



ارائه یک الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک برای حل یکپارچه مسائل زمان بندی چندپروژه‌ای
و برنامه‌ریزی تأمین منابع در زنجیره تأمین پروژه محور
(مطالعه موردی: صنعت پتروشیمی)

سامان حسن زاده روحلانی

گروه مهندسی صنایع، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

Samanhr_1367@yahoo.com

محمد جابری هفشجانی

گروه مهندسی صنایع، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

چکیده

این پژوهش با هدف توسعه یک رویکرد فرا ابتکاری برای حل یکپارچه مسئله زمان بندی چندپروژه با محدودیت منابع و برنامه‌ریزی تأمین منابع در زنجیره تأمین پروژه محور انجام شده است. با توجه به ماهیت ترکیبی و پیچیدگی بالای این مسئله، یک الگوریتم ژنتیک (GA) در محیط MATLAB نسخه R2016a توسعه یافته است. در الگوریتم پیشنهادی، ساختار کروموزوم به گونه‌ای طراحی شد که همزمان اطلاعات مربوط به زمان شروع فعالیت‌ها و استراتژی‌های تأمین منابع را کدگذاری نماید. جهت مدیریت محدودیت‌های مدل، از تابع برازندگی ترکیبی مجهز به مکانیزم جریمه استفاده شده است. قابلیت مقیاس پذیری الگوریتم در مواجهه با مسائل بزرگ مقیاس از طریق سه پیکربندی متفاوت با تعداد نسل‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ و جمعیتی به حجم ۵۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بهترین پیکربندی (نسل ۱۰۰۰) نشان داد که الگوریتم با زمان اجرای ۱۸/۷۴ ثانیه، موفق به دستیابی به هزینه‌ای معادل ۱۲۹۸۸/۲۸ دلار شده است. نرخ همگرایی مناسب و توانایی الگوریتم در یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه در حل مسائل بزرگ مقیاس، نشان‌دهنده کارایی بالای آن در مدیریت همزمان پیچیدگی‌های زنجیره تأمین پروژه محور است؛ به گونه‌ای که می‌تواند تعاملات میان برنامه‌ریزی پروژه و مدیریت زنجیره تأمین را در سطوح تاکتیکی و اجرایی به شکلی منسجم و بهینه یکپارچه نماید.

واژگان کلیدی: الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک، زمان بندی چندپروژه‌ای، برنامه‌ریزی تأمین منابع، زنجیره تأمین پروژه محور.

مقدمه

در محیط‌های صنعتی رقابتی امروز، پیچیدگی زنجیره‌های تأمین و محدودیت‌های منابع، زمان‌بندی مؤثر پروژه‌ها را به یکی از چالش‌های اساسی در سازمان‌های پروژه‌محور تبدیل کرده است. در این ساختارها، اجرای موازی پروژه‌ها منجر به ایجاد رقابت شدید برای دسترسی به منابع تجدیدپذیر (مانند نیروی انسانی و تجهیزات) و منابع مصرفی (مواد اولیه) شده است. از این رو، مدیریت یکپارچه تأمین و تخصیص بهینه منابع، به عاملی تعیین‌کننده در ارتقای بهره‌وری عملیاتی تبدیل شده است (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰).

مطالعات متعدد نشان می‌دهد که در زنجیره‌های تأمین پروژه‌محور، عدم هماهنگی میان زمان‌بندی فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی تأمین منابع می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها، تأخیرات پروژه و کاهش بهره‌وری شود. از سوی دیگر، شرایط واقعی پروژه‌ها ایجاب می‌کند که تصمیم‌گیری در مورد نحوه تأمین منابع مصرفی از میان گزینه‌های موجود (خرید خارجی، خرید داخلی، تولید داخلی) با توجه به هزینه‌های سفارش‌دهی، تولید، نگهداری و ظرفیت منابع به‌طور دقیق و هم‌زمان با زمان‌بندی فعالیت‌ها صورت گیرد. این نیاز منجر به توسعه مدل‌های یکپارچه‌ای شده است (پرچی افرا و خیرخواه، ۱۴۰۲).

در سناریوهای عملی زمان‌بندی، شرکت‌ها معمولاً چندین پروژه را به‌طور هم‌زمان مدیریت می‌کنند. این حالت چندپروژه‌ای، به دلیل احتمال وجود منابع مشترک میان پروژه‌های مختلف، پیچیدگی فرایند زمان‌بندی را افزایش می‌دهد. این چالش با عنوان مسئله زمان‌بندی چندپروژه‌ای با محدودیت منابع (RCMPSP) شناخته می‌شود (Aghileh et al, 2025).

مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح در مسائل زمان‌بندی چندپروژه‌ای با محدودیت منابع یکی از جدیدترین و پیچیده‌ترین مسائل در حوزه مدیریت پروژه است که هدف آن به حداقل رساندن مدت زمان پروژه است. همچنین در سالهای اخیر، حل یکپارچه مسائل زمان‌بندی چندپروژه‌ای با محدودیت منابع و برنامه‌ریزی تأمین منابع برای افزایش سودآوری و کاهش ریسک‌های عملیاتی، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. حل این مسائل به دلیل ماهیت ترکیبی، وجود تقدم و تأخرهای پیچیده، و محدودیت‌های منابع تجدیدپذیر و مصرفی در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد (Ghoroqi et al, 2023).

با گسترش ابعاد مسئله در محیط‌های صنعتی و افزایش تعداد پروژه‌ها، کارایی روش‌های دقیق مانند برنامه‌ریزی خطی به شدت کاهش می‌یابد و نیاز به روش‌هایی با توانایی جستجوی گسترده و انعطاف‌پذیری بالا احساس می‌شود. در این میان، الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان یک رویکرد فراابتکاری قدرتمند، با بهره‌گیری از مکانیسم‌های تکاملی نظیر انتخاب، تقاطع و جهش، قادر است بدون نیاز به مشتق‌پذیری یا خطی بودن توابع هدف، در زمان محاسباتی کوتاه، فضای جستجو را به صورت موازی کاوش کرده و به مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه یا نزدیک به بهینه دست یابد (Asadujjaman et al, 2023). این قابلیت، الگوریتم ژنتیک (GA) را به گزینه‌ای کارآمد برای حل مدل یکپارچه زمان‌بندی چند پروژه‌ای و تأمین منابع در زنجیره تأمین پروژه‌محور، به‌ویژه در محیط‌های پویای صنعتی مانند پتروشیمی، تبدیل کرده است.

با توجه به موارد فوق، علیرغم اهمیت راهبردی صنعت پتروشیمی، خلاء پژوهشی موجود در ارائه مدل‌های یکپارچه برای مدیریت زمان‌بندی چند پروژه‌ای و برنامه‌ریزی تأمین منابع در این صنعت محسوس است. لذا، این مقاله با هدف پاسخ به این پرسش کلیدی تدوین شده است که: چگونه می‌توان با طراحی و پیاده‌سازی یک الگوریتم ژنتیک کارآمد، مسئله پیچیده زمان‌بندی چندپروژه‌ای و برنامه‌ریزی تأمین منابع را در صنعت پتروشیمی به‌صورت یکپارچه حل نموده و به بهینه‌سازی شاخص‌های کلیدی عملکرد دست یافت؟

پیشینه تحقیقات در داخل و خارج از کشور

به منظور تبیین بهتر جایگاه این تحقیق و درک عمیقتر از وضعیت موجود، مروری جامع بر تحقیقات پیشین داخلی و خارجی در حوزه الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل مسئله زمان‌بندی و منابع پروژه صورت گرفت. این مرور، چارچوب نظری و تجربی الزم را برای تحقیق حاضر فراهم آورده و شکاف‌های تحقیقاتی موجود را روشن کرده است.

شی و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان "حل مسئله زمان‌بندی چندحالتی با محدودیت منابع در ساخت‌وساز پیش‌ساخته با استفاده از الگوریتم ژنتیک" یک مدل زمان‌بندی پروژه چندحالتی برای پروژه‌های پیش‌ساخته ارائه کردند که با غنی‌سازی محدودیت‌های کلیدی، ویژگی‌های منحصربه‌فرد فرآیندهای تولید خارج از سایت و عملیات نصب در محل را به‌طور جامع در ساختار مدل منعکس می‌کند. علاوه بر این، یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته برای حل مدل طراحی کردند و اثربخشی آن با استفاده از مجموعه داده‌های PSPLIB تأیید شد و پس از آن، مدل زمان‌بندی در یک پروژه ساختمانی واقعی اجرا گردید. الگوریتم پیشنهادی، که با استفاده از مجموعه داده‌های PSPLIB اعتبارسنجی شده است، دقت و کارایی بالاتری نسبت به روش‌های قبلی را نشان می‌دهد. این روش با میانگین نرخ انحراف ۰.۰۰، ۰.۱۰ و ۰.۳۱ درصد به ترتیب برای مجموعه داده‌های J12، J18 و J20، به نتایج بهتری دست یافتند. با اعمال این مدل در یک مورد واقعی، در مقایسه با روش سنتی CPM، مدت زمان پروژه به طور قابل توجهی کاهش یافته و استفاده از منابع افزایش می‌یابد. این الگوریتم همچنین با بهینه‌سازی توالی فعالیت‌ها و تخصیص منابع، اثرات تأخیر را به طور مؤثر به حداقل می‌رساند و قابلیت کاربرد عملی قوی را تضمین می‌کند (Xie et al, 2026).

