

توسعه مدل دوهدفه زمان‌بندی پروژه با محدودیت منبع با در نظر گرفتن تبادل زمان-هزینه و حل آن با الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک

سونیا ابراهیمی فرد^۱، نسیم نهماوندی^{۲*}، علی حسین‌زاده کاشان^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

۳. استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۲۰، تاریخ دریافت اصلاح‌شده: ۹۶/۰۲/۰۵، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۲/۲۰)

چکیده

زمان‌بندی نقش حیاتی در مدیریت پروژه‌ها ایفا می‌کند. با وجود این، علاوه بر ارائه زمان‌بندی مناسب باید به محدودیت‌های موجود در حین اجرای پروژه نیز توجه شود. در این پژوهش، مدل دوهدفه زمان‌بندی پروژه با تبادل زمان-هزینه تسطیح منابع، منطبق با خواسته کارفرما و پیمانکار برای اولین بار در ادبیات موضوع پیشنهاد شده است. روابط پیش‌نیازی عمومی نیز در مدل لحاظ شده است. برای بررسی بهتر عملکرد این مدل، مطالعه موردی واقعی مرتبط با موضوع انتخاب شد. با توجه به ماهیت NP-Hard بودن مسئله زمان‌بندی و نیز ابعاد بزرگ مطالعه موردی، پس از تجزیه و تحلیل فضای جواب، الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک به‌عنوان روش حلی مناسب برای حل مسئله انتخاب شد. در انتها، نتایج حاصل از حل الگوریتم با نتایج دنیای واقعی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد مدل و الگوریتم ارائه‌شده قابلیت استفاده در پروژه‌های مشابه دیگر را دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب^۱، تسطیح منبع، زمان‌بندی پروژه با محدودیت منبع^۲.

مقدمه

زمان‌بندی به‌صورتی بوده است که مجموعه‌ای از فعالیت‌ها در حین فرایند ایجاد شوند و از منابع متنوع محدود موجود استفاده کنند. در طول این سال‌ها روش زمان‌بندی پروژه روزبه‌روز در حال توسعه بوده است. از یک‌سو، مدل‌های مناسب و منطبق با شرایط عملی موجود ارائه شده و از سوی دیگر به حل مؤثر این مدل‌ها پرداخته شده است [۲]. RCPSP شامل منابع با دسترسی محدود و فعالیت‌هایی با مدت‌زمان موردنیاز مشخص است که در اینجا به‌دنبال یافتن یک برنامه زمان‌بندی با حداقل زمان اجرا به‌وسیله تخصیص یک زمان شروع به هر فعالیت هستیم؛ به‌طوری‌که به روابط پیش‌نیازی و نیاز منابع نیز توجه شود. می‌توان این مسئله را به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی^۳ تعریف کرد. مسائل بهینه‌سازی ترکیبی شامل یک مجموعه جواب گسسته X است که یک زیرمجموعه از جواب‌های قابل قبول $Y \subseteq X$ تابع هدف $f: Y \rightarrow \mathbb{R}$ از آن تعریف می‌شود. هدف در این مسائل حداقل کردن یا حداکثر کردن $f(y)$ است. RCPSP را نیز می‌توان به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی

امروزه مدیریت منابع انسانی و مواد اهمیت بسیاری در سازمان‌ها یافته است. زمان‌بندی نیز نقشی مهم در مدیریت پروژه ایفا می‌کند؛ بنابراین، یک مدیریت دقیق از پروژه‌ها برای حفظ شرکت‌ها در عرصه رقابت امری ضروری است. این تصمیم‌گیری تأثیر زیادی بر مدت‌زمان کل پروژه (زمان تکمیل پروژه) دارد [۱]. ارائه روش‌های کمی مدیریت و زمان‌بندی پروژه به سال‌های دهه ۱۹۵۰ برمی‌گردد. روش‌های اولیه از جمله CPM و PERT برای زمان‌بندی در دسترس بودند که در آن‌ها فقط مدت‌زمان اجرای پروژه (به‌صورت قطعی یا احتمالی) لحاظ می‌شد و فرضیه اصلی این روش‌ها میزان منابع در دسترس نامحدود بود، اما این فرض در شرایط عملی غیرواقعی است؛ بنابراین، به‌تدریج مدل‌هایی با در نظر گرفتن محدودیت منبع ایجاد شد. در طول پنجاه سال اخیر، مدیریت و زمان‌بندی پروژه دو فاکتور مهم در عرصه تحقیقات پژوهشی و همچنین تحقیق در عملیات بوده است. همچنین، شکل کلی فرایند

ترکیبی تعریف کرد [۱]. مسئله زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن هزینه دسترسی منبع^۴ مسئله دیگری است که می‌توان در مباحث برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه به آن توجه کرد. درحقیقت، پیمانکاران باید علاوه بر توجه به نیازها و خواسته‌های کارفرمایان، به بهینه انجام گرفتن برنامه کاری خود نیز توجه کنند. به همین دلیل، در کنار RCPSPP که اغلب هدف در آن حداقل سازی زمان تکمیل پروژه متناسب با نیاز کارفرماست، به مسئله RACP نیز توجه می‌شود که در آن هدف حداقل سازی هزینه دسترسی منابع و منطبق با خواسته و نیاز پیمانکار است. در دنیای واقعی، پیمانکاران به دنبال یافتن این موضوع هستند که به چه تعداد منبع برای انجام دادن فعالیت‌های پروژه به منظور به موقع انجام گرفتن پروژه نیاز است. در نتیجه، می‌توان این دو مسئله را به طور همزمان و در قالب یک مدل چندهدفه زمان‌بندی پروژه در نظر گرفت.

در این پژوهش، ابتدا ادبیات مسئله مرور می‌شود. سپس مسئله مورد نظر و مدل ریاضی پیشنهادی توضیح داده می‌شود. همچنین، پس از اعتبارسنجی مدل با تجزیه و تحلیل فضای جواب برای یک مطالعه موردی نمونه، الگوریتم مرتب‌سازی ژنتیک نامغلوب برای حل مسئله انتخاب و گام‌های این الگوریتم متناسب با مسئله تعریف می‌شود. در ادامه، مطالعه موردی حل و نتایج آن ارائه می‌شود. در نهایت نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی ارائه می‌شود.

