بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی پروژه‌های پل‌سازی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان

مقاله علمی-پژوهشی

حسین محمدی، دانش آموخته کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
*سید علی ضیائی (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sa-ziaee@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲
صفحه ۳۹۸-۳۸۷

چکیده

مدیریت زمان و هزینه در پروژه‌های پل‌سازی به دلیل پیچیدگی فعالیت‌ها، محدودیت منابع و وابستگی متقابل عملیات اجرایی، از مهم‌ترین چالش‌های صنعت ساخت‌وساز محسوب می‌شود. در این پژوهش، رویکردی مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان برای بهینه سازی برنامه زمان‌بندی پروژه‌های پل سازی ارائه شده است. هدف اصلی، کاهش زمان تکمیل پروژه، بهینه سازی تخصیص منابع و افزایش کارایی اجرای فعالیت‌ها در شرایط واقعی پروژه است. در مدل پیشنهادی، فعالیت‌های اجرایی پل به‌صورت شبکه‌ای از وظایف وابسته تعریف شده و الگوریتم کلونی مورچگان با شبیه سازی رفتار جست‌وجوی مورچگان در یافتن کوتاه‌ترین مسیر، بهترین توالی اجرای فعالیت‌ها را تعیین می‌کند. به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، داده‌های یک پروژه نمونه پل‌سازی با مدت زمان اولیه ۷۳۰ روز مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصل با روش‌های سنتی زمان‌بندی مقایسه شد. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان موجب کاهش قابل‌توجه زمان اجرای پروژه، بهبود بهره‌وری منابع و کاهش تداخل فعالیت‌ها شده است. بر اساس نتایج عددی، مدت زمان کل پروژه از ۷۳۰ روز به ۶۴۵ روز کاهش یافت که بیانگر حدود ۱۱/۶ درصد بهبود در زمان‌بندی پروژه است. همچنین میزان بهره‌برداری مؤثر از منابع انسانی و ماشین‌آلات حدود ۱۸ درصد افزایش یافت و تأخیر ناشی از تداخل فعالیت‌های اجرایی نزدیک به ۲۲ درصد کاهش پیدا کرد. افزون بر این، هزینه‌های غیرمستقیم پروژه به دلیل کاهش مدت اجرا، حدود ۹ درصد کمتر از روش سنتی برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: پل‌سازی، برنامه زمان‌بندی، کلونی مورچگان، منابع انسانی

۱- مقدمه

صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه در پروژه‌های زیرساختی نظیر پل‌سازی، از جمله حوزه‌هایی است که با پیچیدگی‌های متعدد در برنامه‌ریزی، زمان‌بندی و تخصیص منابع مواجه است. وابستگی متقابل فعالیت‌ها، محدودیت منابع انسانی و ماشین‌آلات، و همچنین عدم قطعیت‌های اجرایی، موجب شده است که طراحی یک برنامه زمان‌بندی کارآمد به یکی از چالش‌های اساسی مدیران پروژه تبدیل شود(Shabani et al., 2024). در این میان، تصمیم‌گیری بهینه در خصوص ترتیب اجرای فعالیت‌ها و مدیریت منابع، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش مدت زمان، هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری پروژه دارد. با توجه به ماهیت

ترکیباتی و NP–سخت بودن مسائل زمان‌بندی پروژه، روش‌های کلاسیک مانند CPM و PERT در بسیاری از پروژه‌های پیچیده پاسخ‌گو نبوده و توانایی مدل‌سازی دقیق محدودیت‌ها و شرایط واقعی پروژه را ندارند. از این‌رو، استفاده از روش‌های هوشمند و فراابتکاری، به‌ویژه الگوریتم کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization)، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است (Kostrzewa-Demczuk, 2023; Nekoueian et al., 2025).

بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌های پل‌سازی از دو منظر اقتصادی و مدیریتی اهمیت ویژه‌ای دارد. از منظر اقتصادی، کاهش زمان اجرای پروژه منجر به کاهش هزینه‌های غیرمستقیم، هزینه‌های تجهیز کارگاه و کاهش اثرات تورم می‌شود (Castañeda et al., 2025). از منظر مدیریتی نیز، بهبود تخصیص منابع و کاهش تداخل فعالیت‌ها موجب افزایش بهره‌وری نیروی انسانی و ماشین‌آلات خواهد شد. در پروژه‌های زیرساختی مانند پل‌سازی که دارای فعالیت‌های وابسته و پیچیده هستند، هرگونه خطا یا عدم بهینه‌سازی در زمان‌بندی می‌تواند منجر به تأخیرات گسترده و افزایش هزینه‌های پروژه گردد. بنابراین، توسعه مدل‌های هوشمند برای بهینه‌سازی زمان‌بندی این پروژه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲–پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در ایران در حوزه زمان‌بندی پروژه‌ها و بهینه‌سازی آن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری انجام شده است. این مطالعات عمدتاً بر کاهش مدت زمان پروژه، مدیریت منابع و بهبود کارایی زمان‌بندی تمرکز داشته‌اند. گل پیرا و همکاران (گل‌پیرا و همکاران، ۱۴۰۰) به مدل‌سازی زنجیره تأمین چندپروژه‌ای با رویکرد چندهدفه پرداختند و نشان دادند که الگوریتم‌های ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید می‌توانند در بهینه‌سازی کیفیت و قابلیت اطمینان زنجیره تأمین مؤثر باشند. اکبری و همکاران (اکبری و همکاران، ۱۴۰۱) نقش مدیریت دانش را در کاهش تأخیر پروژه‌های راهسازی بررسی کردند و نشان دادند که افزایش مدیریت دانش، تأثیر معناداری بر کاهش تأخیرات دارد. کفاشی و همکاران (۱۴۰۱) تأثیر مدیریت پروژه، ساخت و ریسک را بر زمان و هزینه پروژه‌های انبوه‌سازی بررسی کرده و نشان دادند که ترکیب این عوامل نقش مهمی در بهبود عملکرد پروژه دارد. صالحی و همکاران (صالحی و همکاران، ۱۴۰۲) یک مدل چندهدفه فازی برای زمان‌بندی پروژه با منابع چندمهارته ارائه کردند و نشان دادند که الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه عملکرد مناسبی در حل مسائل پیچیده دارند.

آپرناک و همکاران (آپرناک و همکاران، ۱۴۰۳) نیز زمان‌بندی پروژه‌های پیش‌ساخته را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کرده و بهبود قابل توجهی در کاهش زمان و افزایش هماهنگی تولید و اجرا گزارش کردند.

صدیقی و همکاران (صدیقی و همکاران، ۱۴۰۴) یک مدل ریاضی برای نگهداری پیشگیرانه خطوط ریلی ارائه کردند که با استفاده از الگوریتم ژنتیک توانست عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک مانند GAMS ارائه دهد.

عبادی و قاضی مرادی (عبادی و قاضی مرادی، ۱۴۰۴) در یک مرور نظام‌مند، نقش الگوریتم‌های فراابتکاری در مهندسی عمران را بررسی کرده و نشان دادند که این الگوریتم‌ها در حل مسائل پیچیده زمان‌بندی و تخصیص منابع بسیار مؤثر هستند.

در سطح بین‌المللی نیز مطالعات گسترده‌ای در زمینه زمان‌بندی پروژه‌ها و بهینه‌سازی آن‌ها انجام شده است.

ما و همکاران (Ma et al., 2022) یک الگوریتم ژنتیک برای زمان‌بندی پیشگیرانه پروژه تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند که توانست پایداری برنامه‌های زمان‌بندی را در برابر تغییرات محیطی افزایش دهد.

قروقی و همکاران (Ghoroqi et al., 2023) یک مدل چندهدفه برای زمان‌بندی چندپروژه‌ای تحت عدم قطعیت ارائه دادند که با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، به بهینه‌سازی هزینه، سود و ریسک تأمین پرداخت. وفکی و همکاران (Wefki et al., 2024) با ترکیب BIM و الگوریتم ژنتیک، چارچوبی برای زمان‌بندی هوشمند پروژه‌های ساختمانی ارائه کردند که موجب افزایش بهره‌وری و کاهش خطاهای برنامه‌ریزی شد. مورین و فرانسیس (Morin-Pépin & Francis, 2024) مدل زمان‌بندی فضایی–زمانی پویا را برای مدیریت بهتر فضای کارگاه توسعه دادند و نشان دادند که این مدل می‌تواند نرخ اشغال منابع را بهینه کند.

الکساکیس و همکاران (Alexakis et al., 2024) با مرور نظام‌مند، کاربرد الگوریتم ژنتیک در نوسازی انرژی‌محور ساختمان‌ها را بررسی کرده و نشان دادند که NSGA-II یکی

از پرکاربردترین روش‌ها در این حوزه است. لازاری و همکاران (Lazari et al., 2024) مدل چندهدفه‌ای برای پروژه‌های تکرارشونده ارائه کردند که در آن هزینه‌های منابع و تأخیر به‌صورت همزمان بهینه‌سازی شده‌اند.

ژائو و همکاران (Zhao et al., 2024) نیز مدل زمان‌بندی چندپروژه‌ای مقاوم تحت سیاست انتقال منابع را ارائه دادند که توانست پایداری برنامه‌های زمان‌بندی را در شرایط عدم قطعیت افزایش دهد. اقیله و همکاران (Aghileh et al., 2025) در یک مرور جامع، روش‌های حل مسائل زمان‌بندی چندپروژه‌ای با عدم قطعیت را بررسی کرده و بر اهمیت رویکردهای انعطاف‌پذیر مدیریت منابع تأکید کردند.

با وجود مطالعات گسترده در حوزه زمان‌بندی پروژه‌های عمرانی، بررسی پیشینه نشان می‌دهد که هنوز شکاف‌های پژوهشی مهمی وجود دارد. نخست آنکه بیشتر پژوهش‌ها بر الگوریتم ژنتیک و روش‌های مشابه متمرکز بوده و استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان به‌عنوان یک روش کارآمد در مسائل مسیریابی و بهینه‌سازی ترکیبیاتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. دوم، بسیاری از مطالعات موجود یا صرفاً بر کاهش زمان پروژه تمرکز داشته‌اند یا تنها یک یا دو معیار محدود مانند هزینه یا منابع را در نظر گرفته‌اند، در حالی که در پروژه‌های واقعی، تصمیم‌گیری نیازمند رویکردی چندمعیاره و جامع است.

۳-روش تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی بوده و با رویکرد کمی-مدلسازی انجام شده است. هدف اصلی آن توسعه یک مدل بهینه‌سازی برای زمان‌بندی پروژه‌های پل‌سازی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان می‌باشد. در این راستا، ابتدا ساختار مسئله زمان‌بندی پروژه مدل‌سازی شده و سپس الگوریتم پیشنهادی برای یافتن بهترین توالی اجرای فعالیت‌ها به کار گرفته شده است.

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی پروژه پل‌سازی به‌صورت یک گراف جهت‌دار بدون دور مدل‌سازی شده است. در این ساختار، گره‌ها نشان‌دهنده فعالیت‌های اجرایی پروژه و یال‌ها بیانگر روابط تقدم و تأخر (پیش‌نیازی) میان فعالیت‌ها هستند. به این ترتیب، هر فعالیت تنها در صورت اتمام تمامی فعالیت‌های پیش‌نیاز خود امکان شروع خواهد داشت.

هر فعالیت i در پروژه دارای ویژگی‌های زیر است:

-d_i: مدت زمان اجرای فعالیت

-R_i: بردار منابع مورد نیاز شامل نیروی انسانی، ماشین‌آلات و سایر منابع اجرایی

-مجموعه روابط پیش‌نیازی با سایر فعالیت‌ها

هدف اصلی در این مدل، تعیین یک توالی بهینه اجرای فعالیت‌ها به گونه‌ای است که مدت زمان کل پروژه حداقل گردد.

تابع هدف مسئله به صورت کمینه‌سازی مدت زمان تکمیل پروژه تعریف می‌شود.

$$\min T_{project} = \max(F_i)$$

که در آن Fiزمان پایان فعالیت i و Tproject زمان کل اتمام پروژه است.

مدل پیشنهادی تحت دو دسته قید اصلی تعریف می‌شود.

قید تقدم و تأخر فعالیت‌ها

برای رعایت وابستگی بین فعالیت‌ها، هر فعالیت تنها زمانی مجاز به شروع است که تمامی پیش‌نیازهای آن تکمیل شده باشند:

$$S_j \geq F_i \quad \forall (i,j) \in precedence$$

که در آن S_j زمان شروع فعالیت j و F_i زمان پایان فعالیت i است.

قید محدودیت منابع

در هر لحظه از زمان اجرای پروژه، مجموع منابع مورد استفاده توسط فعالیت‌های در حال اجرا نباید از ظرفیت موجود فراتر رود.

$$\sum_{i \in A(t)} R_i \leq R^{\max}$$

که در آن A(t) مجموعه فعالیت‌های در حال اجرا در زمان t و R است. در این مدل، هدف نهایی یافتن زمان‌بندی بهینه‌ای است که ضمن رعایت تمامی قیود تقدم و محدودیت منابع، کمترین مدت زمان تکمیل پروژه را تضمین نماید. این مسئله از نوع مسائل بهینه‌سازی ترکیبیاتی NP-سخت بوده و حل دقیق آن در ابعاد بزرگ با روش‌های کلاسیک با محدودیت‌های محاسباتی جدی مواجه است؛ از این‌رو در این پژوهش از الگوریتم کلونی مورچگان برای یافتن پاسخ‌های نزدیک به بهینه استفاده شده است.

۳-۱- الگوریتم کلونی مورچگان

در این پژوهش از الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه پل‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم یکی از روش‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که با الهام از رفتار جست‌وجوی غذا در مورچگان و استفاده از مفهوم فرومون، قادر به تولید پاسخ‌های نزدیک به بهینه در مسائل ترکیبیاتی پیچیده می‌باشد. ایده اصلی الگوریتم بر این اصل استوار است که مورچگان با حرکت روی مسیرهای مختلف و تبادل غیرمستقیم اطلاعات از طریق فرومون، به مرور زمان به سمت مسیرهای بهینه همگرا می‌شوند. در این پژوهش، هر مسیر معادل یک توالی اجرای فعالیت‌های پروژه در نظر گرفته شده است.

مراحل اجرای الگوریتم به شرح زیر است:

مقداردهی اولیه

در ابتدا ساختار گراف فعالیت‌های پروژه تعریف شده و مقدار اولیه فرومون‌ها برای تمامی مسیرها به صورت یکنواخت تعیین می‌شود:

$$\tau_{ij}(0) = \tau_0$$

که در آن $\tau_{ij}(0)$ مقدار اولیه فرومون روی یال بین فعالیت i و j بوده و τ_0 مقدار ثابت اولیه

ساخت راه‌حل توسط مورچگان

در این مرحله، هر مورچه یک زمان‌بندی کامل برای پروژه تولید می‌کند. انتخاب فعالیت بعدی بر اساس احتمال زیر انجام می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} . \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{k \in allowed} \tau_{ik}^{\alpha} . \eta_{ik}^{\beta}}$$

که در آن P_{ij} احتمال انتخال فعالیت j از حالت i، τ_{ij} میزان فرومون روی مسیر i به سمت j، η_{ij} معیار ابتکاری، α ضریب اهمیت فرومون، β ضریب اهمین اطلاعات ابتکاری و allowed مجموعه فعالیت‌های مجاز است.

ارزیابی راه‌حل‌ها

پس از تولید هر زمان‌بندی، کیفیت آن بر اساس تابع هدف (مدت زمان کل پروژه) ارزیابی می‌شود. در این مرحله، هرچه مدت زمان پروژه کمتر باشد، کیفیت راه‌حل بهتر در نظر گرفته می‌شود.

به‌روزرسانی فرومون‌ها

پس از ارزیابی، مقدار فرومون‌ها به‌روزرسانی می‌شود تا مسیرهای بهتر تقویت و مسیرهای ضعیف تضعیف شوند.

$$\tau_{ij} = (1-\rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}$$

که در آن ρ نرخ تبخیر فرومون و $\Delta\tau_{ij}$ میزان تقویت فرومون بر اساس کیفیت راه‌حل‌ها است.

این فرآیند به الگوریتم کمک می‌کند تا از گیر افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری کرده و به سمت جواب بهینه کلی همگرا شود.

۳-۲-پروژه مورد مطالعه

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم کلونی مورچگان در بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌های عمرانی، در این پژوهش یک پروژه نمونه پل‌سازی به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. این پروژه شامل مراحل مختلف اجرایی از جمله تجهیز کارگاه، عملیات خاکبرداری، اجرای شمع و فونداسیون پایه‌ها، احداث پایه‌های میانی، نصب قطعات پیش‌ساخته عرشه، بتن‌ریزی، روسازی، نصب تجهیزات ایمنی و عملیات نهایی تحویل پروژه می‌باشد. ساختار پروژه به‌گونه‌ای تعریف شده است که فعالیت‌ها دارای روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع بوده و اجرای همزمان برخی فعالیت‌ها نیز امکان‌پذیر است. مدت زمان اولیه اجرای پروژه بر اساس برنامه‌ریزی سنتی برابر با ۷۳۰ روز در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر فعالیت، منابع مورد نیاز شامل ماشین‌آلات سنگین، تجهیزات اجرایی و نیروی انسانی مشخص گردیده تا شرایط واقعی پروژه‌های پل‌سازی به‌صورت مناسب شبیه‌سازی شود. جزئیات فعالیت‌ها، مدت زمان اجرا، روابط پیش‌نیازی و میزان منابع مورد نیاز در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. جزئیات پروژه احداث پل

Task ID	نام فعالیت	پیش‌نیاز	تیم نصب	کارگر	بتن‌ریز	جرثقیل	دامپتراک	بیل مکانیکی
۱۰	تجهیز کارگاه و احداث راه دسترسی	-	۰	۱۰	۰	۰	۲	۱
۲۰	عملیات خاکبرداری مسیر پایه‌ها	۱۰	۰	۱۵	۰	۰	۵	۳
۳۰	حفاری و اجرای شمع‌های پایه ۱	۲۰	۰	۲۰	۰	۱	۳	۲
۴۰	بتن‌ریزی شمع‌های پایه ۱	۳۰	۰	۱۵	۳	۱	۲	۰
۵۰	اجرای فونداسیون پایه ۱	۴۰	۰	۲۰	۴	۲	۲	۱
۶۰	حفاری و اجرای شمع پایه ۲	۲۰	۰	۲۲	۰	۱	۳	۲
۷۰	بتن‌ریزی پایه ۲	۶۰	۰	۱۸	۳	۱	۲	۰
۸۰	اجرای فونداسیون پایه ۲	۷۰	۰	۲۰	۴	۲	۲	۱
۹۰	اجرای پایه میانی پل	۵۰،۸۰	۰	۲۵	۴	۲	۳	۲
۱۰۰	نصب قطعات پیش‌ساخته عرشه	۹۰	۴	۱۵	۰	۵	۲	۰
۱۱۰	بتن‌ریزی عرشه پل	۱۰۰	۳	۲۰	۵	۴	۳	۰
۱۲	اجرای عرشه نهایی و تکمیل سازه	۱۱۰	۳	۱۸	۳	۴	۲	۰
۱۳۰	روسازی و آسفالت مسیر پل	۱۲۰	۰	۲۰	۲	۰	۳	۱
۱۴۰	نصب تجهیزات ایمنی و جانبی	۱۳۰	۲	۱۵	۱	۲	۱	۰
۱۵۰	تست بارگذاری و کنترل کیفیت	۱۴۰	۳	۱۰	۰	۱	۰	۰
۱۶۰	عملیات تکمیلی و تحویل پروژه	۱۵۰	۰	۱۲	۰	۰	۲	۱

۳-۳- ساختار الگوریتم کلونی مورچگان

به‌منظور اجرای الگوریتم کلونی مورچگان و دستیابی به یک زمان‌بندی بهینه برای پروژه پل‌سازی، لازم است پارامترهای اصلی الگوریتم به‌صورت مناسب تنظیم شوند. عملکرد الگوریتم ACO به شدت تحت تأثیر مقادیر پارامترهایی نظیر تعداد مورچه‌ها، نرخ تبخیر فرومون، ضرایب اهمیت فرومون و اطلاعات ابتکاری، تعداد تکرارها و مقدار اولیه فرومون قرار دارد. انتخاب صحیح این پارامترها موجب افزایش سرعت همگرایی الگوریتم، جلوگیری از همگرایی زودهنگام و بهبود کیفیت پاسخ‌های تولیدشده می‌شود. در پژوهش حاضر، مقادیر پارامترها بر اساس مطالعات پیشین و چندین اجرای آزمایشی تنظیم گردید تا بهترین عملکرد در کاهش مدت زمان پروژه و بهینه‌سازی تخصیص منابع حاصل شود. جدول ۲ مقادیر نهایی پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم کلونی مورچگان را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقادیر نهایی پارامترهای مورد استفاده

پارامتر	نماد	مقدار
تعداد مورچه‌ها	□	۳۰
تعداد تکرار	□□□□	۱۰۰
ضریب اهمیت فرومون	α	۱
ضریب اهمیت اطلاعات ابتکاری	β	۲
نرخ تبخیر فرومون	ρ	۰/۵
مقدار اولیه فرومون	τ_0	۰/۱
معیار توقف	-	رسیدن به ۱۰۰ تکرار

٤- یافته‌ها

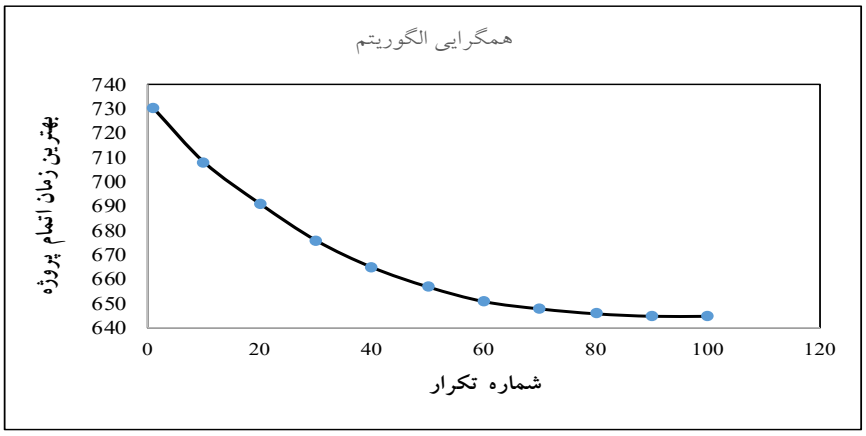
٤-١- روند همگرایی الگوریتم

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم کلونی مورچگان در فرآیند بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه پل‌سازی، روند تغییرات بهترین پاسخ حاصل در طول تکرارهای الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل روند همگرایی یکی از مهم‌ترین معیارهای سنجش کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری محسوب می‌شود، زیرا نشان می‌دهد الگوریتم با چه سرعت و پایداری به سمت پاسخ بهینه حرکت می‌کند. در پژوهش حاضر، مقدار تابع هدف یعنی مدت زمان کل پروژه در هر تکرار ثبت گردید و بهترین جواب تولیدشده توسط مورچگان مصنوعی در طول اجرای الگوریتم استخراج شد. نتایج نشان داد که الگوریتم در تکرارهای ابتدایی کاهش قابل توجهی در زمان اجرای پروژه ایجاد کرده و با افزایش تعداد تکرارها، روند تغییرات به تدریج پایدار شده است.

این موضوع بیانگر توانایی مناسب الگوریتم کلونی مورچگان در جستجوی فضای پاسخ و دستیابی به جواب نزدیک به بهینه برای مسئله زمان‌بندی پروژه پل‌سازی می‌باشد. جدول ۳ و نمودار ارایه شده در شکل ۱ روند همگرایی بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. روند همگرایی الگوریتم

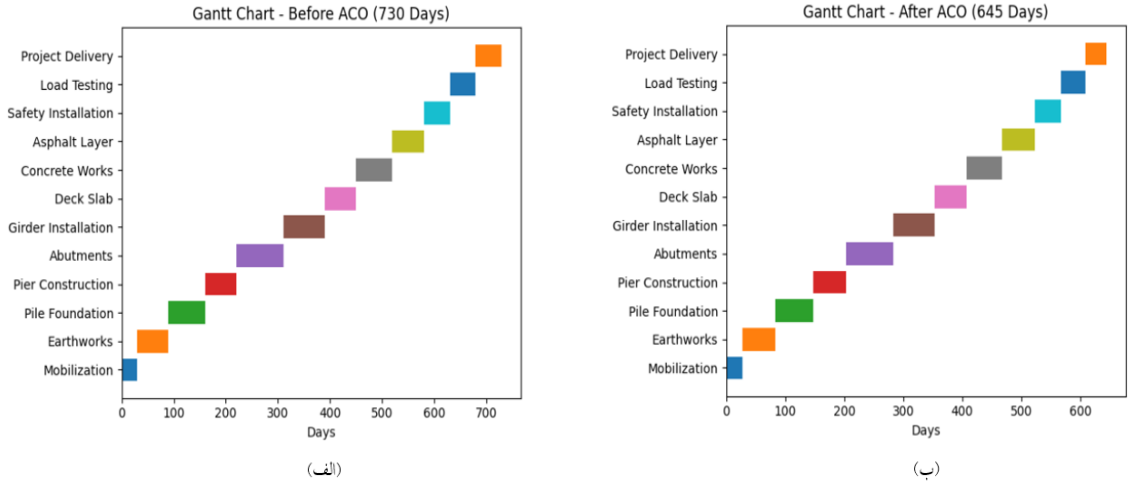
شماره تکرار	بهترین زمان اتمام پروژه
۱	۷۳۰
۱۰	۷۰۸
۲۰	٦٩١
۳۰	٦٧٦
٤٠	٦٦٥
٥٠	٦٥٧
٦٠	٦٥١
۷۰	٦٤٨
۸۰	٦٤٦
۹۰	٦٤٥
۱۰۰	٦٤٥



شکل ۱. نمودار همگرایی الگوریتم

با توجه به نمودار مشاهده می‌شود با گذت ۸۰ تکرار، مدت زمان اتمام پروژه تغییری نکرده و ٦٤٥ روز محاسبه شده است.

نقشه زمانی اجرای پروژه در شکل ۲ ارایه شده است.



شکل ۲. نقشه زمانی اجرای پروژه: الف) بدون بهینه‌سازی و ب) پس از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان

٤-۲-تحلیل تخصیص منابع

در این بخش، عملکرد الگوریتم کلونی مورچگان از منظر بهینه‌سازی تخصیص منابع در پروژه پل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از چالش‌های اصلی در پروژه‌های عمرانی، مدیریت همزمان منابع محدود شامل نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات اجرایی در کنار رعایت تقدم و تأخر فعالیت‌ها می‌باشد. در این پژوهش، الگوریتم ACO با هدف کاهش زمان‌های بیکاری منابع، جلوگیری از هم‌پوشانی بیش از حد فعالیت‌ها و افزایش بهره‌وری کلی سیستم به کار گرفته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با استفاده از مکانیزم جستجوی جمعی مورچگان و تبادل اطلاعات از طریق فرومون، تخصیص منابع به شکل متعادل‌تری در طول زمان پروژه انجام شده و تمرکز بار کاری در بازه‌های زمانی خاص کاهش یافته است. این امر موجب افزایش کارایی منابع و بهبود هماهنگی بین فعالیت‌های اجرایی شده است. در ادامه، نتایج عددی مربوط به میزان بهره‌برداری از منابع و مقایسه وضعیت قبل و بعد از بهینه‌سازی در قالب جدول ٤ ارائه شده است.

جدول ٤. نتایج تحلیل تخصیص منابع

منابع	روش سنتی	الگوریتم ACO
بیل مکانیکی	٦٤٪	۸۲٪
دامتراک	٦۱٪	۷۹٪
جرثقیل	۵۸٪	۸۱٪
تجهیزات بتن ریزی	٦٦٪	۸٤٪
منابع انسانی	٦۳٪	۸۳٪

بهره‌وری منابع بر اساس نسبت زمان استفاده فعال هر منبع به کل مدت زمان پروژه محاسبه گردید. در هر سناریو، با استخراج گانت‌چارت حاصل از زمان‌بندی، میزان حضور هر منبع در بازه‌های زمانی اجرای فعالیت‌ها تعیین و سپس میانگین آن به‌عنوان شاخص بهره‌وری گزارش شد. نتایج ارائه‌شده در جدول نشان‌دهنده مقایسه میزان بهره‌برداری از منابع کلیدی پروژه پل‌سازی در دو حالت «زمان‌بندی سنتی» و «زمان‌بندی بهینه‌شده با الگوریتم کلونی مورچگان (ACO)» است. این منابع شامل بیل مکانیکی، دامپتراک، جرثقیل، تجهیزات بتن‌ریزی و نیروی انسانی هستند که به‌عنوان مهم‌ترین عوامل اجرایی در پروژه‌های عمرانی نقش مستقیم در سرعت پیشرفت فعالیت‌ها دارند.

بر اساس نتایج، مشاهده می‌شود که در حالت روش سنتی، به دلیل نبود یک سازوکار هوشمند برای هماهنگی بین فعالیت‌ها و محدودیت‌های منابع، بخشی از ظرفیت تجهیزات در بازه‌های زمانی مختلف بلااستفاده مانده یا به‌صورت نامتوازن مورد استفاده قرار گرفته است. در مقابل، الگوریتم کلونی مورچگان با تولید چندین زمان‌بندی مختلف و انتخاب بهترین پاسخ بر اساس کمینه‌سازی مدت زمان پروژه و رعایت قیود منابع، توانسته است تخصیص منابع را به شکل مؤثرتری انجام دهد.

افزایش درصد بهره‌برداری در الگوریتم ACO (برای مثال افزایش بهره‌وری بیل مکانیکی از ٦٤٪ به ۸۲٪ و جرثقیل از ۵۸٪ به ۸۱٪) نشان‌دهنده کاهش زمان‌های بیکاری تجهیزات، کاهش تداخل فعالیت‌ها و توزیع یکنواخت‌تر عملیات اجرایی در طول زمان پروژه است. این بهبودها حاصل مکانیزم جستجوی جمعی مورچگان، به‌روزرسانی فرومون‌ها بر اساس کیفیت زمان‌بندی‌ها و تکرار فرآیند ساخت راه‌حل‌های مختلف در فضای جواب می‌باشد.

٤-۳- تحلیل تداخل فعالیت‌ها

تحلیل تداخل فعالیت‌ها در این پژوهش با هدف بررسی میزان هم‌پوشانی غیرمؤثر عملیات اجرایی و ارزیابی اثر آن بر بهره‌وری منابع انجام شده است. تداخل فعالیت‌ها زمانی رخ می‌دهد که چند فعالیت به‌صورت هم‌زمان نیازمند استفاده از یک یا چند منبع محدود باشند، در حالی که ظرفیت موجود پاسخگوی تقاضای هم‌زمان آن‌ها نیست. این وضعیت در روش زمان‌بندی سنتی معمولاً منجر به ایجاد صف انتظار، توقف موقت فعالیت‌ها و افزایش زمان‌های بیکاری منابع می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در حالت سنتی به دلیل نبود سازوکار بهینه‌سازی هوشمند، تداخل بین فعالیت‌های کلیدی پروژه به‌ویژه در بخش‌های خاکبرداری، اجرای فونداسیون و عملیات نصب سازه‌های اصلی به‌طور قابل توجهی مشاهده شده است که این امر موجب افزایش زمان‌های انتظار و کاهش بهره‌وری منابع گردیده است. در مقابل، الگوریتم کلونی مورچگان با بازتخصیص بهینه فعالیت‌ها و تنظیم توالی اجرای آن‌ها، توانسته است میزان تداخل فعالیت‌ها را به شکل محسوسی کاهش دهد؛ به‌طوری که فعالیت‌های دارای منابع مشترک در زمان‌های غیرهم‌پوشان یا با هم‌پوشانی کنترل‌شده اجرا شده‌اند نتایج تحلیل تداخل فعالیت‌ها در جدول ۵ ارایه شده است.

جدول ۵. تحلیل تداخل فعالیت‌ها

شاخص	روش سنتی	الگوریتم ACO
تعداد تداخل فعالیت‌ها	۳۱	٢٤
مجموع تاخیر تجیعی	۱۱۰ روز	۸٦ روز
میانگین زمان انتظار فعالیت	۷ روز	٤ روز

٤-٤-تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم

در این بخش، هدف بررسی میزان تأثیر پارامترهای کلیدی الگوریتم کلونی مورچگان بر کیفیت جواب‌ها (زمان کل پروژه، همگرایی و پایداری راه‌حل) است. تحلیل حساسیت به‌منظور ارزیابی رفتار الگوریتم در برابر تغییر مقادیر پارامترها و شناسایی تنظیمات بهینه انجام می‌شود. برای این منظور، هر پارامتر در بازه‌های مختلف تغییر داده شده و عملکرد الگوریتم از نظر مدت

زمان پروژه، نرخ همگرایی و کیفیت تخصیص منابع مورد ارزیابی قرار گرفته است، در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده‌اند. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها در جدول ٦ ارایه شده است.

جدول ٦. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها

تعداد مورچه		تعداد تکرار		ضریب اهمیت فرومون		ضریب اهمیت اطلاعات ابتکاری		نرخ تبخیر فرومون	
مقدار	زمان اتمام	مقدار	زمان اتمام	مقدار	زمان اتمام	مقدار	زمان اتمام	مقدار	زمان اتمام
۱۰	٦٦٨	۵۰	٦٧٢	۰/۵	٦٦٢	۱	٦٦۰	۰/۲	٦٦١
۲۰	٦٥٧	۱۰۰	٦٤٥	۱	٦٥١	۲	٦٥٢	۰/٤	٦٥١
۳۰	٦٤٥	۲۰۰	٦٤٢	۱/۵	٦٤٥	۳	٦٤٥	۰/۵	٦٤٥
۵۰	٦٤٢	۳۰۰	٦٤٢	۲	٦٤٧	٤	٦٤٦	۰/۷	٦٤٩
۸۰	٦٤٤	۵۰۰	٦٤۰	۳	٦٥٦	۵	٦٥٥	۰/۹	٦٥٨

بر اساس نتایج جدول تحلیل حساسیت مشاهده می‌شود که هر یک از پارامترهای الگوریتم کلونی مورچگان تأثیر قابل توجهی بر کیفیت زمان‌بندی پروژه دارند. در بخش تعداد مورچه‌ها، افزایش تعداد از ۱۰ به ۳۰ باعث بهبود قابل توجه جواب از ٦٦٨ به ٦٤٥ روز شده است، اما پس از این مقدار، بهبود چشمگیری مشاهده نمی‌شود و حتی در مقادیر بالاتر (۵۰ و ۸۰) تغییرات جزئی و نوسانی در نتایج دیده می‌شود که نشان‌دهنده اشباع عملکرد الگوریتم و افزایش هزینه محاسباتی بدون بهبود محسوس است.

در مورد تعداد تکرارها، افزایش آن از ۵۰ به ۲۰۰ منجر به کاهش زمان پروژه از ٦٧٢ به ٦٤٢ روز شده و پس از آن تقریباً به نقطه پایداری رسیده است که بیانگر همگرایی الگوریتم در حوالی این مقدار است. در خصوص ضریب اهمیت فرومون، بهترین عملکرد در مقدار ۱ تا ۱,۵ مشاهده شده که منجر به دستیابی به مقدار بهینه ٦٤٥ روز شده است، در حالی که مقادیر بالاتر باعث تمرکز بیش از حد بر مسیرهای قبلی و کاهش تنوع جستجو شده‌اند. همچنین در ضریب اطلاعات ابتکاری، مقدار ۳ به‌عنوان مقدار بهینه شناسایی شده که تعادل مناسبی بین اکتشاف و بهره‌برداری ایجاد کرده است و تغییرات بیشتر از این مقدار منجر به افت کیفیت جواب شده است. در نهایت، نرخ تبخیر فرومون نشان می‌دهد که مقدار ۰,۵ بهترین عملکرد را داشته و مقادیر کمتر یا بیشتر از آن باعث کاهش کارایی الگوریتم شده‌اند؛ به‌طوری که نرخ تبخیر پایین موجب گیر افتادن در بهینه‌های محلی و نرخ‌های بالا موجب از بین رفتن حافظه مفید مسیرها شده است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که تنظیم مناسب پارامترها نقش کلیدی در دستیابی به جواب بهینه ٦٤٥ روز داشته و تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری در عملکرد الگوریتم بسیار تعیین‌کننده است.

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی پروژه‌های پل‌سازی به‌عنوان یک مسئله پیچیده بهینه‌سازی با محدودیت منابع و روابط پیش‌نیازی مدل‌سازی شد و ساختار آن به‌صورت گراف جهت‌دار بدون دور تعریف گردید که امکان نمایش دقیق وابستگی بین فعالیت‌ها را فراهم می‌کند.

الف) تابع هدف مدل، حداقل‌سازی مدت زمان کل پروژه (Makespan) در نظر گرفته شد و قیود اصلی شامل محدودیت تقدم و تأخر فعالیت‌ها و محدودیت ظرفیت منابع در هر بازه زمانی به‌طور کامل در مدل لحاظ گردید.

ب) برای حل مسئله، از الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) به‌عنوان یک روش فراابتکاری الهام‌گرفته از رفتار طبیعی

مورچگان استفاده شد که توانایی بالایی در جستجوی فضای پاسخ و یافتن زمان‌بندی‌های بهینه دارد.

ج) نتایج پیاده‌سازی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قادر است با تولید زمان‌بندی‌های کارا، مدت زمان کل پروژه را از ۷۳۰ روز در حالت سنتی به ٦٤٥ روز کاهش دهد که بیانگر بهبود قابل توجه در کارایی زمان‌بندی است.

د) تحلیل تخصیص منابع نشان داد که در روش سنتی، به دلیل نبود هماهنگی مناسب بین فعالیت‌ها، میزان استفاده از منابع پایین‌تر و نامتوازن بوده است، در حالی که الگوریتم ACO با بهینه‌سازی توالی فعالیت‌ها، بهره‌برداری از منابع را به‌طور میانگین بین ۱۸ تا ۲۵ درصد افزایش داده است.

ه) بررسی تداخل فعالیت‌ها نشان داد که الگوریتم پیشنهادی با کاهش هم‌پوشانی‌های غیرمؤثر و مدیریت بهتر محدودیت منابع، موجب کاهش توقف فعالیت‌ها و روان‌تر شدن جریان اجرایی پروژه شده است.

و) نتایج تحلیل همگرایی الگوریتم بیانگر آن است که الگوریتم کلونی مورچگان در تعداد تکرار مشخصی به نقطه پایداری رسیده و توانسته است بدون نوسانات شدید به جواب بهینه نزدیک شود.

ز) تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم نشان داد که نرخ تبخیر فرومون، تعداد مورچه‌ها، و ضرایب α و β نقش کلیدی در کیفیت راه‌حل نهایی دارند و تنظیم مناسب آن‌ها تأثیر مستقیم بر کاهش زمان پروژه دارد.

ح) در مجموع، نتایج تحقیق تأیید می‌کند که استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان در زمان‌بندی پروژه‌های پل‌سازی می‌تواند نسبت به روش‌های سنتی، بهبود قابل توجهی در زمان اجرا، بهره‌وری منابع و کاهش تداخل فعالیت‌ها ایجاد کند.

٦- مراجع

– آپرناک، آرش؛ خسروی، مهتاب؛ تقی‌زاده، شادی؛ حسینی، سیدمحسن (۱٤۰۳). بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی پیش‌ساخته با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مطالعات بین‌رشته‌ای در مدیریت و مهندسی.*

– اکبری، محمد؛ اکبری، داوود؛ نجیبی، فاطمه؛ حاجی‌زاده، وحید (۱٤۰۱). مدیریت دانش در سازمان پروژه‌محور و تأثیر آن بر کاهش تأخیرات پروژه‌های راه‌سازی خرا سان جنوبی. *مهندسی سازه و ساخت*، ۹(۲)، ٤۳–۲۵.

doi.org/۱۰/۲۲۰۶۵/jsce.۲۰۲۱/۲۱۳۳۳۷/۲۰۳۲

– صالحی، مجتبی؛ رحیمی، یلدا؛ شریعتی، شهره (۱٤۰۲). مدل‌سازی چندهدفهٔ فازی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندمهارته: با قابلیت تغییر سطح مهارت‌ها و انقطاع فعالیت‌ها. *پژوهش در مدیریت تولید و عملیات*، ۱٤(۱)، ۲۰–۱.

– صدیقی، علیر ضا؛ قندهاری، مهسا؛ ابطحی، سیدمهدی (۱٤۰٤). ارائه یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی عملیات نت پیشگیرانه و مبتنی بر وضعیت خطوط ریلی و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *مدیریت صنعتی*، ۱۷(۱)، ۳۳–۱.

– عبادی، افشین؛ قاضی‌مرادی، مصطفی. (۱٤۰٤). بهینه‌سازی در مهندسی عمران مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری. *ماهنامه عمران و پروژه*، ۷(۱)، ٦۳–۳۹.

doi.org/۱۰/۲۲۰۳٤/cpj.۲۰۲۵/۵۰۳۹۹۸/۱۳٤۲

– کفاشی، ابوذر؛ عدالت‌پناه، سیداحمد؛ نجاتی، فایزه (۱٤۰۱). برر سی تأثیر مدیریت پروژه، مدیریت ساخت و مدیریت ریسک بر زمان، هزینه و روند اجرایی پروژه‌ها (مطالعهٔ موردی: انبوه سازی ساختمان). *پژوهش‌های نوین در ارزیابی عملکرد*، ۱(۳)، ۱۷۰–۱٦۰.

– گل‌پیرا، هیرش؛ با بایی تیرکلایی، عر فان؛ تقوی‌فرد، محمدتقی؛ ظاهری، فایق (۱٤۰۰). زمان‌بندی چندپروژه‌ای بهینه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و کیفیت در زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز: الگوریتم ژنتیک ترکیبی. *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۹(٦۱)، ۹۳–٦۵.

-Lazari, V., Chassiakos, A., & Karatzas, S. (2024). Multi-objective resource-constrained scheduling in large and repetitive construction projects. *Algorithms*, 17(8), 351.
-Ma, Z., Zheng, W., He, Z., Wang, N., & Hu, X. (2022). A genetic algorithm for proactive project scheduling with resource transfer times. *Computers & Industrial Engineering*, 174, 108754.
-Morin-Pépin, S., & Francis, A. (2024). Dynamic spatiotemporal scheduling for construction building projects. *Buildings*, 14(10), 3139.
-Nekoueian, R., Servranckx, T., & Vanhoucke, M. (2025). A dynamic learning-based genetic algorithm for scheduling resource-constrained projects with alternative subgraphs. *Applied Soft Computing*, 180, 113316.
-Shabani, R., Torp, O., Klakegg, O. J., & Johansen, A. (2024). Managing uncertainty in the construction phase of road projects. In *Risk Management in Construction: Recent Advances*.
-Wefki, H., Elnahla, M., & Elbeltagi, E. (2024). BIM-based schedule generation and optimization using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 164, 105476.
-Zhao, Y., Hu, X., Wang, J., & Cui, N. (2024). A robust multi-project scheduling problem under a resource dedication-transfer policy. *Annals of Operations Research*, 337(1), 425-457.
-Aghileh, M., Tereso, A., Alvelos, F., & Lopes, M. O. M. (2025). Multi-project scheduling with uncertainty and resource flexibility: A narrative review and exploration of future landscapes. *Algorithms*, 18(6), 314.
-Alexakis, K., Benekis, V., Kokkinakos, P., & Askounis, D. (2024). Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review. *Energy and Buildings*, 328, 115216.
-Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., & Mejía, G. (2025). Deficiencies causes in road construction scheduling: Perspectives from construction professionals. *Heliyon*, 11(2), e41514.
-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), 2023.
-Kostrzewa-Demczuk, P. (2023). Construction schedule versus various constraints and risks. *Applied Sciences*, 14(1), 196.

Optimization of Bridge Construction Project Scheduling Using the Ant Colony Optimization Algorithm

Hosein Mohammadi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

.

Seyed Ali Ziaee, *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.*

.

E-mail: sa-ziaee@um.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Time and cost management in bridge construction projects is considered one of the most important challenges in the construction industry due to the complexity of activities, resource constraints, and the interdependence of execution operations. In this study, an ant colony optimization (ACO)-based approach is proposed for optimizing the scheduling of bridge construction projects. The main objective is to reduce project completion time, optimize resource allocation, and enhance the efficiency of activity execution under real project conditions. In the proposed model, bridge construction activities are defined as a network of interdependent tasks, and the ant colony optimization algorithm determines the optimal execution sequence by simulating the foraging behavior of ants in finding the shortest path. To evaluate the performance of the proposed method, data from a sample bridge construction project with an initial duration of 730 days was analyzed and compared with traditional scheduling methods. The results show that the use of the ant colony optimization algorithm significantly reduces project duration, improves resource efficiency, and decreases activity interference. According to the numerical results, the total project duration was reduced from 730 days to 645 days, representing an improvement of approximately 11.6% in scheduling performance. Furthermore, effective utilization of human and machine resources increased by about 18%, and delays caused by activity conflicts decreased by nearly 22%. In addition, indirect project costs were reduced by approximately 9% due to the shorter execution time compared to the traditional method.

Keywords: Bridge Construction, Project Scheduling, Ant Colony Optimization, Human Resources