Archive of SID

بهینه‌سازی مدل دوهدفهٔ مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با منابع محدود باوجود چند حالت اجرایی و امکان قطع فعالیت‌ها

حمزه امین طهماسبی[۱*]، الهیار داغبندان،[۲] رؤیا باقرپور[۳]

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

۲. استادیار گروه مهندسی شیمی دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان

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

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

چکیده

مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با وجود چند حالت اجرایی (MRCPSP)[۱]، به‌دنبال یافتن بهترین توالی انجام‌دادن فعالیت‌هاست، به‌نحوی‌که 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 هریک از این حالت‌های اجرایی، مقدار منابع و زمان اجرایی فعالیت‌ها مشخص و متفاوت است. در مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و چند حالت اجرایی با امکان قطع فعالیت‌ها (P-MRCPSP)[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-MRCPSP مدنظر قرار گرفته است. پس از حل مسئله با استفاده از روش محدودیت اپسیلون، با توجه به NP-hard بودن مسئله و چندهدفه‌بودن مدل، الگوریتم تکاملی چندهدفهٔ بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO)[۳] برای دستیابی به زمان‌بندی بهینه توسعه داده شده است. به‌منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، نتایج براساس شاخص‌های طراحی‌شده با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGAII)[۴] مقایسه می‌شود. برای تنظیم پارامترهای دو الگوریتم از روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. نتایج حل مدل نشان‌دهندهٔ قوت الگوریتم MOPSO است.

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

مقدمه

مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) از مسائل مهم در حوزهٔ 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 RCPSP اغلب کمینه‌کردن زمان تکمیل پروژه بوده است. زمانی‌که در پروژه محدودیت سرمایه وجود داشته باشد یا هزینهٔ سرمایه‌گذاری بالا باشد، اهمیت استفاده از معیار ارزش خالص فعلی نمایان می‌شود.

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

* نویسندهٔ مسئول: تلفن: ۰۱۳۳۳۶۹۰۲۴۲

Email: amintahmasbi@guilan.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

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

در زمینهٔ مسئلهٔ زمان بندی پروژه با منابع محدود و درنظرگرفتن جریانات نقدی مثبت و منفی، اولین‌بار راسل [۱] در سال ۱۷۷۴ ایدهٔ حداکثرکردن ارزش خالص فعلی جریانات نقدی پروژه را به‌عنوان یک معیار در زمان‌بندی پروژه مطرح کرد. راسل یک مسئله را بدون محدودیت منابع درنظر گرفت و فرض کرد فعالیت های پروژه در یک شبکهٔ فعالیت برداری ارائه شده است و جریانات نقدی مثبت و منفی در ارتباط با رویدادهای پروژه وجود دارد. وی یک مدل برنامه ریزی غیرخطی با تنزیل پیوسته تابع هدف ارائه کرد و برای استخراج یک تابع هدف خطی از تقریب سری های تیلور استفاده کرد. راسل فرم ثانویهٔ این مدل برنامه ریزی خطی را به صورت یک مسئلهٔ جریان شبکه تفسیر کرد و سپس روش حل بهینهٔ آن را استخراج کرد. وی کاربرد این الگوریتم را با یک مثال ساده تشریح کرده است.

گرینولد [۲] از مدل غیرخطی راسل استفاده کرد و نشان داد این مدل ممکن است به‌طور مستقیم به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تبدیل شود. وی با به‌کارگیری یک ساختار ویژه، دو الگوریتم حل بهینه برای مسئله ارائه داد. الگوریتم اول مسئله را برای یک فرجهٔ ثابت برای مسئله حل می‌کند، درحالی‌که الگوریتم دوم، مسئله را به‌صورت پارامتریک برای تمام فرجه های ممکن پروژه حل می‌کند. امین‌طهماسبی 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 الگوریتم‌های پیشین ارائه‌شده در رتبه‌بندی آقای کولیش و هارتمن مقایسه کردند. خلیلی دامغانی و همکاران [۴] رویکردی براساس بهینه‌سازی توسط کلونی مورچگان برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه‌ها با منابع محدود ارائه دادند. از جمله تفاوت‌های اصلی رویکرد ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان به تعریف قانون انتخاب احتمالی به‌شکل 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 مسئلهٔ زمان بندی پروژه با محدودیت منابع با وجود چند حالت اجرایی ارائه داد.

