

توسعه مدل زمان بندی در صنعت ساختمان با رویکرد کیفی سازی پروژه‌ها در شرایط محدودیت منابع

مهیار عزیزخانی^۱، داود صداقت شایگان^{۲*}، علی اصغر امیر کار دوست^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاداسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاداسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران (نویسنده مسئول)

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاداسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

چکیده

زمان‌بندی پروژه در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه تحت محدودیت منابع، همواره از چالش‌های اساسی در مدیریت پروژه به شمار می‌آید. در این پژوهش مدلی چندهدفه برای زمان‌بندی پروژه‌های چندحالتی با منابع محدود ارائه گردید که علاوه بر زمان و هزینه، کیفیت اجرای فعالیت‌ها را نیز به‌عنوان یک تابع هدف مستقل در نظر می‌گیرد. در راستای ماهیت $NP-hard$ این مسئله، دو الگوریتم فراابتکاری PSO و NSGA-III برای تولید جبهه‌های پارتو سه‌بعدی به‌کار گرفته شدند. نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم NSGA-III در هر دو سناریوی منابع توانسته است پاسخیابی با زمان نسبتاً پایین و هزینه‌های مقرون‌به‌صرفه ارائه دهد؛ به‌ویژه در حالت دوم که کمترین هزینه معادل ۳۵۷۲ میلیون ریال برای مدت ۲۱ روز و کیفیت ۶۹٪ به دست آمد. در مقابل، PSO در حالت اول عملکرد برتری در دستیابی به کیفیت بالاتر داشته و راه‌حلهایی با کیفیت ۷۴٪ و مدت مشابه ۱۷ روز، هرچند با هزینه بیشتر (۴۳۰۴ میلیون ریال)، تولید نموده است. تحلیل جبهه‌های پارتو نشان داد که PSO تنوع بالاتری در پاسخ‌ها ایجاد کرده و ترکیب‌های متعادلی میان سه هدف ارائه می‌دهد، در حالی که NSGA-III گرایش بیشتری به تولید پاسخ‌های یکنواخت با تمرکز بر کاهش هزینه دارد. نوآوری اصلی این پژوهش، گنجاندن تابع کیفیت به‌صورت مستقل در مدل زمان‌بندی و مقایسه عمیق عملکرد دو الگوریتم در شرایط منابع متفاوت است که می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیرندگان پروژه به‌منظور انتخاب گزینه بهینه بر اساس اولویت‌های راهبردی به‌کار رود.

کلمات کلیدی: مدل زمان بندی، زمان بندی پروژه، بهینه سازی زمان-هزینه، محدودیت منابع، الگوریتم فرا ابتکاری

* نویسنده مسئول: داود صداقت شایگان
پست الکترونیکی: da.sedaghat@iau.ac.ir

در راستای محورهای مهم و اساسی در برنامه توسعه کشور، به کارگیری از توان فنی داخلی در اجرای طرح‌ها و پروژه‌های عمرانی، صنعتی و خدماتی، مورد تاکید بسیار قرار دارد. در این زمینه موضوع زمان‌بندی پروژه در شرایط محدودیت منابع جهت بهبود بخشیدن به برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و جلوگیری از به هدر رفتن سرمایه‌های ملی و خسارت‌های جبران ناپذیر ناشی از تاخیر در انجام پروژه، مقوله‌ای انکار ناپذیر است. با توجه به چالش‌های پیش‌رو و نیازهای مهم سازمان‌ها نسبت به حجم عظیم طرح‌ها و پروژه‌های زیرساختاری کشور و روند نظارتی بر مدیریت اجرایی آن، ابزاری لازم است که قادر به آنالیز دقیق پروژه و به کارگیری موثر توانمندی‌های علمی، فنی و اجرایی و تلفیق آن با فناوری اطلاعات و تکنولوژی روز باشد [۱]. یک پروژه مجموعه‌ای از فعالیت‌هایی است که از طریق روابط منطقی متفاوتی که حاکم بر آنهاست به یکدیگر ارتباط پیدا می‌کند. به این معنا که هرچند تعدادی از این فعالیت‌ها می‌توانند همزمان و به صورت موازی انجام شوند، اما شروع یا خاتمه تعدادی در گرو انجام یک یا چند فعالیت پیش‌نیاز آنها می‌باشند. اجرای هر فعالیت پروژه معمولاً نیازمند منابع متفاوتی از جمله زمان، سرمایه، نیروی انسانی و غیره است که بعضاً محدود می‌باشند [۲]. همچنین زمان‌بندی پروژه عبارت از تعیین زمان انجام فعالیت‌های یک پروژه، با توجه به محدودیت‌های حاکم بر آن، برای رسیدن به یک هدف معین است [۳]. با استفاده از زمان‌بندی پروژه، مواردی همچون تخصیص منابع به فعالیت‌ها، تعهدات پیمانکاران، تعمیرات پیشگیرانه و تحویل سفارش مشتری داخلی و خارجی به راحتی قابل برنامه‌ریزی خواهد بود [۴]. یکی از مهمترین مسائل در بحث زمان‌بندی پروژه مدل RCPSP است. از زمان پیدایش این مدل در سال ۱۹۶۹ تاکنون مطالعات بسیاری روی آن انجام شده است [۶]. محدودیت‌های اصلی این مدل شامل سطح دسترسی به منابع و روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه است [۵]. هدف مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود که یک مسئله NP-hard است. تعیین زمان شروع و حالت اجرای هر فعالیت به گونه‌ای می‌باشد که زمان اجرای پروژه را کمینه نماید. بدیهی است مساله نه تنها باید قیود مربوط به ارتباط منطقی فعالیت‌ها را تامین کند، بلکه باید به محدودیت منابع نیز توجه داشته باشد [۲]. از سوی دیگر در انجام پروژه‌های واقعی، با مسائل محدودیت در منابع، روش‌های اجرایی مختلف با زمان و هزینه‌های متفاوت و همچنین وجود عوامل کنترل‌نشده نظیر افزایش زمان اجرای فعالیت‌ها یا اضافه شدن فعالیت‌های پیش‌بینی نشده روبرو می‌باشیم، لذا این امر تصمیم‌گیری را در تعیین زمان‌بندی بهینه برای مدیران پروژه دشوار نموده است.

یکی از جنبه‌های اساسی در پروژه‌های ساختمانی، پیوند مستقیم میان محدودیت منابع و کیفیت خروجی نهایی است. به‌طور معمول، کاهش دسترسی به منابع مالی، انسانی یا تجهیزاتی موجب می‌شود پیمانکاران برای کنترل هزینه‌ها، از مصالح ارزان‌تر یا نیروی کار کم‌تجربه‌تر استفاده کنند و یا برخی فرآیندهای کنترل کیفیت را حذف نمایند. این مسئله به‌طور مستقیم کیفیت ساخت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای مثال، بر اساس گزارش *FMI Construction Industry Report (2021)*، بیش از ۳۵٪ از پروژه‌های ساختمانی که با محدودیت شدید مواجه بوده‌اند، دچار افت محسوس کیفیت در اجرای جزئیات سازه و تاسیسات شده‌اند. در ایران نیز

مطالعه‌ای توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۹۹) نشان داد که در پروژه‌های عمرانی که محدودیت منابع مالی وجود داشته، احتمال بروز ترک‌های زودرس در بتن تا ۲۸٪ بیشتر از پروژه‌های دارای منابع کافی بوده است. از سوی دیگر، محدودیت نیروی انسانی متخصص نیز می‌تواند کیفیت را کاهش دهد؛ به‌عنوان نمونه در پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن، کاهش ۲۰٪ نیروی ماهر منجر به افزایش دوباره کاری‌ها و تأخیرهای ناشی از اصلاح کار تا ۱۵٪ گزارش شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که محدودیت منابع نه تنها بر زمان و هزینه، بلکه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر کیفیت پروژه اثرگذار است. مدل پیشنهادی این پژوهش با در نظر گرفتن کیفیت به‌عنوان تابع هدف مستقل، امکان ارزیابی این اثرات و ارائه‌ی راه‌حل‌های متوازن میان سه شاخص کلیدی زمان-هزینه-کیفیت را فراهم می‌سازد. عدم اهتمام و توجه به این پارامترها، موجب تعویق و تأخیر در زمان تکمیل و اتمام پروژه‌های عمرانی در کشور گردیده است، به همین منظور با توجه به چند هدفه بودن مسائل اجرایی، در این پژوهش به بررسی مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چند حالت و بهینه‌سازی آن با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری چند هدفه پرداخته شده است.

۲- چارچوب و پیشینه تحقیق

افزایش تعداد فعالیت‌ها و تعداد منابع برای تکمیل فعالیت‌ها در یک پروژه باعث می‌شود زمان‌بندی این فعالیت‌ها به منظور تکمیل پروژه در حداقل زمان ممکن، تبدیل به یک مسئله بزرگ شود که حل آن از طریق روش معمول تحقیق در عملیات عملی نیست. علاوه بر این، منابع نامحدود در اکثر شرایط قابل توجیه نیست. در واقع منابع مقدار مشخص و محدودی دارند و یا هزینه‌های اضافه کردن به منبع بسیار زیاد است. پس در نهایت می‌توان گفت محدودیت منابع در پروژه یکی از اصلی‌ترین مشکلات برنامه‌ریزی در دنیای واقعی است [۸]. مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود از دسته مسائل مشکل برای حل، دسته‌بندی شده است [۹]. در این مسئله، هر پروژه از تعدادی فعالیت تشکیل شده است، به علاوه تعدادی منبع با ظرفیت‌های محدود در هر دوره زمانی وجود دارد. فعالیت‌ها علاوه بر اینکه نسبت به یکدیگر جهت اجرا دارای اولویت هستند، در استفاده از منابع نیز محدودیت دارند. به طور کلی، RCPSP درگیر یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های یک پروژه است، به نحوی که محدودیت‌های تقدم و تاخر شبکه پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منبعی موجود در پروژه به طور همزمان ارضا شوند و معیار سنجش معینی از جمله زمان انجام پروژه، هزینه‌ی انجام، تعداد فعالیت‌های تأخیردار و... بهینه گردد [۱۰]. در دنیای واقعی معمولاً فعالیت‌های مربوط به یک پروژه با روش‌ها و در حالت‌های مختلفی قابل اجرا می‌باشند. با توجه به این موضوع و با در نظر گرفتن اهداف مختلف در پروژه، در هر کدام از حالت‌های اجرا، فعالیت‌های پروژه در مدت زمان و با هزینه‌های متفاوتی نسبت به سایر حالت‌ها، انجام می‌گیرند [۱۱]. امروزه از یک سو مدیران به دنبال کاهش هزینه‌های پروژه هستند و از سوی دیگر به دنبال فشرده‌سازی زمان انجام پروژه می‌باشند. اما فشرده‌سازی زمان پروژه که با افزایش منابع تخصیص یافته جهت سرعت بیشتر در اجرای فعالیت‌ها انجام می‌پذیرد، به ناچار باعث افزایش هزینه‌ها خواهد شد. پیش‌بینی این مطلب که نتیجه فشرده‌سازی زمان‌بندی پروژه منجر به افزایش یا کاهش هزینه کل پروژه می‌شود دشوار است. در واقع اگر چه هزینه‌های مستقیم افزایش می‌یابند، ولی به دلیل کاهش زمان پروژه، هزینه‌های غیرمستقیم ممکن است کاهش یابند. این موضوع تاییدی