بو (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان "روش بهینه‌سازی زمان‌بندی منابع ساخت‌وساز مهندسی عمران با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (IGA)" یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (IGA) را برای حل محدودیت‌های روش‌های سنتی با بهینه‌سازی کارایی محاسباتی، همگرایی و توانایی جستجوی سراسری الگوریتم ژنتیک به کار گرفت و در نتیجه کارایی و دقت زمان‌بندی منابع را بهبود بخشید، هزینه‌ها و دوره ساخت‌وساز را کاهش و یک روش بهینه‌سازی جدید و کارآمد برای پروژه‌های مهندسی عمران ارائه کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (IGA) برای زمان‌بندی منابع چقدر خوب عمل می‌کند. وقتی صحبت از کارایی در زمان‌بندی می‌شود، الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (IGA) کارایی زمان‌بندی بالایی معادل ۹۵٪ دارد که در مقایسه با الگوریتم کنترل بسیار خوب است. استفاده از منابع در ۱۰ وظیفه نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (IGA) کارایی تخصیص منابع بالایی با نرخ متوسط استفاده از منابع بین ۸۵ تا ۹۴ دارد. در نهایت، الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (IGA) روشی قابل اعتماد و کارآمد برای بهینه‌سازی زمان‌بندی منابع در موارد ساخت‌وساز پیچیده ارائه می‌دهد و می‌تواند به طور مؤثر هزینه‌های ساخت‌وساز را کاهش دهد، مصرف منابع را افزایش دهد و زمان ساخت‌وساز را کاهش دهد (Bo, 2026).

لیو و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان "یک الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک مبتنی بر یادگیری ماشین برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تصادفی با فضاهای کاری سه‌بعدی و انتشار کربن" یک مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تصادفی جدید با فضاهای کاری سه‌بعدی و انتشار کربن پیشنهاد کردند که شامل تصمیمات یکپارچه در مورد زمان شروع هر فعالیت، سرعت اجرا و مکان فضای کاری در شرایط محدودیت‌های فضایی و مکانیسم "سقف و تجارت کربن" است. بنابراین یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تصادفی با فضاهای کاری سه‌بعدی و انتشار کربن (SRCPSP-3DWCE)، فرموله کردند و یک الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک مبتنی بر یادگیری ماشین (MLBGP) را برای تکامل قواعد اولویت‌بندی مؤثر توسعه دادند. الگوریتم MLBGP دو تکنیک یادگیری ماشین را با هم ترکیب می‌کند: ۱- شبکه عصبی گراف کانولوشنی - پرسپترون چندلایه ۲- یک الگوریتم بهینه‌سازی خط‌مشی نزدیک (PPO). نتایج آزمایش‌های عددی و بررسی موردی واقعی نشان می‌دهد که الگوریتم MLBGP از ۹۹ ترکیب قواعد اولویت‌بندی طراحی شده به روش دستی عملکرد بهتری دارد و ترکیب این دو تکنیک یادگیری، هم کیفیت جواب‌ها و هم کارایی محاسباتی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، در نظر گرفتن

عدم قطعیت در شرایط آبوهوایی و حجم کاری فعالیتها می تواند خطاهای تخمین در مدت زمان پروژه و میزان انتشار کربن را کاهش دهد (Liu et al,2026).

لیو و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان "یک الگوریتم ژنتیک کارآمد مبتنی بر کلید تصادفی برای حل مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع چند حالت" یک الگوریتم ژنتیک (GA) جدید با سه نوآوری کلیدی برای مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالت (MRCPSP) پیشنهاد کردند. اول، یک الگوریتم تخصیص حالت امکان پذیر با یک استراتژی انتخاب مبتنی بر آستانه معرفی شد که به سرعت افراد امکان پذیر جمعیت اولیه را برای برآورده کردن محدودیت های منابع غیرقابل تجدید پذیر شناسایی می کند. دوم، یک تکنیک بهبود رو به جلو و عقب چندحالت اصلاح شده (MMFBI) به عنوان یک رویکرد جستجوی محلی برای بهبود پویای برنامه ها توسعه داده می شود. سوم، یک چارچوب GA با چهار مؤلفه کلیدی طراحی شده است: (۱) یک ساختار طرح رمزگذاری برای افزایش عملیات ژنتیکی؛ (۲) یک مکانیسم تنظیم کلید تصادفی برای کاهش فضاهای جستجوی اضافی؛ (۳) یک استراتژی جستجوی سلسله مراتبی برای ایجاد تعادل بین اکتشاف سراسری و بهره برداری محلی در بین افراد با سطوح برازندگی متفاوت؛ و (۴) یک مکانیسم حفظ راه حل امکان پذیر در طول فرآیند تکاملی. عملکرد الگوریتم با استفاده از کتابخانه معیار چندحالت (MMLIB) و یک پروژه ساختمانی، به طور دقیق در مقایسه با الگوریتم های فراابتکاری پیشرفته ارزیابی شد. این الگوریتم ۵ راه حل جدید و شناخته شده (BKS) را برای هر دو مجموعه داده MM50 و MM100 (هر مجموعه داده شامل ۵۴۰ نمونه) و ۲۷۷ راه حل جدید BKS را برای مجموعه داده MMplus (شامل ۳۲۴۰ نمونه) شناسایی کرد. این نتایج، اثربخشی الگوریتم و پتانسیل آن را برای پیشرفت در حوزه مسائل بهینه سازی زمان بندی پروژه های ساختمانی برجسته می کند (Liu et al,2025).