مرور ادبیات

هرلثون و لئوس بر اهمیت داشتن چارچوب زمان‌بندی برای پروژه‌های متعدد تأکید کرده است [۳]. رومل و همکاران تابع هزینه‌ای متشکل از دو جزء را تعریف کرده است [۴]. هزینه‌های پروژه که متناسب با زمان تکمیل پروژه است. فعالیت‌ها نیز می‌توانند با یکدیگر ترکیب (و یا تقویت) شوند و زمان تکمیل را کاهش دهند، اما این تقویت نیز هزینه‌بر است و به تابع هدف اضافه می‌شود. کن و همکاران برای مقایسه پنج مدل ریاضی از روش ریلکس کردن LP برای محاسبه حد پایین هریک استفاده و سپس با نرم‌افزار CPLEX آن‌ها را حل کرده است [۵]. در پژوهش هربرت و دکرو ابتدا یک زمان‌بندی اولیه با استفاده از نرم‌افزار MSP

ارائه و نتایج به صورت دستی با استفاده از روش دیاگرام پیش‌نیازی^۵ اعتبار داده شده است [۶]. لیو و وانگ با ترکیب ابزارهای سنتی (مدل‌سازی) و معاصر (نرم‌افزار) در مدیریت پروژه به حل موفقیت‌آمیز مسئله زمان‌بندی مرتبط با پروژه ساختمان‌سازی دست یافته است. همچنین بر زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن خدمه چندمهارته تمرکز داشته و از برنامه‌ریزی محدودیت‌دار CP برای مدل‌سازی استفاده کرده است [۷]. گویتانیلاو مسئله زمان‌بندی را برای یک پروژه پیشنهاد داد که از چندین زیر پروژه تشکیل می‌شود [۸]. برای هر پروژه رابطه پیش‌نیازی زمانی و کاری برای کارها لحاظ شده است. کیریاکیدز و همکاران برای مسائل تک و چندحالته مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را گسترش دادند [۹]. همچنین، دو نوع منبع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر برای مسئله در نظر گرفتند. در تحقیقی که توانا و همکاران ارائه داد، یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسائل چندحالته و با انقطاع برای فعالیت‌ها توسعه داده شده است [۱۰]. برای حل مسئله MRCPSPP با انقطاع و تبادل زمان-هزینه و کیفیت از یک روش دقیق ϵ -constrained و الگوریتم ژنتیک استفاده شده و سپس نتایج با هم مقایسه شده است. افشارنجفی و همکاران برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه چندحالته با حق انقطاع از الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید^۶ استفاده کرده است [۱۱]. همچنین، در پژوهش تیان و دمالیستر از دو خط‌مشی زمان‌بندی راه‌آهن و زمان‌بندی سریع برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منبع چندحالته^۷ در زنجیره بحرانی استفاده شده است [۱۲]. کیم و همکاران مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای حل RCPSPP در صورتی که هزینه ازدست‌دادن کیفیت نیز در هزینه‌ها لحاظ شده است ارائه داده و با تکیه بر روش CPM با نرم‌افزار LINGO آن را حل کرده است [۱۳]. همچنین، بیانسو و کارامیا برای حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط از روش شاخه و کران و همچنین برای محاسبه حد پایین از روش ریلکس کردن لاگرانژ استفاده کرده‌اند [۱۴]. اسمرکوسکی و ونکاتشان نیز از برنامه‌ریزی عدد صحیح برای حل مدل زمان‌بندی پروژه استفاده و با نرم‌افزار CPLEX آن را حل و نتایج را با سه مدل موجود در ادبیات

همچنین، چن و همکاران برای حل RCPSPP فن خوشه‌بندی حد وسط c -فازی^{۱۳} را با فن بی‌نظمی^{۱۴} در الگوریتم انقلاب تفاضلی^{۱۵} برای توسعه الگوریتم انقلاب تفاضلی خوشه‌بندی فازی بر پایه بی‌نظمی برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه کرده است [۲۸]. قاسمی و همکاران مسئله RCPSPP را با روابط پیش‌نیازی و هدف حداقل‌سازی دو معیار در نظر گرفته‌اند: زمان تکمیل و مجموع زمان شروع وزن‌دار فعالیت‌ها [۲۹]. برای حل مسئله، پنج الگوریتم فرا ابتکاری تجزیه و تحلیل شدند. الگوریتم پیشنهادی از راهبردهایی براساس مفهوم نامغلوب پارتو برای جست‌وجوی جواب و تعیین مجموعه جواب‌های نامغلوب استفاده کرده است. پاراسکوپولس و همکاران برای اولین بار در ادبیات، تأثیر برنامه‌ریزی حافظه انطباقی^{۱۶} را برای حل مسئله RCPSPP به چالش کشید [۳۰]. نتایج آزمایش‌ها روی مثال‌های RCPSPP شناخته‌شده نشان می‌دهد که AMP پیشنهادی به‌طور مداوم جواب‌های با کیفیت بالا در زمان محاسباتی قابل قبول تولید می‌کند. در پژوهش دیگر یک رویکرد جواب برای مسئله RCPSPP چندحالتی و چند پروژه‌ای توضیح داده می‌شود [۳۱]. ایده کلیدی این تحقیق براساس مفهوم جست‌وجوی همسایگی متغیر^{۱۷} با جست‌وجوی محلی تکراری^{۱۸} است. تمرکز اصلی این کار در راستای اجرای موازی تکنیک‌های جواب جست‌وجوی محلی بوده است. در پژوهش لیمان و ونهوک مسئله زمان‌بندی پروژه با سرمایه محدود و جریان‌های نقدی تخفیف‌دار^{۱۹} و نیز مسئله زمان‌بندی پروژه با سرمایه و منبع محدود و جریان‌های نقدی تخفیف‌دار^{۲۰} بررسی شده است [۳۲]. هدف در هر دو مسئله حداکثر سازی ارزش خالص فعلی^{۲۱} براساس سه مدل جریان نقدی است. هر دو مسئله شامل محدودیت سرمایه می‌شود، با تمرکز بر این نکته که پروژه همیشه دارای یک بالانس نقدی مثبت است. از این‌رو، زمان‌بندی فعالیت‌ها باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که سرمایه شایان توجهی در دسترس باشد.

قلی پور و شهبازی از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبود داده شده برای برنامه‌ریزی مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع استفاده کرده است [۳۳]. این مسئله به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی کلی فرمول‌نویسی شده

مقایسه کرده‌اند [۱۵]. شی و بلامکویست از یک الگوریتم فازی براساس ماتریس ساختار وابسته برای حل RCPSPP استفاده کرده‌اند [۱۶]. کوریا و همکاران از یک روش ابتکاری متشکل از دو فاز برای حل RCPSPP استفاده کرده‌اند [۱۷]. کن و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بر پایه رویداد ارائه داده‌اند و آن را با نرم‌افزار CPLEX حل و با مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح موجود در ادبیات مقایسه کرده‌اند [۱۸]. رحیمی و همکاران از الگوریتم SA و الگوریتم تکاملی تفاضلی^۱ برای حل RCPSPP و حالت‌های یکسان استفاده کرده است [۱۹]. کویانوس و همکاران چهار مدل برنامه‌ریزی ریاضی گسسته و پیوسته برای RCPSPP ارائه داده و برای مقایسه نتایج با مدل‌های موجود در ادبیات از نرم‌افزار GAMS و از CPLEX برای حل مدل‌ها استفاده کرده است [۲۰]. یانگ و فو از رویکرد زنجیره بحرانی و روش استدلال شواهد^۹ بهره برده‌اند و براساس اولویت‌دهی به کارها اقدام به حل مسئله RCPSPP چندپروژه‌ای کرده‌اند [۲۱]. وانگ و همکاران یک مدل چندهدفه برای زمان‌بندی چندپروژه‌ای با محدودیت منبع در زنجیره بحرانی ارائه کرده است [۲۲]. سپس برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک براساس اولویت استفاده کرده است. سینگ برای حل مسئله زمان‌بندی چندپروژه‌ای تحت محدودیت منبع از یک الگوریتم ترکیبی متشکل از قوانین اولویت و روش سلسله‌مراتبی تحلیلی^{۱۰} استفاده کرده است [۲۳]. تانگ و همکاران یک مدل دوهدفه برای کنترل زمان‌بندی پروژه‌های ساخت راه‌آهن براساس مدل زمان‌بندی خطی^{۱۱} و برنامه‌ریزی محدودیت^{۱۲} ارائه داده و برای بررسی نتایج از چند مطالعه موردی حقیقی بهره برده و با استفاده از نرم‌افزار CPLEX و آن را حل کرده است [۲۴]. در پژوهش مسلیس و دکاسمیکر از یک الگوریتم اتوماتیک به‌عنوان ابزار انتخابی برای حل MRCPSPP استفاده شده است [۲۵]. همچنین، از مدل سختی تجربی برای پیش‌بینی عملکرد الگوریتم استفاده شده است. در پژوهش وان پتگم و ونهوک الگوریتم‌های فرا ابتکاری مختلف برای حل MRCPSPP بررسی شده است [۲۶]. لوئا و همکاران مقیاس‌پذیری هشت الگوریتم چندهدفه را هنگام استفاده برای زمان‌بندی پروژه بررسی کرده است [۲۷].

