ارزیابی روش‌های فراابتکاری به‌منظور بهینه‌سازی خط پروژه مسیرهای راه

محسن ابوطالبی اصفهانی*، استادیار دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان
علیرضا غنی‌زاده، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان
نسرین حیدرآبادی‌زاده، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان

Email: m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۳/۲۰ – پذیرش: ۹۶/۰۵/۳۰

چکیده

در طراحی مسیر، بخش روسازی راه دارای جزئیات مشخص بوده و هزینه‌ی آن اجتناب‌ناپذیر است. اما در بخش زیرسازی، می‌توان با بهینه نمودن محل خط پروژه، هزینه‌ها را کاهش داد. یکی از هزینه‌های سنگین زیرسازی، هزینه عملیات خاکی است که به شدت به خط پروژه طراحی شده وابسته است. بنابراین، هدف این پژوهش، ارزیابی روش‌های مختلف فراابتکاری برای پیشنهاد توسعه روشی به منظور بهینه‌سازی خط پروژه، برای داشتن کمترین هزینه عملیات خاکی، است. بدین منظور، ابتدا تابع هدف و محدودیت‌های مسئله فرمول‌بندی و سپس کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم در هر سومه به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند. خط پروژه اولیه و موقعیت سومه‌ها طبق ضوابط و نیازها تعیین گردیدند. تابع هدف به صورت مجموع قدر مطلق اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین و محدودیت‌ها به‌صورت حداقل و حداکثر شیب طولی، حداقل ارتفاع پل‌ها، عدم تداخل قوس‌ها و حداقل طول قوس قائم تعریف شده‌اند. برای بهینه‌سازی مسئله از الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام پرندگان شتاب‌دار و کرم شب‌تاب در محیط MATLAB استفاده شده است. برای ارزیابی بهتر روش، سه مسیر مختلف در سه توپوگرافی دشت، تپه‌ماهور و کوهستانی طراحی و خط پروژه اولیه توسط هر یک از این الگوریتم‌ها، بهینه‌سازی شد. علاوه بر مجموع قدر مطلق اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین، سنجش این بهینه‌سازی با نسبت حجم خاکریزی به حجم خاکبرداری و هزینه عملیات خاکی صورت گرفت. نتایج، نشان‌دهنده درصد بالای بهینگی توسط الگوریتم کرم شب‌تاب و سپس ازدحام پرندگان و ژنتیک، برای هر سه توپوگرافی است. بنابراین، می‌توان با به‌کارگیری الگوریتم کرم شب‌تاب، هزینه‌های زیرسازی مسیر را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. همچنین، تکرار و زمان صرف شده جهت حل مسئله نشان می‌دهد که زمان لازم برای بهینه‌سازی و دست یافتن به جواب بهینه، در مقابل کاهش هزینه‌ها بسیار ناچیز است.

واژه‌های کلیدی: روش‌های فراابتکاری، بهینه‌سازی، خط پروژه، الگوریتم کرم شب‌تاب، الگوریتم ازدحام پرندگان شتاب‌دار

۱. مقدمه

طراحی راه شامل سه مرحله‌ی طراحی پلان افقی، ترسیم خط پروژه و محاسبه احجام خاکی است. پس از طراحی پلان مسیر، بیشترین عاملی که بر هزینه‌های احداث راه تأثیر می‌گذارد، طراحی یک خط پروژه مناسب است، به طوری که بتواند حجم عملیات خاکی را به‌اندازه کافی کاهش دهد. خط پروژه بهینه بایستی علاوه بر کم کردن حجم عملیات خاکی، بتواند محدودیت‌هایی از قبیل حداکثر و حداقل شیب طولی، حداقل طول قوس قائم، ارتفاع محل پل‌ها، ارتفاع نقاط اجباری و عدم تداخل قوس‌ها را در نظر بگیرد.

مقدار عملیات خاکی به‌شدت به خط پروژه طراحی‌شده وابسته است و یک خط پروژه خوب می‌تواند تأثیر زیادی بر هزینه‌های ساخت‌وساز نهایی بگذارد (هار و همکاران، ۲۰۱٤). با استفاده از رایانه‌ها و مدل‌های ریاضی مناسب، مهندسین راه قادرند تا فرایند طراحی را با سرعت قابل توجهی انجام دهند و به یک طراحی بهینه برسند. مطالعات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی به‌دست آمده از مدل‌های ریاضی و برنامه‌های کامپیوتری می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های ساخت‌وساز، در مقایسه با طراحی دستی، حاصل کند. مدل‌های موجود، باوجود عملکرد خوب، هنوز نقایص زیادی دارند و به‌طور گسترده در دنیای واقعی به‌کار گرفته نشده‌اند. بنابراین، یک مدل مناسب و همچنین یک الگوریتم کارآمد، با سرعت اجرای مناسب، هنوز هم برای بهینه‌سازی مسیرها نیاز است (جها و همکاران، ۲۰۰٦). طراحی خط پروژه عمدتاً بر هزینه ساخت‌وساز مسیر، ایمنی و عملکرد عملیاتی ترافیک، تأثیر می‌گذارد. بهینه‌سازی خط پروژه منجر به حداقل شدن مقدار کل عملیات خاکی می‌شود (السوبکی، ۲۰۱٤).

هدف این پژوهش، توسعه روشی به‌منظور بهینه‌سازی خط پروژه با کمترین هزینه احجام عملیات خاکی است. در حقیقت، فرض بر این است که مهندس طراح خط پروژه اولیه را طراحی نموده و روش پیشنهادی قصد بهینه‌سازی این خط پروژه را دارد. بنابراین، تعداد نقاط سومه‌ها[1] (PVI) در خط پروژه معلوم است. تابع هدف به‌صورت مجموع قدر مطلق اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین و محدودیت‌ها به‌صورت حداقل و حداکثر شیب طولی، ارتفاع نقاط اجباری، عدم تداخل قوس‌ها و حداقل طول قوس قائم در نظر گرفته شده‌اند. بدین منظور، از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک[2] (GA)، ازدحام پرندگان شتاب‌دار[3] (APSO) و کرم شب‌تاب[4] (FA) در سه توپوگرافی دشت، تپه‌ماهور و کوهستانی، در محیط نرم‌افزار MATLAB، استفاده شده است. همچنین، الگوریتم‌های فوق به‌منظور حل مسئله از دیدگاه جواب بهینه و سرعت اجرا، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

پرسش‌های مطرح‌شده در خصوص مطالعه حاضر عبارت‌اند از: کدامیک از الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی مؤثرترند؟ مقدار تأثیر هر یک چقدر است؟ کدامیک به حل بهینه سراسری دست‌یافته و کدامیک در حل محلی متوقف می‌شوند؟ آیا با توجه به افزایش هزینه طراحی و زمان طراحی، استفاده از این الگوریتم‌ها مقرون به صرفه است؟

۲. پیشینه تحقیق

تاکنون محققین زیادی به بهینه‌سازی خط پروژه پرداخته‌اند. ترایپیا (۱۹۷۹) با استفاده از برنامه‌نویسی اعداد صحیح مختلط، هزینه‌های عملیات خاکی را حداقل کرد. او پس از طراحی مسیر، خط پروژه اولیه‌ای ترسیم کرد. سپس با تغییر ارتفاع سومه‌ها، هزینه

[1]- Point of vertical intersection
[2]- Genetic Algorithm
[3]- Accelerated Particle Swarm Optimization
[4]- Firefly Algorithm

عملیات خاکی را کم کرد.

ایسا (۱۹۸۸) ابتدا یک مدل برای رسم تمامی خط پروژه‌های قابل قبول ارائه کرد. سپس، با استفاده از برنامه‌نویسی خطی، هزینه‌های عملیات خاکی را حداقل نمود. نتایج نشان‌دهنده اختلاف ۲۳ درصدی بین خط پروژه طراحی شده و بهینه شده است.