است بر این مطلب که حتی کاهش زمان و هزینه به طور همزمان تنها در بعضی حالات ممکن است [۱۱]. همچنین یکی از مشکلات رایج در مدیریت پروژه، اختلال زمان‌بندی‌ها در اثر عوامل کنترل‌نشده‌ای در حین اجرای پروژه است. در نتیجه، مدیران پروژه اغلب در پایبندی به تعهداتشان دچار مشکل می‌شوند. بنابراین زمان‌بندی پروژه علاوه بر زمان ختم کوتاه، باید حین اجرا دچار کمترین اختلال شود [۴]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی موضوع زمان‌بندی پروژه انجام شده است. در بیشتر تحقیقات فرض می‌شود فعالیت‌ها در یک شرایط ایده‌آل انجام می‌گیرد و زمان‌بندی ارائه شده می‌تواند به طور دقیق مطابق با برنامه اجرا شود. اگر چه در عمل، وجود چندین عامل کنترل‌نشده نظیر افزایش زمان اجرای فعالیت‌ها، نبود دسترسی به منابع، اضافه شدن فعالیت‌های پیش‌بینی نشده به پروژه، شرایط بد آب و هوایی و غیره ممکن است منجر به ایجاد اختلال‌هایی در زمان‌بندی پروژه شود. این اختلال‌ها می‌تواند هزینه‌های قابل توجهی به سیستم پروژه تحمیل کند [۵]. از این رو می‌توان گفت رسالت مدیریت پروژه، ایجاد تعهد در قبال برنامه زمان‌بندی است [۱۲]. لزوم در نظر گرفتن تمامی موارد یاد شده و ارتقاء مدل و توابع هدف در حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود حائز اهمیت است. لذا در این پژوهش یک مدل چند هدفه برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چند حالتی (MRCPS) توسعه داده شده است که در آن به بررسی همزمان کمینه‌کردن زمان ختم پروژه و کمینه‌سازی هزینه کل (بودجه کل) پرداخته شده است. مدل ارتقا یافته با لحاظ قیود مربوطه و با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری چند هدفه مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو مطالعات متنوعی نیز در ارتباط با بهینه‌سازی زمان‌بندی در پروژه‌های ساخت و ساز نیز انجام شده که در این بخش خلاصه‌ای از این موارد شرح داده خواهد شد.

وانگ و همکاران، (۲۰۱۲) با استفاده از منطق نرم، یک مدل بهینه‌سازی برای کاهش هزینه‌های پروژه و کوتاه کردن مدت زمان ساخت در پروژه‌های تکراری ارائه دادند. مدل آن‌ها مبنی بر این واقعیت است که ترتیب کاری بین نواحی مختلف ثابت نبوده و اغلب تغییر می‌کند. تیم مدیریت پروژه برای کوتاه کردن مدت زمان پروژه، نیاز به منابع اضافه دارند. در نتیجه با اضافه کردن منابع جدید، هزینه مستقیم پروژه افزایش خواهد یافت. در پروژه‌های تکراری ترکیب طول مدت فعالیت‌ها و ترتیب منطقی آن‌ها منجر به طول مدت‌های متفاوت در پروژه می‌شود. از سوی دیگر، نرخ بهره‌وری گروه‌های کاری می‌تواند در اندازه آن‌ها و استراتژی‌های افزایش تولید تاثیرگذار باشد. بنابراین در این تحقیق از مدل خاصی استفاده شده، که توانسته است با ترکیب هزینه به عنوان مهم‌ترین متغیر تصمیم، با منطق نرم و براساس فرآیند بنیادی ساخت و تعداد فعالیت‌هایی که در واحدهای تکراری باید در یک زمان خاص انجام گیرند، روشی سودمند را برای حمایت از تیم پروژه در راستای کاهش هزینه کلی پروژه ارائه دهد [۱۳]. پاورسکی و ساپیچا (۲۰۱۲) با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، به دنبال پیدا کردن ارزان‌ترین زمان‌بندی، با توجه به محدودیت‌های زمانی می‌باشند. به طور میانگین، این بهینه‌سازی ۱۴/۱٪ کاهش هزینه‌ها، با استفاده از منابع یکسان را در پی داشته است. در این مقاله برای تعیین مقدار بهبود وضعیت زمان‌بندی، از مفهوم سود استفاده شده است که نسبتی بین هزینه و زمان کلی پروژه است [۱۴]. آمول سینگ (۲۰۱۳) مسئله زمان-بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع را با قاعده اولویت و فرآیند سلسه مراتبی بررسی نموده است. در این تحقیق یک الگوریتم ترکیبی بر مبنای اولویت‌بندی (بحرانی بودن آن) و پیشرفت پروژه در زمان‌بندی چندپروژه‌ای و با

هدف حداقل‌سازی زمان اتمام و هزینه‌های جریمه ارائه شده است، این مسئله با استفاده از الگوریتم ترکیبی بر پایه قواعد اولویت‌بندی و AHP ایجاد و به منظور بهینه‌سازی جواب‌ها جهت ارائه توزیع اولویت زمان‌بندی در یک چند پروژه‌ای نتایج خود را منتشر کرده است [۱۵]. پینگ و ولینگ (۲۰۱۴) یک مدل کارآمد برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود بر پایه الگوریتم ژنتیک ارائه داده‌اند، این الگوریتم با بررسی تعارض و تداخل فعالیت‌ها و منابع بر پایه اولویت‌ها، از تولید کروموزوم‌های غیرعملی جلوگیری کرده و نسبت به ارائه جواب‌های بهینه اقدام نموده است، این مثال در یک پروژه واقعی الکتریکی بررسی و نتایج آن ارائه شده است [۱۶]. محمد عبدالشاه (۲۰۱۴) به مروری بر روش‌ها در حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پروژه با هدف تحلیل روش‌های مختلف که بطور همزمان و یا جداگانه می‌تواند برای حل مشکلات زمان‌بندی پروژه استفاده شود پرداخته است، این تحقیق به بررسی بیش از ۲۰۰ مقاله منتشر شده از معتبرترین مجلات علمی دنیا پرداخته و با جمع‌آوری و بررسی روش‌های مختلف به منظور روشن شدن ویژگی‌های مدل‌های توسعه یافته و نارسایی آن‌ها جهت به کارگیری مدیران پروژه با توجه به شرایط سازمانی، نوع منابع و فعالیت‌ها پرداخته است و نتایج بررسی خود را در قالب جداول مدون ارائه داده است [۱۷]. اسماعیل علی و همکاران (۲۰۱۶) برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود یک الگوریتم تکاملی تشخیص دهنده (تفاضلی) ارائه داشته‌اند، این الگوریتم که با عنوان DE مطرح شده است با اصلاح جهش و عامل تقاطع با هدف حفظ امکان اجرا برای تولید منحصر به فرد معرفی شده و با ارائه راه حل کارا در جمعیت‌های اولیه و پیشنهاد ساده کردن نمایش برای کروموزم و جانشین‌های قبلی وابسته بین فعالیت‌ها قادر به همگرا کردن و حل بهینه می‌باشد و این الگوریتم با نمونه مثال‌های PSPLIB با فعالیت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ آزمایش و عملکرد آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری در این تحقیق بررسی و نتایج آن ارائه شده است [۱۸]. خانگ و مینت در سال ۲۰۱۷ سه مدل برنامه‌ریزی خطی برای موازنه زمان، هزینه و کیفیت در برنامه زمان‌بندی پروژه ابداع کرده بودند را برای پروژه ساخت یک کارخانه سیمان در تایلند بکار بردند و با نرم‌افزار LINGO آنرا حل کردند. با تغییر دادن مقادیر کران محدودیت‌های زمان، هزینه و کیفیت در هر مدل مقدار تابع هدف مربوط را محاسبه کردند و حداقل و حداکثر مقداری که می‌توانست در مقدار تابع هدف تأثیرگذار باشد را بدست آوردند و ضمن ارائه جداول و نمودارهایی به تحلیل نتایج پرداختند [۱۹]. زنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای موازنه زمان و هزینه در مسأله زمان‌بندی پروژه یک مدل دو هدفه ارائه کردند. آنها در تابع برازش الگوریتم تغییراتی ایجاد نمودند و با توجه به اهمیت هر عامل زمان یا هزینه در پروژه وزنی به هر کدام از آنها در تابع برازش تخصیص دادند که باعث می‌شد الگوریتم فضای بزرگتری را نسبت به حالت بدون وزن جستجو کند [۲۰]. لازاری و همکاران در سال ۲۰۲۴ به مطالعه مدل زمان‌بندی چندهدفه پروژه‌های بزرگ و تکرارشونده در صنعت ساخت‌وساز با رویکرد بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت با منابع محدود پرداخته است. در این پژوهش بر پایه مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی چندهدفه با توجه به محدودیت منابع انجام شد. نویسندگان به جای بررسی ساده‌ی نوسانات، رابطه‌ی مستقیم میان نوسان استفاده از منابع و ضررهای واقعی (مثلاً هزینه) را تحلیل نمودند. برای ارزیابی مدل، شاخص‌هایی مانند انحراف معیار روزانه تخصیص منابع نیز لحاظ شد و اثرات منفی ناهنجاری در تخصیص منابع بر تأخیر و هزینه بررسی گردید. نتایج نشان داد که در پروژه‌های با منابع محدود، نوسانات