بیان مسئله

پس از مطالعه مدل‌های موجود در ادبیات و نیز در نظر گرفتن خواسته‌ها و اهداف کارفرما و پیمانکار به صورت همزمان و در کنار هم، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه پیشنهاد شد. یکی از خلأهای موجود در ادبیات موضوع، تحقیقات اندک موجود پیرامون در نظر گرفتن همزمان این‌گونه اهداف است. در نتیجه، اهداف در این مدل از دو جنبه هدف کارفرما و نیز هدف پیمانکار ارائه شده است. هدف اول حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه و بیشتر مدنظر کارفرما و نیز هدف دوم حداقل‌سازی هزینه تسطیح منبع است که برای ادامه کار پیمانکار نیاز است.

است. همچنین، در مورد مدت‌زمان هر فعالیت برای دست‌یافتن به حداقل هزینه کل پروژه تصمیم‌گیری می‌شود. در پژوهش رفیعی مجد و همکاران برای اولین بار مسئله زمان‌بندی پروژه در شرایط محدودبودن منابع، امکان اجرای فعالیت‌ها در چندین حالت و با در نظر گرفتن تأخیرات زمانی بیشینه و کمینه میان زمان‌های شروع فعالیت‌ها، $MRCPSP/\max$ ، با هدف کمینه‌کردن جریمه دیرکرد و بیشینه‌کردن پاداش زودکرد اتمام فعالیت‌ها مطرح و بررسی شده است [۳۴].

جدول ۱. مجموعه‌ها، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی

مجموعه‌ها	E_{FS} : مجموعه فعالیت‌های دارای رابطه پیش‌نیازی FS E_{SS} : مجموعه فعالیت‌های دارای رابطه پیش‌نیازی SS H : افق برنامه‌ریزی پروژه (حد بالای زمان تکمیل پروژه) R : مجموعه منابع تجدیدپذیر موجود
اندیس‌ها	i, j : اندیس شماره فعالیت k : اندیس نوع منبع t : اندیس زمان
پارامترها	n : تعداد فعالیت‌های پروژه d_i : مدت‌زمان فعالیت i ES_i : زودترین زمان شروع فعالیت i LS_i : دیرترین زمان شروع فعالیت i FS_{ij} : فاصله زمانی برای فعالیت‌ها با رابطه پیش‌نیازی FS SS_{ij} : فاصله زمانی برای فعالیت‌ها با رابطه پیش‌نیازی SS b_{ik} : میزان منبع مورد نیاز از منبع k برای فعالیت i B_k : میزان منبع موجود نوع k c_k : هزینه ثابت منبع نوع k
متغیرهای تصمیم	x_{it} : اگر فعالیت i در زمان t شروع شود، $x_{it}=1$ و در غیر این صورت برابر صفر

$$\sum_{t=ES_j}^{LS_j} t x_{jt} \geq \sum_{t=ES_i}^{LS_i} t x_{it} + d_i + FS_{ij} \quad \forall (i, j) \in E_{FS} \quad (3)$$

$$\sum_{t=ES_j}^{LS_j} t x_{jt} \geq \sum_{t=ES_i}^{LS_i} t x_{it} + SS_{ij} \quad \forall (i, j) \in SS_{ij} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k b_{ik} \sum_{\tau=\max\{ES_i, t-d_i+1\}}^{\min\{LS_i, t\}} x_{i\tau} \leq B_k \quad \forall t \in H, \forall k \in R \quad (5)$$

$$\sum_{t=ES_i}^{LS_i} x_{it} = 1 \quad \forall i \in A \cup \{n+1\} \quad (6)$$

$$x_{00} = 1 \quad (7)$$

$$x_{it} = 0 \quad \forall i \in A \cup \{n+1\} \quad (8)$$

$$x_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in A \cup \{n+1\}, \quad \forall t \in \{ES_i, LS_i\} \quad (9)$$

در این مدل، زمان شروع هر فعالیت (S_i) به صورت $S_i = \sum_{t \in H} t \cdot x_{it}$ نشان داده می شود. رابطه ۴ اولین هدف مدل را نشان می دهد که برابر است با حداقل سازی زمان تکمیل کل پروژه. رابطه ۵ دومین هدف مدل ریاضی است که بیانگر حداقل سازی هزینه تسطیح منابع است؛

$$r_k(t) = \sum_{i=1}^n b_{ik} \sum_{\tau=\max\{ES_i, t-d_i+1\}}^{\min\{LS_i, t\}} x_{i\tau}$$

به طوری که $t=H$ مقدار صفر می گیرد. رابطه های ۶ و ۷ به روابط

پیش نیازی زمانی فعالیت ها اشاره می کنند؛ به طوری که رابطه ۶ برای آن دسته از فعالیت هایی است که رابطه پیش نیازی FS دارند و به همین صورت رابطه ۷ برای آن دسته از فعالیت هایی است که روابط پیش نیازی SS دارند. فواصل زمانی نیز در رابطه های ۶ و ۷ لحاظ شده است؛ یعنی برای مثال برای فعالیت ها با رابطه FS فعالیت ز ممکن است با یک فاصله زمانی پس از اتمام فعالیت i شروع شود. رابطه ۸ محدودیت منبع را نشان می دهد. رابطه ۹ و ۱۲ به عدم امکان انقطاع در فعالیت های پروژه اشاره دارند. رابطه ۱۰ برای مشخص کردن این نکته است که فعالیت مجازی (۰) باید در ابتدای پروژه شروع شود تا سایر فعالیت ها در ادامه آن امکان اجرا داشته باشند. رابطه ۱۱ نیز تضمین می کند هر فعالیت باید بین زودترین و دیرترین زمان شروع خود، آغاز شود. همچنین، به دلیل غیرخطی بودن رابطه ۵ به دلیل وجود $\min \max$ ، باید به صورت زیر خطی شود:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{t=0}^H C_k y_{kt} \quad (10)$$

$$r_k(t) - r_k(t-1) \leq y_{kt} \quad \forall t \in H, \quad \forall k \in R \quad (11)$$