در مسائل واقعی، زمان‌بندی پروژه مسئلهٔ چندهدفه است، زیرا نمی توان با توجه به یک شاخص به جواب بهینه برای مسئله رسید. الفازان و هاوریی [۶] مسئلهٔ زمان بندی پروژه با محدودیت منابع را با وجود دو هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل پروژه و بیشینه‌کردن پایداری با روش فرا ابتکاری جست وجوی ممنوع حل کردند. سیفی و توکلی مقدم [۷] یک مدل ریاضی دومعیاره برای مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با چند حالت اجرایی با دو هدف بیشینه‌کردن ارزش خالص فعلی و کمینه‌کردن هزینهٔ نگهداری فعالیت‌های تکمیل‌شده تا زمان تکمیل نهایی پروژه ارائه کردند. پتقم و ونهوک [۸] مسئلهٔ زمان‌بندی 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 هزینه‌ای با هدف یافتن یک زمان‌بندی شدنی ارائه دادند که در آن هزینه‌های استفاده از منابع تجدیدناپذیر موردنظر بود و درنهایت این مسئله را با یک الگوریتم ابتکاری از گروه الگوریتم ممتیک حل کردند. کولهو و ونهوک [۱۰] یک رویکرد حل جدید برای مسئلهٔ MRCPSP ارائه دادند. هدف آن‌ها انتخاب یک حالت از هر فعالیت از مجموعهٔ حالت‌های دردسترس به‌منظور ساخت یک روابط تقدمی و زمان‌بندی پروژه منابع ممکن (منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) به‌منظور حداقل سازی زمان کل بوده است.

عظیمی و همکاران [۱۱] مدل زمان‌بندی پروژه با هدف مینیمم‌کردن زمان اجرای پروژه و ماکزیمم‌کردن ارزش خالص فعلی با جریان های نقدی مثبت و منفی ارائه کردند که به‌منظور حل مدل ارائه‌شده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات چندهدفه بهره بردند. وانگ و فنگ [۱۲] در پژوهش خود یک الگوریتم توزیع تخمینی برای حل مسئلهٔ MRCPSP پیشنهاد دادند. لی و ژانگ [۱۳] مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه منابع محدود چندحالته را در حالت‌های منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر با الگوریتم کلونی مورچگان حل کردند. هاوو و همکاران [۱۴] مسئلهٔ MRCPSP را با درنظرگرفتن زمان غیرقطعی برای طول فعالیت‌ها بررسی کردند. آن‌ها در مسئلهٔ خود دو هدف حداقل‌کردن مقاومت و همچنین حداقل‌سازی زمان کل پروژه را درنظر گرفتند و مسئلهٔ خود را با الگوریتم توزیع

www.SID.ir

Archive of SID

تخمین مؤثر حل کردند. سادات حسینی و همکاران [۱۵] مسئلهٔ 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] مسئلهٔ RCPSP را با درنظرگرفتن امکان قطع و عدم امکان قطع فعالیت‌ها بررسی کردند. آن‌ها در مسئلهٔ خود هر دو منبع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را درنظر گرفتند.

شو و همکاران [۱۷] یک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی برای حل RCPSP با امکان قطع فعالیت‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها در مسئلهٔ خود حداکثر یک وقفه در فعالیت‌ها را مجاز دانسته‌اند. موکریم و همکاران [۱۸] نیز مسئلهٔ RCPSP را با امکان قطع فعالیت‌ها و درنظرگرفتن منابع تجدیدپذیر درنظر گرفتند و آن را با الگوریتم شاخه و قیمت حل کردند. فرشیدی و زیارتی [۱۹] حل مسئلهٔ MRCPSPرا با استفاده از الگوریتم حریصانه بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهندهٔ عملکرد مناسب این الگوریتم برای مسائل سایز بزرگ بود. آستا و همکاران [۲۰] مسئلهٔ MRCPSP را با ترکیب روش مونت‌کارلو و الگوریتم ممتیک حل کردند و نتایج رضایت‌بخشی را به‌دست آوردند. الومی و همکاران [۲۱] یک الگوریتم تکاملی و یک روش ابتکاری چندهدفهٔ واکنشی را به‌منظور حل مسئلهٔ MRCPSP در شرایط اختلال در تغییر حالات مختلف ارائه کردند.

به‌منظور 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 مسئلهٔ زمان‌بندی پروژهٔ چندهدفه با محدودیت منابع در چند حالت اجرایی بررسی شده است. همچنین، برای نمونه‌های چندحالته، بودهاکولسمسیری و کیم [۲۳] ثابت کردند انقطاع در بهبود زمان تکمیل پروژه مؤثر است. درنتیجه، 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 ارائه‌شده بهبودی بر مدل‌های ریاضی موجود در ادبیات موضوع برای مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با 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، به‌دلیل تخصیص منابع محدود به فعالیت‌ها نسبت به مدل‌های قبلی بسیار سخت‌تر است، به‌طوری‌که محاسبات برای پیداکردن جواب بهینهٔ مسئله، با بزرگ‌شدن ابعاد مسئله به‌طور نمایی افزایش می‌یابد و به‌شدت به سمت NP-hard میل می‌کند. درنتیجه، 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 (به‌دلیل وسعت فضای جست‌وجوی حل بهینه) و هم خطرپذیری جواب نزدیک به بهینه خودنمایی می‌کند. همچنین، در دههٔ اخیر الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه در محیط‌های مختلف کاربردهای متنوعی داشته است. در این زمینه، می‌توان به حل مسئلهٔ زمان‌بندی flowshop جایگشتی [۲۴]، RCPSP [۲۵] و Jobshop [۲۶] اشاره کرد. از آنجاکه در ادبیات موضوع استفاده از الگوریتم MOPSO برای حل مسئلهٔ MRCPS با وجود امکان قطع فعالیت‌ها مشاهده نشد، در پژوهش حاضر، از این الگوریتم استفاده شد و نتایج با حل حاصل از الگوریتم NSGA-II ارائه‌شده توسط امیری و همکاران [۲۷] مقایسه شده است.