یک روش برای کاهش احجام خاکی، نزدیک کردن خط پروژه به خط زمین طبیعی است. از آنجا که نزدیک کردن خطوط در محور راه صورت می‌گیرد، ممکن است سبب نابرابری حجم خاکبرداری و خاکریزی شود. گوکتپ و لاو (۲۰۰۳) یک ارتفاع وزنی[1]فرضی به‌جای ارتفاع محور راه، ارائه کردند. در نتیجه، نزدیک کردن خط پروژه به خط وزنی، سبب برقراری تعادل میان احجام خاکبرداری و خاکریزی و کم شدن مقدار حجم عملیات خاکی شد. آن‌ها بار دیگر با قرار دادن ضریب تورم و انقباض و نوع خاک، به نتایج مقرون به‌صرفه‌تری دست یافتند (گوکتپ و لاو، ۲۰۰٤). گوکتپ و همکاران (۲۰۰۸) از سیستم تصمیم‌گیری فازی[2]برای تعیین تأثیر تورم و انقباض در بهینه‌سازی حجم عملیات خاکی مسیر بهره گرفتند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که این روش، روش‌های قبلی بهینه‌سازی خط پروژه را بهبود می‌بخشد. آن‌ها مجدداً علاوه بر نظریه مجموعه فازی و روش ارتفاع وزنی که به ترتیب برای توصیف رفتار تورم و انقباض و محاسبه حجم خاک به‌کار رفت، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی خط پروژه استفاده کردند، که در آن تابع هدف مجموع مربعات اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین را حداقل می‌کند (گوکتپ و همکاران، ۲۰۰۹).

دابور و همکاران (۲۰۰۸)، قوس قائم را با استفاده از برنامه‌نویسی غیرخطی بهینه کردند. آن‌ها تابع هدف را مجموع اختلاف ارتفاع نقاط زمین و خط پروژه تعریف و برای حداقل کردن آن از نرم‌افزار لینگو[3] استفاده کردند. در بهینه‌سازی خطی، متغیرهای تصمیم شامل: شیب اول، شیب دوم، ارتفاع شروع و پایان قوس قائم است. اما آن‌ها با ارائه مدل بهینه‌سازی غیرخطی، متغیرهای تصمیم را به کیلومتر شروع و پایان قوس قائم تقلیل دادند.

میل و پیانتاناکولاچای (۲۰۱۳) از مدل رگرسیون چندجمله‌ای برای یافتن مختصات سومه‌های خط پروژه بهینه و دو الگوریتم تکرارشونده برای رسیدگی به محدودیت‌های طراحی، استفاده کردند. محدودیت‌های طراحی شده شامل حداکثر شیب مجاز، حداقل طول مورد نیاز قوس قائم و عدم تداخل دو قوس متوالی و تابع هدف به‌صورت مجموع اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین در نظر گرفته شد. بهترین خط پروژه به‌دست آمده از معادله درجه ۹ با ضریب حداقل مربعات $R^2 = 0.95$ بوده است.

بابابیک و منجم (۲۰۱۲) هزینه‌های مسیر را با استفاده از معادله ریاضی فرموله و خط پروژه مسیرهای راه‌آهن را با توجه به هزینه‌های عملیاتی و ساخت‌وساز بهینه کردند. هزینه‌های عملیاتی و ساخت‌وساز که به تغییرات شیب حساس‌اند، به‌عنوان متغیرهای تصمیم در مدل گنجانده شدند. برای حل تابع هدف، یک روش جستجوی مستقیم برای یافتن فضای جستجو و یک الگوریتم حل‌کننده (الگوریتم ژنتیک) برای پیدا کردن جواب بهینه به گونه‌ای که تابع هدف را به مقدار زیاد کمینه کند، به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل، علاوه بر پیدا کردن مسیر بهینه در خطوط راه‌آهن، خروجی‌های مفیدی از قبیل نمودار زمان و سرعت و نیروی کشش کل را با توجه به مسیر نهایی در اختیار قرار می‌دهد و زمان لازم برای طراحی مسیر را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

کاظمی و شفاهی (۲۰۱۳) از الگوریتم ازدحام ذرات

[1]- Weighted ground elevation
[2]- Fuzzy decision support system
[3]- LINGO

برای بهینه‌سازی مسیر و از پردازش موازی[1]برای کاهش زمان اجرا و دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر و اقتصادی‌تر استفاده کردند. محدودیت‌ها شامل حداقل شعاع قوس افقی، حداکثر شیب طولی و حداقل طول قوس قائم است و از روش جریمه برای برخورد با آن‌ها استفاده شد. نتایج به دست‌آمده نشان می‌دهد که حل جدا از هم این دو روش می‌تواند کارایی پردازش موازی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد؛ اما ممکن است دقت نتایج کم شود.

هار و همکاران (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن موانع فیزیکی مانند کوه و رودخانه و شیب‌های خاکبرداری و خاکریزی و با استفاده از مدل برنامه‌نویسی اعداد صحیح مختلط، به بهینه‌سازی خط پروژه پرداختند. هزینه محاسبه شده بدون در نظر گرفتن شیب‌ها، خطای قابل توجهی بیش از ۲۰٪ ایجاد می‌کند و انجام عملیات خاکی بدون در نظر گرفتن موانع غیر واقعی است. نتایج نشان می‌دهد که با قرار دادن شیب‌ها در مدل می‌توان به جواب‌های مناسب، بدون افزایش قابل توجه زمان، رسید.

روشنی و کوچک‌زاده (۱۳۸۷) بیان کردند که در پروژه‌های آبیاری و زهکشی، عملیات خاکی بخش بزرگی از هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد و روش‌های برآورد حجم عملیات که تاکنون ارائه شده، کم‌دقت و بسیار وقت‌گیر می‌باشند. آن‌ها در پژوهش خود، زمین و سطح کانال را با شبکه مثلثی نامنظم شبیه‌سازی کرده و به کمک روش عددی نیوتن-رافسون، رقوم بهینه خط پروژه کانال را محاسبه کردند. مقایسه نتایج عددی روش پیشنهادی با نتایج روش‌های متداول نشان می‌دهد که روش جدید دقت محاسبات را به میزان حدود سه برابر افزایش داده که می‌تواند اثر مستقیم در افزایش دقت محاسبه هزینه‌های طرح داته باشد و خط پروژه کانال را با توجه به حجم عملیات خاکی بهینه نماید.

باباپور و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود، مدل ابتکاری برآورد مساحت عملیات خاکی برای طراحی پروفیل طولی جاده‌ها را ارائه کردند. آن‌ها بیان کردند که عملیات خاکی جاده‌های جنگلی مهم‌ترین مرحله ساخت جاده است و طراحی هوشمندانه خط پروژه جاده جنگلی تأثیر مهمی در میزان حجم عملیات خاکی دارد. برای این کار، آنها ابتدا مدلی که بتواند سطح عملیات خاکی را با دقتی قابل قبول محاسبه کند، ارائه کردند. در این پژوهش، برنامه ابتکاری محاسبه سطح عملیات خاکی با توجه به شاخص‌های هندسی عرضی استاندارد جاده جنگلی در محیط نرم‌افزار MATLAB تولید شد. آزمون آماری روی مدل ساخته شده نشان داد که مدل از اعتبار مناسبی برخوردار است و برنامه ابتکاری بدون کاهش دقت محاسبات، ساعت‌ها زمان انجام محاسبات را نسبت به روش متداول کاهش داده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در بیشتر مطالعات، به بهینه‌سازی با استفاده از یک الگوریتم پرداخته و کمتر از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک، ازدحام پرندگان و کرم شب‌تاب استفاده شده و مقایسه خاصی هم بین روش‌های مختلف صورت نگرفته است. علاوه بر این، محدودیت‌هایی که لازمه هر پروژه است در هیچیک از این پژوهش‌ها در نظر گرفته نشده است. لذا، در پژوهش حاضر، به بهینه‌سازی و مقایسه روش‌های یاد شده، با در نظر گرفتن محدودیت‌های بیشتر، پرداخته شده است.