$$y_{kt} \geq 0 \quad \forall k \in R \quad (12)$$

تسطیح منابع^{۲۲} به صورت حداقل ساختن تغییرات و نوسانات در گراف منابع مورد نیاز به منظور اجرای فعالیت های پروژه تعریف می شود. به عبارت دیگر، تسطیح منابع را می توان تلاشی به منظور رسیدن به توزیع بهتری از به کارگیری مؤثر منابع بیان کرد. هدف از به کارگیری تسطیح منابع، تلاش در راستای حداقل کردن اختلاف بین سطوح بیشترین و کمترین نرخ به کارگیری منابع، نسبت به یک سطح کاربردی مطلوب و کاهش هزینه به کارگیری منابع است. از آنجاکه نوسانات منابع در مورد نیروی انسانی به معنی استخدام و اخراج است و نوسانات منابع در تجهیزات به معنی اجاره کردن و بازپس دادن است، در اغلب پروژه ها این نوسانات نامطلوب است. مسئله تسطیح منابع از این نظر اهمیت می یابد که سعی در حداقل کردن نوسانات منابع انسانی و تجهیزات طی زمان دارد. به ویژه، در پروژه هایی که بیکار ماندن منابع (انسانی یا تجهیزات) یا بالابودن بار کاری منابع هزینه بر است، این مسئله مهم تلقی می شود [۳۵]. کاهش زمان با استفاده از تدابیری ویژه از جمله به کارگیری منابع اجرایی محقق می شود که سبب افزایش هزینه های پروژه نیز می شود. در مواردی با توجه به روابط فعالیت ها، شرایط تأخیر برای پروژه پیش بینی می شود، که با افزایش هزینه و خسارت های دیرکرد همراه است و در نتیجه به کاهش یا افزایش هزینه های کلی منجر می شود که مدیر پروژه باید این مسئله را بررسی کند. در مدل پیشنهادی، دو نوع رابطه پیش نیازی SS و FS در نظر گرفته شده است. انقطاع در فعالیت های پروژه مجاز نیست. همچنین، فاصله های زمانی^{۲۳} در محدودیت های روابط پیش نیازی لحاظ شده است. در ادامه، مجموعه ها، اندیس ها، پارامترها و متغیر تصمیم مدل ریاضی پیشنهادی در جدول ۱ معرفی و سپس مدل ریاضی تشریح می شود.

مدل سازی ریاضی

مدل ریاضی دوهدفه به صورت روابط زیر توسعه داده می شود.

$$\min \sum_{t=ES_i}^{LS_i} t \cdot x_{n+1,t} \quad (1)$$

$$\min \sum_{k=1}^m C_k \sum_{t=0}^H \max(0, r_k(t) - r_k(t-1)) \quad (2)$$

موجه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. برای محاسبه تابع برازندگی نهایی از روش تابع مطلوبیت استفاده شده است. مراحل این روش در ادامه توضیح داده می‌شود:

۱. برای هر جواب i ، مقدار μ_m^i به شرح رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$\mu_m^i = \frac{f_m^i - f_m^{\min}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (13)$$

برای جواب i ، اگر تابع هدف ماکزیم‌سازی باشد از مقدار μ_{1m}^i برای محاسبه مقدار مطلوبیت و اگر تابع مینیم‌سازی باشد از μ_{2m}^i برای محاسبه مقدار مطلوبیت استفاده می‌شود.

۲. مقدار مطلوبیت هر جواب به صورت رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$\mu_i = \frac{\mu_{1m}^i + \mu_{2m}^i}{\sum_{i=1}^N \mu_{1m}^i + \sum_{i=1}^N \mu_{2m}^i} \quad (14)$$

هر جواب که μ_i بیشتری داشته باشد، به عنوان جواب بهتر انتخاب می‌شود. این روش ۱۰۰ بار تکرار می‌شود و ۱۰۰ جواب به دست می‌آید و سپس تحلیل انجام می‌گیرد. به طور کلی، دو معیار آماری مختلف برای تحلیل فضای جواب تعریف می‌شود: معیارهای توزیع^{۲۵} که مکان‌شناسی^{۲۶} جواب‌های بهینه محلی را مطالعه می‌کنند و هدف آن‌ها تحلیل توزیع جواب‌های بهینه محلی در فضای جواب پیش‌بینی شده در فضای جست‌وجو G و فضای هدف f است و نیز معیارهای همبستگی^{۲۷} که چرکیدگی فضای جواب و نیز ارتباط بین کیفیت جواب‌ها و فاصله نسبی آن‌ها را تحلیل می‌کند و هدف آن‌ها تخمین میزان پستی و بلندی فضای جواب مرتبط با کیفیت جواب‌ها و فاصله‌شان از جواب بهینه کلی است.

معیارهای توزیع

هدف از معیارهای توزیع، تحلیل توزیع جواب‌های بهینه محلی در فضای جواب پیش‌بینی شده در فضای جست‌وجو G و فضای هدف f است. برخی از این معیارهای توزیع عبارت‌اند از:

۱. **توزیع در فضای جست‌وجو:** برای جمعیت P ، متوسط فاصله $dmm(P)$ و متوسط فاصله نرمال شده $Dmm(P)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

مدل ارائه شده ابتدا در نرم‌افزار GAMS با کامپیوتر دارای پردازنده پنج هسته‌ای ۱/۸ گیگاهرتز و حافظه اصلی ۶ گیگابایت در سیستم عامل ویندوز ۸ اعتبارسنجی شد. پس از اطمینان از صحت عملکرد این مدل و به دلیل Np-hard بودن مسئله RCPSP، فقط برای مسائل با سایز کوچک می‌توان از روش‌های دقیق برای حل این مسئله استفاده کرد. علاوه بر این، در مسائل چندهدفه بهترین نتیجه زوج جواب‌هایی است که شرایط خوب بودن را دارند. به همین دلیل، در بخش بعدی ابتدا فضای جواب مسئله تجزیه و تحلیل می‌شود تا از این طریق بتوان مناسب‌ترین روش حل را انتخاب کرد. برای مطالعه موردی در این تحقیق از یک مطالعه موردی مرتبط با پروژه ساخت قطار شهری با ۱۸۳ فعالیت و ۲۷ نوع منبع تجدیدپذیر استفاده می‌شود.

انتخاب روش حل مناسب

برای حل مدل ارائه شده ابتدا باید ابعاد و پیچیدگی مسئله بررسی شود. سپس با تحلیل فضای جواب^{۲۴} روش حلی متناسب با سایز پروژه مورد بررسی پیشنهاد می‌شود.

بررسی ابعاد و پیچیدگی مسئله

برای محاسبه ابعاد مسئله ابتدا باید تعداد متغیرها و محدودیت‌های مدل‌های ارائه شده در قسمت قبل محاسبه شود. در مدل ارائه شده متغیر x_{it} به تعداد و تعداد محدودیت‌های مدل قطعی $|E_{FS}| + |E_{SS}| + T \cdot k + 1 + (n+1)$ است. مقادیر ES_i و LS_i از طریق محاسبات رفت و برگشت شبکه قابل محاسبه‌اند. n تعداد فعالیت‌های پروژه و برابر ۱۸۳، T حد بالای زمان پروژه در حالت قطعی به صورت $\sum_{i=0}^{n+1} d_i = 2900$ ، k تعداد منابع تجدیدپذیر و برابر ۲۷، $|E_{SS}|$ تعداد فعالیت‌ها با رابطه پیش‌نیازی SS و برابر ۱۰۸، $|E_{FS}|$ تعداد فعالیت‌ها با رابطه پیش‌نیازی FS و برابر ۱۴۰ است. در نتیجه، برای مدل ارائه شده تعداد متغیرها برابر ۵۰۵۱۸ و تعداد محدودیت‌ها برابر ۷۸۷۳۳ برآورد می‌شود.