همچنین، به‌منظور نمایش جواب دو الگوریتم فرا ابتکاری NSGAII و MOPSO استفاده‌شده 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 به‌ترتیب بیان مسئله و توصیف مدل ریاضی، تولید مسائل نمونه، نتایج محاسباتی حاصل از تنظیم پارامترهای الگوریتم، مقایسهٔ مقادیر شاخص‌های عملکردی به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی ارائه می‌شود.

بیان مسئله

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

www.SID.ir

Archive of SID

این گراف، گره‌ها نشان‌دهندهٔ فعالیت و یال‌ها بیانگر روابط پیش‌نیازی هستند. هریک 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 درنظر گرفته شده است که هر فعالیت فقط در یک حالت اجرایی انجام می‌گیرد و تکمیل می‌شود، اما ممکن است برخی از فعالیت‌ها در حین انجام‌دادن 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 مسئلهٔ زمان‌بندی پروژهٔ چندهدفه با محدودیت منابع با امکان قطع فعالیت‌ها در حالت قطعی مواجه می‌شویم. الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مدل الگوریتم فرا ابتکاری MOPSO و NSGAII است. هدف از طراحی روش یادشده، دستیابی هرچه بیشتر به جواب های بهینهٔ سراسری یا پارتو است.

مفروضات مدل

مسئلهٔ موردبررسی در این پژوهش، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با درنظرگرفتن 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. شبکهٔ تقدم و تأخر فعالیت‌ها جهت‌دار است؛
۲. هر زمان که پیش‌نیازهای یک فعالیت انجام گرفته باشند، آن فعالیت قابل‌اجراست؛
۳. فعالیت‌ها به زمان آماده‌سازی احتیاج ندارد؛
۴. ارتباط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها از نوع پایان به شروع است؛
۵. فعالیت های اول و آخر (۱ و N) موهومی درنظر 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 بازهٔ زودترین زمان شروع و دیرترین زمان پایان خودشان انجام می‌گیرند؛
۹. ظرفیت منابع مشخص و محدود است؛
۱۰. سطح موردنیاز منابع برای انجام‌دادن هر فعالیت مشخص و ثابت است؛
۱۱. در هر فعالیت از یک یا چند منبع استفاده می‌شود؛
۱۲. منابع مورداستفاده در پروژه از نوع تجدیدپذیر است؛
۱۳. مدت زمان لازم برای انجام‌دادن هر فعالیت مشخص است و در مدت انجام‌دادن پروژه ثابت است؛
۱۴. زمان پرداخت هزینه‌ها در ابتدای پروژه مشخص شده است؛
۱۵. زمان پرداخت های مالی از طرف کارفرما به پیمانکار در پایان انجام‌دادن هر فعالیت مشخص شده است؛
۱۶. محدودیت بودجه وجود ندارد.

مدل‌سازی مسئله

پارامترها و اندیس‌های مسئله به شرح زیر هستند:

اندیس‌ها:

$A_i, i \in \{0,...,n\}$: مجموعهٔ فعالیت‌های پروژه
A_0: گره مجازی شروع
A_n: گره مجازی پایان
$(A_i, A_j) \in E$: وجود رابطهٔ پیش‌نیازی بین فعالیت‌های A_i و A_j
G = (A,E,d): گراف پیش‌نیازی‌ها
i,j: شمارندهٔ فعالیت‌ها (از ۱ تا N)
m شمارندهٔ حالت‌های (mode) اجرایی (از ۱ تا M)
k: شمارندهٔ منابع تجدیدپذیر (از ۱ تا K)
$t \in \{1,...,T_{\max}\}$: شمارندهٔ زمان شروع فعالیت‌ها

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

پارامترها:

d_{im}: زمان انجام‌دادن 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

www.SID.ir

Archive of SID

به شرح زیر تعریف شده‌اند:

C_{max}: زمان پایان پروژه؛

$NPVT_{it}$: ارزش فعلی خالص موقت فعالیت i ام در لحظهٔ 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 درحال اجرا باشد ۱ و در غیر این‌صورت صفر؛

y_{im}: اگر فعالیت i ام در حالت m ام انجام گیرد ۱ و در غیر این‌صورت صفر.