شدید در تخصیص منابع منجر به افزایش قابل توجه در تأخیرات و هزینه‌ها می‌شود. همچنین تأکید شد که معیارهای آماری ساده نمی‌توانند زیان‌های واقعی را آشکار سازند و پیشرفت‌های عملی‌تر برای ارزیابی تخصیص منابع مورد نیاز است [۲۱]. در مطالعه ای دیگر ژو و همکاران (۲۰۲۵) به تحلیل همزمان دو نوع محدودیت ریسک زمان‌بندی و منابع در پروژه‌های ساخت‌وساز پرداخته و با رویکردی بر پایه ریسک، تصمیم‌گیری چندهدفه را بررسی نموده‌اند. ایشان ابتدا چارچوب مسئله را با در نظر گرفتن همزمان تأخیر زمانی و محدودیت منابع توسعه دادند. سپس با رویکرد چندهدفه و ساختار ریسک‌محور، مدل زمان‌بندی را پیاده‌سازی و آزمایش نمودند. یافته‌ها نشان دادند که مدل‌های ساده چندهدفه قادر به تولید تعادل بهتر میان اهداف زمانی، هزینه، کیفیت و ریسک هستند. این مدل به مدیران پروژه اجازه داد تا بر اساس درجه‌ی تحمل ریسک و محدودیت منابع، انتخاب‌های بهینه‌تر داشته باشند و تصمیمات استراتژیک را کارآمدتر اتخاذ نمایند [۲۲]. در سال‌های اخیر، بهبود کیفیت اجرای پروژه‌ها در کنار زمان و هزینه، به یکی از اهداف کلیدی در تحقیقات زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تبدیل شده است. بسیاری از مطالعات اولیه نظیر مدل‌های کلاسیک RCPSPP عمدتاً بر کمینه‌سازی زمان یا هزینه تمرکز داشتند و کیفیت را یا ثابت فرض کرده یا لحاظ نکرده‌اند [۲۳]. با این حال، در پاسخ به نیازهای عملی پروژه‌های واقعی، محققانی چون ژانگ و همکاران با معرفی مدل‌هایی چندهدفه، کیفیت را به صورت تابع هدف جداگانه وارد مدل‌سازی کرده‌اند [۲۴]. در این راستا، خاموشی و گل افشانی کیفیت را به عنوان تابعی از منابع اختصاص یافته به فعالیت‌ها تعریف نموده و تأکید کردند که کیفیت بالاتر نیازمند هزینه‌های بیشتر است [۲۵]. مطالعاتی مانند عصف و حسینیان نیز کیفیت را در قالب شاخص‌های فنی و استانداردهای اجرایی مدل کرده و به این نتیجه رسیدند که صرف نظر از کیفیت می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های آتی و ریسک‌های پروژه گردد [۲۶]. به طور مشابه، پژوهش‌های اخیر مانند شاو و همکاران مدلی ترکیبی از زمان، هزینه و کیفیت ارائه داده‌اند و نشان داده‌اند که در برخی پروژه‌ها، بهبود اندک در کیفیت می‌تواند به شدت بهره‌وری کل پروژه را افزایش دهد. این روند پژوهشی نشان می‌دهد که گنجاندن تابع هدف کیفیت در مدل‌های زمان‌بندی پروژه، نقشی اساسی در بهبود تصمیم‌گیری مدیران پروژه داشته و اهمیت آن به ویژه در پروژه‌های زیربنایی و حساس روزبه‌روز در حال افزایش است [۲۷].

با توجه به مواردی که بررسی گردیده است دغدغه جدی برای استفاده از فرایند بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری مشاهده گردیده است. از این جهت، در این مطالعه مدل زمان بندی در صنعت ساختمان با رویکرد کیفی سازی پروژه‌ها در شرایط محدودیت منابع پیاده سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بهینه سازی این مسئله از الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب نخبه گرا ورژن سوم و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. با توجه به مطالعاتی که در این بخش بررسی گردید، در این پژوهش توسعه مدل چندهدفه زمان‌بندی پروژه با تمرکز همزمان بر زمان، هزینه و کیفیت، در نظر گرفتن فعالیت‌های چندحالتی با منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر روزانه و استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری پیشرفته برای اولین بار در زمینه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی با محدودیت منابع چندحالتی بررسی و مورد نظر بوده است. برخلاف بسیاری از مدل‌ها که تنها زمان یا

هزینه را در نظر می‌گیرند، این مقاله بهینه‌سازی هر سه شاخص را با هم انجام داده و مدل پیشنهادی پیچیدگی واقعی پروژه‌های ساختمانی را با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف اجرای فعالیت‌ها لحاظ کرده است.

۳- روش شناسی پژوهش

در این مطالعه با توجه به اهداف در نظر گرفته شده که در این بخش اشاره می‌گردد، از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات^۱ (PSO) [۲۸، ۲۹] و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نخبه‌گرا ورزن سوم^۲ (NSGA-III) [۲۹] جهت بهینه‌سازی مدل زمان بندی در صنعت ساختمان با رویکرد کیفی سازی پروژه‌های عمرانی در شرایط محدودیت منابع استفاده شده و نتایج با الگوریتم‌های دیگر مقایسه و ارزیابی می‌گردد. در این مطالعه، هدف، پیدا کردن مدل چند هدفه برای تصمیم‌گیری در زمان‌بندی پروژه‌ای با محدودیت منابع و فعالیت‌های چندحالتی و پیشنهاد مدلی ارتقاء یافته برای این نوع مسئله می‌باشد. در ادامه مدل پیشنهادی مسئله، ارائه و به تشریح تابع هدف و محدودیت‌های مربوط به آن پرداخته و اعتبارسنجی و صحت نتایج مدل با دو مثال واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- تعریف مسئله

در این مطالعه، توابع مسئله و قیود در نظر گرفته شده با توجه به اهداف مطالعه و ارزیابی تحقیقات پیشین در نظر گرفته شده است. پروژه‌ها شامل چند فعالیت بوده و تعدادی منبع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر با ظرفیت محدود وجود دارد. هر فعالیت دارای بیش از یک نوع حالت اجرا می‌باشد که هر حالت اجرا، زمان مشخص با منابع مورد نیاز بصورت روزانه می‌باشد. فعالیت‌ها علاوه بر اینکه با توجه به روابط پیش‌نیازی محدودیت اولویت اجراء دارند، در استفاده از منابع روزانه نیز محدودیت دارند. هدف این نوع مسائل، معمولاً کمینه کردن زمان و هزینه اتمام پروژه با کسب کیفیت بهینه می‌باشد، به نحوی که با رعایت محدودیت‌های پیش‌نیازی، ایده‌آل‌ترین استفاده از منابع موجود برای اجرای فعالیت‌ها و در نهایت بهترین توالی و حالت اجرای فعالیت و اتمام به موقع پروژه با کمترین هزینه و بهترین کیفیت تضمین گردد. ساده‌ترین حالت این مسئله، مسئله پایه زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع است که در آن هر فعالیت تنها با یک حالت اجرایی قابل انجام می‌باشد و منابع نیز تنها منابع تجدیدپذیر هستند. همانطور که واضح است در عمل گاه یک فعالیت به بیش از یک روش قابل انجام هستند و به عنوان نمونه می‌توان با به‌کارگیری منابع بیشتر و یا روش دیگر اجراء، آن فعالیت را به اتمام رسانید. در اغلب مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چندحالتی، تابع هدف تنها به دنبال کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه با لحاظ روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع می‌باشد. عامل بعدی، هزینه نهایی تمام شده در یک پروژه است که با توجه به شرایط محدودیت بودجه در کشور، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از این رو جهت اعمال این

¹ Particle swarm optimization (PSO)

² Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-third version (NSGA-III)

موارد در مسئله، جدا از بدست آوردن بهترین زمان و توالی فعالیتها، همزمان کمترین هزینه در مسئله نظر گرفته می شود و همزمان جهت کارآیی بهتر زمانبندی مسئله کیفیت را نیز جزء اهداف مسئله در نظر میگیریم، لذا با لحاظ نمودن پارامترهای یاد شده، مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت چندانحاله از یک مدل تک هدفه به یک مدل چندهدفه کارا ارتقا خواهد یافت [۳۱].

در مدل فرض شده است که پروژه از n فعالیت تشکیل شده و توسط شبکه AON و به صورت گراف $G=(V,E)$ نمایش داده می شود که گره (V) نشان دهنده فعالیت و یال (E) روابط پیش نیازی را بیان می کنند. یک پروژه شامل J فعالیت را در نظر می گیریم که فعالیتها به صورت $j=1, \dots, J$ شماره گذاری شده اند. به دلیل مسائل فنی، روابط اولویت بندی و حق تقدم بین فعالیتها حاکم می باشد. این روابط حق تقدم توسط مجموعه های پیش نیازی مستقیم P_i نمایش داده می شود و بیان کننده این است که فعالیت j شروع نمی شود مگر اینکه تمام پیش نیازی های آن به اتمام رسیده باشند و ساختار پروژه به صورت فعالیت روی گره نمایش داده می شود. یک برنامه زمان بندی برای مدل تحت محدودیت منابع با یک زمان شروع T_j و در حالت j برای هر فعالیت j تعیین می شود. فعالیت j باید در زمان شروع در یکی از حالات اجرایی که به صورت $m=1, 2, \dots, M$ نمایش داده می شود، آغاز گردد. هر فعالیت می تواند در یکی از چند مد اجرایی مختلف انجام پذیرد. هر مد، ترکیبی از منابع مختلف، میزان استفاده از آنها و زمان مربوط به انجام آن فعالیت را به صورت روزانه به نمایش می گذارد. وقتی فعالیتی در مد انتخاب شده شروع شد، اجازه متوقف شدن و یا تغییر مد به آن داده نمی شود. فعالیت j امکان دارد در یکی از مد داده شده در مجموعه مدها اجرا شود. فعالیت با هر حالت اجرایی که شروع می شود باید با همان حالت هم اتمام یابد. همچنین فعالیت های $j=0$ و $j=J+1$ فعالیت های مجازی آغاز و پایان شبکه پروژه می باشد. هر فعالیت (به جز فعالیت های مجازی) به مقدار معینی از منابع برای اجرای خود نیاز دارند. در این مدل منابع تجدیدپذیر روزانه مورد نیاز برای فعالیت j برای اجرا در حالت m با r_{jmb}^k و تجدیدناپذیر با nr_{jmb}^v نمایش داده شده است. برای هر منبع تجدیدپذیر روزانه $r_{jmb}^k \in T_{kt}$ و هر منبع تجدیدناپذیر روزانه $r_{jmb}^v \in T_{vt}$ ، همچنین برای منابع تجدید پذیر و تجدیدناپذیر کل منابع مصرفی نباید از TR_k و TNR_v بیشتر باشد. هزینه هر منبع تجدید پذیر با C_k و تجدیدناپذیر با C_v معرفی شده است. برای حل مدل پیشنهادی، دو الگوریتم فراابتکاری شامل PSO و NSGA-III استفاده شده است [۳۲].