۳. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

۱-۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA)، توسط هلند و همکاران (۱۹۷۵) در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ توسعه یافت که در واقع مدل یا چکیده‌ای از تکامل بیولوژیک بر اساس تئوری

[1] Parallel processing

انتخاب طبیعت چارلز داروین بود. او اولین نفری بود که از تقاطع، نوترکیبی، جهش و انتخاب بر اساس مطالعه سیستم‌های انطباقی و مصنوعی استفاده کرد. این عملگرهای ژنتیک، بخش اساسی الگوریتم ژنتیک را به‌عنوان راهکارهای حل مسئله تشکیل می‌دهند. ماهیت این الگوریتم به این صورت است که ابتدا یک تابع بهینه‌سازی را به عنوان رشته‌ای از بیت‌ها یا رشته‌های کاراکتری برای نمایش کروموزوم کدگذاری می‌کند. عملیات دست‌کاری رشته‌ها توسط عملگرهای ژنتیکی انجام می‌شود و انتخاب بر اساس تابع هدف، با هدف پیدا کردن جواب خوب (جواب بهینه) برای مسئله مورد نظر، است. این کار اغلب توسط مراحل زیر انجام می‌شود: ۱) کدگذاری تابع هدف یا تابع هزینه، ۲) تعریف تابع هدف یا معیارهای انتخاب، ۳) ایجاد جمعیتی از افراد، ٤) انجام چرخه تکامل یا تکرار با ارزیابی تابع هدف از تمامی افراد موجود در جامعه، ایجاد یک جمعیت جدید با انجام ادغام و جهش، تولیدمثل مناسب با ارزیابی تابع هدف و جایگزینی افراد در جمعیت قدیمی و تکرار دوباره با استفاده از جمعیت جدید و ٥) رمزگشایی نتایج به دست‌آمده از جواب مسئله و انتخاب بهترین جواب (یانگ، ۲۰۱٤).

۲-۳. الگوریتم ازدحام پرندگان شتاب‌دار

بهینه‌سازی ازدحام ذرات (پرندگان) توسط کِندی و ابرهارت (۱۹۹٥) بر اساس رفتار گروهی در طبیعت، مانند ماهی‌ها و پرندگان توسعه یافت. این الگوریتم، با توجه به‌سادگی و انعطاف‌پذیری، به یکی از پراستفاده‌ترین الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی تبدیل شده است. در این الگوریتم، به‌جای استفاده از جهش و تقاطع، از اعداد واقعی تصادفی و ارتباط جهانی بین ذرات استفاده می‌شود. بنابراین، این الگوریتم برای پیاده‌سازی ساده‌تر است، چرا که هیچ‌گونه رمزگذاری یا رمزگشایی برای پارامترها رشته‌های دودویی انجام نمی‌دهد. بهینه‌سازی ازدحام پرندگان شتاب‌دار توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ توسعه داده شد و پس از آن نسبت به انواع دیگر الگوریتم پرندگان بیشتر مورد استفاده قرار گرفت. در APSO بردار سرعت توسط یک فرمول ساده تولید می‌شود (یانگ، ۲۰۱٤):

$$v_i^{t+1} = v_i^t + \beta\left(g^* - x_i^t\right) + \alpha\varepsilon_t \qquad (۱)$$

در این رابطه، v_i^{t+1} سرعت ذره i ام در تکرار t+1، v_i^t سرعت ذره i ام در تکرار t، g^* بهترین موقعیت کل گروه و x_i^t موقعیت ذره i ام در تکرار t و α و β ثابت شتاب می‌باشند. به‌روزرسانی موقعیت مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \qquad (۲)$$

مقدار عملی برای پارامترهای ازدحام پرندگان شتاب‌دار برابر $\alpha \approx 0.1 \sim 0.4$ و $\beta \approx 0.1 \sim 0.7$ و $\gamma \approx 0.9 \sim 0.97$ (که γ یک پارامتر کنترلی است) در نظر گرفته می‌شود. با این حال، این پارامترها باید بر اساس مسئله بهینه‌سازی تنظیم شوند (یانگ، ۲۰۱٤).

۳-۳. الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب اولین بار توسط یانگ در اواخر سال ۲۰۰۷ توسعه داده شد و در سال ۲۰۰۸ انتشار یافت. این الگوریتم بر اساس الگوها و رفتار تولید نور توسط کرم شب‌تاب به وجود آمده است (یانگ، ۲۰۰۹). در الگوریتم کرم شب‌تاب، دو موضوع مهم وجود دارد: تغییرات شدت نور و تدوین جذابیت. برای سادگی، فرض می‌شود که جذابیت کرم شب‌تاب توسط نور تعیین می‌شود که در واقع با تابع هدف کدگذاری شده برابر است. در ساده‌ترین حالت، برای بیشینه‌سازی مسئله بهینه‌سازی، روشنایی (I) یک کرم شب‌تاب در موقعیت خاص X می‌تواند با مقدار تابع هدف $I(x) \propto f(x)$ به دست آید. شدت نور با فاصله از منبع نور کاهش می‌یابد. در ساده‌ترین شکل، شدت نور

$I(r)$ با معکوس مربع فاصله از منبع تغییر می‌کند. فاصله بین هر دو کرم شب‌تاب i و j طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (یانگ، ۲۰۱٤):

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \qquad (۳)$$

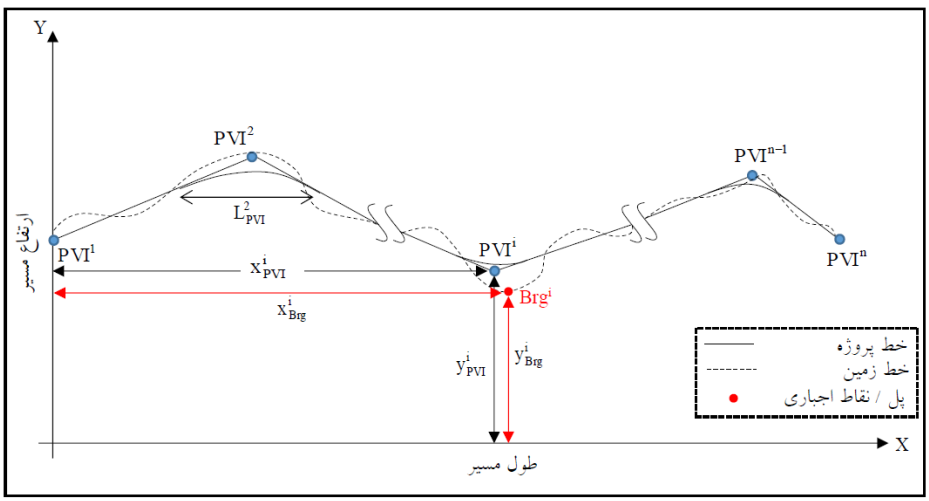
در این رابطه، x و y به ترتیب موقعیت افقی و قائم کرم‌های شب‌تاب تا منبع نور است. حرکت کرم شب‌تاب i به سمت کرم شب‌تاب جذاب‌تر (روشن‌تر) j توسط رابطه (٤) تعیین می‌شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}\left(x_j^t - x_i^t\right) + \alpha\varepsilon_i^t \qquad (٤)$$

در این رابطه، x_i^{t+1} موقعیت جدید کرم شب‌تاب i در تکرار $t+1$ و x_i^t موقعیت کرم شب‌تاب i در تکرار t است. جمله دوم در اثر جاذبه است که در آن β جذابیت نسبی و γ ضریب جذب نور و x_j^t موقعیت کرم شب‌تاب j در تکرار t است. جمله سوم نشان‌دهنده تصادفی بودن حرکت است که α پارامتر تصادفی، ε_i برداری از اعداد تصادفی طراحی شده از یک توزیع گوسی[1] یا یک توزیع یکنواخت است. پارامتر γ را می‌توان تنوع جذابیت توصیف کرد و مقدار آن در تعیین سرعت همگرایی و چگونگی رفتار الگوریتم کرم شب‌تاب اهمیت دارد. در تئوری، $\gamma \in [0,\infty)$، اما برای بیشتر برنامه‌های کاربردی، به طور معمول از ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ متفاوت است (یانگ، ۲۰۱٤).

٤. فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی خط پروژه

همان‌طور که بیان شد، طراحی خط پروژه بهینه به‌منظور کاهش هزینه‌های عملیات خاکی نقش به سزایی در کاهش هزینه‌های راه‌سازی دارد. شکل ۱، قسمتی از پروفیل طولی مسیر را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی خط‌چین قسمتی از پروفیل زمین و منحنی مشکی خط پروژه طراحی‌شده را که دارای n سومه است نشان می‌دهد. هر سومه (PVI) دارای مشخصات x_{pvi}^i، y_{pvi}^i و L_{Pvi}^i است که این سه مقدار به ترتیب کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم برای سومه iام می‌باشد. مقدار L_{Pvi}^i زمانی که i برابر یک و n است، صفر می‌باشد. نقطه توپر قرمزرنگ در شکل، پل‌های زیرخاکی برای عبور آب و غیره یا نقاط اجباری دیگر را به تعداد مشخص، نشان می‌دهد که هر پل دارای مشخصات x_{Brg}^j، y_{Brg}^j و h_{Brg}^j است که این سه مقدار به ترتیب کیلومتر، ارتفاع و حداقل ارتفاع مجاز بین خط پروژه و پل jام است.



شکل ۱. قسمتی از پروفیل طولی مسیر

٤-١. تابع هدف

در این مسئله، تابع هدف به‌صورت مجموع قدر مطلق اختلاف ارتفاع بین خط پروژه و خط زمین در نظر گرفته شد. برای این منظور، کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم در هر سومه به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شدند. رابطه (٥) تابع هدف را نشان می‌دهد:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} \left| y_{EG}^{i} - y_{FG}^{i} \right| \qquad (٥)$$

در این رابطه، y_{EG} ارتفاع خط زمین برای تمامی نقاط تغییر شیب، y_{FG} ارتفاع خط پروژه در نقاط متناظر با خط زمین و n تعداد نقاط تغییر شیب می‌باشد. ارتفاع هر نقطه روی خط پروژه بسته به اینکه روی قوس قائم و یا در مسیر مستقیم واقع شود، از رابطه (٦) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} y_{FG} = \dfrac{g_i - g_{i-1}}{2 \times L_{PVI}^{i}} \times x^2 + g_{i-1} \times x + y_{BVC}^{i} \\ \rightarrow x_{BVC}^{i} \le x \le x_{EVC}^{i} \\ y_{FG} = g_i \times \left(x - x_{PVI}^{i}\right) + y_{PVI}^{i} \\ \rightarrow otherwise \end{cases} \qquad (٦)$$

در این رابطه، g_{i-1} شیب مماس ورودی به قوس قائم، g_i شیب مماس خروجی به قوس قائم، x فاصله هر نقطه روی قوس تا نقطه شروع قوس و x_{PVI}^{i}، y_{PVI}^{i} و L_{PVI}^{i} به ترتیب کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم در سومه iام و y_{BVC}^{i} ارتفاع نقطه شروع قوس i ام است. مقادیر g_i و y_{BVC}^{i} از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$g_i = \frac{y_{pvi}^{i+1} - y_{pvi}^{i}}{x_{pvi}^{i+1} - x_{pvi}^{i}} \qquad (٧)$$

$$y_{BVC}^{i} = y_{pvi}^{i} - g_{i-1} \times \frac{L_{PVI}^{i}}{2} \qquad (٨)$$

در این راستا، مقدار هزینه خاکبرداری و خاکریزی مطابق فهرست‌بهای پایه رشته راه و راه‌آهن و باند فرودگاه (١٣٩٥) استخراج شده است. رابطه (٩) هزینه عملیات خاکی را محاسبه می‌کند:

$$C = \alpha \times V_c + \beta \times V_f \qquad (٩)$$

که C هزینه عملیات خاکی برحسب تومان، V_c حجم خاکبرداری شده برحسب متر مکعب، V_f حجم خاکریزی شده برحسب متر مکعب، α هزینه خاکبرداری و β هزینه خاکریزی که بر اساس بررسی‌های انجام‌گرفته به ترتیب برابر ١٣٠٠ و ١٦٠٠ تومان برای هر متر مکعب می‌باشد (فهرست‌بهای پایه رشته راه و راه‌آهن و باند فرودگاه، ١٣٩٥).

٤-٢. محدودیت‌های مسئله

٤-٢-١. شیب طولی

شیب طولی به شیب سطح تمام شده راه در امتداد مسیر گفته می‌شود. این شیب، همان شیب طولی خط پروژه است و به طور عمده به وسیله پستی‌وبلندی، طبقه‌بندی عملکردی راه، قوس افقی، قدرت وسایل نقلیه سنگین، هزینه تملک حریم راه، ایمنی، فواصل دید، هزینه‌های ساخت راه و زهکشی، فرهنگ رانندگی و منظر آرایی، کنترل می‌شود. شیب طولی خط پروژه با توجه به سرعت طرح و نوع منطقه نبایستی از مقادیر حداقل و حداکثر خود تجاوز کند (آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران، ١٣٩١). در صورت عدم وجود مشکل زهکشی در خاکبرداری‌ها، می‌توان شیب طولی حداقل را برابر با صفر در نظر گرفت.

٤-٢-٢. حداقل طول قوس قائم

تغییر شیب طولی، به‌صورت تدریجی و به وسیله قوس قائم انجام می‌شود. قوس قائم تأمین‌کننده مسافت دید کافی، تخلیه مناسب آب‌های سطحی، ایمنی، آسایش راننده و زیبایی ظاهری راه، خواهد بود. طول قوس قائم باید به اندازه‌ای باشد که حداقل فاصله دید برای راننده وسیله نقلیه فراهم کند. طول قوس قائم باید از رابطه زیر تبعیت کند (آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران، ١٣٩١):

[1] Gaussian distribution

$$L \geq K \times A \quad (10)$$

که در آن، L طول قوس قائم (متر)، A قدر مطلق تفاضل جبری دو شیب متوالی و K میزان انحنای قائم است که به سرعت اولیه و نوع قوس قائم (محدب یا مقعر) بستگی دارد (آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران، ۱۳۹۱).

٤-۲-۳. عدم تداخل دو قوس قائم متوالی

به منظور افزایش ایمنی، راحتی و مسائل ساخت، سعی می‌شود که مقدار طول در نظر گرفته شده برای هر قوس از حداقل مقدار آیین‌نامه بیشتر باشد. افزایش طول قوس‌ها بایستی به اندازه‌ای باشد که هیچ گونه تداخلی بین دو قوس متوالی صورت نگیرد و پیوستگی مسیر حفظ شود. بنابراین، خط پروژه بهینه‌شده بایستی در رابطه زیر صدق کند:

$$\left(x_{PVI}^{i+1} - x_{PVI}^{i}\right) > \left(\frac{L_{PVI}^{i+1} + L_{PVI}^{i}}{2}\right) \quad (11)$$

که در آن x_{PVI}^{i} کیلومتر سومه i ام و L_{PVI}^{i} طول قوس قائم در سومه i ام است.

٤-۲-٤. ارتفاع نقاط اجباری

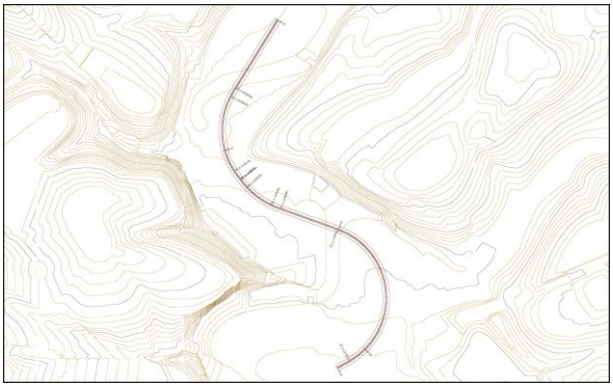
در طراحی خط پروژه باید به ارتفاع نقاط اجباری دقت شود. نقاط اجباری می‌توانند شامل پل‌ها، خطوط لوله، روگذر یا زیرگذر باشند. در این تحقیق، پل‌های آبروها به عنوان نقاط اجباری در طراحی خط پروژه در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به مطالعات هیدرولوژی، دهانه و همچنین حداقل ارتفاع آزاد پل تعیین می‌شود و ارتفاع خط پروژه در محل پل باید به‌گونه‌ای باشد که حداقل ارتفاع آزاد پل رعایت شود.

۵. مشخصات طرح پژوهش

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، سه مسیر به طول‌های مختلف، در سه توپوگرافی دشت، تپه‌ماهور و کوهستانی طراحی شد. معیارهای طرح هندسی در جدول ۱ برای سه توپوگرافی آورده شده است. شکل‌های ۲ الی ٤ پلان مسیرهای طراحی‌شده را نشان می‌دهند.

جدول ۱. پارامترهای طراحی و محدودیت برای سه توپوگرافی

شرح	دشت	تپه‌ماهور	کوهستانی
طبقه‌بندی راه	اصلی	اصلی	فرعی
سرعت طراحی (km/h)	۱۱۰	۱۰۰	٦۰
طول مسیر (m)	۳۲۳۰/۹۲	۷٦۱۵/۸٤	۷۳۳۲/۵٤
عرض جاده (m)	۱۱	۱۱	۱۰/۲
تعداد نقاط اجباری	۵	۵	۹
تعداد سومه‌ها	۱۳	۱٦	٤۳
تعداد متغیرهای تصمیم	۳۹	٤۸	۱۲۹
حداکثر شیب طولی (درصد)	۳	۵	۱۰
حداقل شیب طولی (درصد)	–	۰/۵	–
K برای قوس قائم محدب	۷٤	۵۲	۱۱
K برای قوس قائم مقعر	۵۵	٤۵	۱۸
محدودیت ارتفاعی (متر)	۱	۱	۱



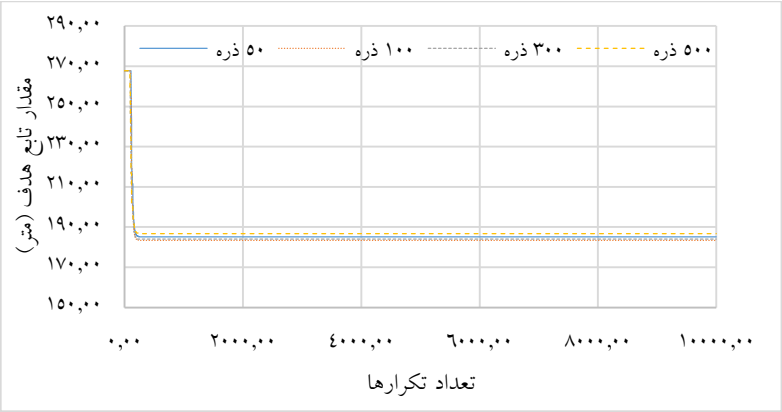
شکل ۲. مسیر طراحی‌شده در توپوگرافی دشت

شکل ۳. مسیر طراحی‌شده در توپوگرافی تپه‌ماهور

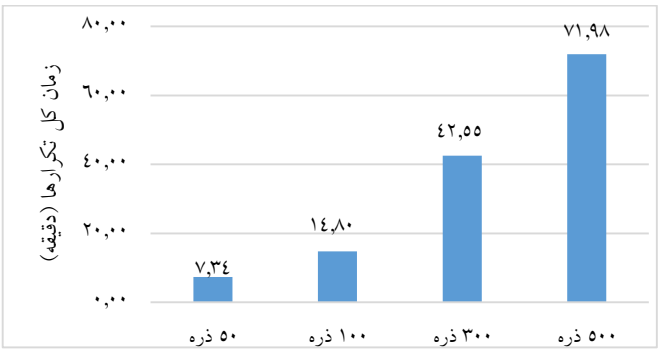
شکل ٤. مسیر طراحی‌شده در توپوگرافی کوهستانی

پس از طراحی مسیر با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD Land Desktop، خط پروژه اولیه‌ای با رعایت محدودیت‌های طراحی بیان شده، ترسیم گردید. سپس، اطلاعات خط پروژه شامل کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم هر یک از سومه‌ها و همچنین کیلومتر و ارتفاع نقاط زمین در نقاط تغییر شیب به همراه کیلومتر، ارتفاع و محدودیت ارتفاعی پل‌ها برای ورود به نرم‌افزار MATLAB مطابق با فرمت مشخص، نوشته شدند. به منظور ارزیابی الگوریتم کرم شب‌تاب، مقادیر تابع هدف بهینه شده با این الگوریتم با مقدار تابع هدف بهینه شده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام پرندگان مقایسه شده‌اند. برای انتخاب تعداد ذرات، مسئله‌ای با ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ذره حل شد. همان طور که در شکل‌های ۵ الی ۷ مشاهده می‌شود، با اضافه‌تر شدن تعداد ذرات،

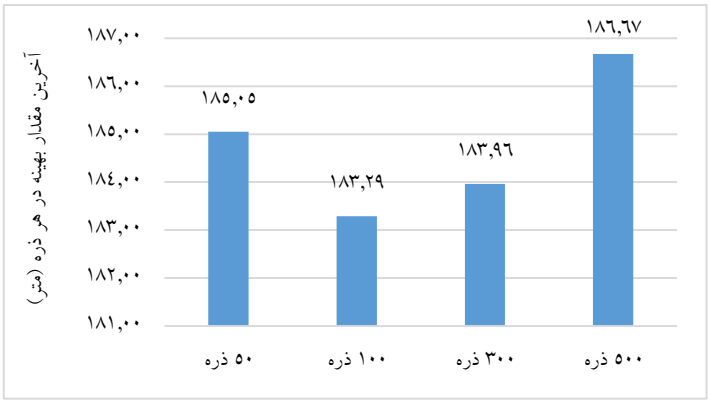
بهبود چندانی در نتایج حاصل نمی‌شود. اما زمان اتمام برنامه به ترتیب ۲، ٦ و ۱۰ برابر می‌شود. علاوه بر این، از آنجا که تولید جمعیت اولیه در الگوریتم‌های فراابتکاری به‌صورت تصادفی است و در هر بار اجرا کردن برنامه، جمعیت جدید تولید می‌شود، نتایج متفاوتی به دست می‌آید. ولی نتایج در مقایسه با هم آن قدر قابل ملاحظه نیست. بنابراین، برای هر الگوریتم ۱۰۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شد تا فرصت کافی برای پیدا کردن بهینه سراسری به الگوریتم‌ها داده شود.



شکل ۵. بهینه‌سازی با تعداد ذرات مختلف



شکل ٦. زمان کل تکرارها برای تعداد ذرات مختلف



شکل ۷. آخرین مقدار بهینه برای تعداد ذرات مختلف

برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای هر سه الگوریتم، مسائل با ۵۰ ذره و ۱۰۰۰۰ تکرار حل شدند. بر اساس نتایج، بهترین روش در الگوریتم ژنتیک چرخ رولت و بهترین مقدار برای احتمال تقاطع و احتمال جهش به ترتیب برابر ۰/۹ و ۰/٤ بوده است. در الگویتم ازدحام پرندگان، بهترین مقدار برای پارامترهای α، β و γ به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/٦ و ۰/۹٦ و در الگوریتم کرم شب‌تاب بهترین مقدار برای پارامترهای α، β و γ به ترتیب برابر ۰/۰۰۵، ۰/۱ و ۵۰۰ حاصل شد.

٦. نتایج

پس از تعیین پارامترهای بهینه هر یک از الگوریتم‌ها و بعد از وارد کردن اطلاعات خط پروژه اولیه و خطوط زمین برای هر یک از سه توپوگرافی در فایل اکسل و ورود آن‌ها به نرم‌افزار متلب، نرم‌افزار آماده بهینه‌سازی با ۵۰ ذره و ۱۰۰۰۰ تکرار شده است. برای ارزیابی میزان بهینه‌سازی خط پروژه، حجم عملیات خاکی یک بار بر اساس خط پروژه اولیه و بار دیگر با استفاده از خط پروژه بهینه‌سازی شده و به کمک نرم‌افزار AutoCAD Land Desktop محاسبه گردید. حجم عملیات خاکبرداری و خاکریزی به همراه هزینه اجرای عملیات خاکی برای هر الگوریتم و برای هر توپوگرافی در جداول ۲ الی ٤ آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر خط پروژه قبل و بعد از بهینه شدن در توپوگرافی دشت

عنوان	خط پروژه اولیه	خط پروژه بهینه با الگوریتم ژنتیک	خط پروژه بهینه با الگوریتم پرندگان	خط پروژه بهینه با الگوریتم کرم شب‌تاب
مقدار تابع هدف (متر)	۲٦۷/۷۷۸۳	۲۲۸/٤٥٤٤	۱۸۷/٦۱٤٤	۱٦۳/۱۹۵۳
درصد بهینگی تابع هدف	–	۱٤/٦۹	۲۹/۹٤	۳۹/۰٦
حجم خاکبرداری (متر مکعب)	۲۰۹۸/۲۱۱	۲۳۹۲/۷۷۱	۵۲۸۰/۸۵	۵۲۰٤/۳۸۸
حجم خاکریزی (متر مکعب)	۱۵۲۱۱/۳۲۸	۱۳۷۵۰/۸۳۸	۱۰۷۷۱/۳	۹۲۵۵/۵٦۹
نسبت خاکریزی به خاکبرداری	۷/۲۵	۵/۷۵	۲/۰٤	۱/۷۸
هزینه (میلیون تومان)	۲۷/۰٦٦	۲۵/۱۱۲	۲٤/۰۹۹	۲۱/۵۷۵
درصد بهینگی هزینه	–	۷/۲۲	۱۰/۹٦	۲۰/۲۹

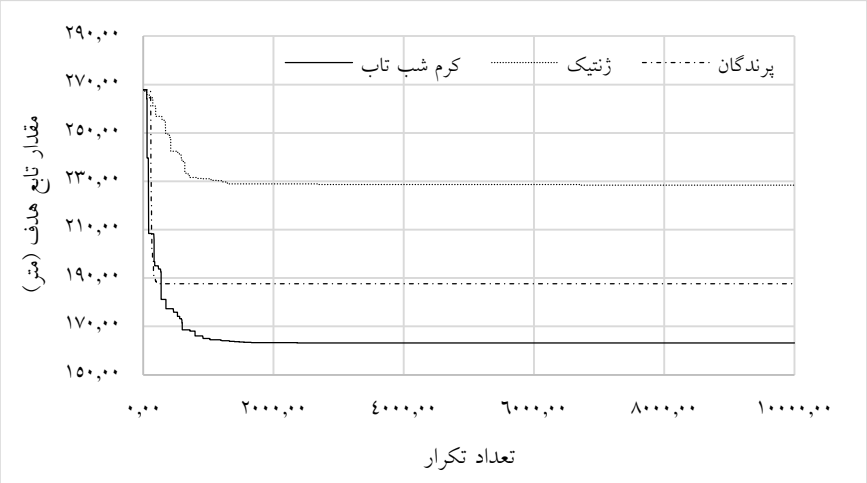
جدول ۳. مقادیر خط پروژه قبل و بعد از بهینه شدن در توپوگرافی تپه‌ماهور

عنوان	خط پروژه اولیه	خط پروژه بهینه با الگوریتم ژنتیک	خط پروژه بهینه با الگوریتم پرندگان	خط پروژه بهینه با الگوریتم کرم شب‌تاب
مقدار تابع هدف (متر)	۱۱۸۰/٤٥٤۷	۱۱۲٦/٦۰۷۷	۹٦۰/٤۳٦۹	۹۰۰/٦۵۹۳
درصد بهینگی تابع هدف	–	۰/٦۲	۷/۲۳	۱۰/۱۱
حجم خاکبرداری (متر مکعب)	۲٤۲۷٦/۱٤۱	۲٦۹۵٦/۰۷۹	٤۷۰۳۲/۷	۳۸۷۲۷/٤۲
حجم خاکریزی (متر مکعب)	٤۹٤٤۹/۸۸۷	٤٤٦۹۱/۳۹٦	۲۵٤۹۲/٤۵	۳۱٦۰/۸
نسبت خاکریزی به خاکبرداری	۱/٤۳	۱/٤۱	۱/۲٤	۱/۰٤
هزینه (میلیون تومان)	۱۱۰/٦۸	۱۰٦/۵۵	۱۰۱/۹۳	۱۰۰/۹۱٦
درصد بهینگی هزینه	–	۰/۵۷	۲/۱۲	٦/۸۹

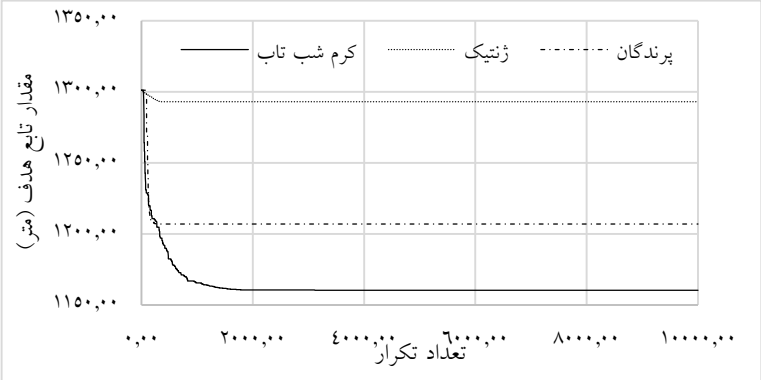
جدول ٤. مقادیر خط پروژه قبل و بعد از بهینه شدن در توپوگرافی کوهستانی

عنوان	خط پروژه اولیه	خط پروژه بهینه با الگوریتم ژنتیک	خط پروژه بهینه با الگوریتم پرندگان	خط پروژه بهینه با الگوریتم کرم شب‌تاب
مقدار تابع هدف (متر)	۱۳۰۱/۰٦٦٦	۱۲۹۲/۹۸۳۹	۱۲۰۷/۰٤۸	۱۱٦۰/٤۱٤
درصد بهینگی تابع هدف	–	٤/٥٦	۱۸/٦٤	۲۳/۷
حجم خاکبرداری (متر مکعب)	۷۳٥۱٤/۲۹	۷۲٥٦٥/۰٦۳	٦۷۱۰٥/۲۱	٥۸۲۸۳/۳۷
حجم خاکریزی (متر مکعب)	٥۱٤٥۹/۳٦۸	٥۱٥۸۹/٥۸٦	٥٤۳۱۰/٤٦	٥٦۱٦۷/۹۹
نسبت خاکریزی به خاکبرداری	۲/۰٤	۱/٦٦	۱/۸٤	۱/۲۲
هزینه (میلیون تومان)	۱۷۷/۹	۱۷٦/۸۸	۱۷٤/۱۳٤	۱٦٥/٦۳۷
درصد بهینگی هزینه	–	۳/۷۳	۷/۹۱	۸/۸۲

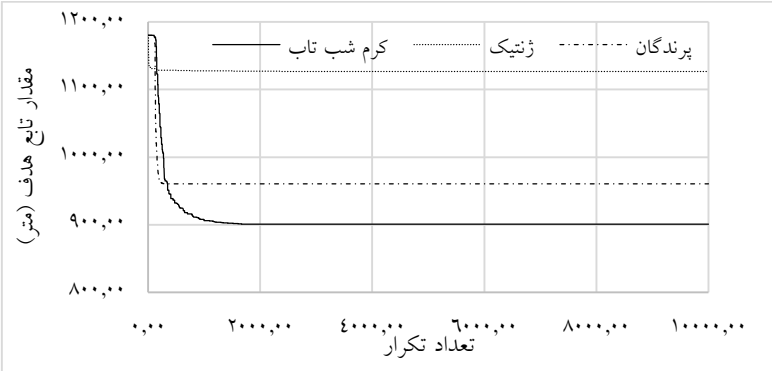
در این پژوهش، فرض بر این است که با کم شدن فاصله بین خط زمین و خط پروژه (با رعایت تمامی محدودیت‌ها) هزینه عملیات خاکی نیز کم می‌شود. مقادیر به‌دست آمده در جداول ۲ تا ٤ گویای درستی این فرض است. علاوه بر این، از آنجا که فرمول‌بندی و برنامه‌نویسی سطح و به دنبال آن حجم مقاطع عرضی بسیار پیچیده و زمان‌بر است و امکان دارد در مقایسه با تابع هدف این پژوهش بهبود زیادی در کم شدن هزینه عملیات خاکی و یافتن خط پروژه بهینه سراسری حاصل نشود، از فرمول‌بندی آن صرفه نظر شد. شکل-های ۸ الی ۱۰ نمودار بهینگی الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام پرندگان و کرم شب‌تاب را برای سه توپوگرافی دشت، تپه‌ماهور و کوهستانی نشان می‌دهند.



شکل ۸. نمودار بهینگی تابع هدف در هر تکرار در توپوگرافی دشت



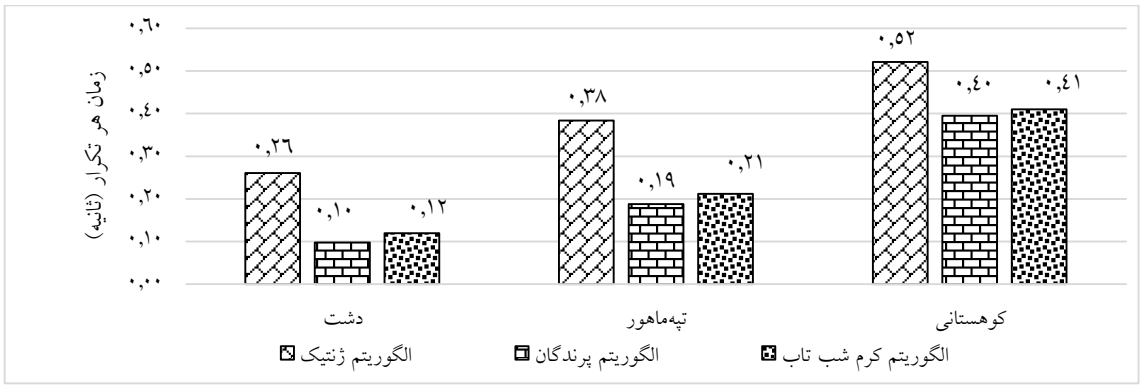
شکل ۹. نمودار بهینگی تابع هدف در هر تکرار در توپوگرافی تپه‌ماهور



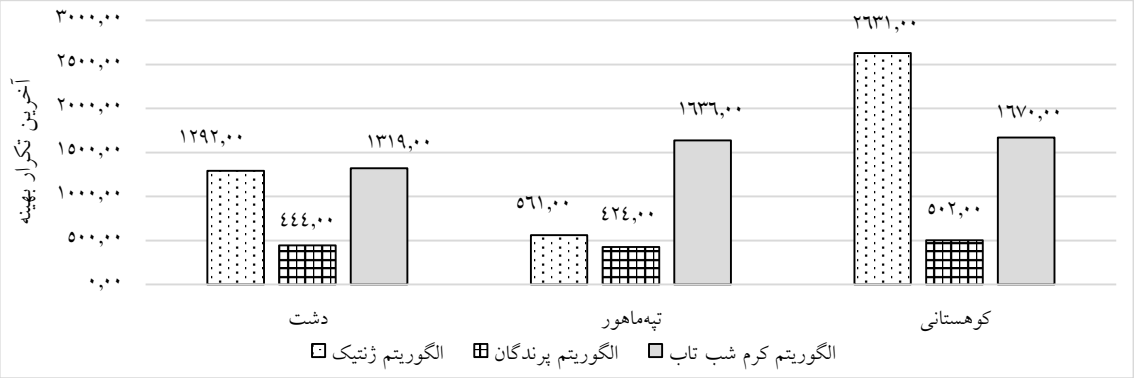
شکل ۱۰. نمودار بهینگی تابع هدف در هر تکرار در توپوگرافی کوهستانی

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نرخ همگرایی هر سه الگوریتم تقریباً برابر و برای هر سه توپوگرافی تقریباً تا تکرار ۱۵۰۰ موفق به یافتن مقدار بهینه می‌شوند. با این وجود، روش‌های ژنتیک و ازدحام پرندگان موفق به یافتن پاسخ بهینه سراسری نشده و در بهینه محلی گرفتار می‌شوند. در حالی که الگوریتم کرم شب‌تاب موفق به یافتن جواب بهینه سراسری می‌شود.

به منظور ارزیابی سرعت همگرایی، آخرین تکرار بهینه و زمان صرف شده در هر تکرار، برای هر الگوریتم و برای سه توپوگرافی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۱، ملاحظه می‌شود که زمان هر تکرار برای دو الگوریتم پرندگان و کرم شب‌تاب تقریباً برابر و کمتر از الگوریتم ژنتیک است.



شکل ۱۱. زمان هر تکرار برای سه الگوریتم و سه توپوگرافی



شکل ۱۲. آخرین تکرار بهینه برای سه الگوریتم و سه توپوگرافی

۷. بحث و نتیجه‌گیری

هزینه‌های زیرسازی مسیر که تابع حجم خاکریزی و خاکبرداری است تحت تأثیر خط پروژه می‌باشد و بهینه بودن آن تأثیر به‌سزایی در کل هزینه‌های پروژه دارد. در این پژوهش، ابتدا سه مسیر در توپوگرافی‌های دشت، تپه‌ماهور و کوهستانی طراحی و خط پروژه اولیه هر یک با رعایت محدودیت‌های طرح هندسی و مسئله، ترسیم شد. پس از آن کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم هر سومه به عنوان متغیر تصمیم به نرم‌افزار MATLAB داده شده است. برای بهینه‌سازی، تعداد ذرات و تکرار به ترتیب ۵۰ ذره و ۱۰۰۰۰ تکرار (برای اطمینان از این‌که هر الگوریتم به آخرین مقدار بهینه خود دست پیدا می‌کند)، در نظر گرفته شدند. هر الگوریتم با پارامترهای بهینه خود، شروع به بهینه‌سازی خط پروژه مسیر نموده است. تابع هدف به صورت مجموع قدر مطلق اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین و محدودیت‌ها به صورت حداقل و حداکثر شیب طولی، ارتفاع نقاط اجباری، عدم تداخل قوس‌ها و حداقل طول قوس قائم، تعریف شدند. از بهینه‌سازی ارائه شده می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد:

۱- با توجه به جدول ۲، در توپوگرافی دشت، درصد بهینگی مجموع اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین برای سه الگوریتم ژنتیک، ازدحام پرندگان و کرم شب‌تاب به ترتیب برابر ۱٤/٦۹، ۲۹/۹٤ و ۳۹/۰٦ است. همچنین، درصد بهینگی هزینه عملیات خاکی برای سه الگوریتم به ترتیب برابر ۷/۲۲، ۱۰/۹٦ و ۲۰/۲۹ درصد است. عملیات خاکریزی از عملیات خاکبرداری زمان‌برتر و پرهزینه‌تر است زیرا بایستی خاک در ضخامت‌های محدودی ریخته شده، رطوبت‌دهی شده و متراکم گردد. بنابراین، کمتر شدن احجام خاکریزی، علاوه بر کاهش هزینه، به کاهش زمان اجرا هم کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که نسبت حجم خاکریزی به حجم خاکبرداری در این حالت، برای خط پروژه اولیه و سه الگوریتم به ترتیب برابر ۷/۲۵، ۵/۷۵، ۲/۰٤ و ۱/۷۸ است. پس، استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب به مقدار قابل توجه به بهینه‌سازی خط پروژه کمک کرده است.

۲- برای توپوگرافی تپه‌ماهور، نتایج جدول ۳ حاکی از آن است که درصد بهینگی مجموع اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین برای سه الگوریتم ژنتیک، ازدحام پرندگان و کرم شب‌تاب به ترتیب برابر ۰/٦۲، ۷/۲۳ و ۱۰/۸۱ و درصد بهینگی هزینه عملیات خاکی برای سه الگوریتم به ترتیب برابر ۰/۵۷، ۲/۱۲ و ٦/۸۹ درصد محاسبه شده است. علاوه بر این، نسبت حجم خاکریزی به حجم خاکبرداری، برای خط پروژه اولیه و سه الگوریتم به ترتیب برابر ۱/٤۳، ۱/٤۱، ۱/۲٤ و ۱/۰٤

است. نتایج فوق مجدداً نشان‌دهنده قابلیت بهینه‌سازی بیشتر الگوریتم کرم شب‌تاب است.

۳- درصد بهینگی مجموع اختلاف ارتفاع خط پروژه و خط زمین برای توپوگرافی کوهستانی و برای سه الگوریتم ژنتیک، ازدحام پرندگان و کرم شب‌تاب مطابق جدول ٤ به ترتیب برابر ٤/٥٦، ١٨/٦٤ و ٢٣/٧ است. همچنین، درصد بهینگی هزینه عملیات خاکی برای این توپوگرافی و برای سه الگوریتم به ترتیب برابر ٣/٧٣، ٧/٩١ و ٨/٨٢ درصد به‌دست‌آمده و نسبت حجم خاکریزی به حجم خاکبرداری، برای خط پروژه اولیه و سه الگوریتم به ترتیب برابر ٢/٠٤، ١/٦٦، ١/٨٤ و ١/٢٢ برآورد شده است. این نتایج حاکی از توانایی بهینه‌سازی بهتر الگوریتم کرم شب‌تاب می‌باشد.

٤- مقایسه جداول ٢، ٣ و ٤ نشان‌دهنده این است که الگوریتم کرم شب‌تاب به لحاظ مقدار جواب بهینه از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام پرندگان بهتر است و قابلیت یافتن بهینه سراسری را دارد. از طرف دیگر، مقادیر این اختلاف و درصدهای بهینگی قابل توجه است که می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش هزینه‌ها در یک پروژه داشته باشد. دو الگوریتم دیگر در جواب‌های بهینه محلی همگرا شده‌اند.

٥- شکل‌های ١١ و ١٢ نشان می‌دهند که تکرار و زمان صرف شده جهت حل مسئله مربوط به مناطق با توپوگرافی دشت به ترتیب ١٢٩٢ و ٠/٢٦٢ ثانیه است. زمان کل لازم برای این بهینه‌سازی و دست یافتن به جواب سراسری ٥/٦٢ دقیقه بوده که این زمان آنالیز و طراحی بهینه، در مقابل کاهش هزینه‌ها، بسیار ناچیز است.

امروزه، با در اختیار داشتن نرم‌افزارها و پردازشگرهای قدرتمند، استفاده از فرایندهای طراحی خاص و پیچیده، آسان شده است و با توجه به ارزش زمان و سرمایه، استفاده از آنها غیر قابل اجتناب است. در این راستا، در طراحی خط پروژه نشان داده شد که روش‌های فوق تا چه حدی می‌توانند مؤثر باشند و استفاده از روش‌های سنتی که هنوز بسیار متداول است تا چه حد منجر به اتلاف بودجه خواهد شد. در میان روش‌های به‌کار گرفته شده، روش کرم شب‌تاب درصد بهینه‌سازی بالایی داشته و کاهش هزینه‌ها در مقابل افزایش زمان طراحی قابل تعمق است.

۸. مراجع

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۹۱. "آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران". نشریه شماره ٤١٥.

باباپور، ر.، نقدی، ر.، فجر، ا. و مظفری، س. ۱۳۹۵. "مدل ابتکاری برآورد مساحت عملیات خاکی برای طراحی پروفیل طولی جاده‌های کوهستانی". تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ٢٤(٢): ١٨٩- ١٩٩.

روشنی، ا. و کوچک زاده، ص. ۱۳۸۷. "تعیین حجم عملیات خاکی مسیر کانال‌های روباز با استفاده از شبکه مثلثی نامنظم". علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ١٥(٦): ٢٦٩-٢٥٩.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۵. فهرست‌بهای واحد پایه رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه.

Al-Sobky, Al-S. A. 2014. “An optimization approach for highway vertical alignment using the earthwork balance condition”. World Appl. Sci. J., 29(7): 884-891.

Bababeik, M. and Monajjem, M. S. 2012. “Optimizing longitudinal alignment in railway with regard to construction and operating costs”. J. Transport. Eng., 138(11): 1388-1395.

Dabbour, E., Raahemifar, K. and Easa, S. M. 2008. “Optimum vertical curves for highway profiles using nonlinear optimization”. Proceedings of the Annual Conference, Canadian Society for Civil Engineering.

Easa, S. M. 1988. “Selection of roadway grades that minimize earthwork cost using linear programming”. Transport. Res. Part A: General, 22(2): 121-136.

Goktepe, A. B. and Lav, A. H. 2003. “Method for balancing cut-fill and minimizing the amount of earthwork in the geometric design of highways”. J. Transport. Eng., 129(5): 564-571.

Goktepe, A. B. and Lav, A. H. 2004. “Method for optimizing earthwork considering soil properties in the geometric design of highways’. J. Survey. Eng., 130(4): 183-190.

Göktepe, A. B., Lav, A. H., Altun, S. and Altıntaş, G. 2008. “Fuzzy decision support system to determine swell/shrink factor affecting earthwork optimization of highways”. Math. Comp. Appl., 13(1): 61-70.

Goktepe, A. B. Lav, A. H. and Altun, S. 2009. “Method for optimal vertical alignment of highways”. Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Transport, 162(4): 177-188.

Hare, W., Hossain, S., Lucet, Y. and Rahman, F. 2014. “Models and strategies for efficiently determining an optimal vertical alignment of roads”. Comp. Oper. Res., 44: 161-73.

Hare, W., Lucet, Y. and Rahman, F. 2015. “A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and side-slopes in road construction”. Eur. J. Oper. Res., 241(3): 631-641.

Holland, J. H. 1975. “An introductory analysis with applicati on to biology, control, and artificial intelligence”. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.

Jha, M. K., Schonfeld, P. and Jong, J. C. 2006. Intelligent road design”. WIT Press.

Kazemi, S. F. and Shafahi, Y. 2013. “An integrated model of parallel processing and PSO algorithm for solving optimum highway alignment problem”. Proceedings of the 27th European Conference on Modelling and Simulation ©ECMS, Webjørn Rekdalsbakke.

Kennedy, J. and Eberhart, R. C. 1995. “Particle Swarm Optimization”. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, USA, pp. 1942-1948.

Mil, S. and Piantanakulchai, M. 2013. “Vertical alignment optimization using customized polynomial regression model”. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.

Trypia, M. 1979. “Minimizing ‘cut and fill’costs in roadmaking”. Computer-Aided Design, 11(6): 337-339.

Tunahoglu, N. and Soycan, M. 2014. “A novel route design methodology based on minimizing level differences between grade and ground line”. Geodetski Vestnik, 58(1): 140-154.

Yang, X. S. 2009. “Firefly algorithm for multimodal optimization”. Stoch Algorithms: Found. Appl., 5792(2): 169-178.

Yang, X. S. 2014. “Nature-inspired optimization algorithms”, Elsevier.