ارائهٔ مدل ریاضی

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

$$\text{Min } Z_1 = C_{max} \quad (۱)$$

$$Max\ Z_2 = \sum_{i=1}^{n} NPV_i \quad (۲)$$

s.t

$$NPVT_{it} = \sum_{m=1}^{M} cf_i * e^{-\alpha t} * x_{imt} \quad \forall i,t \quad (۳)$$

$$NPV_i = \max_t VT_{it} \quad \forall i \quad (۴)$$

$$NPV_i \geq NPVT_{it} \quad \forall i,t \quad (۵)$$

$$\sum_{m=1}^{M} y_{im=1} \quad \forall i \quad (۶)$$

$$\sum_{t=1}^{Tmax} x_{imt} = y_{im} * d_{im} \quad \forall i,m \quad (۷)$$

$$s_i \leq t * x_{imt} + (1 - x_{imt}) * M \quad \forall i,m,t \quad (۸)$$

$$c_i \geq t * x_{imt} \quad \forall i,m,t \quad (۹)$$

$$c_{max} \geq c_i \quad \forall i \quad (۱۰)$$

$$c_i \leq s_j \quad \forall i,j \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{m=1}^{M} r_{imk} * x_{imt} \leq R_k \quad \forall k,t \quad (۱۲)$$

$$x_{imt} = \{0,1\}, y_m = \{0,1\} \quad \forall i,m,t \quad (۱۳)$$

محدودیت ۳ ارزش خالص فعلی هر فعالیت را محاسبه می‌کند. محدودیت ۴ بیشترین مقدار ارزش خالص فعلی هر فعالیت را مشخص می‌کند. محدودیت ۵ نشان‌دهندهٔ 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 در همان حالت اجرایی پایان یابد. محدودیت ۷ تضمین می‌کند مجموع زمانی که فعالیت i در حالت اجرایی m_i در زمان t درحال 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 مشخص‌شده بیشتر نشود و بالاخره محدودیت ۱۳ نشان‌دهندهٔ 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 حافظهٔ خارجی نگهداری می‌شود. ساختار عمومی الگوریتم به‌صورت زیر است:

برای هر ذرهٔ موجود در جمعیت موقعیت ذرهٔ جاری را به‌طور تصادفی مقداردهی اولیه کنید. سرعت ذره جاری را به‌طور تصادفی مقداردهی اولیه کنید یا آن را معادل با صفر درنظر بگیرید. بهترین موقعیت شخصی (بهترین موقعیت محلی) ذرهٔ جاری را برابر با موقعیت ذرهٔ جاری درنظر بگیرید. با استفاده از تابع برازش، برازش هریک از ذرات موجود در جمعیت را ارزیابی کنید و بهترین موقعیت شخصی در بین آن‌ها را بهترین موقعیت سراسری درنظر بگیرید. تا هنگامی‌که شرایط همگرایی برآورده نشده است، برای هر ذرهٔ موجود در جمعیت، سرعت ذرهٔ جاری را به‌روز کنید. موقعیت ذرهٔ جاری را به‌روز کنید. با استفاده از تابع برازش، برازش ذرهٔ جاری را ارزیابی کنید. بهترین موقعیت شخصی (بهترین موقعیت محلی) ذره جاری را به‌روز کنید. بهترین موقعیت سراسری را به‌روز کنید.

شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفهٔ ازدحام ذرات در زیر نشان داده می‌شود. فرایند به‌روزرسانی مقادیر مربوط به سرعت و موقعیت ذرات در هر دو حلقهٔ اصلی این الگوریتم صورت می‌گیرد. علاوه‌براین، مجموعهٔ Repository

www.SID.ir

Archive of SID

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

به‌دلیل نیاز به حل‌شدنی، ابتدا باید حل‌شدنی طبق ساختار مشخصی ذخیره شود که به این ساختار، نحوهٔ نمایش جواب می‌گویند. تولید جواب اولیه در مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه، روش تولید زمان‌بندی نامیده می‌شود. این روش نقش بسیار مهمی در بیشتر روش‌های فرا ابتکاری و حل مسئله ایفا می‌کند. نحوهٔ نمایش جواب در این تحقیق، به‌صورت اعداد تصادفی در بازهٔ 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 به‌ترتیب 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 به‌صورت شکل ۱ ارائه می‌شود.

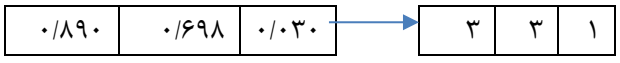
برای تعیین مدهای بهینهٔ انجام‌دادن هر فعالیت، ابتدا به تعداد فعالیت از سطر اول روش نمایش جواب انتخاب می‌شود. این اعداد در تعداد مد اجرایی هر فعالیت ضرب می‌شود و به سمت بالا گرد می‌شود. اعداد حاصل بیانگر مدهای اجرای فعالیت هستند. این فرایند به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده می‌شود.