تحلیل فضای جواب

برای انجام دادن تحلیل باید تعدادی جواب متناسب با مسئله ایجاد شود. به این منظور، ابتدا یک جمعیت اولیه

فضای جست‌وجو با فاصله d را اندازه‌گیری می‌کند. این تابع با استفاده از نمونه‌های بسیار از جواب‌های زوجی n جواب با فاصله d به صورت رابطه ۲۱ تخمین زده می‌شود:

$$\rho(d) = \frac{\sum_{s,t \in S \times S, dist(s,t)=d} (f(s) - \bar{f})(f(t) - \bar{f})}{n \cdot \sigma_f^2} \quad (21)$$

$$\rho(1) = 0/011722305401654$$

در این مسئله، مقدار $\rho(1)$ بسیار کوچک و نزدیک به صفر است و باز هم می‌توان نتیجه گرفت که فضای جواب ناهموار است.

ج همبستگی فاصله و تابع تناسب: هدف از این تحلیل، بررسی میزان همبستگی تابع تناسب یک جواب تا جواب بهینه کلی است. در نتیجه، ضریب همبستگی به صورت روابط ۲۲ و ۲۳ قابل محاسبه است:

$$r = \frac{cov(F,D)}{\sigma_f \cdot \sigma_d} = -9/297427883975023e - 18 \quad (22)$$

$$cov(F,D) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})(d_i - \bar{d}) = -7/165898733771382e - 21 \quad (23)$$

با توجه به عدد منفی بزرگ به دست آمده برای ضریب همبستگی این نتیجه به دست می‌آید که مسئله گمراه‌کننده است و ممکن است جوابی نزدیک به جواب بهینه باشد، ولی کیفیت کمتری داشته باشد.

روش حل مناسب برای مسئله

با توجه به تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته روی مسئله این تحقیق، فضای جواب دره‌های متعددی با اعماق کم و زیاد را در بر می‌گیرد، که در این نقاط بهینه‌های محلی جمع شده‌اند. برای بازدهی بیشتر حل این مسئله، الگوریتم فرا ابتکاری باید طراحی شود که هم توان بهره‌برداری^{۳۱} دره‌های پایین و نیز توانایی کاوش^{۳۲} کافی فضای جست‌وجو را برای اطمینان از اینکه بهترین دره‌ها بهره‌برداری شده‌اند، داشته باشد. برای این مسئله الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیتی از جواب‌ها مناسب‌اند که این موارد را در نظر می‌گیرند. همچنین، به دلیل اینکه مدل ارائه شده در این تحقیق چندهدفه است، الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک استفاده می‌شود که در دسته الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه قرار دارد.

$$dmm(P) = \frac{\sum_{s \in P} \sum_{t \in P, s \neq t} dist(s,t)}{|P| \cdot (|P|-1)} = 6/28419868686867e + 03 \quad (15)$$

$$Dmm(P) = \frac{dmm(P)}{diam(S)} = 0/265761595486285 \quad (16)$$

$$diam(P) = \max_{s,t \in P} dist(s,t) = 23646 \quad (17)$$

بر اساس پژوهش [۲۶] فاصله بین دو جواب x^k و x^l به صورت رابطه ۱۸ تعریف می‌شود:

$$dist(x^i, x^k) = \sum_{j=1}^J |StartTime_j^i - StartTime_j^k| \quad (18)$$

که در آن $StartTime_j^i$ زمان شروع فعالیت j در جواب i است. با توجه به بزرگ بودن مقادیر به دست آمده از معیارهای توزیع در فضای جست‌وجو نتیجه می‌شود که جواب‌ها از یکدیگر فاصله دارند.

۲. توزیع در فضای هدف: دامنه^{۲۸} $Amp(P)$ از جمعیت دلخواه P ، اختلاف نسبی بین بهترین کیفیت از جمعیت P و بدترین آن است که به صورت رابطه ۱۹ تعریف می‌شود:

$$Amp(P) = \frac{|P| \cdot (\max_{s \in P} f(s) - \min_{s \in P} f(s))}{\sum_{s \in P} f(s)} = 1/476736609204341 \quad (19)$$

این مقدار نشان می‌دهد بهینه‌های محلی به یکدیگر نزدیک‌اند.

معیارهای همبستگی

هدف از معیارهای همبستگی تخمین میزان پستی و بلندی فضای جواب مرتبط با کیفیت جواب‌ها و فاصله‌شان از جواب بهینه کلی است. برخی از این معیارهای همبستگی عبارت‌اند از:

الف) طول راه‌ها: ^{۲۹} متوسط طول $Lmm(P)$ از راه‌های نزولی مرتبط با جمعیت P را می‌توان به صورت رابطه ۲۰ تعریف کرد:

$$Lmm(P) = \frac{\sum_{p \in P} l(p)}{|P|} = 1/476736609204342e - 04 \quad (20)$$

که در آن $l(p)$ طول راه شروع از جواب $p \in P$ است. با توجه به مقدار بسیار کوچک به دست آمده معیار طول راه‌هاست، فضای جواب ناهموار و نقاط بهینه بی‌شمار است. ب) تابع خودهمبستگی: ^{۳۰} این تابع هموار یا ناهموار بودن فضای جواب را اندازه‌گیری می‌کند. به عبارت دیگر، تابع خودهمبستگی $\rho(d)$ همبستگی جواب‌ها در

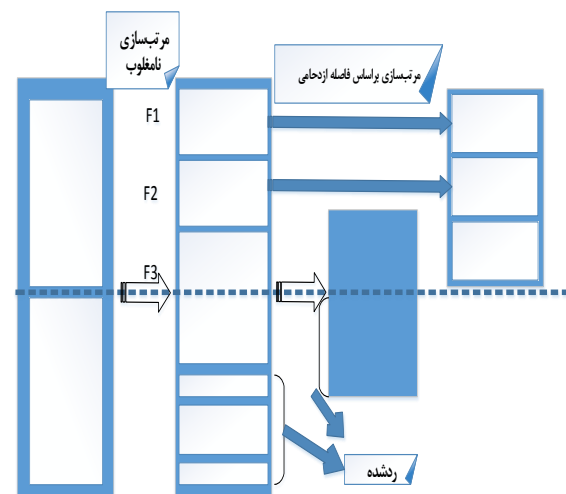
الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک

در چند دهه اخیر، ویژگی‌های ذاتی الگوریتم‌های ژنتیک دلیل مناسب بودن این الگوریتم‌ها در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بوده‌اند. با افزایش اهداف در مسائل مختلف بهینه‌سازی، کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه^{۳۳} روزبه‌روز توسعه یافته است [۳۷]. در این پژوهش، از الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب ژنتیک به‌عنوان یک روش فرا ابتکاری برای رسیدن به جوابی خوب (نزدیک به بهینه) استفاده شده است. پارامترهای موجود در الگوریتم NSGA-II در جدول ۲ معرفی می‌شوند.

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم

پارامتر	توضیح
Pop-size	تعداد جمعیت اولیه ایجاد شده
Iteration	تعداد تکرارهای الگوریتم
P_c	احتمال ترکیب
n_c	تعداد جمعیت ترکیب
P_m	احتمال جهش
n_m	تعداد جمعیت جهش

در شکل ۱ طرح شماتیک از الگوریتم NSGA-II ارائه می‌شود.