محمودی و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی با عنوان "ارائه الگوریتم فراابتکاری ترکیبی بهبود یافته برای حل زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر" به ارائه یک روش ترکیبی و نوآورانه، برای ایجاد یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید به منظور بهینه سازی در مسئله زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر از طریق اثرگذاری در تولید جمعیت اولیه که منجر به کاهش زمان تکمیل کل در سیستم های تولیدی می شود، پرداختند. در این روش ترکیبی، دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و جستجوی ممنوعه با هم ادغام گردیده و یک الگوریتم فراابتکاری بهبود یافته ارائه شده است. بدین منظور، ابتدا مدل ریاضی مسئله بیان شده و در ادامه الگوریتم های مورد استفاده در نرم افزار Matlab کدنویسی و به وسیله حل مسائل زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر در ابعاد مختلف به مقایسه ی عملکرد الگوریتم ها پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد الگوریتم ارائه شده از طریق اصلاح جمعیت اولیه نتیجه ی بهتری نسبت به دو الگوریتم پایه ی ترکیب (ژنتیک و جستجوی ممنوعه) و دو الگوریتم بهینه سازی ازدهام ذرات و کلونی مورچه ها داشته است.

نهادوندی و مرادی (۱۴۰۴) در پژوهشی با عنوان "ارائه مدل بهینه سازی استوار برای مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع" به ارائه ی رویکردی برای تخصیص منابع محدود مسئله زمان بندی چند پروژه ای با عدم قطعیت مدت زمان فعالیت های پروژه پرداختند. همچنین در فضای این مسئله انتخاب تامین کننده ی منابع هم به عنوان اهداف مسئله در نظر گرفته شده است. پس از معرفی مدل استوار مبتنی بر سناریو جواب ها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می دهد با افزایش هزینه تامین منابع هزینه کل پروژه افزایش می یابد. چهار سناریو در مدل تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است که شامل مازاد نیروی کار و کمبود منابع؛ کمبود نیروی کار و مازاد منابع، افزایش قیمت محصولات پروژه و افزایش هزینه، عدم افزایش قیمت محصولات پروژه و عدم افزایش هزینه است. با افزایش هزینه تامین منابع بیشترین افزایش در سناریوی چهارم رخ می دهد. این افزایش صرفاً در هزینه نیست و منجر به افزایش زمان پروژه نیز می شود از سوی دیگر ریسک شکست تامین کننده

می‌تواند بر هزینه و زمان پروژه اثرگذار باشد. با افزایش ریسک شکست تامین‌کننده هزینه افزایش یافته و بیشترین افزایش در سناریوی یک رخ می‌دهد در حالی که در سناریوی سه کمترین افزایش هزینه به دلیل ریسک شکست تامین‌کننده رخ می‌دهد.

روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور حل مسئله بهینه‌سازی ترکیبی زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع و برنامه‌ریزی تأمین منابع مصرفی در زنجیره تأمین پروژه‌محور، یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) توسعه یافته است. با توجه به ماهیت مسئله که شامل متغیرهای تصمیم گسسته (زمان شروع فعالیت‌ها) و پیوسته (مقدار تأمین منابع) است، این مسئله در دسته مسائل برنامه‌ریزی ریاضی سخت (NP-Hard) قرار می‌گیرد. فرآیند تحقیق شامل دو مرحله اصلی مدل‌سازی ریاضی و پیاده‌سازی الگوریتم حل است.

(۱) مدل‌سازی ریاضی مسئله:

(۱) تابع هدف:

$$\min Z = \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} cost_{rm} \cdot x_{rmt} + \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} setup_{rm} \cdot z_{rmt} + \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} hold_r \cdot inv_{rt}$$

مدل پیشنهادی شامل مجموعه‌ای از محدودیت‌هاست که به منظور اطمینان از اجرای صحیح زمان‌بندی فعالیت‌ها، رعایت ظرفیت منابع، کنترل سفارش‌دهی منابع مصرفی، و برقراری توازن موجودی در زنجیره تأمین پروژه‌محور طراحی شده‌اند. در ادامه، محدودیت‌های اصلی مدل تشریح می‌گردند:

(۲) توازن موجودی منابع مصرفی

$$inv_{rt} = inv_{rt-1} + \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{rmt} - demand_{rt} \quad \forall m \in M, r \in R, t \in T$$

(۳) ظرفیت تأمین

$$x_{rmt} \leq cap_{rmt} \quad \forall r, m, t$$

(۴) محدودیت استفاده از روش تأمین

$$x_{rmt} \leq cap_{rmt} \cdot z_{rmt} \quad \forall r, m, t$$

(۵) محدودیت ظرفیت انبار:

$$inv_{rt} \leq invCap_r \quad \forall r, t$$

(۶) برابری تقاضا با نیاز فعالیت‌ها:

$$demand_{rt} = \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} req_{par} \cdot start_{pat} \quad \forall r, t$$