همانطور که در مطالعات گذشته نشان داده شده برای دستیابی به یک زیرمجموعه با ویژگی خوب نیاز به الگوریتمی با توانایی حل مسئله در توابع مختلف می باشد [۳۳-۳۶]. این موضوع عمدتاً به دلیل این واقعیت است که با افزایش تعداد اهداف فشار انتخاب بر اساس تسلط پرتو به شدت کاهش می یابد. به تازگی، یک نقطه مرجع مبنی بر NSGA-II به عنوان NSGA-III برای مقابله با مسائل چند هدفی پیشنهاد می شود، که در آن حفظ تنوع در میان اعضای جمعیت با تهیه و انطباق به روز رسانی تعدادی از نقاط مرجع به خوبی گسترده شده، حفظ می شود. همچنین به منظور اعتبارسنجی مدل و الگوریتم پیشنهادی، دو حالت برای منابع روزانه در دسترس برای فعالیتها و شبکه مسئله ارائه می گردد.

۲-۳- پارامترهای مسئله

پارامترهای مسئله با توجه به مدل پیشنهادی به شرح ذیل می‌باشد:

EV_j ارزش افزوده فعالیت j

$q_j m$ کیفیت فعالیت j در مد m

r_{jmb}^k میزان منبع تجدیدپذیر مورد نیاز نوع k در مد m در طول انجام فعالیت

nr_{jmb}^v میزان منبع تجدیدنپذیر مورد نیاز نوع v در مد m در طول انجام فعالیت

R_{kt} میزان منابع تجدید پذیر در دسترس در روز t

NR_{vt} میزان منابع تجدیدنپذیر در دسترس در روز t

TR_k مجموع منابع تجدید پذیر

TNR_v مجموع منابع تجدیدنپذیر

d_{jm} مدت زمان انجام فعالیت j در مد m

C_k هزینه هر واحد منبع تجدیدپذیر k

C_v هزینه هر واحد منبع تجدیدنپذیر v

θ_j مجموعه فعالیت‌هایی که پیش نیاز فعالیت j می‌باشند.

۳-۳- متغیرهای مسئله

X_{jmt} : اگر فعالیت j در مد m در روز t تکمیل شود ۱ و در غیر اینصورت ۰ است

Y_{jm} : اگر فعالیت j در مد m انجام شود ۱ و در غیر اینصورت ۰ است. برای هر فعالیت، دقیقاً یک مد (حالت

اجرایی) انتخاب شده است و سایر مدها برای همان فعالیت فعال نشده‌اند ($Y_{jm} = 0$)

۳-۳- مدل پیشنهادی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع روزانه و فعالیت‌های چندحالتی

همانطور که اشاره شد، در این مطالعه، مسئله‌ی زمان‌بندی چند هدفه با فعالیت‌های چند حالتی در نظر گرفته شده که در ادامه، هر یک از این اهداف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. رویکرد بهینه سازی توابع این مطالعه با بهبود در مدل مطالعه ژانگ و ژینگ پیاده سازی شده است [۳۰]. توابع هدف این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

• حداقل سازی زمان تکمیل پروژه با منابع محدود روزانه

اولین هدفی که در تابع هدف باید در نظر گرفت، کمینه کردن حداکثر زمان اتمام پروژه است. این تابع هدف را می‌توان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\min \sum_{t=EF_{j+1}}^{LF_{j+1}} t X_{(j+1),1,t} \quad (1)$$

• حداقل سازی هزینه پروژه با منابع محدود روزانه

دومین هدفی که در تابع هدف در نظر گرفته شده، کمینه کردن هزینه اتمام پروژه است. این تابع هدف را می‌توان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{k=1}^K \sum_{b=\max\{t, EFj\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LFj\}} c_k r_{jmb}^k x_{jmb} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{v=1}^V \sum_{b=\max\{t, EFj\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LFj\}} C_v n r_{jmb}^v x_{jmb} \quad (2)$$

- حداکثرسازی کیفیت اجرای پروژه
- کیفیت فعالیت‌ها وابسته به مد انتخابی اجرای آن‌هاست. استفاده از تجهیزات بهتر یا تیم‌های متخصص‌تر، کیفیت را افزایش می‌دهد. کیفیت نهایی پروژه نیز مجموع وزن دار کیفیت فعالیت‌هاست؛ یعنی فعالیت‌هایی که اهمیت بیشتری دارند سهم بیشتری در کیفیت نهایی دارند.

$$\text{Max} \frac{1}{\sum_{j=1}^J EV_j} \times \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{Mj} EV_j \times q_{jm} \times y_{jm} \quad (3)$$

۳-۴- محدودیت‌های مدل

محدودیت‌های اعمال شده بمنظور کنترل منابع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در دسترس روزانه و مورد نیاز پرداخته شده است که بشرح ذیل می‌باشد.

$$\sum_{m=1}^{Mj} \sum_{t=EFj}^{LFj} X_{jmt} = 1 \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^{Mj} \sum_{t=EFj}^{LFj} t \times X_{jmt} \leq \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{t=EFj}^{LFj} (t - d_{jm}) \times X_{jmt} \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{t=EFj}^{LFj} X_{jmt} + Y_{jm} \geq R \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{Mj} r_{jmb}^k x_{jmb} \leq R_{kt} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{Mj} n r_{jmb}^v x_{jmb} \leq NR_{vt} \quad \forall v \in V, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{b=\max\{t, EFj\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LFj\}} r_{jmb}^k x_{jmb} \leq TR_k \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{b=\max\{t, EFj\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LFj\}} n r_{jmb}^v x_{jmb} \leq TNR_v \quad (10)$$

$$X_{jmt}, Y_{jm} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall m \in Mj, \forall t \in T \quad (11)$$

رابطه (۴) تضمین می‌کند هر فعالیت تنها در یک مد انجام شده و در یک روز پایان می‌یابد. رابطه (۵) رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها را تضمین می‌کند. رابطه (۶) تعیین کننده مد اجرایی هر یک از فعالیت‌ها جهت تعیین میزان کیفیت اجرای آن فعالیت می‌باشد. رابطه (۷) میزان منابع تجدیدپذیر در دسترس برای هر منبع را بطور روزانه بررسی می‌کند. به همین ترتیب رابطه (۸) میزان منابع تجدیدنپذیر در دسترس برای هر منبع را بطور

روزانه بررسی می‌کند. رابطه (۹) تضمین می‌کند کل منابع مورد نیاز تجدیدپذیر برای انجام تمام فعالیت‌ها از میزان کل منابع در دسترس تجاوز نکند. همچنین رابطه (۱۰) تضمین می‌کند کل منابع مورد نیاز تجدیدناپذیر برای انجام تمام فعالیت‌ها از میزان منابع در دسترس تجاوز نکند. رابطه (۱۱) متغیرهای صفر و یک مسئله را نشان می‌دهد. اگر منابع بسیار محدود باشند، الگوریتم ممکن است به سراغ مدهایی با کیفیت پایین برود که هزینه کمتری دارند. تنها راه کنترل این موضوع، وزن‌دهی به کیفیت در تابع هدف یا اعمال قید مستقل روی مقدار نهایی کیفیت است. از این رو، حداقل کیفیت در این مطالعه ۶۹٪ در نظر گرفته شده است.

۵-۳- طراحی مسئله نمونه

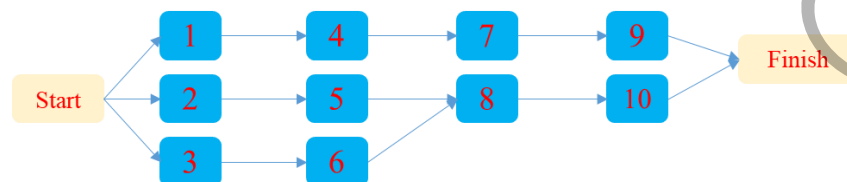
با توجه به مطالعه مرجع این تحقیق که مسئله نمونه براساس آن پیاده سازی شده است [۳۷، ۳۸]، به منظور بررسی مدل و صحت نتایج، یک مدل شامل ۱۰ فعالیت با حالت‌های اجرایی مختلف و منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مورد نیاز بصورت روزانه در نظر گرفته شده و پیش‌نیاز هر فعالیت نیز مشخص گردیده است. همچنین کیفیت فعالیت در هر مدل و ارزش افزوده کیفیت هر فعالیت مطابق جدول (۱) پیوست ارائه شده است. با توجه به بررسی زمان-هزینه در مدل پیشنهادی، هزینه‌های هریک از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر نیز در جدول (۱) درج گردیده است. همچنین شبکه AON این مثال در شکل (۱) ترسیم شده است.

جدول (۱): هزینه هر واحد از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مورد نیاز برای اجرای فعالیت‌ها

Table (1): Cost per unit of renewable and non-renewable resources required to implement activities

منابع	NR1	NR2	NR3	NR4	R1	R2
هزینه پیشنهادی بازای هر واحد (میلیون ریال)	۱۰	۱۵	۱۰	۵	۲۰	۳۰

همانطور که در جداول پیوست نشان داده شده است، این پروژه از ۱۰ فعالیت تشکیل شده است. نحوه ارتباط این فعالیت‌ها نیز در شکل (۱) به صورت شبکه نشان داده می‌شود که کار را برای یافتن ارتباط میان فعالیت‌ها آسان‌تر می‌کند. همچنین در جداول پیوست تمامی فعالیت‌ها با ذکر میزان منابع و زمان لازم مطرح گردیده است. در این جدول برای هر کدام از فعالیت‌ها چندین روش اجرا در نظر گرفته شده است و هریک از پارامترهای منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مشخص شده است.



شکل (۱): شبکه گرهی مربوط به پروژه

Figure (1): Project node network

به منظور صحت و اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، مثال فرضی در نظر گرفته شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با دو نوع منابع روزانه متفاوت حل شده که در ادامه به بررسی هر یک از آنها پرداخته شده است. همچنین حداقل و حداکثر منابع مورد نیاز جهت تکمیل فعالیتهای معرفی شده طبق جدول (۲) محاسبه گردیده است.

جدول (۲): حداقل و حداکثر مقادیر منابع فعالیتها

Table (2): Minimum and maximum activity resource values

منابع	NR1	NR2	NR3	NR4	R1	R2
حداکثر منابع مورد نیاز	۷۸	۶۶	۶۷	۶۴	۶۶	۳۵
حداقل منابع مورد نیاز	۴۵	۴۶	۳۴	۳۹	۴۹	۲۳

به منظور تحلیل بیشتر مدل پیشنهادی، دو حالت تخصیص منبع روزانه در نظر گرفته شده است که به ترتیب در جدول (۲) و (۳) پیوست گزارش شده‌اند.

۳-۶- تنظیم پارامتر الگوریتم های فراابتکاری پیشنهادی

همانطور که اشاره گردید در این مطالعه دو الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب به منظور بهینه‌سازی مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چندحالتی توسعه داده شده است. هدف پیدا کردن بهترین توالی و بهترین حالت اجرای فعالیت‌ها با توجه به محدودیت روزانه منابع بوده، به طوری که بهترین مقدار توابع هدف حاصل شود.