شکل ۱. طرح شماتیک از الگوریتم NSGA-II [۳۶]

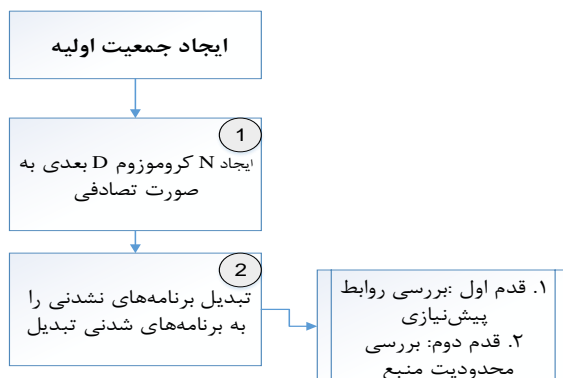
مراحل پیاده‌سازی این الگوریتم عبارت‌اند از: ۱. ایجاد جمعیت اولیه، ۲. ارزیابی و مرتب‌سازی جواب‌ها، ۳. انتخاب والدین برای عملگر ترکیب، ۴. انجام دادن عملگر ترکیب، ۵. انتخاب جمعیت برای عملگر جهش، ۶. انجام دادن عملگر جهش، ۷. یکپارچه‌سازی جمعیت‌ها، ۸. ارزیابی و مرتب‌سازی جواب‌ها، ۹. نخبه‌گرایی، ۱۰. بررسی شرط توقف. در صورت رسیدن به شرط توقف به گام ۱۱ و در غیر این صورت به گام ۳ می‌رویم. ۱۱. نمایش جبهه پارتو و توقف الگوریتم. در ادامه، هر یک از گام‌های الگوریتم به تفصیل توضیح داده می‌شود.

جمعیت اولیه

در این الگوریتم، هر کروموزوم (جواب) به‌صورت یک بردار D بعدی نمایش داده می‌شود. D تعداد فعالیت‌های (ژن‌های) مرتبط با پروژه است. هر کروموزوم (i) به‌صورت $x_i = (x_{i1} \dots x_{iD})$ نمایش داده می‌شود که x_{ij} بیانگر فعالیت i است که در جایگاه j قرار دارد. مراحل ایجاد جمعیت اولیه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۲. نحوه نمایش کروموزوم‌ها



شکل ۳. مراحل ایجاد جمعیت اولیه

فعالیت‌ها (ژن‌ها) دوبار تکرار شده‌اند. یکی از آن‌ها به تصادف از کروموزوم حذف می‌شود. ژن‌هایی که در کروموزوم‌ها وجود ندارند، به تصادف در مکان‌هایی قرار می‌گیرند و لزومی ندارد که به انتهای کروموزوم افزوده شوند. کروموزوم‌های جدید ممکن است از نظر روابط پیش‌نیازی نشدنی باشند. سپس اصلاحات لازم انجام می‌گیرد. در نتیجه، کروموزوم‌های نهایی فرزندان به دست می‌آید.

عملگر جهش

برای انجام دادن جهش ابتدا یک کروموزوم انتخاب می‌شود. سپس دو جایگاه به تصادف از کروموزوم انتخاب می‌شود. فعالیت‌های (ژن‌های) موجود در این دو جایگاه جابه‌جا می‌شوند. ساختار کروموزوم ایجاد شده از نظر روابط پیش‌نیازی کنترل می‌شود. اگر به تغییر برای موجه شدن نیاز باشد، اصلاحات لازم انجام می‌گیرد. در غیر این صورت، کروموزوم ایجاد شده به‌عنوان کروموزوم حاصل از جهش انتخاب می‌شود.

یکپارچه‌سازی و ارزیابی جمعیت‌های ایجاد شده

در این مرحله، جمعیت اولیه موجود (Pop-size)، جمعیت حاصل از ترکیب (n_c) و نیز جمعیت حاصل از جهش (n_m) در یک جمعیت واحد یکپارچه می‌شوند. سپس ارزیابی و رتبه‌بندی می‌شوند.

نخبه‌گرایی

در هر تکرار (نسل) از اجرای الگوریتم، برخی از اعضای جمعیت عملکرد بهتری نسبت به دیگران دارند (نخبه‌ها). در هر مرحله از الگوریتم این اعضا انتخاب و بدون تغییر به نسل بعدی منتقل می‌شوند.

شرط توقف الگوریتم

در این پژوهش، شرط توقف الگوریتم رسیدن به تعداد تکرار مشخص تعریف شده است.

نتایج عددی حل مسئله

در شکل ۴، جبهه پارتوی تشکیل شده به ازای یک‌بار حل مسئله نشان داده می‌شود.

ارزیابی و مرتب‌سازی جواب‌ها

به منظور ارزیابی N جمعیت اولیه، ابتدا باید جبهه‌هایی که هر جواب در آن قرار دارد مشخص شود. همچنین، برای تخمین تراکم در اطراف یک جواب خاص در جمعیت، متوسط فاصله این جواب از هر دو جواب مجاور در دو سمت این جواب براساس مقادیر اهداف محاسبه می‌شود. این مقدار را فاصله ازدحامی می‌نامند. فاصله ازدحامی برای هریک از اعضای جمعیت (i) به صورت رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود.

$$d_{I_j} = \sum_{m=1}^M \frac{f_m^{Im}(j+1) - f_m^{Im}(j-1)}{f_m^{Max} - f_m^{Min}} \quad (24)$$

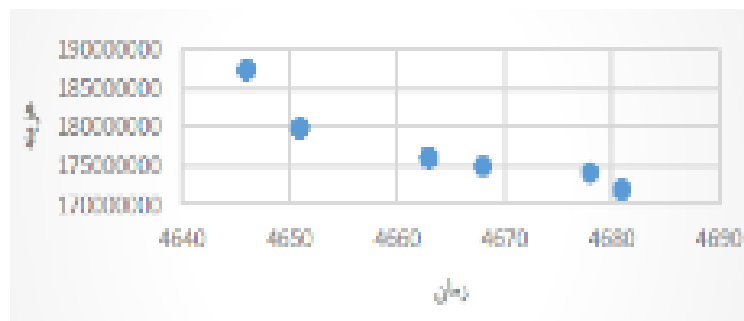
در این فرمول، d_{I_j} فاصله ازدحامی j امین جواب، M تعداد توابع هدف، $f_m^{Im}(j+1)$ و $f_m^{Im}(j-1)$ مقدار هدف m ام برای $j+1$ و $j-1$ امین جواب، f_m^{Max} برابر حداکثر مقدار هدف m ام در بین جواب‌های جمعیت موجود و f_m^{Min} برابر حداقل مقدار هدف m ام در بین جواب‌های جمعیت موجود است. همچنین، I_j به j امین جواب در لیست مرتب شده و $(j-1)$ و $(j+1)$ نیز دو تا نزدیک‌ترین جواب همسایه در دو طرف I_j هستند. جوابی با فاصله ازدحامی کم بیانگر تراکم بیشتر جواب در اطراف آن است.

راهبرد انتخاب

اصل اساسی راهبرد انتخاب این است که «افراد بهتر شانس بیشتری برای انتخاب برای والدین شدن دارند». در این پژوهش، از روش رتبه‌بندی برای انتخاب والدین استفاده می‌شود؛ به طوری که از رتبه هر کروموزوم استفاده می‌شود. به این ترتیب، ابتدا کروموزوم‌ها از فاصله ازدحامی زیاد به کم مرتب‌سازی می‌شوند. سپس براساس جبهه‌ای که در آن قرار دارند، کروموزوم دارای رتبه پایین‌تر، برای انتخاب مناسب‌تر است.