(۷) محدودیت منابع تجدیدپذیر:

$$\sum_{p \in P} \sum_{a \in A} rreq_{parr} \cdot start_{pat} \leq capR_{rrt} \quad \forall rr, t$$

(۸) هر فعالیت فقط یک بار شروع شود:

$$\sum_{t \in T} start_{pat} = 1 \quad \forall p, a$$

(۹) روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها:

$$\sum_{t \in T} TNUM_t \cdot start_{pa_1t} + 1 \leq \sum_{t \in T} TNUM_t \cdot start_{pa_2t} \quad \forall p, a_1 \rightarrow a_2 \text{ precedes}$$

(۱۰) حداقل خرید خارجی و داخلی (برای هر منبع):

$$\sum_{t \in T} x_{routt} \geq minOutReq_r \quad \forall r$$

$$\sum_{t \in T} x_{rint} \geq minInReq_r \quad \forall r$$

(۲) الگوریتم ژنتیک:

با توجه به ساختار مسئله ترکیبی زمان بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع، برنامه‌ریزی تأمین منابع از طریق سه روش مختلف (خرید خارجی، خرید داخلی، تولید داخلی) و همچنین قیود تقدم فعالیت‌ها، یک الگوریتم ژنتیک با قابلیت انطباق به صورت کامل در محیط نرم افزار متلب R2016a پیاده‌سازی گردید. در این بخش، مراحل اجرای الگوریتم و اجزای اصلی آن به صورت خلاصه معرفی می‌گردد.

(۱) تعریف کروموزوم و فضای جستجو:

در این مسئله، کروموزوم شامل دو بخش مجزا است:

بخش اول: زمان شروع هر یک از ۸ فعالیت (۴ فعالیت برای هر پروژه، جمعاً ۲ پروژه) به صورت عدد صحیح بین ۱ تا ۳ (نمایانگر ۳ دوره زمان).

$$[s_{p1_a1}, s_{p1_a2}, s_{p1_a3}, s_{p1_a4}, s_{p2_a1}, s_{p2_a2}, s_{p2_a3}, s_{p2_a4}]$$

بخش دوم: تصمیم‌گیری در مورد مقدار تأمین هر یک از منابع مصرفی (اتان و متانول) به تفکیک روش تأمین (۳ روش) و دوره زمانی (۳ دوره)، در مجموع ۱۸ متغیر پیوسته.

$$[eth_out_1, eth_out_2, eth_out_3, eth_in_1, eth_in_2, eth_in_3, eth_prod_1, eth_prod_2, eth_prod_3, met_out_1, met_out_2, met_out_3, met_in_1, met_in_2, met_in_3, met_prod_1, met_prod_2, met_prod_3]$$

در نتیجه، طول هر کروموزوم برابر با ۲۶ متغیر تصمیم‌گیری است که به صورت برداری به الگوریتم معرفی می‌شود. حدود بالا و پایین هر متغیر در دو بردار lb و ub تعریف شده‌اند.



(۲) مقداردهی اولیه جمعیت:

جمعیت اولیه با اندازه ثابت (مثلاً ۵۰ فرد) به صورت تصادفی تولید می شود. برای بخش زمان شروع فعالیت ها، اعداد صحیح بین ۱ تا ۳ تخصیص می یابند و برای بخش تأمین منابع، اعداد پیوسته بین صفر تا حداکثر ظرفیت مجاز تخصیص داده می شوند.

(۳) تابع برازندگی تعبیه شده:

تابع برازندگی برای هر کروموزوم شامل چهار مؤلفه اصلی زیر است:

۱. هزینه متغیر تأمین منابع مصرفی:

هزینه خرید یا تولید هر واحد از منابع اتان و متانول از سه روش خرید خارجی، خرید داخلی و تولید داخلی در دوره های مختلف محاسبه می شود. این مقدار طبق رابطه زیر تعیین می شود:

$$VariableCost = \sum_{r \in \{eth, met\}} \sum_{m \in \{out, in, prod\}} \sum_{t=1}^3 cost_{rmt} \cdot x_{rmt}$$

$$variable_cost = variable_cost + cost.(rname)(m) * x;$$

که در آن، x_{rmt} مقدار منبع مصرفی r تأمین شده به روش m در دوره t و $cost_{rmt}$ نرخ هزینه آن است.

۲. هزینه ثابت راه اندازی هر روش تأمین:

اگر در یک دوره از یک روش خاص استفاده شود، هزینه ای ثابت به آن تعلق می گیرد:

$$FixedCost = \sum_{r,m,t} setup_{rmt} \cdot z_{rmt}$$

if $x > 0$

fixed_cost = fixed_cost + setup.(rname)(m);

end

که در آن، متغیر $z_{rmt} = 1$ اگر $x_{rmt} > 0$ و صفر در غیر این صورت است.