الگوریتم NSGA-III تفاوت اصلی در استفاده از نقطه‌های مرجع دارد که به پخش شدن یکنواخت جواب‌ها روی مرز پارتو کمک می‌کند. اجزای اصلی الگوریتم شامل موارد زیر می‌باشد:

- ایجاد جمعیت اولیه
- ارزیابی توابع هدف
- مرتب‌سازی بر اساس عدم سلطه
- Crowding distance یا استفاده از نقاط مرجع برای انتخاب بهتر
- انتخاب والدین، تولید فرزندان با crossover و mutation
- ترکیب والدین و فرزندان جهت انتخاب بهترین‌ها برای نسل بعد

همچنین پیاده‌سازی الگوریتم PSO در این مقاله، از رویکرد کدگذاری عددی برای ترتیب و مد فعالیت‌ها استفاده شده و تخطی از محدودیت‌ها با اعمال جریمه در تابع هدف، مدیریت شده است. مراحل اجرایی این الگوریتم نیز به شرح زیر می‌باشد:

- تولید اولیه ذرات (جمعیت اولیه با توزیع تصادف)
- محاسبه توابع هدف برای هر ذره
- به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات
- اعمال محدودیت‌ها و ارزیابی ذرات
- ثبت بهترین موقعیت‌های فردی و جمعی
- تکرار مراحل تا رسیدن به شرط توقف

برای تنظیم پارامترهای هر دو الگوریتم، مطابق جدول (۳) مقادیر مختلفی برای هر پارامتر در نظر گرفته شده است.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA-III

Table (3): Values of NSGA-III algorithm parameters

مقادیر			تعریف	پارامتر
۱۰۰	۸۰	۵۰	تعداد جمعیت اولیه	Npop
۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	تعداد نسل‌ها (تکرار)	Max_iteration
۰/۹	۰/۷	۰/۵	نرخ عملگر تقاطع	Cross_rate
۰/۱	۰/۳	۰/۵	نرخ عملگر جهش	Mut_rate

در ادامه با استفاده از روش سعی و خطا براساس مقادیر تابع هدف، بهترین مقدار برای هر یک از آنها بدست آمده و در جدول (۴) گزارش شده است.

جدول (۴): مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم PSO و NSGAIII

Table (4): Optimal values of PSO and NSGAIII algorithm parameters

بهترین مقدار		پارامتر
NSGA-III	PSO	
۱۰۰	۱۵۰	Npop
۲۰۰	۲۰۰	Max_iteration
۰/۷	۰/۸	Cross_rate

۴- بحث و نتایج

۴-۱- بهینه سازی حالت اول

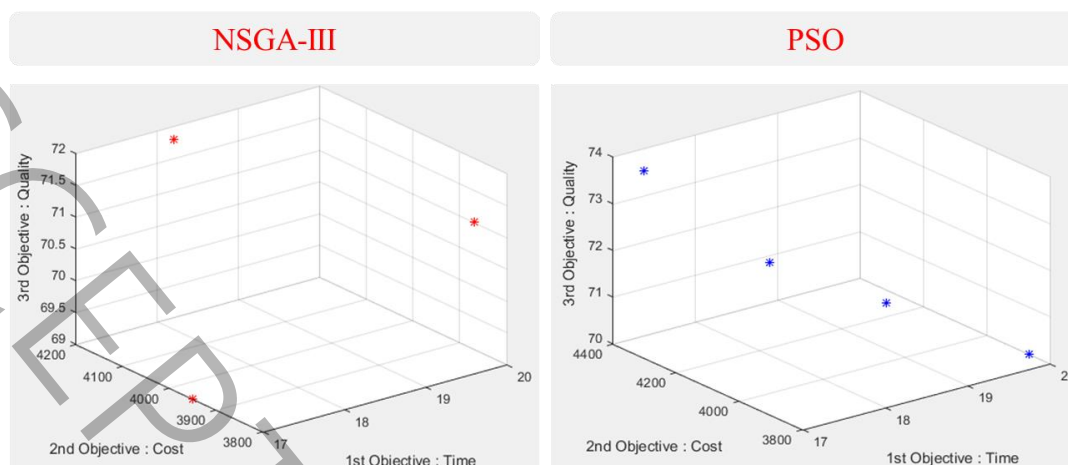
مدل پیشنهادی با استفاده از دو الگوریتم PSO و NSGA-III بهینه سازی گردیده است. با توجه به مقادیر منابع روزانه در دسترس جدول (۵) در کد مربوطه در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و حل شده است. جواب های پارتو بدست آمده از دو الگوریتم در جدول (۵) گزارش شده است.

جدول (۵): نتایج بدست آمده از حل مسئله نمونه در حالت اول توسط دو روش پیشنهادی

Table (5): Results obtained from solving the sample problem in the first case by the two proposed methods

جواب بدست آمده از PSO			جواب بدست آمده از NSGA-III			جواب
کیفیت (درصد)	هزینه (میلیون ریال)	زمان (روز)	کیفیت (درصد)	هزینه (میلیون ریال)	زمان (روز)	
۷۰	۳۸۶۵	۲۰	۷۱	۳۸۷۰	۲۰	۱
۷۱	۴۰۵۷	۱۹	۷۲	۴۱۶۵	۱۸	۲
۷۲	۴۱۶۵	۱۸	۶۹	۳۹۵۰	۱۷	۳
۷۴	۴۳۰۴	۱۷	-	-	-	۴

همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده، الگوریتم NSGA-III قادر به پیدا کردن سه جواب نامغلوب شده است در حالی که با استفاده از روش PSO چهار جواب پارتو بدست آمده است. از مقایسه دو روش مشاهده می گردد که جواب های بدست آمده تقریباً به هم نزدیک بوده و حتی در یک مورد دقیقاً یکسان بوده است. این امر نشان دهنده عملکرد صحیح دو الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی می باشد. با توجه به جدول (۵) مشاهده می شود که کمترین زمان، هزینه و بیشترین کیفیت به ترتیب برابر ۱۷ روز، ۴۳۰۴ میلیون ریال و ۷۴ درصد می باشند. همچنین شکل (۲) جواب های بدست آمده از دو الگوریتم NSGA-III و PSO را نمایش می دهند.



شکل (۲): جواب بدست آمده از الگوریتم PSO و NSGA-III برای حالت اول مسئله نمونه

Figure (2): The solution obtained from the PSO and NSGA-III algorithms for the first case of the sample problem.

همچنین نتایج مربوط به توالی انجام فعالیت‌ها، حالت‌های اجرایی انتخابی و زمان شروع و پایان هر یک از فعالیت‌ها برای حالت اول بدست آمده از الگوریتم NSGA-III در جدول (۶) مشخص شده است.

جدول (۶): اطلاعات مربوط به جواب شماره ۱ بدست آمده از الگوریتم NSGA-III برای حالت اول
Table (6): Information related to solution number 1 obtained from the NSGA-III algorithm for the first case

	فعالیت‌ها									
توالی فعالیت‌ها	۲	۵	۱	۴	۷	۹	۳	۶	۸	۱۰
مد انتخابی فعالیت	۲	۲	۲	۲	۱	۳	۳	۱	۱	۲
زمان انجام فعالیت	۳	۳	۴	۴	۲	۴	۴	۲	۳	۳
زمان شروع	۰	۳	۰	۴	۹	۱۱	۴	۱۰	۱۴	۱۷
زمان پایان	۳	۶	۴	۸	۱۱	۱۵	۸	۱۲	۱۷	۲۰

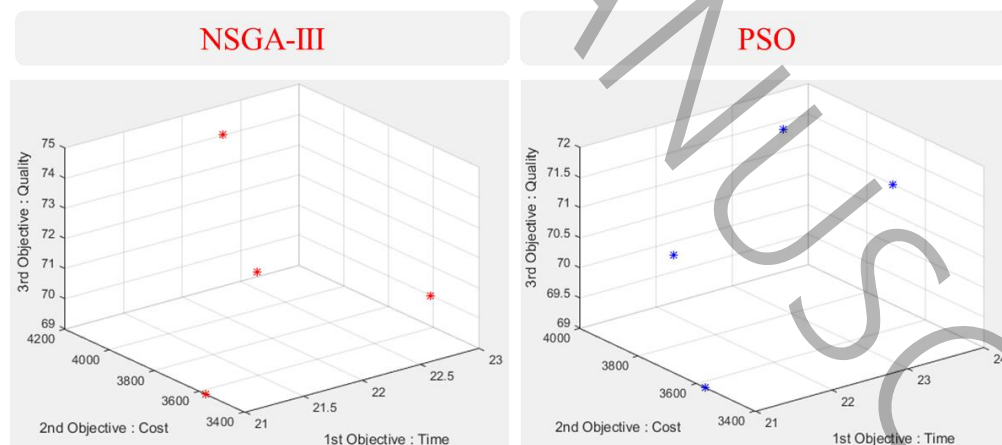
۲-۴- بهینه سازی حالت دوم

در این بخش میزان منابع در دسترس روزانه در حالت دوم مطابق جدول ۴-۵ در نظر گرفته شده و اطلاعات مربوطه در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و مسئله نمونه حل شده است. جواب‌های پارتو بدست آمده از دو الگوریتم در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷): نتایج بدست آمده از حل مسئله نمونه در حالت اول توسط دو روش پیشنهادی
Table (7): Results obtained from solving the sample problem in the first case by the two proposed methods

جواب بدست آمده از PSO			جواب بدست آمده از NSGA-III			جواب
کیفیت (درصد)	هزینه (میلیون ریال)	زمان (روز)	کیفیت (درصد)	هزینه (میلیون ریال)	زمان (روز)	
۷۱	۳۷۱۰	۲۴	۷۰	۳۶۱۳	۲۳	۱
۷۲	۳۸۲۵	۲۳	۷۱	۳۸۶۴	۲۲	۲
۷۰	۳۹۴۱	۲۲	۷۵	۴۰۲۰	۲۲	۳
۶۹	۳۵۷۲	۲۱	۶۹	۳۵۷۲	۲۱	۴

مطابق جدول (۷) مشاهده می‌گردد که تعداد جواب‌های بدست آمده از هر دو روش برابر ۴ بوده است. از مقایسه دو روش مشاهده می‌گردد که جواب‌های بدست آمده تقریباً به هم نزدیک بوده و حتی در یک مورد دقیقاً یکسان بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که کمترین زمان، هزینه و بیشترین کیفیت به ترتیب برابر ۲۱ روز، ۳۵۷۲ میلیون ریال و ۷۵ درصد می‌باشند. همچنین شکل (۳) جواب‌های بدست آمده از دو الگوریتم NSGA-III و PSO را نمایش می‌دهند.



شکل (۳): جواب بدست آمده از الگوریتم NSGA-III و PSO برای حالت دوم مسئله نمونه

Figure (3): The solution obtained from the NSGA-III and PSO algorithms for the second case of the sample problem.