عملگر ترکیب

در این پژوهش، از ترکیب یک نقطه‌ای استفاده شده است. ابتدا دو کروموزوم به‌عنوان والدین از کروموزوم‌های موجود انتخاب می‌شود. سپس یک مکان به تصادف انتخاب می‌شود و ترکیب انجام می‌گیرد. در کروموزوم‌های فرزندان برخی



شکل ۴. جبهه پارتو برای مسئله موردی

جدول ۳. نتایج حل مدل

اجرا	حداکثر هزینه تسطیح منابع	حداقل هزینه تسطیح منابع	حداکثر زمان تکمیل پروژه	حداقل زمان پروژه
۱	۱۷۴۱۸۵۰۰۰	۱۶۷۴۵۰۰۰۰	۲۱۷۹,۵	۲۱۶۳
۲	۱۶۹۴۰۵۰۰۰	۱۶۳۵۷۰۰۰۰	۲۳۲۰,۵	۲۲۹۸
۳	۱۷۴۹۵۰۰۰۰	۱۶۹۵۴۰۰۰۰	۲۳۰۸,۵	۲۲۷۷,۵
۴	۱۷۰۴۶۵۰۰۰	۱۶۶۱۲۰۰۰۰	۲۲۵۶,۵	۲۲۰۸
۵	۱۶۴۶۳۰۰۰۰	۱۵۸۶۸۰۰۰۰	۲۳۶۲	۲۳۴۹
۶	۱۷۱۱۰۰۰۰۰	۱۶۵۹۶۵۰۰۰	۲۴۰۰	۲۳۹۱
۷	۱۷۳۳۸۰۰۰۰	۱۶۶۵۲۰۰۰۰	۲۴۳۲,۵	۲۴۱۰
۸	۱۷۰۱۲۰۰۰۰	۱۶۲۹۷۰۰۰۰	۲۱۸۸	۲۱۷۰
۹	۱۷۵۴۰۵۰۰۰	۱۵۸۸۲۵۰۰۰	۲۳۸۶,۵	۲۳۶۵
۱۰	۱۶۸۲۰۰۰۰۰	۱۵۶۲۵۵۰۰۰	۲۴۷۶,۵	۲۴۳۰

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش، با توجه به تحقیقات اندک موجود در زمینه مدل‌های دو یا چندهدفه در ادبیات RCPS، یک مدل کاربردی دوهدفه ارائه شد که اهداف از دو جنبه نظر کارفرما و پیمانکار در آن لحاظ شده‌اند. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، این مدل در نرم‌افزار گمز که یکی از ابزارهای حل دقیق مسائل خطی است، کدنویسی شد و با استفاده از یک مثال از ادبیات، حل و صحت مدل پیشنهادی تضمین شد. سپس مطالعه موردی در دنیای واقعی انتخاب و با تجزیه و تحلیل فضای جواب، الگوریتم تکاملی NSGA-II انتخاب شد. در نهایت، نتایج حل مدل با الگوریتم ژنتیک با نتایج دنیای واقعی مقایسه شد، اما مسئله RCPS یک مسئله بسیار کاربردی در دنیای واقعی است. از جمله مواردی که می‌توان در تحقیقات آتی بررسی کرد، در نظر گرفتن سایر اهداف از قبیل کیفیت، ارزش

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقاط نامغلوب به‌ازای حل این مدل در یک‌بار اجرای الگوریتم به‌دست آمده است که همه آن‌ها خوب هستند. نتایج پس از ۱۰ بار اجرای الگوریتم برای این مدل در جدول ۳ نشان داده می‌شود. حداقل زمان تکمیل پروژه محاسبه‌شده از حل مدل ۲۱۶۳ به‌دست آمده است. همچنین، حداقل هزینه تسطیح منبع محاسبه‌شده از حل مدل ۱۶۲۹۷۰۰۰۰ تومان بوده است. این پروژه در شرایط واقعی و برنامه‌ریزی‌شده در ۲۰۰۰ روز کاری تکمیل شده است. با توجه به اینکه مدل پیشنهادی کاملاً جدید است، تنها راه مقایسه بررسی فقط یک هدف از آن یعنی زمان تکمیل پروژه به‌صورت نسبی با نتیجه حاصل از نرم‌افزار است. ۱۶۳ روز کاری اختلاف در زمان‌های تکمیل محاسبه‌شده وجود دارد که این اختلاف به‌علت ماهیت دوهدفه بودن مدل قطعی و امری منطقی است.

غیرقابل پیش‌بینی در پروژه‌ها شود. در نظر گرفتن رویکردی که این اختلالات را در مدل لحاظ کند، یکی از حوزه‌های بسیار مهم برای پژوهش‌های آتی است.

خالص فعلی و... در مدل‌سازی است. توسعه الگوریتم‌های تکاملی و ترکیبی دیگر نیز برای این مسئله نتایج بهتری را به همراه دارد. همچنین، در دنیای واقعی عدم قطعیت‌های بی‌شماری ممکن است رخ دهد که موجب بروز تأخیرات

مراجع

- ARTIGUES, C., LEUS, R. and NOBIBON, F. T. (2013). "Robust optimization for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 25, No. 1, PP. 175-205.
- Węglarz, J., J. Józefowska, M. M. and Waligóra, G. (2011). "Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes—A survey", *European Journal of Operational Research*, Vol. 208, No. 3, PP. 177-205.
- Herroelen, W. and LEUS, R. (2005). "Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials", *European Journal of Operational Research*, Vol. 165, No. 2, PP. 289-306.
- Rummel, J. L., Walter, Z., Dewan, R. and Seidmann, A. (2005). "Activity consolidation to improve responsiveness", *European Journal of Operational Research*, Vol. 161, No.3, PP. 683-703.
- Koné, O., Artigues, C., Lopez, P. and Mongeau, M. (2011). "Event-based MILP models for resource-constrained project scheduling problems", *Computers & Operations Research*, Vol. 38, No. 1, PP. 3-13.
- Hebert, J. E. and DECKRO, R. F. (2011). "Combining contemporary and traditional project management tools to resolve a project scheduling problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 38, No. 1, PP. 21-32.
- Liu, S. S. and Wang, C. J. (2012). "Optimizing linear project scheduling with multi-skilled crews", *Automation in Construction*, Vol. 24, No. 1, PP. 16-23.
- Quintanilla, S., Pérez, Á., Lino, P. and Valls, V. (2012). "Time and work generalised precedence relationships in project scheduling with pre-emption: An application to the management of Service Centres", *European Journal of Operational Research*, Vol. 219, No. 1, PP. 59-72.
- Kyriakidis, T. S., Kopanos, G. M. and Georgiadis, M. C. (2012). "MILP formulations for single-and multi-mode resource-constrained project scheduling problems", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 36, No. 1, PP. 369-385.
- Tavana, M., Abtahi, A. R. and Khalili-damghani, K. (2014). "A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time-cost-quality trade-off project scheduling problems", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 4, PP. 1830-1846.
- Afshar Najafi, B., Karimi, H., Rahimi, A. and Khalili, S. (2015). "Project scheduling with limited resources using an efficient differential evolution algorithm", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, Vol. 27, No. 2, PP. 176-184.
- Tian, W. and Demeulemeester, E. (2014). "Railway scheduling reduces the expected project makespan over roadrunner scheduling in a multi-mode project scheduling environment", *Annals of Operations Research*, Vol. 213, No. 1, PP. 271-291.
- Kim, J., Kang, C. and Hwang, I. (2012). "A practical approach to project scheduling: Considering the potential quality loss cost in the time-cost tradeoff problem", *International Journal of Project Management*, Vol. 32, No. 2, PP. 264-272.
- Bianco, L. and Caramia, M. (2013). "A new formulation for the project scheduling problem under limited resources," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 25, No. 1-2, PP. 6-24.
- Szmerekovsky, J. G. and Venkateshan, P. (2012). "An integer programming formulation for the project scheduling problem with irregular time-cost tradeoffs", *Computers & Operations Research*, Vol. 39, No. 7, PP. 1402-1410.

