ تنزیل نیز برابر با $۰/۲$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. سطوح مربوط به پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی

Multi-objective algorithms	Algorithm parameters	Parameter level		
		Level 1	Level 2	Level 3
NSGA-II	Pc	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	Pm	۰/۱	۰,۱۵	۰,۲
	N-pop	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
	Max iteration	* N۵	*N۱۰	* N۱۵
	C1	۱	۱/۴۹۶۲	۲
	C2	۱	۱/۴۹۶۲	۲
MOPSO	W	۰/۶	۰/۷۲۹۸	۰/۹
	Max iteration	* N۵	* N۱۰	* N۱۵
	N-Pop	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
	N-Rep	۵۰	۷۰	۱۰۰
	N-Grid	۰/۷	۸	۱۰

جدول ۴. نتایج محاسباتی الگوریتم NSGAII

Run order	P_{cr}	P_{mut}	Max-iteration	N- Pop	Response
۱	۱	۱	۱	۱	-/۰.۲۸۸۴
۲	۱	۲	۲	۲	-/۰.۲۹۳۷۳
۳	۱	۳	۳	۳	-/۰.۲۹۱۵۹
۴	۲	۱	۲	۳	-/۰.۲۸۵۴۱
۵	۲	۲	۳	۱	-/۰.۵۷۳۹۵
۶	۲	۳	۱	۲	-/۰.۵۹۹۵۸
۷	۳	۱	۳	۲	-/۰.۲۸۸۲۶
۸	۳	۲	۱	۳	-/۰.۰۶۲۵
۹	۳	۳	۲	۱	-/۰.۸۸۳۴۲

برای الگوریتم MOPSO انتخاب شده است. شایان ذکر است فاکتورها همان پارامترهای مربوط به دو الگوریتم هستند. در جدول ۳، سطوح در نظر گرفته شده برای هر پارامتر به منظور آزمایش تاگوجی ارائه می‌شود. داده‌های جدول زیر بنا به تشخیص و در بازه مورد قبول هر پارامتر به طور دلخواه در نظر گرفته شده است.

آرایه‌های متعامد مربوط به این طرح‌ها به همراه مقادیر متغیر پاسخ برای الگوریتم NSGA-II در جدول ۴ و برای الگوریتم MOPSO در جدول ۵ ارائه می‌شود. مسائل مورد بررسی در این پژوهش به دو دسته کوچک و بزرگ تقسیم شده‌اند. برای اجرای آزمایش‌ها، یک مسئله نمونه در نظر گرفته شده است. هریک از نه آزمایش مختلف طراحی شده در آرایه متعامد L9 برای الگوریتم NSGA-II، برای هریک از مسائل، سه بار اجرا شده است.

تاگوجی دسته‌ای از آزمایش‌های عاملی کسری را معرفی کرد که به طور شایان توجهی تعداد آزمایش‌های ضروری را برای بررسی با حفظ اطلاعات مورد نیاز کاهش می‌دهد. در این پژوهش، فاکتورهای کنترلی روش تاگوجی برای تنظیم پارامترهای کنترلی، شامل پارامترهای عدد ثابت مثبت (c1) و عدد ثابت مثبت (c2)، وزن اینرسی (W)، تعداد تکرار (max-iteration)، اندازه جمعیت (N-pop)، تعداد اعضای مخزن (N-Rep) و تعداد بخش‌بندی‌های هر بعد (N-Grid) در الگوریتم MOPSO و پارامترهای کنترلی اندازه جمعیت (N-pop)، تعداد تکرار (N-iteration)، احتمال تقاطع (Pc) و احتمال جهش (Pm) در الگوریتم NSGA-II به کار رفته است. برای عوامل در نظر گرفته شده، از جدول‌های استاندارد آرایه‌های متعامد، مناسب‌ترین آرایه طرح L9 (با ۴ فاکتور و در ۳ سطح) برای الگوریتم NSGAII و طرح L27 (۷ فاکتور و در ۳ سطح)