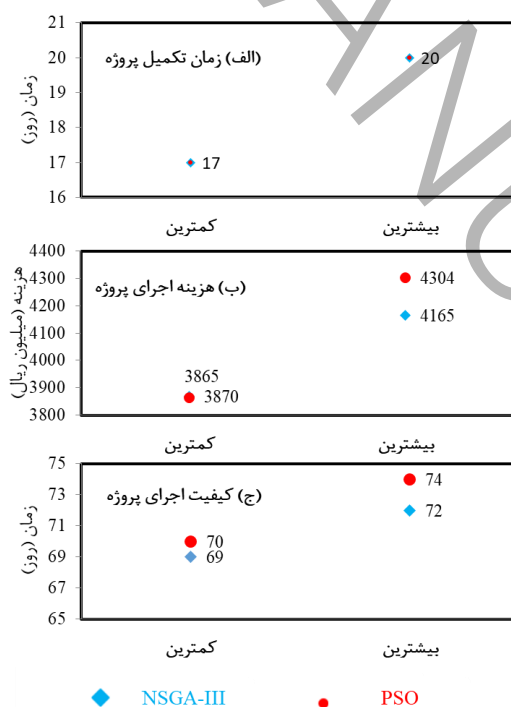
هچنین نتایج مربوط به توالی انجام فعالیت‌ها، حالت‌های اجرایی انتخابی و زمان شروع و پایان هر یک از فعالیت‌ها برای جواب شماره ۱ بدست آمده از الگوریتم NSGA-III در جدول (۸) مشخص شده است.

جدول (۸): اطلاعات مربوط به جواب شماره ۱ بدست آمده از الگوریتم NSGA-III برای حالت دوم
Table (8): Information related to solution number 1 obtained from the NSGA-III algorithm for the second case

	فعالیت‌ها									
توالی فعالیت‌ها	۲	۳	۶	۱	۴	۷	۹	۵	۸	۱۰
مد انتخابی فعالیت	۲	۳	۱	۳	۱	۲	۳	۳	۱	۲
زمان انجام فعالیت	۳	۴	۲	۵	۲	۳	۴	۴	۳	۳
زمان شروع	۰	۰	۹	۲	۸	۱۰	۱۳	۳	۱۶	۱۹
زمان پایان	۳	۴	۱۱	۷	۱۰	۱۳	۱۷	۷	۱۹	۲۲

۳-۴- مقایسه دو الگوریتم NSGA-III و PSO

براساس نتایج بدست آمده در این بخش، دو الگوریتم پیشنهادی براساس توابع هدف با یکدیگر مقایسه می‌گردند. شکل (۴) بهترین و بدترین مقادیر بدست آمده از توابع هدف این مطالعه (زمان تکمیل پروژه، هزینه اجرای پروژه و کیفیت اجرای پروژه) نشان می‌دهد.

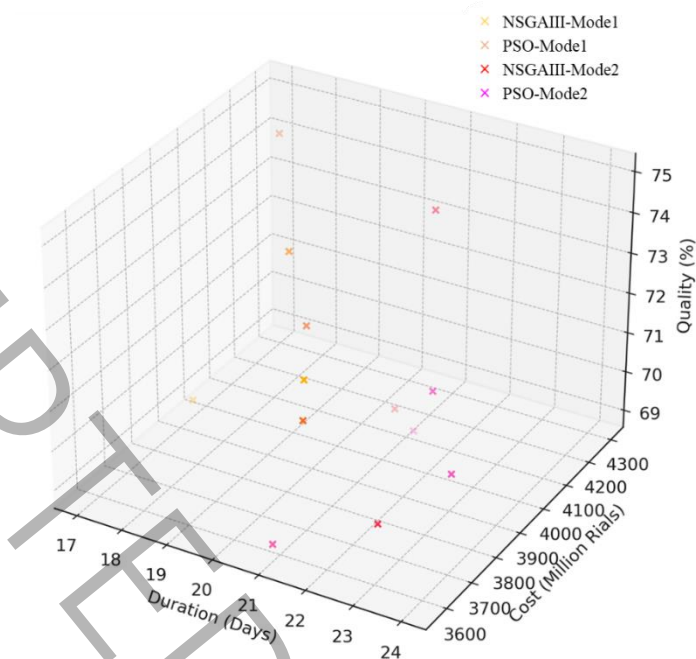


شکل (۴): ارزیابی کیفیت بدست آمده از دو روش پیشنهادی

Figure (4): Quality assessment obtained from the two proposed methods

همانطور که در شکل (۴) الف مشاهده می‌شود، هر دو الگوریتم در این تابع هدف به یک شکل عمل کرده‌اند، طوریکه کمترین و بیشترین زمان تکمیل بدست آمده از هر دو روش یکسان بوده است. به جهت هزینه اجرایی نیز الگوریتم PSO کمی بهتر عمل کرده و جوابی با هزینه‌ای نسبتاً کمتر از الگوریتم NSGA-III بدست آورده است. البته در مقابل بیشترین هزینه نیز از همین الگوریتم بدست آمده است. به عبارت دیگر می‌توان گفت پراکندگی جواب بدست آمده از روش PSO به ازای این تابع هدف بیشتر بوده است. در ادامه نیز کیفیت اجرای پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. در این تابع هدف نیز الگوریتم PSO عملکرد بهتری داشته و توانسته جواب‌هایی با سطح کیفی بالاتری بدست آورد. از مقایسه سه تابع هدف و نتایج بدست آمده می‌توان بیان نمود که الگوریتم PSO جواب‌های بهتری نسبت به NSGA-III بدست آورده است (شکل (۴) ج).

نمودار پارتو سه‌بعدی حاصل از اجرای الگوریتم‌های PSO و NSGA-III، با در نظر گرفتن سه تابع هدف شامل زمان تکمیل پروژه، هزینه اجرای پروژه و کیفیت اجرای فعالیت‌ها، تصویری جامع از عملکرد این دو الگوریتم در شرایط مختلف منابع ارائه می‌دهد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA-III در هر دو حالت منابع توانسته پاسخ‌هایی با زمان‌های نسبتاً پایین و هزینه‌های قابل قبول ارائه دهد؛ به‌ویژه در حالت دوم که کمترین هزینه (۳۵۷۲ میلیون ریال) برای زمان ۲۱ روز و کیفیت ۶۹٪ حاصل شده است. با این حال، PSO در حالت اول توانسته پاسخ‌هایی با کیفیت بالاتر (تا ۷۴٪) برای همان زمان (۱۷ روز) تولید کند، اگرچه هزینه در این حالت بیشتر (۴۳۰۴ میلیون ریال) بوده است. نکته قابل توجه در پاسخ‌های PSO، تنوع بالاتر در پارتوها و توانایی آن در تولید ترکیب‌هایی با تعادل مناسب میان سه هدف مورد نظر است، به‌گونه‌ای که در برخی موارد پاسخ‌هایی با کیفیت بالا و هزینه متوسط نیز مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، NSGA-III در ارائه پاسخ‌های متعادل عملکردی یکنواخت‌تر دارد، اما در دستیابی به حداکثر کیفیت، به‌ویژه در حالت اول منابع، نسبت به PSO عملکرد ضعیف‌تری داشته است. به‌طور کلی، اگر اولویت تصمیم‌گیرنده بر کیفیت اجرای پروژه باشد، پاسخ‌های PSO در حالت اول توصیه می‌شود، اما اگر محدودیت بودجه حاکم باشد، خروجی NSGA-III در حالت دوم می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. بنابراین، هر دو الگوریتم در شرایط خاص خود قابلیت ارائه پاسخ‌های بهینه را داشته و تصمیم‌گیرنده می‌تواند بسته به اولویت‌های استراتژیک پروژه، از میان پاسخ‌های پارتو یکی را انتخاب نماید.



شکل (۵): نمودار جواب های پارتو مقایسه برای دو حالت مستخرج شده از جدول ۵ و ۷

Figure (5): Comparison Pareto solutions diagram for two cases extracted from Tables 5 and 7

جدول (۹) جمع بندی از پاسخ های الگوریتم ها در حل مسئله ارائه نموده است. اگر کیفیت اولویت دارد (مثلاً در پروژه های حساس یا زیربنایی)، پاسخ های PSO مناسب تر است. با این حال، اگر هدف، کاهش هزینه در منابع محدودتر است، پاسخ NSGA-III در حالت دوم مزیت دارد. همچنین جواب های پارتو اجازه می دهند تصمیم گیر با توجه به سیاست سازمان، یکی از گزینه ها را برگزیند.

جدول (۹): تشریح پاسخ های پارتو در بهینه سازی مسئله

Table (9): Description of Pareto solutions in optimization problem

معیار	الگوریتم برتر
کمترین زمان	هر دو PSO و NSGA-III با ۱۷ روز
کمترین هزینه	NSGA-III در حالت دوم (۳۵۷۲ میلیون ریال)
بیشترین کیفیت	PSO در حالت اول با ۷۴٪
تنوع پاسخ های پارتو	PSO برتر است
پایداری در شرایط مختلف منابع	هر دو قابل قبول، PSO کمی انعطاف پذیرتر