جدول ۱. داده‌های اولیهٔ مثال

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

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 به‌صورت عدد تصادفی بین صفر و یک



شکل ۲. روش به‌کاررفتهٔ به‌منظور تعیین مد انجام‌دادن فعالیت‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

از آنجاکه وقفه در انجام‌دادن فعالیت‌ها مجاز است، روش نمایش جواب باید به‌صورت گسسته باشد؛ بنابراین، برای تعیین توالی انجام‌دادن کارها هر فعالیت برحسب زمان‌های انجام‌دادن آن فعالیت‌ها تقسیم‌بندی می‌شود و برای زمان هر فعالیت یک بخش جداگانه درنظر گرفته می‌شود. در این مرحله برای هر بخش یک مجموعه به نام activity تعریف می‌شود. در این مجموعه، فعالیت‌هایی تعریف می‌شوند که مجموعهٔ پیش‌نیازی تهی دارند. سپس در هر مرحله اعداد واقع در لایهٔ دوم شکل ۱ در تعداد المان‌های مجموعهٔ activity ضرب می‌شود و اعداد حاصل به سمت بالا رند می‌شود و n امین عضو مجموعهٔ activity تخصیص داده می‌شود. اگر تمام بخش‌های یک فعالیت تخصیص داده شود، باید آن را جزء فعالیت‌های تخصیص‌یافته به حساب آورد. این روند تا تخصیص آخرین بخش یک فعالیت ادامه می‌یابد. شکل ۳ نشان می‌دهد فعالیت‌ها به‌ترتیب 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 به‌کاررفته به‌منظور تعیین تخصیص فعالیت‌ها

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 MOPSOبه‌کاررفته در این پژوهش استفاده شده است.

نتایج محاسبات

تولید مسائل نمونه

از آنجاکه کتابخانهٔ خاص مسائل P-MRCPSP وجود ندارد و مدل ارائه‌شده ماهیتی متفاوت با سایر مسائل کلاسیک در حوزهٔ مسائل زمان‌بندی پروژه دارد، استفاده از داده‌های مسائل استاندارد موجود در کتابخانهٔ خاص مسائل زمان‌بندی پروژه به‌دلیل تغییر در ماهیت مسائل تعریف‌شده کمکی به مقایسه و ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها نمی‌کند؛ بنابراین، در این قسمت ۲۰ مسئلهٔ تصادفی به‌منظور ارزیابی و مقایسهٔ 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 به‌کاررفته در فعالیت‌های مختلف پروژه طبقه‌بندی می‌شوند. این مسائل در جدول ۲ نمایش داده می‌شوند.

جدول ۲. مسائل تولیدشده

شمارهٔ 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 ارائه‌شده در این تحقیق به‌صورت تصادفی از طریق نرم‌افزار متلب تولید شده‌اند. اطلاعات مربوط به این داده‌ها به‌صورت زیر است:

www.SID.ir

Archive of SID

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

تنظیم پارامترها به روش تاگوچی

کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ارتباط مستقیمی با تنظیم پارامترهای آن دارد، به طوری‌که 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.

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
MOPSO	C1	۱	۱/۴۹۶۲	۲
	C2	۱	۱/۴۹۶۲	۲
	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	۰/۰۲۸۸۴
۲	۱	۲	۲	۲	۰/۰۲۹۳۷۳
۳	۱	۳	۳	۳	۰/۰۲۹۱۵۹
۴	۲	۱	۲	۳	۰/۰۲۸۵۴۱
۵	۲	۲	۳	۱	۰/۰۵۷۲۹۵
۶	۲	۳	۱	۲	۰/۰۵۹۹۵۸
۷	۳	۱	۳	۲	۰/۰۲۸۸۲۶
۸	۳	۲	۱	۳	۰/۰۶۲۵
۹	۳	۳	۲	۱	۰/۰۸۸۳۴۲