۳. هزینه نگهداری موجودی:

در پایان هر دوره، اگر موجودی منابع مصرفی بیشتر از صفر باشد، هزینه ای به ازای هر تن ذخیره شده به سیستم تحمیل می شود:

$$InventoryCost = \sum_{r \in \{eth, met\}} \sum_{t=1}^3 hold_r \cdot inv_{rt}$$

inventory_cost = inventory_cost + hold.(rname) * inventory.(rname)(t+1);

که در آن inv_{rt} موجودی منبع r در پایان دوره t است و $hold_r$ نرخ هزینه نگهداری آن.

(۴) سازوکار جریمه ها:

در صورت نقض هر یک از محدودیت های مسئله، یک مقدار جریمه بزرگ به تابع برازندگی افزوده می شود تا این کروموزوم ها در فرآیند انتخاب کمتر انتخاب شوند. جریمه ها به صورت زیر طراحی شده اند:



کمبود موجودی:

اگر موجودی منفی شود (یعنی مصرف بیش از تأمین باشد)، مقدار کمبود در عدد بزرگی مانند ۱۰۰۰۰ ضرب شده و به تابع اضافه می‌شود:

$$Penalty_{inv} = 10^4 \cdot \sum_{r,t} r, tmax(0, -inv_{rt})$$

if inventory.(rname)(t+1) < 0
 penalty = penalty + 10000 * abs(inventory.(rname)(t+1));
 end

تجاوز از ظرفیت منابع تجدیدپذیر:

اگر مصرف منابع تجدیدپذیر مانند نیروی انسانی یا ماشین‌آلات در هر دوره از ظرفیت آن بیشتر شود، تفاوت ضربدر جریمه می‌شود:

$$Penalty_{renew} = 10^4 \cdot \sum_{rr,t} max(0, usage_{rrt} - cap_{rrt})$$

if renew.hr(t) > capR.hr(t)
 penalty = penalty + 10000 * (renew.hr(t) - capR.hr(t));
 end

نقض روابط تقدم و تأخر فعالیت‌ها:

اگر زمان شروع یک فعالیت از فعالیت قبلی خود زودتر یا مساوی باشد، جریمه‌ای به تابع افزوده می‌شود. مثلاً:

$$Penalty_{precedence} = 10^4 \cdot \sum_{(i,j) \in P} max(0, 1 + s_{p,ai} - s_{p,aj})$$

if start(1,1) >= start(1,2), penalty = penalty + 10000; end
 if start(1,1) >= start(1,3), penalty = penalty + 10000; end
 ...

این روابط طبق ساختار تعریف‌شده در هر پروژه به‌صورت صریح در کد متلب بررسی می‌شوند.

۵) انتخاب والدین و تولید فرزندان:

در هر نسل، بهترین افراد انتخاب شده و با استفاده از عملگر ترکیب خطی یکنواخت فرزندان تولید می‌شوند. پس از آن، یک عملگر جهش نقطه‌ای در یک ژن به‌صورت تصادفی اعمال می‌شود.

۶) جایگزینی و به‌روزرسانی جمعیت:

اگر هزینه فرزند جدید کمتر از بدترین فرد جمعیت باشد، جایگزینی صورت می‌گیرد و جمعیت مرتب‌سازی می‌شود. این فرآیند تا رسیدن به حداکثر تعداد نسل‌ها (مثلاً ۱۰۰۰۰ نسل) ادامه می‌یابد.

۷) ثبت بهترین جواب و رسم نمودار همگرایی:

در انتهای اجرا، مقدار بهترین تابع هدف، کروموزوم متناظر، و زمان اجرای الگوریتم ثبت شده و نمودار همگرایی الگوریتم رسم می‌گردد. این نمودار بیانگر کاهش هزینه کلی در طی تکرار نسل‌ها است.



برای تحلیل همگرایی الگوریتم و بررسی تأثیر تعداد نسل‌ها بر کیفیت پاسخ، سه سناریو با تعداد نسل‌های مختلف طراحی شد:

جدول (۱) سناریوهای مربوط به الگوریتم و زمان اجرای آن

سناریو	تعداد نسل	جمعیت اولیه	زمان اجرا (ثانیه)
A	۱۰۰۰	۵۰	۲/۰۶
B	۵۰۰۰	۵۰	۹/۱۶
C	۱۰۰۰۰	۵۰	۱۸/۷۴

عملگرهای انتخاب به صورت انتخاب چرخ رولت، تقاطع یکنواخت با ۰/۹ و جهش تصادفی با نرخ ۰/۱ طراحی شدند. همچنین از الگوریتم بازتولید با جانشینی نخبگان استفاده شد تا بهترین کروموزوم‌ها در نسل بعدی باقی بمانند.