بررسی رفتار الگوریتم‌ها نشان داد که PSO به واسطه‌ی سازوکار یادگیری جمعی و حرکت جهت‌دار حول بهترین‌های سراسری، در چشم‌انداز نسبتاً نرم تابع کیفیت، توان بهره‌برداری بالاتری داشته است. نگاشت پیوسته به گسسته‌ی بردارهای سرعت به فضای حالت‌های اجرایی نیز جهش‌های ساختاری هماهنگی را ممکن می‌سازد که دسترسی به ترکیبات با کیفیت بالا با افزایش اندک زمان/هزینه را تسریع می‌کند. در نتیجه، در سناریوی منابع نسبتاً نامحدود، PSO جبهه‌های پارتویی با کیفیت برتر ارائه کرده است. در نقطه مقابل، در سناریوی منابع محدود که فضای شدنی باریک و ناهموار است، NSGA-III به کمک سازوکار انتخاب مبتنی بر بردارهای مرجع و حفظ تنوع جهت‌مند، توانست افراد شدنی کم‌هزینه را در جمعیت نگه دارد و با جهش‌های کوچک ژنتیکی آن‌ها را به صورت تدریجی بهبود دهد. این ویژگی باعث شد NSGA-III در بُعد هزینه، به‌ویژه تحت محدودیت‌های شدید روزانه، عملکرد بهتری نسبت به PSO داشته باشد. همچنین، نتایج مطالعه نشان داد که پارامترهای کنترلی الگوریتم‌ها تأثیر قابل توجهی بر کیفیت راه‌حل‌های به‌دست‌آمده دارند. به عنوان نمونه، در الگوریتم NSGA-III افزایش اندازه جمعیت باعث پوشش یکنواخت‌تر جبهه پارتو و شناسایی نقاط کم‌هزینه‌تر شد، در حالی که نرخ جهش بالا، هرچند تنوع جمعیت را تقویت کرد، اما گاه موجب کاهش سرعت همگرایی گردید. در مقابل، الگوریتم PSO نسبت به اندازه جمعیت حساسیت کمتری داشت، اما پارامترهای وزن اینرسی و ضرایب یادگیری تأثیر مستقیمی بر توانایی الگوریتم در دستیابی به راه‌حل‌های با کیفیت بالاتر داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که تنظیم مناسب پارامترها برای هر الگوریتم می‌تواند اولویت‌های متفاوتی در میان سه هدف مورد نظر برجسته سازد. با این حال، مدل پیشنهادی نیز با محدودیت‌هایی مواجه است؛ از جمله فرض ثبات نرخ منابع در کل افق زمانی، عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های واقعی پروژه مانند تأخیرهای پیش‌بینی نشده یا تغییرات ناگهانی هزینه‌ها، و همچنین پیچیدگی محاسباتی بالای مدل که اجرای آن را در پروژه‌های بسیار بزرگ یا با منابع متنوع‌تر دشوار می‌سازد. این محدودیت‌ها می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات آینده برای توسعه مدل‌های کارا تر و واقع‌گرایانه‌تر باشد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک مدل زمان‌بندی پروژه با فعالیت‌های چندحالتی و منابع محدود ارائه شده است. در این مطالعه، سه تابع هدف اصلی شامل کمینه‌سازی زمان، کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی کیفیت را به صورت هم‌زمان بهینه نموده تا مدلی با در نظر گرفتن حالت‌های اجرایی مختلف برای فعالیت‌ها، منابع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر روزانه ارائه شود. در این فرایند بهینه‌سازی فرا ابتکاری پیچیدگی‌های واقعی پروژه‌های ساختمانی به صورت دقیق‌تری بررسی و مدل‌های توسعه داده شده با پیاده‌سازی الگوریتم‌های NSGA-III و PSO بهینه‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر دو سناریوی متفاوت از محدودیت منابع نشان داد که هر دو الگوریتم توانایی تولید مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو با تعادل‌های گوناگون میان سه هدف مورد نظر را داشته اند. به طور خاص، الگوریتم PSO در تولید پاسخ‌هایی با کیفیت بالاتر عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داد، در حالی که NSGA-III توانست پاسخ‌هایی با هزینه پایین‌تر در شرایط منابع محدود ارائه دهد. این نتایج حاکی از آن است که استفاده از مدل چندهدفه پیشنهادی می‌تواند ابزار تصمیم‌گیری مؤثری برای مدیران پروژه باشد تا بر اساس اولویت‌های

راهبردی پروژه، از میان پاسخ‌های پارتو گزینه بهینه را انتخاب نمایند. همچنین، در نظر گرفتن تابع هدف کیفیت به صورت مستقل، یکی از نوآوری‌های اصلی این تحقیق است که به تصمیم‌گیری واقع‌بینانه‌تر در پروژه‌های واقعی کمک شایانی خواهد نمود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای مدیران پروژه در صنعت ساخت‌وساز مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این که مدل پیشنهادی سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت را به صورت همزمان در نظر می‌گیرد، مدیران قادر خواهند بود جبهه‌ای از راه‌حل‌های پارتو را مشاهده کرده و بر اساس اولویت‌های استراتژیک سازمان، گزینه‌ی مناسب را انتخاب کنند. برای مثال، در شرایطی که کیفیت ساخت اهمیت بالاتری دارد (مانند پروژه‌های عمرانی با الزامات ایمنی یا دوام بلندمدت)، می‌توان از پاسخ‌های حاصل از الگوریتم PSO بهره برد که کیفیت بالاتری را فراهم می‌سازد. در مقابل، در پروژه‌هایی با محدودیت شدید مالی، راه‌حل‌های ارائه‌شده توسط NSGA-III می‌تواند گزینه بهتری باشد. همچنین مدیران پروژه می‌توانند با تحلیل نتایج به دست آمده، اثرات تغییر در تخصیص منابع یا انتخاب حالت‌های اجرایی مختلف برای فعالیت‌ها را پیش‌بینی کنند و قبل از شروع اجرا، تصمیم‌های بهینه‌تری اتخاذ نمایند. این ویژگی به کاهش ریسک شکست پروژه و افزایش احتمال دستیابی به اهداف کلیدی کمک می‌کند. با وجود دستاوردهای قابل توجه، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه است. نخست، مدل ارائه‌شده منابع را ثابت و قطعی در طول افق زمانی پروژه فرض می‌کند، در حالی که در پروژه‌های واقعی، منابع ممکن است تحت تأثیر عواملی چون تأخیر در تأمین مصالح یا نوسانات مالی تغییر کنند. دوم، اثر عدم قطعیت‌ها (مانند تغییرات ناگهانی در هزینه‌ها یا وقوع ریسک‌های پیش‌بینی نشده) در مدل لحاظ نشده است. سوم، پیچیدگی محاسباتی مدل در پروژه‌های بزرگ با تعداد زیاد فعالیت‌ها و حالت‌های اجرایی، زمان پردازش بالایی ایجاد می‌کند که می‌تواند استفاده عملی آن را در پروژه‌های بسیار عظیم محدود سازد. همچنین تنها دو الگوریتم فراابتکاری (PSO و NSGA-III) بررسی شده‌اند و امکان دارد سایر الگوریتم‌ها یا رویکردهای ترکیبی عملکرد متفاوتی ارائه دهند. این محدودیت‌ها زمینه‌ای برای تحقیقات آتی فراهم می‌سازد تا مدل‌های کارتر و واقع‌بینانه‌تر توسعه یابند و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و روش‌های محاسباتی سریع‌تر، قابلیت استفاده عملی بیشتری در پروژه‌های بزرگ مقیاس پیدا کنند.

مراجع

- [1] Merkle, D., Middendorf, M., & Schmeck, H. (2002). Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(4), 333-346.
- [2] Zhang, H., Li, H., & Tam, C. M. (2006). Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling. *International journal of project management*, 24(1), 83-92.
- [3] Zhang, H., Li, X., Li, H., & Huang, F. (2005). Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling. *Automation in construction*, 14(3), 393-404.

-
- [4] Rogalska, M., Bożejko, W., & Hejducki, Z. (2008). Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling. *Automation in Construction*, 18(1), 24-31.
- [5] Balouka, N., & Cohen, I. (2021). A robust optimization approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *European journal of operational research*, 291(2), 457-470.
- [6] Wang, L., & Zheng, X. L. (2018). A knowledge-guided multi-objective fruit fly optimization algorithm for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 54-63.
- [7] Guo, K., & Zhang, L. (2022). Multi-objective optimization for improved project management: Current status and future directions. *Automation in Construction*, 139, 104256.
- [8] Xie, L. L., Chen, Y., Wu, S., Chang, R. D., & Han, Y. (2024). Knowledge extraction for solving resource-constrained project scheduling problem through decision tree. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(7), 2852-2877.
- [9] Yu, Ze, Chuxin Wang, Yuanyuan Zhao, Zhiyuan Hu, and Yuanjie Tang. "Linear Project-Scheduling Optimization Considering a Reverse Construction Scenario." *Applied Sciences* 13, no. 16 (2023): 9407.
- [10] Zohrehvandi, M., Zohrehvandi, S., Khalilzadeh, M., Amiri, M., Jolai, F., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2024). A Multi-Objective Mathematical Programming Model for Project-Scheduling Optimization Considering Customer Satisfaction in Construction Projects. *Mathematics*, 12(2), 211.
- [11] Ashrafian, A., Behnood, A., Golafshani, E. M., Panahi, E., & Berenjian, J. (2024). Toward presenting an ensemble meta-model for evaluation of pozzolanic mixtures incorporating industrial by-products. *Structural Concrete*, 25(2),
- [12] Fan, Su-Ling, Kuo-Shun Sun, and Yu-Ren Wang. "GA optimization model for repetitive projects with soft logic." *Automation in Construction* 21 (2012): 253-261.
- [13] Pawiński, Grzegorz, and Krzysztof Sapięcha. "Resource allocation optimization in critical chain method." *Annales UMCS, Informatica*. Vol. 12. No. 1. (2012).

-
- [14] Singh, Amol. "Resource constrained multi-project scheduling with priority rules & analytic hierarchy process." *Procedia Engineering* 69 (2014): 725-734.
- [15] Peng, L., and P. Wuliang. "An Efficient Simulation Algorithm for Resource-Constrained Project Scheduling Problem." *Open Mechanical Engineering Journal* 8 (2014): 9-13.
- [16] Abdolshah, Mohammad. "A Review of Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) Approaches and Solutions." (2014).
- [17] Ali, Ismail M., et al. "A Differential Evolution Algorithm for Solving Resource Constrained Project Scheduling Problems." *Australasian Conference on Artificial Life and Computational Intelligence*. Springer International Publishing, (2016).
- [18] B. Khang, A. Ming, H. genetic algorithm for mode identity and the resource constrained project scheduling problem, *Sci. Iran.* 20 (3) (2017) 824–831.
- [19] H. Zhang, C. Tam, H. Li, Multi-mode project scheduling based on particle swarm optimization, *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 21 (201) 93–103.
- [20] A. Tavana, S. Colak, S. Erenguc, A neurogenetic approach for the resource constrained project scheduling problem, *Comput. Oper. Res.* 38 (1) (2019) 44–50.
- [21] Lazari, V., Chassiakos, A., & Karatzas, S. (2024). Multi-objective resource-constrained scheduling in large and repetitive construction projects. *Algorithms*, 17(8), 351. <https://doi.org/10.3390/a17080351>
- [22] Zhou, J., Tang, Y., & Tian, Y. (2025). Multi-Objective Trade-Offs for Construction Projects with Dual Constraints of Schedule Risk and Resources Under a Risk-Driven Perspective. *Sustainability*, 17(5), 1926.
- [23] Zhang, H., Li, H., & Tam, C. M. (2012). Impact of quality management on project cost performance. *Construction Management and Economics*, 30(7), 565-578.
- [24] Khamooshi, H., & Golafshani, H. (2014). EDM: Earned duration management, a new approach to schedule performance management and measurement. *International Journal of Project Management*, 32(6), 1019-1041.
- [25] Assaf, S., & Hassanain, M. (2019). Causes of quality failures in building construction projects. *Journal of Building Engineering*, 20, 101-112.