www.SID.ir

Archive of SID

تاگوچی دسته‌ای از آزمایش‌های عاملی کسری را معرفی کرد که به‌طور شایان‌توجهی تعداد آزمایش‌های ضروری را برای بررسی با حفظ اطلاعات مورد نیاز کاهش می‌دهد. در این پژوهش، فاکتورهای کنترلی روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای کنترلی، شامل پارامترهای عدد ثابت مثبت (c1) و عدد ثابت مثبت (c2)، وزن اینرسی (W)، تعداد تکرار (max-iteration)، اندازهٔ جمعیت (N-pop)، تعداد اعضای مخزن (N-Rep) و تعداد بخش‌بندی‌های هر بعد (N-Grid) در الگوریتم MOPSO و پارامترهای کنترلی اندازهٔ جمعیت (N-pop)، تعداد تکرار (N-iteration)، احتمال تقاطع (Pc) و احتمال جهش (Pm) در الگوریتم NSGA-II به‌کار رفته است. برای عوامل درنظر گرفته‌شده، از جدول‌های استاندارد آرایه‌های متعامد، مناسب‌ترین آرایهٔ طرح L9 (با ۴ فاکتور و در ۳ سطح) برای الگوریتم NSGAII و طرح L27 (۷ فاکتور و در ۳ سطح) برای الگوریتم MOPSO انتخاب شده است. شایان ذکر است فاکتورها همان پارامترهای مربوط به دو الگوریتم هستند. در جدول ۳، سطوح درنظر گرفته‌شده برای هر پارامتر به‌منظور آزمایش تاگوچی ارائه می‌شود. داده‌های جدول زیربنا به تشخیص و در بازهٔ موردقبول هر پارامتر به‌طور دلخواه درنظر گرفته‌شده 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 دستهٔ کوچک و بزرگ تقسیم شده‌اند. برای اجرای آزمایش‌ها، یک مسئلهٔ نمونه درنظر گرفته شده است. هریک از نه آزمایش مختلف طراحی‌شده در آرایهٔ متعامد L9 برای الگوریتم NSGA-II، برای هریک از مسائل، سه بار اجرا شده است.

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

www.SID.ir

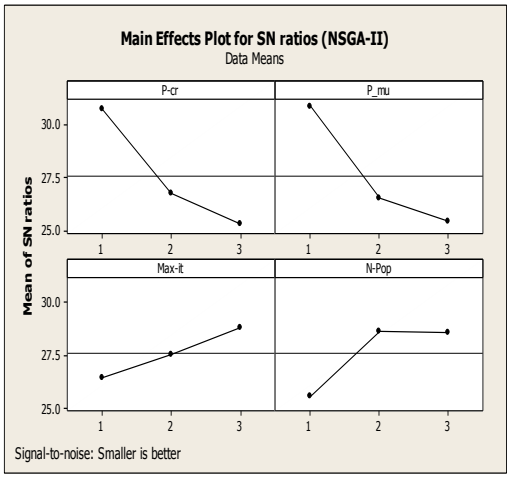
Archive of SID

ادامه جدول ۵. نتایج محاسباتی الگوریتم MOPSO

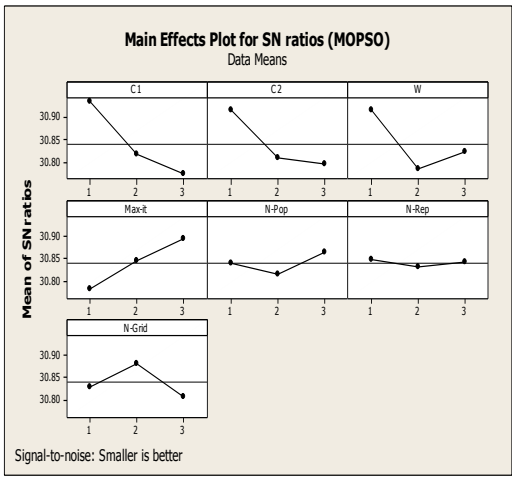
Run order	C_1	C_2	W	Max-iteration	N-Pop	N-Rep	N-Grid	Response
۲۰	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۱/۲۹۷۶۱
۲۱	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۱/۲۲۵۸۱
۲۲	۳	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۱/۲۱۲۹۹
۲۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۱/۷۲۰۵۴
۲۴	۳	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۱/۲۵۴۲۷
۲۵	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۱/۴۰۱۳۸
۲۶	۳	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۱/۳۱۵۳۰
۲۷	۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۱/۴۶۷۲۹

هریک از ۲۷ آزمایش مختلف طراحی‌شده در آرایهٔ متعامد طرح L27 برای الگوریتم MOPSO نیز برای هر طرح، سه بار اجرا شده و میانگین آن‌ها در جدول‌های ۴ و ۵ به‌عنوان متغیر پاسخ آمده است. در این مرحله، هدف یافتن مقدار مطلوب پارامترهای الگوریتم MOPSO و NSGA-II به‌عنوان متغیر ورودی برای به‌دست‌آوردن پاسخ بهینه (Y) است. شایان ذکر است در تنظیم پارامتر MOPSO و NSGA-II از معیار $R = \frac{\text{MID}}{\text{Diversification}}$ (یک متغیر پاسخ مناسب که در این تحقیق استفاده می‌شود و شامل تلفیق دو شاخص MID بیانگر مشخصهٔ 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.

شکل‌های ۴ و ۵ سطوح بهینهٔ 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 به‌صورت پررنگ نشان داده شده است. همان‌طورکه در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، بهترین سطح برای این فاکتورها به‌ترتیب عبارت‌اند از: پارامترهای کنترلی (c1) سطح سوم و (c2) سطح سوم، (W) سطح دوم، تعداد تکرار (max-iteration) سطح اول، اندازهٔ جمعیت (N- pop) سطح دوم، (N-Rep) سطح دوم و (N-Grid) سطح سوم در الگوریتم MOPSO و پارامترهای کنترلی اندازهٔ 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.