جدول ۵. نتایج محاسباتی الگوریتم MOPSO

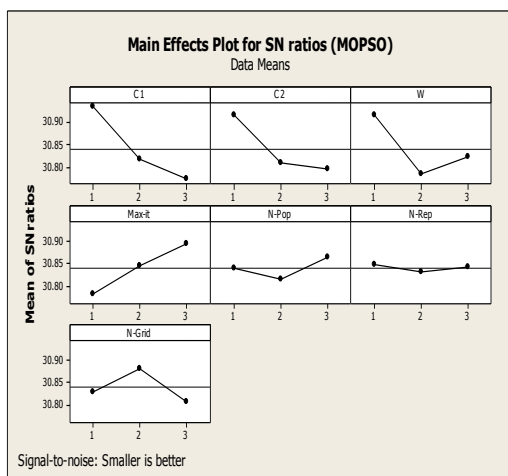
Run order	C_1	C_2	W	Max-iteration	N-Pop	N-Rep	N-Grid	Response
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۲۸۴۳۸
۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۰/۰۲۷۶۶۴
۳	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۰/۰۲۸۲۰۵
۴	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۰/۰۲۸۴۸۱
۵	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰/۰۲۸۸۶۱
۶	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۰/۰۲۸۶۶۵
۷	۱	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۰/۰۲۸۳۱۵
۸	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۰/۰۲۸۶
۹	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۰/۰۲۸۳۶۵
۱۰	۲	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۰/۰۲۸۵۲۶
۱۱	۲	۱	۲	۳	۲	۳	۱	۰/۰۲۸۵۵
۱۲	۲	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۰/۰۲۸۵۴۴
۱۳	۲	۲	۳	۱	۱	۲	۳	۰/۰۲۹۱۲۱
۱۴	۲	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۰/۰۲۹۳۱۲
۱۵	۲	۲	۳	۱	۳	۱	۲	۰/۰۲۹۰۴۳
۱۶	۲	۳	۱	۲	۱	۲	۳	۱/۱۴۲۰۷
۱۷	۲	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۱/۴۳۵۵۰
۱۸	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۱/۱۹۱۴۳
۱۹	۳	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱/۲۴۹۹۵

ادامه جدول ۵. نتایج محاسباتی الگوریتم MOPSO

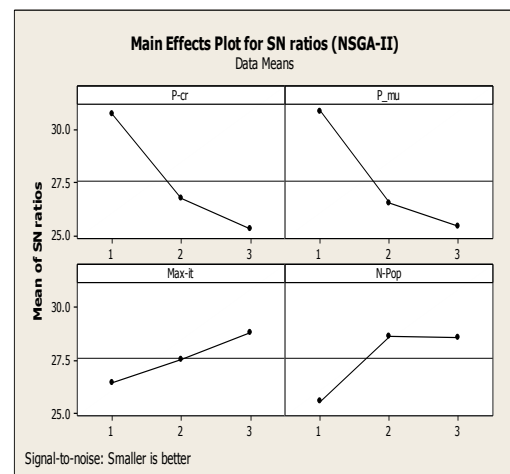
Run order	C_1	C_2	W	Max-iteration	N-Pop	N-Rep	N-Grid	Response
۲۰	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۱/۲۹۷۶۱
۲۱	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۱/۲۲۵۸۱
۲۲	۳	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۱/۲۱۲۹۹
۲۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۱/۷۲۰۵۴
۲۴	۳	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۱/۲۵۴۲۷
۲۵	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۱/۴۰۱۳۸
۲۶	۳	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۱/۳۱۵۳۰
۲۷	۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۱/۴۶۷۲۹

شکل‌های ۴ و ۵ سطوح بهینه هر فاکتور را برای الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO نشان می‌دهد. با استفاده از شکل‌های ۴ و ۵، نتایج مناسب پارامترها انتخاب شده و در جدول ۳ به صورت پررنگ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، بهترین سطح برای این فاکتورها به ترتیب عبارت‌اند از: پارامترهای کنترلی (C_1) سطح سوم و (C_2) سطح سوم، (W) سطح دوم، تعداد تکرار (max-iteration) سطح اول، اندازه جمعیت (N-pop) سطح دوم، (N-Rep) سطح دوم و (N-Grid) سطح سوم در الگوریتم MOPSO و پارامترهای کنترلی اندازه جمعیت (N-pop) سطح سوم، تعداد تکرار (N-iteration) سطح سوم، احتمال تقاطع (Pc) سطح سوم و احتمال جهش (Pm) سطح سوم در الگوریتم NSGA-II.

هریک از ۲۷ آزمایش مختلف طراحی شده در آرایه متعامد طرح L27 برای الگوریتم MOPSO نیز برای هر طرح، سه بار اجرا شده و میانگین آن‌ها در جدول‌های ۴ و ۵ به عنوان متغیر پاسخ آمده است. در این مرحله، هدف یافتن مقدار مطلوب پارامترهای الگوریتم MOPSO و NSGA-II به عنوان متغیر ورودی برای به دست آوردن پاسخ بهینه (Y) است. شایان ذکر است در تنظیم پارامتر MOPSO و NSGA-II از معیار $R = \frac{MID}{Diversification}$ (یک متغیر پاسخ مناسب که در این تحقیق استفاده می‌شود و شامل تلفیق دو شاخص MID بیانگر مشخصه همگرایی جواب‌های الگوریتم و شاخص Diversification بیانگر تنوع‌دهی جواب‌های حاصل از الگوریتم است) برای تعیین مناسب‌ترین آزمایش استفاده شده است. نتایج روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی به نرخ S/N تبدیل می‌شود.