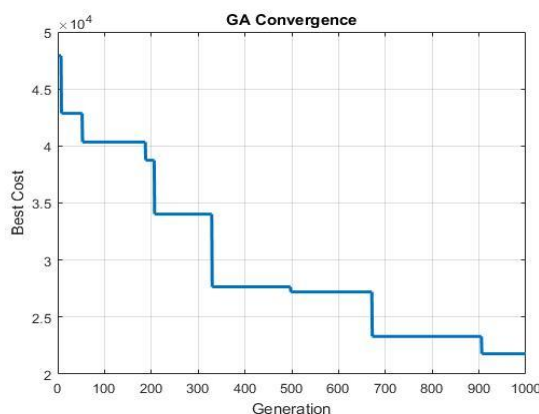
یافته‌های تحقیق

نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم در سه سناریو نشان دهنده روند همگرایی و بهبود کیفیت راه حل‌ها با افزایش تعداد نسل‌هاست:

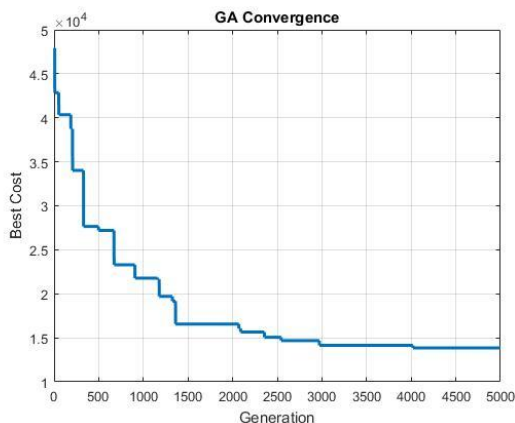
جدول (۲) نتایج الگوریتم ژنتیک

سناریو	تعداد نسل	هزینه به دست آمده (دلار)
A	۱۰۰۰	۲۱۷۸۴/۶۹
B	۵۰۰۰	۱۳۸۵۵/۹۱
C	۱۰۰۰۰	۱۲۹۸۸/۲۸

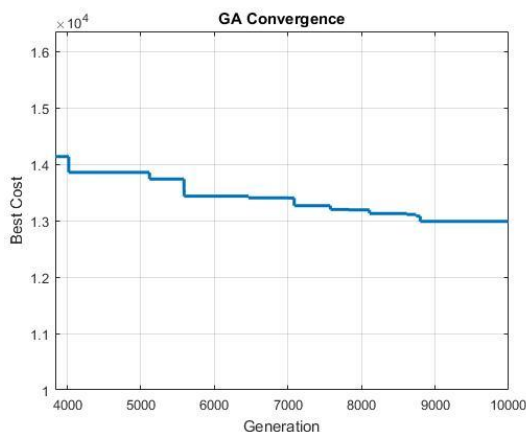
در سناریوی سوم (۱۰۰۰۰ نسل)، الگوریتم ژنتیک توانست به راه حلی با هزینه کل برابر با ۱۲۹۸۸/۲۸ دلار دست یابد. فرآیند همگرایی الگوریتم در هر سه سناریو در شکل‌های زیر نشان داده شده است. این نمودارها روند کاهش مقدار تابع هدف (Fitness) را در طول نسل‌ها به تصویر می‌کشند و نشان دهنده پایداری و کارایی الگوریتم در رسیدن به راه حل‌های با کیفیت می‌باشند:



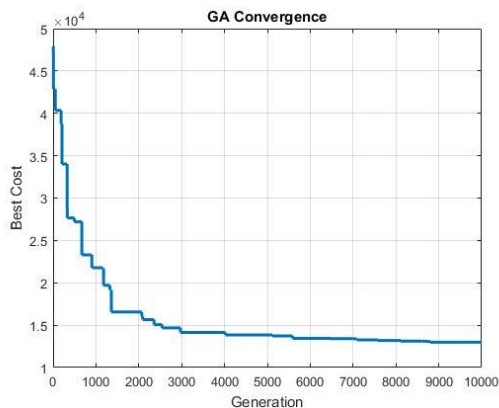
شکل (۱): نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای ۱۰۰۰ نسل



شکل (۲): نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای ۵۰۰۰ نسل



شکل (۳): نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای ۱۰۰۰۰ نسل



شکل (۴): نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای هر سه نسل

همانگونه که در شکل های ۱ تا ۴ قابل مشاهده است، با افزایش تعداد نسل ها، نرخ بهبود تابع هدف کاهش یافته و الگوریتم به حالت تقریباً پایدار رسیده است. این رفتار نشان دهنده توانایی الگوریتم در جست و جوی مناسب فضای پاسخ و پرهیز از گیر افتادن در بهینه های محلی می باشد.