-
- [26] Shao, X., Li, P., & Ding, L. (2020). A multi-objective optimization model for construction project scheduling considering quality, time and cost. *Automation in Construction*, 113, 103138
- [27] Marini, F., & Walczak, B. (2015). Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149, 153-165.
- [28] Ishibuchi, H., Imada, R., Setoguchi, Y., & Nojima, Y. (2016, July). Performance comparison of NSGA-II and NSGA-III on various many-objective test problems. In *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 3045-3052). IEEE.
- [29] Zhang, L., Du, J., & Zhang, S. (2014). Solution to the time-cost-quality trade-off problem in construction projects based on immune genetic particle swarm optimization. *Journal of Management in Engineering*, 30(2), 163-172.
- [30] Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., & Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects. *Expert systems with applications*, 42(6), 3089-3104.
- [31] Teymourifar, A., Rodrigues, A. M., & Ferreira, J. S. (2020, July). A comparison between NSGA-II and NSGA-III to solve multi-objective sectorization problems based on statistical parameter tuning. In *2020 24th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)* (pp. 64-74). IEEE.
- [32] Gu, Q., Xu, Q., & Li, X. (2022). An improved NSGA-III algorithm based on distance dominance relation for many-objective optimization. *Expert Systems with Applications*, 207, 117738.
- [33] Sedaghat Shayegan D. Optimum cost design of reinforced concrete slabs using a metaheuristic algorithm, *Int J Optim Civil Eng* 2022; 12(4): 545-55.
- [34] Saberi AA, Sedaghat Shayegan D (2021) Optimization of Haraz Dam reservoir operation using CBO metaheuristic algorithm. *Journal Int J Optim Civ Eng* 11(4):599–610. [https:// doi. org/ 10. 13140/RG.2. 2. 14648. 85636](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14648.85636)
- [35] Saberi AA, Ahmadi H, Sedaghat Shayegan D, Amirkardoust A (2023) Prediction of electricity consumption using three meta-heuristic algorithms. *Int J Optim Civil Eng*. 13(1):111–125

[36] Sedaghat Shayegan D, Lork A, Hashemi AH. optimum cost design of reinforced concrete slabs using Mouth Brooding Fish (MBF) algorithm, J Appl Eng Sci 2020; 10(23): ISSUE 1 ART.NO. 290: pp. 95-100.

[37] Bhesdadiya, R. H., Trivedi, I. N., Jangir, P., Jangir, N., & Kumar, A. (2016). An NSGA-III algorithm for solving multi-objective economic/environmental dispatch problem. Cogent Engineering, 3(1), 1269383.

[38] Zhang, H., & Xing, F. (2010). Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time–cost–quality tradeoff in construction. Automation in Construction, 19(8), 1067-1075.

پیوست

جدول (۱): فعالیت‌ها، پیش‌نیازها، گزینه‌های اجرایی و میزان منابع مورد نیاز برای اجرای هر فعالیت

Table (1): Activities, prerequisites, implementation options and the amount of resources required to implement each activity

فعالیت	پیشنیاز	حالت	زمان	روزشمار	NR1	NR2	NR3	NR4	R1	R2	کیفیت q	ارزش افزوده Ev	
۱	۰	۱	۳	۱	۳	۲	۲	۳	۴	۲	۵۰	۷۰	
				۲	۴	۳	۳	۴	۳	۲			
				۳	۳	۳	۳	۵	۰				
		۲	۴	۱	۲	۱	۱	۲	۳	۲			
				۲	۱	۱	۲	۳	۲	۱			
				۳	۲	۲	۱	۳	۰				
				۴	۳	۲	۱	۳	۰				
		۳	۵	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۱		
				۲	۱	۰	۱	۱	۳	۱	۰		
				۳	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰		
				۴	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۱		
				۵	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۰		

ادامه جدول (۱): فعالیت‌ها، پیش‌نیازها، گزینه‌های اجرایی و میزان منابع مورد نیاز برای اجرای هر فعالیت

Table (1): Activities, prerequisites, implementation options and the amount of resources required to implement each activity(continued)

فعالیت	پیشنیاز	حالت	زمان	روزشمار	NR1	NR2	NR3	NR4	R1	R2	کیفیت q	ارزش Ev افزوده			
۲	۰	۱	۲	۱	۴	۳	۲	۲	۳	۲	۴۵	۶۰			
				۲	۲	۲	۱	۰	۲						
		۲	۳	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۶۵					
				۲	۱	۱	۱	۱							
				۳	۱	۰	۰	۱							
۳	۰	۱	۲	۱	۳	۳	۴	۳	۴	۳	۴۰	۸۰			
				۲	۳	۲	۳	۲	۲						
		۲	۳	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۱	۶۰				
				۲	۱	۱	۲	۱	۲						
				۳	۱	۱	۱	۱							
		۲	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۰				
				۲	۱	۱	۱	۱	۱						
				۳	۱	۰	۱	۱	۱						
				۴	۱	۰	۱	۱							
		۴	۱	۱	۲	۱	۴	۲	۴	۴	۴		۲	۶۵	۷۰
						۲	۳	۲	۲	۲	۱				
				۲	۳	۱	۲	۰	۱	۱	۲		۸۵		
۲	۱					۱	۱	۱							
۳	۱					۱	۱	۰							
۴	۱					۱	۱	۰							
۵	۲			۱	۲	۱	۵	۴	۵	۴	۳	۳	۹۰	۸۵	

		۱	۳	۳	۳	۴	۴	۲				
۷۰		۲	۲	۲	۳	۲	۴	۱	۳	۲		
		۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲				
		۰	۱	۱	۱	۲	۱	۳				
۵۵		۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۴	۳		
		۱	۱	۱	۲	۱	۱	۲				
		۰	۱	۰	۱	۱	۱	۳				
		۱	۱	۱	۰	۱	۰	۴				

ادامه جدول (۱): فعالیت‌ها، پیش‌نیازها، گزینه‌های اجرایی و میزان منابع مورد نیاز برای اجرای هر فعالیت

Table (1): Activities, prerequisites, implementation options and the amount of resources required to implement each activity(continued)

فعالیت	پیشنیاز	حالت	زمان	روزشمار	NR1	NR2	NR3	NR4	R1	R2	کیفیت q	Ev ارزش افزوده
۶	۳	۱	۲	۱	۵	۴	۰	۱	۴	۱	۶۰	۸۰
		۲		۴	۳	۰	۲	۱				
		۲	۲	۲	۰	۵	۴	۲	۴	۳	۷۰	
		۲		۰	۴	۴	۱	۳	۲			
۷	۴	۱	۲	۱	۴	۳	۴	۵	۳	۲	۴۵	۷۰
		۲		۳	۲	۲	۳	۲	۱			
		۲	۳	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۶۵	
				۲	۲	۱	۲	۲	۱	۰		
				۳	۱	۱	۰	۲	۱	۱		
۸	۵و۶	۱	۳	۱	۳	۳	۲	۱	۲	۲	۸۵	۸۵
		۲		۱	۱	۲	۲	۱	۰			
		۳		۱	۱	۲	۲	۱	۱			
۹	۷	۱	۲	۱	۶	۵	۴	۶	۴	۲	۶۵	۹۰

		۱	۴	۵	۶	۵	۴	۲					
	۷۵	۱	۲	۴	۳	۴	۴	۱	۳	۲			
		۱	۲	۳	۳	۴	۲	۲					
		۱	۱	۲	۲	۲	۲	۳					
	۹۰	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۴	۳			
		۰	۱	۱	۲	۳	۲	۲					
		۰	۱	۲	۱	۲	۱	۳					
		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۴					
	۸۰	۸۵	۲	۳	۵	۴	۳	۴	۱	۲			۱
			۲	۲	۱	۲	۳	۳	۲				
۶۵		۱	۲	۲	۲	۲	۳	۱	۳	۲			
		۰	۲	۰	۱	۱	۱	۲					
		۱	۱	۱	۰	۱	۱	۳					

جدول (۲): منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در دسترس روزانه (حالت اول)

Table (2): Renewable and non-renewable resources available daily (first case)

روز	NR1	NR2	NR3	NR4	R1	R2
1	7	5	5	5	11	7
2	7	5	5	5	7	3
3	7	5	5	5	12	6
4	7	5	5	5	11	7
5	7	5	5	5	10	5
6	8	8	7	7	8	5
7	7	5	5	5	5	4
8	6	3	4	2	9	6
9	0	0	0	0	10	6
10	7	8	8	8	7	4
11	8	7	5	8	7	4
12	7	7	8	5	6	4
13	7	3	5	4	5	3
14	7	3	5	4	5	3
15	7	3	5	4	5	3
16	7	3	5	4	5	3

17	7	3	5	4	5	3
18	7	3	5	4	5	3
19	7	3	5	4	5	3
20	7	3	5	4	5	3
21	7	3	5	4	5	3
22	7	3	5	4	5	3
23	7	3	5	4	5	3
24	7	3	5	4	5	3
25	7	3	5	4	5	3
26	7	3	5	4	5	3
27	7	3	5	4	5	3
28	7	3	5	4	5	3
29	7	3	5	4	5	3
30	7	3	5	4	5	3
31	7	3	5	4	5	3
32	7	3	5	4	5	3
33	7	3	5	4	5	3
34	7	3	5	4	5	3
35	7	3	5	4	5	3
36	7	3	5	4	5	3
37	7	3	5	4	5	3
38	7	3	5	4	5	3
39	7	3	5	4	5	3

جدول (۳): منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در دسترس روزانه (حالت دوم)

Table (2): Renewable and non-renewable resources available daily (second case)

روز	NR1	NR2	NR3	NR4	R1	R2
1	4	3	3	3	15	8
2	4	3	3	3	15	8
3	4	3	3	3	15	8
4	4	3	3	3	15	8
5	4	3	3	3	15	8
6	4	3	3	3	15	8
7	4	3	3	3	15	8
8	4	3	0	0	15	8
9	4	3	5	6	15	8
10	9	9	8	8	15	8

11	8	6	5	5	15	8
12	4	3	3	3	15	8
13	6	8	8	12	15	8
14	10	12	11	10	15	8
15	4	3	3	3	15	8
16	0	0	0	0	15	8
17	0	0	0	0	15	8
18	0	0	0	0	15	8
19	0	0	0	0	15	8
20	0	0	0	0	15	8
21	0	0	0	0	15	8
22	0	0	0	0	15	8
23	0	0	0	0	15	8
24	0	0	0	0	15	8
25	0	0	0	0	15	8
26	0	0	0	0	15	8
27	0	0	0	0	15	8
28	0	0	0	0	15	8
29	0	0	0	0	15	8
30	0	0	0	0	15	8
31	0	0	0	0	15	8
32	0	0	0	0	15	8
33	0	0	0	0	15	8
34	0	0	0	0	15	8
35	0	0	0	0	15	8
36	0	0	0	0	15	8
37	0	0	0	0	15	8
38	0	0	0	0	15	8
39	0	0	0	0	15	8