شکل ۵. متوسط نرخ S/N برای هر سطح از فاکتورهای الگوریتم‌های MOPSO

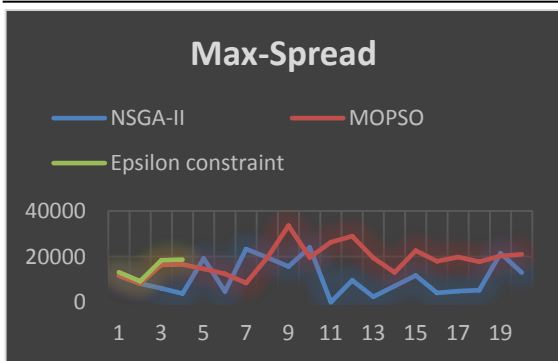


شکل ۴. متوسط نرخ S/N برای هر سطح از فاکتورهای الگوریتم‌های NSGAII

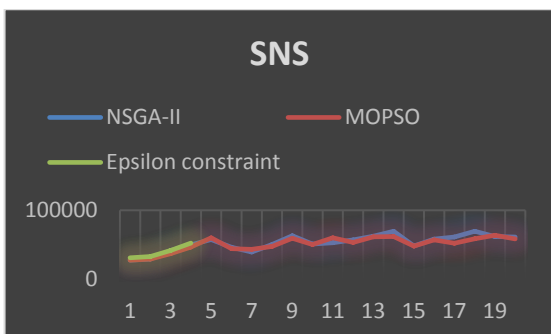
نتایج محاسباتی

در این قسمت، عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی براساس شاخص‌های محاسبه فاصله نزدیکی بین جواب‌های نامغلوب حاصله و نقطه ایده‌آل حاصل (MID)^۵، محاسبه گستردگی جواب‌های جبهه پارتو بهینه حاصل از الگوریتم (MS)^۶، گستردگی محاسبه میزان تنوع در جواب‌های پارتو (SNS)^۷، محاسبه تعداد جواب‌های نامغلوب به دست آمده از طریق الگوریتم (NPS)^۸، محاسبه نرخ تعادل در دستیابی به هریک از اهداف (RAS)^۹ و محاسبه یکنواختی انتشار جواب‌های نامغلوب (Spacing)^{۱۰} بررسی می‌شود. این الگوریتم‌ها روی نرم‌افزار متلب کدنویسی شده‌اند و از طریق یک کامپیوتر شخصی دارای ۲ گیگابایت رم و سی پی یوی ۲ هسته‌ای اجرا شده‌اند. همچنین، مدل ارائه شده در این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی در سایز کوچک به صورت دقیق حل شده است.

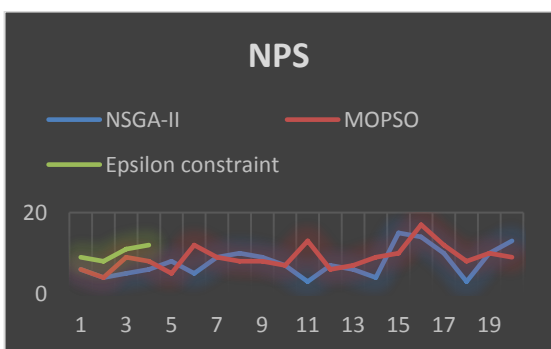
به این منظور، روش دقیق محدودیت افسیلون در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی شده و جواب‌های حاصل از حل دقیق مسائل سایز کوچک به دست آمده است. به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالای مدل ارائه شده، فقط مسائل دارای سایز کوچک در نرم‌افزار گمز حل شدند. از آنجاکه روش‌های حل دقیق توانایی حل مسائل سایز متوسط و بزرگ را در زمان معقول ندارند، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری NSGAII و MOPSO به منظور حل مسئله و یافتن جواب‌های تقریبی موجه استفاده شده است. همچنین، نتایج براساس شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش به صورت نمودار در شکل‌های ۶ تا ۱۱ ارائه می‌شود.