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



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

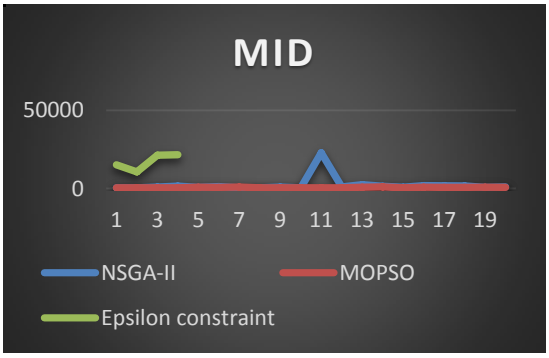
www.SID.ir

Archive of SID

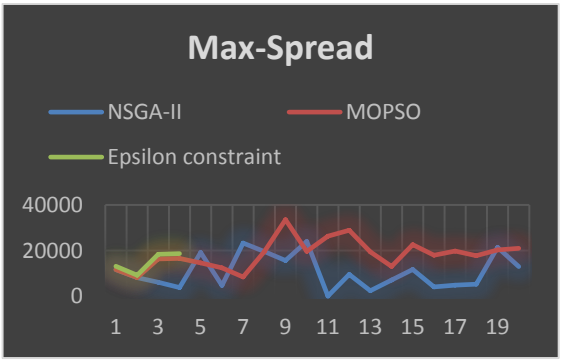
نتایج محاسباتی

در این قسمت، عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی براساس شاخص‌های محاسبهٔ فاصلهٔ نزدیکی بین جواب‌های نامغلوب حاصله و نقطهٔ ایده‌آل حاصل (MID)[۵]، محاسبهٔ گستردگی جواب‌های جبههٔ پارتو بهینهٔ حاصل از الگوریتم (MS)[۶]، گستردگی محاسبهٔ میزان تنوع در جواب‌های پارتو (SNS)[۷]، محاسبهٔ تعداد جواب‌های نامغلوب به‌دست‌آمده از طریق الگوریتم (NPS)[۸]، محاسبهٔ نرخ تعادل در دستیابی به هریک از اهداف (RAS)[۹] و محاسبهٔ 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 ارائه‌شده در این تحقیق، به‌منظور اعتبارسنجی در سایز کوچک به‌صورت دقیق حل شده است.

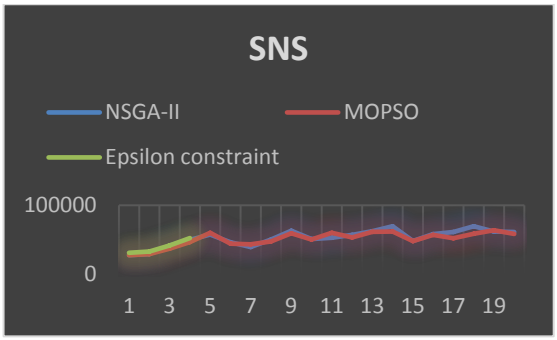
به‌این‌منظور، روش دقیق محدودیت اپسیلون در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی شده و جواب‌های حاصل از حل دقیق مسائل سایز کوچک به‌دست آمده است. به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی بالای مدل ارائه‌شده، فقط مسائل دارای سایز کوچک در نرم‌افزار گمز حل شدند. از آنجاکه روش‌های حل دقیق توانایی حل مسائل سایز متوسط و بزرگ را در زمان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



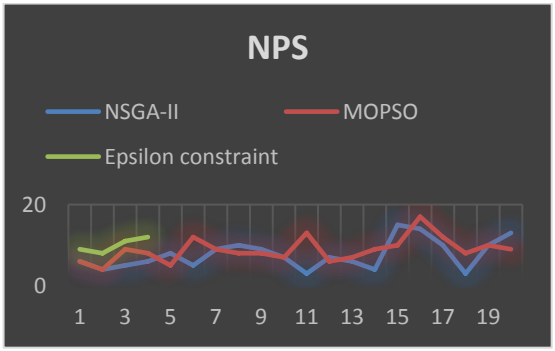
شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای شاخص MID



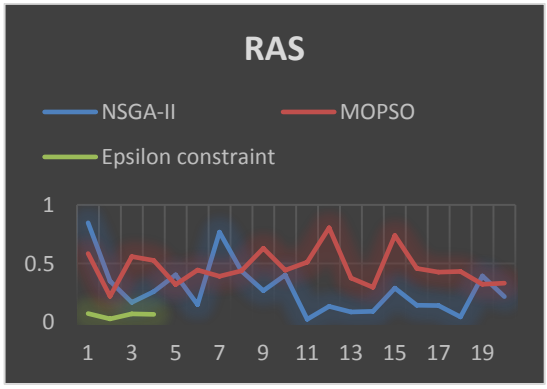
شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای شاخص MS