بحث و نتیجه گیری

تحقیق حاضر با هدف حل یک مسئله ترکیبی در حوزه مدیریت پروژه و زنجیره تأمین، به بررسی مسئله زمان بندی چندپروژه های با محدودیت منابع، برنامه ریزی تأمین منابع در زنجیره تأمین پروژه محور پرداخت. در این راستا، ابتدا با مرور ادبیات موضوع و بررسی خلأ های موجود، مشخص شد که در اغلب مطالعات پیشین، مسئله زمان بندی پروژه ها بدون در نظر گرفتن ساختار تأمین منابع مدل سازی شده است و تعامل بین تصمیمات برنامه ریزی پروژه و زنجیره تأمین مغفول مانده است. بدین منظور در پژوهش حاضر، تلفیق هم زمان این دو جنبه با هدف مدل سازی دقیق تر واقعیت های محیط پروژه های در قالب یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط انجام شد. سپس، یک الگوریتم ژنتیک خود تطبیقی طراحی و پیاده سازی شد که ساختار کروموزوم آن شامل دو بخش مجزا جهت تصمیمات زمان بندی و سفارش دهی بود. این طراحی امکان یافتن پاسخ هایی نزدیک به بهینه در شرایطی که مدل ریاضی به دلیل افزایش ابعاد مسئله غیر قابل حل می شود را فراهم ساخت. نرخ های جهش و تقاطع به صورت پویا تنظیم شدند تا از همگرایی زودرس جلوگیری شده و تنوع جمعیت حفظ گردد. برای ارزیابی قابلیت مقیاس پذیری و توانمندی الگوریتم در مواجهه با مسائل بزرگ، الگوریتم ژنتیک در سه پیکربندی متفاوت با ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ نسل و جمعیتی به حجم ۵۰ اجرا شد. بهترین نتیجه مربوط به نسل ۱۰۰۰۰ بود که هزینه ای معادل ۱۲۹۸۸/۲۸ دلار به همراه نرخ همگرایی مناسب به دست آمد. زمان اجرای الگوریتم در این پیکربندی برابر با ۱۸/۷۴ ثانیه محاسبه گردید.

با توجه به ماهیت پویا و غیر قطعی محیط های واقعی، پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی، اثر عدم قطعیت در زمان رسیدن منابع یا نوسانات تقاضا با استفاده از منطق فازی در این مدل ادغام شود. همچنین بررسی الگوریتم های هیبریدی می تواند پتانسیل کاهش بیشتر زمان اجرا و افزایش دقت را در مسائل فوق بزرگ فراهم آورد.

منابع

- پرچمی افرا، علی و خیرخواه، امیرسامان، **ارایه الگوریتم آزاد سازی لاگرانژ برای مساله زمان بندی چندپروژه ای با محدودیت منابع، برنامه ریزی سفارش دهی و برنامه ریزی تولید منابع مصرفی در زنجیره تامین پروژه محور، تحقیق در عملیات در کاربردهای آن**، ۱۴۰۲، ۶۰-۳۳.
- رحیمی، مریم، ایمانی، دین محمد و قنادپور، سیدفرید، **مدل یکپارچه مسئله زمان بندی چند پروژه با زمان بندی زنجیره تامین مواد پروژه ها تحت شرایط محدودیت منابع، اولین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، مدیریت، اقتصاد و حسابداری**، ۱۴۰۰.
- محمودی، جمال، احتشام راثی، رضا و ایرج پور، علیرضا، **ارائه الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی بهبود یافته برای حل زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر، فصلنامه آماد و فناوری دفاعی**، ۱۴۰۴، ۲۵۱-۲۹۶.
- نهادندی، نسیم و مرادی، مژده، **ارائه مدل بهینه سازی استوار برای مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع، روش های عددی در مهندسی**، ۱۴۰۴، ۱۴۹-۱۲۷.



- Asadujjaman, M., Rahman, H. F., Chakraborty, R. K., & Ryan, M. J. (2024). **Supply chain integrated resource-constrained multi-project scheduling problem**. Computers & Industrial Engineering, 194, 110380.
- Bo, C. (2026). **Optimization method of civil engineering construction resource scheduling using improved genetic algorithm (IGA)**. CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction, 1-15.
- Ghoroqi, M., Ghoddousi, P., Makui, A., Shirzadi Javid, A. A., & Talebi, S. (2023). **An integrated model for multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problems considering supply management with sustainable approach in the construction industry under uncertainty using evidence theory and optimization algorithms**. Buildings, 13(8).
- Liu, H., Zhang, J., Demeulemeester, E., & Chen, Z. (2026). **A machine learning-based genetic programming algorithm for the stochastic resource-constrained project scheduling problem with 3D workspaces and carbon emissions**. International Journal of Production Research, 64(8), 2829-2853.
- Liu, J., Chen, J., Tian, J., & Li, Y. (2025). **An Efficient Random Key-Based Genetic Algorithm for Solving Multimode Resource-Constrained Project Scheduling Problem**. Journal of Construction Engineering and Management, 151(12), 04025193.
- Xie, L. L., Li, D., Wu, S., & Chang, R. D. (2026). **Solving multi-mode resource-constrained scheduling problem of prefabricated construction using genetic algorithm**. Engineering, Construction and Architectural Management, 33(6), 4632-4657.