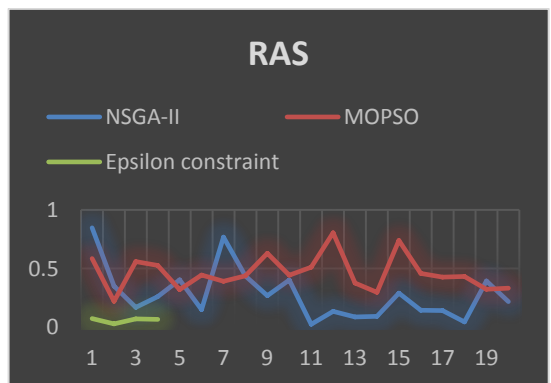
شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای شاخص MS



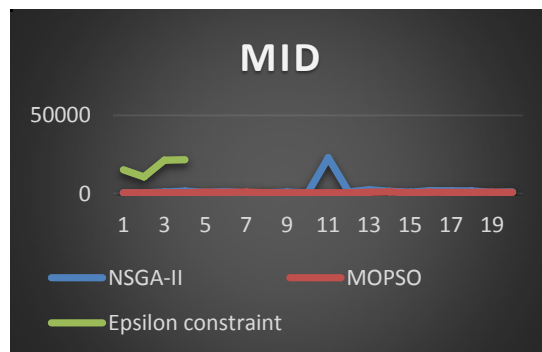
شکل ۸. نمودار مقایسه‌ای شاخص SNS



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای شاخص NPS

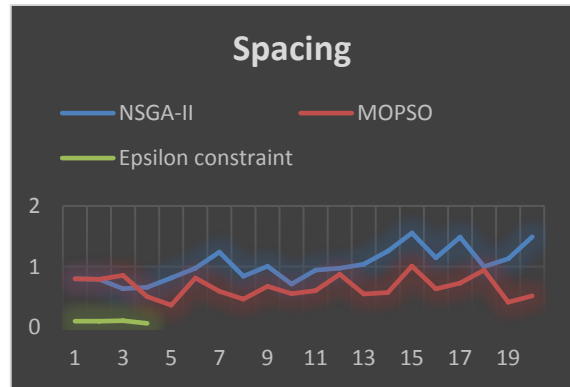


شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای شاخص RAS



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای شاخص MID

با رسم مقادیر شاخص‌های به‌دست‌آمده از جدول‌های ۶ و ۷ به‌صورت نمودار (شکل‌های ۶ تا ۱۱) و مقایسه نمودارهای شاخص الگوریتم‌ها، مشخص می‌شود الگوریتم MOPSO عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم NSGAII برحسب معیارهای MID، MS، NPS و Spacing دارد، درحالی‌که الگوریتم NSGAII عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم MOPSO برحسب معیارهای SNS و RAS دارد.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای شاخص Spacing

جدول ۶. مقایسه مقادیر شاخص‌های عملکردی به‌دست‌آمده از طریق الگوریتم‌های پیشنهادی

Problem No.	NSGA-II			MOPSO			Epsilon Constraint		
	MID	Max-Spread	SNS	MID	Max-Spread	SNS	MID	Max-Spread	SNS
۱	۴۰۱/۷۸۱۸	۱۱۶۳۴/۵۷	۲۷۸۵۴/۳۳	۴۰۱/۷۸۱۸	۱۱۶۳۴/۵۶۶۱۴	۲۷۸۵۴/۳۳	۳۰۴/۵۵۰۶	۸۸۱۹/۰۰۱۱۳۴	۲۱۱۱۳/۵۸
۲	۵۱۶/۵۰۸۴	۸۱۶۰/۳۳	۲۹۵۰۰/۷۶	۵۱۶/۵۰۸۴	۸۱۶۰/۳۲۹۸۷۹	۲۹۵۰۰/۷۶	۳۹۱/۵۱۳۴	۶۱۸۵/۵۳۰۰۴۸	۲۲۳۶۱/۵۷
۳	۹۲۹/۴۴۰۶	۶۱۱۱/۱۵	۴۱۸۱۳/۶۸	۴۶۳/۷۲	۱۶۳۴۹/۴۴۱۴۹	۳۷۲۰۸/۱۵	۳۵۱/۴۹۹۸	۱۲۳۹۲/۸۷۶۶۵	۲۸۲۰۳/۷۸
۴	۱۴۹۹/۱۲۲	۳۷۹۷/۳۹۶	۴۹۹۹۸/۰۷	۶۰۷/۹۸۷۳	۱۶۵۸۱/۰۴۷۳۶	۴۶۷۳۵/۲۵	۴۶۰/۸۵۴۴	۱۲۵۶۸/۴۳۳۹	۳۵۴۲۵/۳۲
۵	۶۹۰/۰۸۱۸	۱۹۱۲۳/۱۴	۵۷۵۲۰/۱۱	۸۳۲/۲۹۴۳	۱۴۵۶۷/۹۱۲۷۱	۶۰۲۰۷/۸۱	NA	NA	NA
۶	۱۲۰۹/۸۴۷	۴۶۶۷/۲۴۳	۴۶۵۹۰/۹۱	۷۰۱/۲۶۲۹	۱۲۴۱۲/۸۱۰۸۴	۴۴۵۶۴/۳۴	NA	NA	NA
۷	۳۸۶/۶۴۱۹	۲۳۲۶۷/۷۹	۳۹۷۱۳/۵۱	۸۵۴/۶۶۴۶	۸۴۰۹/۳۶۵۶۸۳	۴۳۵۴۷/۲۱	NA	NA	NA
۸	۵۸۷/۷۶۸۷	۱۹۵۵۲/۸۳	۵۰۳۹۶/۶۸	۵۶۹/۰۶۰۹	۱۹۵۶۶/۸۶۸۳۶	۴۷۸۰۷/۲۵	NA	NA	NA
۹	۸۷۴/۷۸۸۶	۱۵۶۴۹/۹۲	۶۳۱۱۴/۶۵	۵۰۶/۱۸۵۲	۳۳۴۹۶/۲۶۲۸۸	۵۹۴۳۱/۶۶	NA	NA	NA
۱۰	۵۱۵/۵۴۷۳	۲۴۰۰۹/۷	۵۱۲۵۹/۵۷	۵۸۵/۱۰۶۶	۱۹۶۴۹/۷۸۰۴۶	۵۰۴۵۲/۹۴	NA	NA	NA
۱۱	۲۲۷۸۶/۳۸	۳۳/۶۰۷۹۲	۵۲۹۲۷/۶۵	۶۱۸/۱۲۵۴	۲۶۲۹۹/۵۵۴۳۲	۶۰۱۱۸/۶۴	NA	NA	NA
۱۲	۱۰۳۴/۶۶۶	۹۵۵۴/۸۱۲	۵۷۱۸۱/۷۵	۴۵۱/۷۰۷	۲۸۹۰۳/۸۲۲۲۳	۵۳۴۷۴/۸۵	NA	NA	NA
۱۳	۲۳۹۳/۶۱۴	۲۳۹۵/۰۵۳	۶۲۴۳۰/۳۱	۷۴۴/۷۸۳۹	۱۹۴۰۶/۱۳۳۳۲	۶۱۵۸۵/۱۹	NA	NA	NA
۱۴	۱۴۲۸/۸۸۴	۷۰۴۱/۷۵۸	۶۹۷۵۴/۶۷	۹۶۵/۶۹۵۶	۱۳۰۵۵/۳۶۷۰۱	۶۲۰۷۹/۹۲	NA	NA	NA
۱۵	۸۰۶/۲۷۸۴	۱۱۶۸۷/۸۳	۴۸۴۷۶/۱۸	۵۰۰/۹۰۱	۲۲۵۹۷/۶۷۲۳۳	۴۸۲۱۰/۵۶	NA	NA	NA
۱۶	۱۷۸۱/۰۴۶	۴۰۲۵/۵۷۶	۵۸۳۹۴/۲۶	۷۶۰/۹۱۲۴	۱۷۹۲۸/۳۶۴۲۵	۵۷۱۵۴/۶۱	NA	NA	NA
۱۷	۱۶۶۵/۸۹۳	۴۸۱۶/۲۷	۶۱۲۵۵/۸۶	۶۳۶/۶۸۰۱	۱۹۷۶۳/۶۹۸۸۳	۵۲۲۹۹/۷۸	NA	NA	NA
۱۸	۱۵۶۰/۴۹۵	۵۲۷۳/۴۲۳	۶۹۷۰۲/۶۲	۷۳۴/۳۶۱۹	۱۷۷۴۱/۵۶۷۶۹	۵۸۷۶۰/۵۸	NA	NA	NA
۱۹	۷۰۱/۶۰۷۹	۲۱۳۶/۱۷	۶۲۰۸۱/۵۲	۷۹۰/۳۷۸۱	۲۰۲۶۲/۶۷۹۰۵	۶۳۸۶۸/۸۱	NA	NA	NA
۲۰	۹۶۵/۶۶۷	۱۲۹۹۸/۸۶	۶۱۳۸۷/۶۶	۴۰۱/۷۸۱۸	۲۰۹۳۵/۴۸۶۳۱	۵۸۵۵۷/۸۶	NA	NA	NA

جدول ۷. مقایسه مقادیر شاخص‌های عملکردی به دست آمده از طریق الگوریتم‌های پیشنهادی

Problem No.	NSGA-II			MOPSO			Epsilon Constraint		
	NPS	RAS	Spacing	NPS	RAS	Spacing	NPS	RAS	Spacing
۱	۶	۰/۸۴۶۵	۰/۷۹۶۹۲	۶	۰/۵۸۳۹۷	۰/۷۹۶۹۲	۹	۰/۴۴۲۶۵	۰/۶۰۴۰۶۵
۲	۴	۰/۳۵۰۲۱۷	۰/۷۸۹۲۵۲	۴	۰/۲۱۹۸۷۳	۰/۷۸۹۲۵۲	۸	۰/۱۶۶۶۶۴	۰/۵۹۸۲۵۳
۳	۵	۰/۱۶۸۰۵۵	۰/۶۳۴۲۸	۹	۰/۵۵۸۸۹۸	۰/۸۵۲۴۲۲	۱۱	۰/۴۲۳۶۴۵	۰/۶۴۶۱۳۶
۴	۶	۰/۲۵۹۷۱۴	۰/۶۵۹۱۳۵	۸	۰/۵۲۵۴۶۲	۰/۵۰۳۱۸۹	۱۲	۰/۳۹۸۳۱۰	۰/۳۸۱۴۱۷
۵	۸	۰/۴۰۲۶۸۵	۰/۸۱۰۰۲۴	۵	۰/۳۲۰۲۴	۰/۳۶۳۶۰۵	NA	NA	NA
۶	۵	۰/۱۴۹۰۰۳	۰/۹۷۱۳۴۲	۱۲	۰/۴۴۴۲۶	۰/۸۱۱۶۹۵	NA	NA	NA
۷	۹	۰/۷۶۷۴۶۶	۱/۲۳۹۹۷۳	۹	۰/۳۹۱۲۴۱	۰/۵۹۲۷۴۸	NA	NA	NA
۸	۱۰	۰/۴۳۵۲۳۴	۰/۸۳۹۶۷۲	۸	۰/۴۳۶۸۹۹	۰/۴۶۳۸۹۴	NA	NA	NA
۹	۹	۰/۲۶۸۶۳۸	۰/۰۰۳۷۸۹	۸	۰/۶۲۹۳۹۵	۰/۶۷۴۴۱۹	NA	NA	NA
۱۰	۷	۰/۴۰۱۲۲۹	۰/۷۱۱۹۸۷	۷	۰/۴۴۳۳۵۳	۰/۵۵۱۵۷۶	NA	NA	NA
۱۱	۳	۰/۰۲۴۱۴۹	۰/۹۴۱۲۹	۱۳	۰/۵۱۰۴۳۶	۰/۶۰۱۹۴۶	NA	NA	NA
۱۲	۷	۰/۱۳۴۰۰۲	۰/۹۷۳۴۴۸	۶	۰/۸۰۳۸۰۲	۰/۸۷۱۲۷۵	NA	NA	NA
۱۳	۶	۰/۰۸۶۷۳۶	۱/۰۳۹۲۲۳	۷	۰/۳۷۵۴۸۳	۰/۵۴۸۴۶۴	NA	NA	NA
۱۴	۴	۰/۰۹۱۷۸۲	۱/۲۵۴۲۷۷	۹	۰/۲۹۶۷۸۱	۰/۵۷۰۵۲۳	NA	NA	NA
۱۵	۱۵	۰/۲۹۰۱۵۶	۱/۵۵۲۶۱۴	۱۰	۰/۷۳۹۴۲۸	۱/۰۰۷۲۴۲	NA	NA	NA
۱۶	۱۴	۰/۱۴۴۰۵۱	۱/۱۴۴۹۴۲	۱۷	۰/۴۵۷۶۳۸	۰/۶۳۲۷۲	NA	NA	NA
۱۷	۱۰	۰/۱۴۰۷۹۷	۱/۴۸۵۲۹۶	۱۲	۰/۴۲۶۱۸۵	۰/۷۲۷۴۲۱	NA	NA	NA
۱۸	۳	۰/۰۴۳۶۴۵	۰/۹۹۹۲۴۲	۸	۰/۴۳۱۴۲	۰/۹۴۰۸۷۹	NA	NA	NA
۱۹	۱۰	۰/۳۹۳۸۸۶	۱/۱۲۶۸۰۴	۱۰	۰/۳۲۲۸۲۱	۰/۴۱۲۱۱۸	NA	NA	NA
۲۰	۱۳	۰/۲۱۷۷۶۴	۱/۴۸۹۶۵۶	۹	۰/۳۳۲۶۱۵	۰/۵۱۴۴۸۳	NA	NA	NA

پتروشیمی اشاره کرد. در این تحقیق، یک مدل ریاضی جدید برای مسئله زمان‌بندی پروژه دارای منابع محدود چندحالتی منقطع ارائه شده است. مسائل دارای سایز کوچک با استفاده روش محدودیت اپسیلون که در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی شده بود حل شده‌اند و جواب دقیق به دست آمده گزارش شده است. به منظور یافتن جواب مناسب برای مسائل دارای سایز متوسط و بزرگ الگوریتم‌های فرا ابتکاری کارایی برای حل مسئله موردنظر توسعه داده شده است. همچنین، مدل ارائه شده در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ با استفاده از

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

از دیدگاه عملی، بهبود برنامه‌ریزی پروژه جزئی از علم مدیریت پروژه است و ممکن است به میزان چشمگیر به افزایش سود سازمان‌ها منجر شود. در تمام پروژه‌های اجرایی که با محدودیت منابع انسانی متخصص یا ماشین‌آلات روبه‌رو هستند، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع کاربرد دارد. از جمله زمینه‌های کاربرد این مسئله می‌توان به فعالیت‌های عمرانی، توسعه نرم‌افزارها، پروژه‌های صنایع سنگین و همچنین حوزه‌های نفت و گاز و

جهت‌های مختلف را دارد؛ برای مثال، می‌توان منابع تجدیدنپذیر از قبیل بودجه پروژه، مواد مصرفی و... را تحت محدودیت جدیدی در مدل در نظر گرفت. مدل ارائه شده در این تحقیق برای یک پروژه بوده است، در حالی که در بسیاری از مسائل جهان واقعی کارفرمایان به کنترل هم‌زمان چندین پروژه تمایل دارند. برخی از پارامترهای ارائه شده در این تحقیق مانند زمان انجام دادن فعالیت‌ها ممکن است در برخی از موارد به صورت غیرقطعی باشد؛ بنابراین، می‌توان از رویکردهای عدم قطعیت از قبیل روش‌های موجود در بهینه‌سازی استوار، مجموعه‌های فازی یا برنامه‌ریزی تصادفی به عنوان ایده‌ای جدید برای تحقیقات آتی استفاده کرد. همچنین، تلفیق مسئله ارائه شده در این تحقیق با دیگر مسائل موجود در زمان بندی پروژه و حتی تلفیق این مسئله با مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت ممکن است این حوزه از زمان بندی پروژه را پویاتر و کاربردی‌تر کند.

الگوریتم‌های توسعه یافته حل شده است. بعد از اجرای برنامه‌های تولید شده برای مسائل نمونه ایجاد شده، نتایج در مورد الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی با استفاده از تحلیل‌های آماری به شرح زیر به دست آمده است:

۱. با توجه به اینکه ساختار جواب ابتکاری جدید تولید شده در این تحقیق قابلیت ارضای قطعی تمامی محدودیت‌ها را دارد، تمامی جواب‌های به دست آمده موجه و قابل قبول هستند.

۲. نتایج حل مدل از طریق الگوریتم‌های پیشنهادی نشان دادند الگوریتم MOPSO از لحاظ شاخص‌های MID، NPS، MS و Spacing نتایج بهتری نسبت به الگوریتم NSGAI و NSGAI ارائه داده است، در حالی که الگوریتم بر اساس معیارهای RAS و SNS عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم MOPSO داشته است.

در مسائل زمان بندی پروژه با منابع محدود، محدودیت اصلی در تعداد منابع (انسانی یا ماشین‌آلات) در دسترس است، اما مدل ارائه شده در این تحقیق قابلیت توسعه از

مراجع

1. Russell, A. H. (1970). "Cash flows in networks", *Management Sci.*, Vol. 16, No. 5, PP. 357- 373.
2. Grinold, R. C. (1972). "The payment scheduling problem", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 19, No. 1, PP. 123- 136.
3. Amin-Tahmasbi, H., Tavakkoli-Moghaddam, R. & Iranmash, H. (2009). "Project planning in presence of resource constraint with immune algorithm", *5th Int project management Conf.*, Tehran.
4. Khalili-Damghani, K., Tavakkoli-Moghaddam, R. & Tabari, M. (2011). "Solve of resource-constrained project scheduling problem using modified ant colony algorithm", *J. of Industrial Engineering*, Vol. 45, No. 1, PP. 59- 69.
5. Talbot, F. B. (1982). "Resource-constrained project scheduling with time-resource trade-offs: The nonpreemptive case", *Management Sci.*, Vol. 28, No. 10, PP. 1197- 1210.
6. Al-Fawzan, M. A. & Haouari, M. (2005). "A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling", *Int. J. of Production Economics*, Vol. 96, No. 2, PP. 175-187.
7. Peteghem, V. & Vanhoucke, M. (2010). "A genetic algorithm for the preemptive and on reemptive multi-mode resource constrained project-scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 201, No. 2, PP. 409- 418.
8. Seifi, M. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2008). "A new bi-objective model for a multimode resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows and four payments model", *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, Vol. 21, No. 4, PP. 347- 360.
9. Chen, Z. J. & Chyu, C. C. (2010). "A dual-population memetic algorithm for minimizing total cost of multi-mode resource-constrained project scheduling", *Industrial Engineering and Management Systems*, Vol. 9, No. 2, PP. 70- 79.

10. Coelho, J. & Vanhoucke, M. (2011). "Multi-mode resource-constrained project scheduling using RCPSP and SAT solvers Original", *European Journal of Operational Research*, Vol. 213, No. 1, PP. 73- 82.
11. Azimi, F., Aboutalebi, R. & Najafi, A. A. (2011). "Using multi-objective particle swarm optimization for bi-objective multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 6, PP. 1015- 1019.
12. Wang, L. & Fang, Ch. (2012). "An effective estimation of distribution algorithm for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *Computers & Operations Research*, Vol, 39. No. 2, PP. 449- 460.
13. Li, H. & Zhang, H. (2013). "Ant colony optimization-based multi-mode scheduling under renewable and nonrenewable resource constraints", *Automation in Construction*, Vol. 35, PP. 431- 438.
14. Hao, X., Lin, L. & Gen, M. (2014). "An effective multi-objective EDA for robust resource constrained project scheduling with uncertain durations", *Procedia Computer Science*, Vol. 36, PP. 571- 578.
15. Roghanian, E. (2014). "A Bi-objective pre-emption multi-mode resource constrained project scheduling problem with due dates in the activities", *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, Vol 7, No. 15, PP. 15- 25
16. Cheng, J., Fowler, J., Kempf, K. & Mason, S. (2015). "Multi-mode resource-constrained project scheduling problems with non-preemptive activity splitting", *Computers & Operations Research*, Vol. 53, PP. 275- 287.
17. Shou, Y., Li, Y. & Lai, Ch. (2015). "Hybrid particle swarm optimization for preemptive resource-constrained project scheduling", *Neurocomputing*, Vol. 148, PP. 122- 128.
18. Moukrim, A., Quilliot, A. & Toussaint, H. (2015). "An effective branch-and-price algorithm for the preemptive resource constrained project scheduling problem based on minimal Interval Order Enumeration", *European Journal of Operational Research*, Vol. 244, No. 2, PP. 360- 368.
19. Farshidi, S. & Ziarati, K. (2016). "A bi- population genetic algorithm with two novel greedy mode selection methods for MRCPSP", *ACSIJ Advances in Computer Science: An International Journal*, Vol. 5, No. 22, PP. 66- 77.
20. Asta, Sh. Karapetyan, D. Kheiri, A. Özcan, E. & Parkes, A. J. (2016). "Combining Monte-Carlo and hyper-heuristic methods for the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem", *Information Sciences*, Vol. 373, PP. 476- 498.
21. Elloumi, S., Fortemps, Ph. & Loukil, T. (2017). "Multi-objective algorithms to multi-mode resource-constrained projects under mode change disruption", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 106, PP. 161– 173.
22. Ballestín, F. & Blanco, R. (2011). "Theoretical and practical fundamentals for multi-objective optimization in resource-constrained project scheduling problems", *Computers & Operations Research*, Vol. 38, No. 1, PP. 51– 62.
23. Buddhakulsomsiri, J. & Kim, D. S. (2006). "Properties of multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resource vacations and activity splitting", *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, No. 1, PP. 279- 295.
24. Liu, B., Wang, L. & Jin, Y. H. (2008). "An effective hybrid PSO-based algorithm for flow shop scheduling with limited buffers", *Computers & Operations Research*, Vol. 35, No. 9, PP. 2791- 2806.
25. Chen, R. M., Wu, C. L., Wang, C. M. and Lo, S. T. (2010). "Using novel particle swarm optimization scheme to solve resource-constrained scheduling problem in PSPLIB", *Expert systems with applications*, Vol. 37, No. 3, PP. 1899- 1910.
26. Tavakkoli-Moghaddam, R., Azarkish, M. & Sadeghnejad-Barkousaraie, A. (2011). "Solving a multi-objective job shop-scheduling problem with sequence-dependent setup times by a Pareto archive PSO

- combined with genetic operators and VNS”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 5- 8, PP. 733- 750.
27. Amiri, M., Abtahi, A. R. & Khalili-Damghani, K. (2013). “Solving a generalised precedence multi-objective multi-mode time-cost-quality trade-off project-scheduling problem using a modified NSGA-II algorithm”, *International Journal of Services and Operations Management*, Vol. 14, No. 3, PP. 355- 372.
28. Coello Coello, C. A., Van Veldhuizen, D. A. & Lamont, G. B. (2002). *Evaluatory algorithm for solving multi-objective problems*, Kluwer Academic Pub. Co., New York.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Multi-Mode Resource Constrains Project Scheduling Problem
 2. Preemptive Multi-mode Resource Constraints Project Scheduling Problem
 3. Multi-Objective Particle Swarm Optimization
 4. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
 5. Mean Ideal Distance
 6. Max-Spread
 7. Span of Non-dominant Solution
 8. Number of Pareto solutions
 9. The Rate of Achievement to Objectives Simultaneously
 10. Spacing Metric
-