شکل ۸. نمودار مقایسه‌ای شاخص SNS



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای شاخص NPS

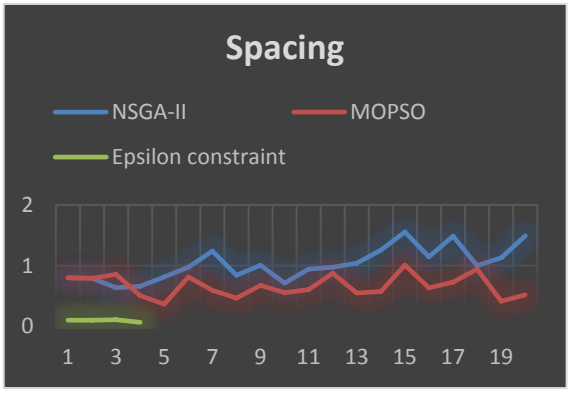


شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای شاخص RAS

www.SID.ir

Archive of SID

با رسم مقادیر شاخص‌های به‌دست‌آمده از جدول‌های ۶ و ۷ به‌صورت نمودار (شکل‌های ۶ تا ۱۱) و مقایسهٔ 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 RAS و SNS دارد.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای شاخص Spacing

جدول ۶. مقایسهٔ 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	۲۱۳۶۱/۷	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

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷. مقایسهٔ مقادیر شاخص‌های عملکردی به‌دست‌آمده 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	۰/۹۷۲۴۴۸	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

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، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع کاربرد دارد. از جمله زمینه‌های کاربرد این مسئله می‌توان به فعالیت‌های عمرانی، توسعهٔ نرم‌افزارها، پروژه‌های صنایع سنگین و همچنین حوزه‌های نفت و گاز و پتروشیمی اشاره کرد. در این تحقیق، یک مدل ریاضی جدید برای مسئلهٔ زمان‌بندی پروژهٔ دارای منابع محدود چندحالتهٔ 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 به‌دست‌آمده گزارش شده است. به‌منظور یافتن جواب مناسب برای مسائل دارای سایز متوسط و بزرگ الگوریتم‌های فرا ابتکاری کارایی برای حل مسئلهٔ موردنظر توسعه داده شده است. همچنین، مدل ارائه‌شده در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ با استفاده از

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم‌های توسعه‌یافته حل شده است. بعد از اجرای برنامه‌های تولیدشده برای مسائل نمونهٔ ایجادشده، نتایج درمورد الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی با استفاده از تحلیل‌های آماری به‌شرح زیر به‌دست آمده است:

۱. با توjه به اینکه ساختار جواب ابتکاری جدید تولیدشده در این تحقیق قابلیت ارضای قطعی تمامی محدودیت‌ها را دارد، تمامی جواب‌های به‌دست‌آمده موجه و قابل‌قبول 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 NSGAII ارائه داده است، درحالی‌که الگوریتم NSGAII براساس معیارهای RAS و SNS عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم MOPSO داشته است.

در مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، محدودیت اصلی در تعداد منابع (انسانی یا ماشین‌آلات) دردسترس است، اما مدل ارائه‌شده در این تحقیق قابلیت توسعه از جهات مختلف را دارد؛ برای مثال، می‌توان منابع تجدیدناپذیر از قبیل بودجهٔ پروژه، مواد مصرفی و... را تحت محدودیت جدیدی در مدل درنظر گرفت. مدل ارائه‌شده در این تحقیق برای یک پروژه بوده است، درحالی‌که در بسیاری از مسائل جهان واقعی کارفرمایان به کنترل هم‌زمان چندین پروژه تمایل دارند. برخی از پارامترهای ارائه‌شده در این تحقیق مانند زمان انجام‌دادن فعالیت‌ها ممکن است در برخی از موارد به‌صورت غیرقطعی باشد؛ بنابراین، می‌توان از رویکردهای عدم قطعیت از قبیل روش‌های موجود در بهینه‌سازی استوار، مجموعه‌های فازی یا برنامه‌ریزی تصادفی به‌عنوان ایده‌ای جدید برای تحقیقات آتی استفاده کرد. همچنین، تلفیق مسئلهٔ ارائه‌شده در این تحقیق با دیگر مسائل موجود در زمان‌بندی پروژه و حتی تلفیق این مسئله با مسئلهٔ موازنهٔ زمان، هزینه و کیفیت ممکن است این حوزه از زمان‌بندی پروژه را پویاتر و کاربردی‌تر کند.

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. & Iranmansh, 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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. & Loukilc, 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

www.SID.ir

Archive of SID

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). *Evaluationary 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

www.SID.ir