16. Shi, Q. and Blomquist, T. (2012). "A new approach for project scheduling using fuzzy dependency structure matrix", *International Journal of Project Management*, Vol. 30, No. 4, PP. 503-510.
 17. Correia, I., Lourenço, L. L. and Saldanha-da-gama, F. (2012). "Project scheduling with flexible resources: Formulation and inequalities", *OR Spectrum*, Vol. 34, No. 3, PP. 635-663.
 18. Koné, O., Artigues, C., Lopez, P. and Mongeau, M. (2013). "Comparison of mixed integer linear programming models for the resource-constrained project scheduling problem with consumption and production of resources", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 25, No. 1-2, PP. 25-47.
 19. Rahimi, A., Karimi, H. and Afshar-nadjafi, B. (2013). "Using meta-heuristics for project scheduling under mode identity constraints", *Applied Soft Computing*, Vol. 13, No. 4, PP. 2124-2135.
 20. Kopanos, G. M., Kyriakidis, T. S. and Georgiadis, M. C. (2014). "New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 68, No. 1, PP. 96-106.
 21. Yang, S. and Fu, L. (2014). "Critical chain and evidence reasoning applied to multi-project resource schedule in automobile R&D process", *International Journal of Project Management*, Vol. 32, No. 1, PP. 166-177.
 22. Wang, W. X., Wang, X., Ge, X. L. and Deng, L. (2014). "Multi-objective optimization model for multi-project scheduling on critical chain", *Advances in Engineering Software*, Vol. 68, No. 1, PP. 33-39.
 23. Singh, A. (2014). "Resource constrained multi-project scheduling with priority rules & analytic hierarchy process", *Procedia Engineering*, Vol. 69, No. 1, PP. 725-734.
 24. Tang, Y., Liu, R. and Sun, Q. (2014). "Schedule control model for linear projects based on linear scheduling method and constraint programming", *Automation in Construction*, Vol. 37, No. 1, PP. 22-37.
 25. Messelis, T. and De Causmaecker, P. (2014). "An automatic algorithm selection approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 233, No. 3, PP. 511-528.
 26. Van Peteghem, V. and Vanhoucke, M. (2014). "An experimental investigation of metaheuristics for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem on new dataset instances", *European Journal of Operational Research*, Vol. 235, No. 1, PP. 62-72.
 27. Luna, F., González-álvarez, D. L., Chicano, F. and Vega-rodríguez, M. A. (2014). "The software project scheduling problem: A scalability analysis of multi-objective metaheuristics", *Applied Soft Computing*, Vol. 15, No. 1, PP. 136-148.
 28. Cheng, M. Y., Tran, D. H. and WU, Y. W. (2014). "Using a fuzzy clustering chaotic-based differential evolution with serial method to solve resource-constrained project scheduling problems", *Automation in Construction*, Vol. 37, No. 1, PP. 88-97.
 29. Ghasemi, B., Sadeghi, A., Roghani, M., Researchers, Y., Club, E. and Branch, S. T. (2015). "The solution of multi-objective multimode Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) with partial precedence relations by Multi-Objective Bees Algorithm", *SILVAE GENETICA*, Vol. 57, No. 1, PP. 0037-5349.
 30. Paraskevopoulos, D. C., Tarantilis, C. D. and Ioannou, G. (2016). "An adaptive memory programming framework for the resource-constrained project scheduling problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 54, No. 16, PP. 4938-4956.
 31. Geiger, M. J. (2017). "A multi-threaded local search algorithm and computer implementation for the multi-mode, resource-constrained multi-project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 256, No. 3, PP. 729-741.
 32. Leyman, P. and Vanhoucke, M. (2017). "Capital-and resource-constrained project scheduling with net present value optimization", *European Journal of Operational Research*, Vol. 256, No. 3, PP. 757-776.
 33. Gholipour, Y. and Shahbazi, M. M. (2011). "Resource-constrained scheduling of construction projects using
-

- the harmony serach algorithm", *Journal of Industrial Engineering, University of Tehran, Special Issue*, Vol. 45, No. 5, PP. 51-60.
34. Rafiee Majd, Z., Julai, F. and Bagherinejad, G. (2012). "Solving the MRCPSP/Max with the objective of minimizing tardiness costs and maximizing earliness rewards of activities with a two-stage genetic algorithm", *Journal of Industrial Engineering, University of Tehran*, Vol. 47, No. 1, PP. 1-13.
35. Kastor, A. and Sirakoulis, K. (2009). "The effectiveness of resource levelling tools for resource constraint project scheduling problem", *International Journal of Project Management*, Vol. 27, No. 5, PP. 493-500.
36. Chen, W, Shi Y. J, Teng, H. F. Lan, X, P and Hu, L. C. (2010). "An efficient hybrid algorithm for resource-constrained project scheduling", *Information Sciences*, Vol. 180, No. 6, PP. 1031-1039.
37. Fallah-mehdipour, E., Haddad, O. B., Tabari, M. M. R. and Mariño, M. A. (2012). "Extraction of decision alternatives in construction management projects: Application and adaptation of NSGA-II and MOPSO", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 3 ,PP. 2803-2794.
38. Deb, K., Anand, A. and Joshi, D. (2002). "A computationally efficient evolutionary algorithm for real-parameter optimization", *Evolutionary Computation*, Vol. 10, No. 4, PP. 371-395.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
2. Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)
3. Combinational Optimization Problem
4. Project Scheduling with Resource Availability Cost Problem (RACP)
5. Precedence Diagramming Modeled (PDM)
6. Simulated Annealing (SA)
7. Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP)
8. Differential Evolution Algorithm (DE)
9. Evidence Reasoning (ER)
10. Analytic Hierarchy Process (AHP)
11. Linear Scheduling Model (LSM)
12. Constraint Programming (CP)
13. Fuzzy c-means Clustering (FCM) Technique
14. Chaotic Technique
15. Differential Evolution (ED)
16. Adaptive Memory Programming (AMP)
17. Variable Neighborhood Search
18. Iterated Local Search
19. The Capital-constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows (CCPSPDC)
20. The Capital- and Resource-constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows (CRCPSPDC)
21. Net Present Value (NPV)
22. Resource Leveling
23. Time Lags
24. Landscape Analysis
25. Distribution Measures
26. Topology
27. Correlation Measures
28. Amplitude
29. Length of the Walks
30. Autocorrelation Function
31. Exploit
32. Explore
33. Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA)