مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال دوازدهم، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۹
ص ۱۳۰-۱۱۳
مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی عملیات ساخت جاده‌های جنگلی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان

ایمان پژوهان[۱]، اکبر نجفی[۲]، جواد وحیدی[۳]، ابوالقاسم کامکار روحانی[۴]

[۱] استادیار، دانشکدهٔ منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر.
[۲] دانشیار، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور.
[۳] دانشیار دانشکدهٔ ریاضیات، دانشگاه علم و صنعت، تهران.
[۴] دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲)

چکیده

برای طراحی جاده‌های جنگلی به‌گونه‌ای که افزون‌بر حداقل‌سازی هزینهٔ ساخت، رضایت طرفداران محیط زیست را نیز جلب کند، باید اطلاعات دقیقی از شرایط روی زمینی و زیر زمینی بستر جاده در اختیار طراحان و پیمانکاران قرار گیرد. از طرفی با توجه به حجم زیاد داده‌ها به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی با کمک رایانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور این پژوهش در جاده‌ای پیش‌بینی‌شده به طول تقریبی یک کیلومتر در جنگل‌های سری چهار باباکوه شهرستان سیاهکل در استان گیلان انجام گرفت. همهٔ مراحل اجرایی عملیات خاکی، مورد بررسی زمان‌سنجی پیوسته قرار گرفت و اطلاعات لایه‌های زیرسطحی از جنبهٔ سختی حفاری به‌دقت ثبت شد. در مرحلهٔ بعد برای اصلاح خط پروژه از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان استفاده شد. نتایج مقایسهٔ روش الگوریتم بهینه‌یابی کلونی مورچگان با سناریوی طراحی دستی نشان داد که الگوریتم چندهدفهٔ ارائه‌شده در این پژوهش، شامل کاهش حجم و هزینهٔ عملیات خاکی قابلیت زیادی در کاهش هزینه‌های عملیات خاکی و حجم آن دارد. براساس نتایج، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان به مقدار ۵۸/۵۵ و ۶۴ درصد قادر به کاهش هزینه و حجم عملیات است. از نتایج این پژوهش می‌توان به‌عنوان راهنمایی در مدیریت بهینهٔ ساخت جادهٔ جنگلی و توسعهٔ روش‌های کارامد در دیگر علوم جنگلی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: حجم عملیات خاکی، خط پروژه، مدل هزینه، مقطع عرضی.

مقدمه

طراحی و اجرای پروژه جاده‌های جنگلی از وظایف اصلی مهندسان جنگل است، چراکه آنان باید بهترین مسیر را از بین گزینه‌های مختلف موجود ارزیابی و انتخاب کنند. روش‌های سنتی برای طراحی و ساخت جاده، به قضاوت و تخصص طراحان و مهندسان بستگی دارد و از طرفی به‌علت وقتگیر و هزینه‌بر بودن این روش‌ها، به‌کارگیری روش‌ها و نرم‌افزارهای کامپیوتری به‌منظور کمک به طراحی و ساخت جاده به‌علت صرفه‌جویی در زمان و هزینه در سال‌های اخیر روزبه‌روز افزایش یافته است. فناوری‌های کامپیوتری از دههٔ ۱۹۶۰ برای ساخت و طراحی جاده‌های به‌کار گرفته شده‌اند. این فناوری‌ها در سال‌های اخیر برای محاسبات مربوط به عملیات خاکی استفاده شده‌اند.

* نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۸۹۵۱۸۸۰۶ ایمیل: imanpazhouhan@gmail.com

مهندسان جنگل به‌طور گسترده از طراحی به کمک کامپیوتر برای کاهش حجم عملیات مختلف استفاده می‌کنند. این عملیات شامل طراحی جاده، مقاطع عرضی جادهٔ جنگلی، مقاطع عرضی و محاسبهٔ حجم عملیات خاکی است؛ اما این روش با تمام قابلیت‌هایش قادر به یافتن بهترین مسیر با کمترین هزینهٔ عملیات ساخت و نگهداری در ارتباط با شاخص‌های اجتماعی- اقتصادی و هزینه‌های محیط زیستی نیست (Cheng & Jiang, 2013). از این‌رو در نخستین تلاش‌ها، برنامه‌نویسی پویا به‌طور گسترده برای بهینه‌یابی مسیر جاده به‌کار گرفته شد (Nicholson, 1976; Trietsch, 1987). با این‌حال، این روش در موارد پیچیده‌ای مانند برآورد سهم عملیات خاکی یا جریان‌های آبی و خاک در جاده‌های جنگلی ناکارامد است. برای غلبه بر این ضعف، روش‌های فراابتکاری بهینه‌یابی مانند تبرید شبیه‌سازی‌شده (Dowsland, 1993)، الگوریتم ژنتیک (Reeves, 1993) و جست‌وجوی ممنوعه (Glover, 1989) با هدف بهینه‌یابی و به حداقل کردن رساندن هزینه‌های ساخت و تعمیر و نگهداری ابداع شدند. در بیشتر این روش‌ها به‌منظور اِعمال شیب‌های طولی مورد نظر در یک محدودهٔ ارتفاعی خاص از تغییر در نقاط کنترل استفاده شده است (Aruga et al., 2005; Kang et al., 2007; Yang et al., 2014; Babapour et al., 2018). افزون‌بر این الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی ممنوعه به‌منظور یافتن بهترین مسیر افقی و عمودی با تغییر در نقاط کنترل مرکزی استفاده شد (Aruga et al., 2005a).

با این‌حال، بهینه‌یابی مسیر افقی جاده به‌دلیل پیچیدگی‌هایش چندان بررسی نشده است. پژوهش‌های زیادی با هدف توسعهٔ روش‌های خودکار استخراج مسیر جاده با استفاده از تئوری گراف (Stuckelberger et al., 2004; Heinimann et al., 2003; Liu & Sessions, 1993) برنامه‌ریزی پویا (Douglas & Henderson, 1988) و مدل‌های ترکیبی مانند ترکیب الگوریتم دایجسترا و الگوریتم ژنتیک (Suzuki et al., 1998) انجام گرفته است. این مدل‌ها هزینه‌یابی ساخت جاده را آسان می‌کنند، ولی جزئیات حجم خاک‌برداری را برای گزینه‌های مختلف مسیر جاده برآورد نمی‌کنند.

بهینه‌سازی مسیر افقی و عمودی از مسائل پیچیدهٔ طراحی و ساخت جاده است. Nicholson et al. (1976) یک مدل برنامه‌ریزی پویا به‌منظور بهینه‌سازی مسیر سه‌بعدی در دو مرحله را ارائه دادند. در مرحلهٔ اول، مدل شبکهٔ به‌نسبت وسیعی از نقاط برای مسیر عبور اولیه را جست‌وجو می‌کند. سپس یک متغیر گسسته به‌منظور اصلاح مسیر به‌کار گرفته می‌شود. با این‌حال، مسیر به‌دست‌آمده ممکن است از نقاط شبکه دارای انحراف باشد.

در ادامهٔ پژوهش‌های بهینه‌سازی شبکهٔ جاده در سال‌های اخیر، پیشرفت در سرعت پردازش و پردازش لحظه‌ای و مشاهده با وضوح گرافیکی زیاد سه‌بعدی، به‌وسیله ریزکامپیوترها از طریق ایجاد مدل سه‌بعدی سطح زمین با وضوح زیاد امکان‌پذیر شده است. لیدار (LiDAR) یکی از سیستم‌هایی است که تولید یک DEM با دقت و وضوح زیاد را ممکن می‌کنند. Akay et al. (2003) یک مدل مسیر سه‌بعدی جاده‌های جنگلی به نام TRACER را ابداع کردند که فناوری تصمیم‌گیری کمکی برای طراحی جاده است. این مدل به طراحان کمک می‌کند که ارزیابی سریعی از مشخصات هندسی جاده و مسیر افقی و عمودی آن داشته باشند و هزینه‌های خاک‌برداری را به حداقل برسانند. Aruga et al. (2004) برنامه‌ای را برای بهینه‌سازی مقاطع عمودی و افقی جاده‌های جنگلی با یک DEM دقیق با استفاده از شیوهٔ جست‌وجوی ممنوعه ارائه دادند که روشی فراابتکاری به شمار می‌رود. Aruga et al. (2005a) از دو روش الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی ممنوعه به‌منظور کاهش هزینه‌های ساخت، تعمیر و نگهداری جاده‌های جنگلی

استفاده کردند. براساس نتایج هر دو روش به راه‌حل قابل قبول در زمان مناسب دست یافتند؛ زیرا ارزیابی گزینه‌های مختلف به‌طور دستی برای طراحان وجود ندارد و الگوریتم ژنتیک در زمان کمتر راه‌حل بهتری نسبت به جست‌وجوی ممنوعه ارائه می‌دهد. Stuckelberger et al. (2006a) مدل هزینه‌ای را ارائه کردند که براساس آن ابتدا هزینهٔ اجزای جاده‌سازی محاسبه می‌شود و سپس هزینهٔ کل ساخت و تعمیر و نگهداری جاده به‌دست می‌آید. در این مدل ویژگی‌های عوارض سطحی، زمین‌شناسی و خاک منطقه عواملی تأثیرگذار بر هزینهٔ ساخت و تعمیر و نگهداری جاده بودند. Stuckelberger et al. (2006) مدل هزینهٔ فوق را با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر و درخت پوششی کمینه برای طراحی مسیر جاده جنگلی به‌کار بردند.

در تحقیق Hasmadi & Kamaruzaman (2009) در مالزی با هدف طراحی مسیر جاده‌های جنگلی با مدل Best-Path از تصاویر ماهواره‌ای و دیگر داده‌های دورسنجی استفاده شد. این مدل مناسب‌ترین محل برای جاده را با توجه به معیارهای مورد نظر طراح انتخاب می‌کند. معیار اصلی در این تصمیم‌گیری ملاحظات محیط زیستی و هزینهٔ ساخت جاده است. Bruce et al. (2011) برنامه‌ای الحاقی برای نرم‌افزار اکسل تهیه کردند که برای استفاده از اطلاعات رویشگاهی و همچنین مشخصات هندسی یک مسیر طراحی‌شده، امکان بهینه‌سازی اجزای هزینهٔ ساخت و تعمیر و نگهداری را فراهم می‌کرد. این برنامه امکان طراحی مسیر را نداشت، بلکه قابلیت آن محاسبهٔ هزینه‌های ساخت و تعمیر و نگهداری برای جاده‌های طراحی‌شده و مقایسهٔ گزینه‌های مختلف جاده بود. Babapour et al. (2018) با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و ازدحام ذرات مسیر افقی جاده‌های جنگلی را به‌منظور بهینه کردن بررسی کردند. نتایج نشان داد که در هر دو روش حجم عملیات خاکی نسبت به روش طراحی دستی کاهش یافت. Jaafari (2015) طراحی چندهدفهٔ شبکهٔ حمل‌ونقل جنگل را با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بررسی کرد. در این پژوهش توابع هدف برمبنای کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری جاده، هزینه‌های انتقال چوب و کاهش تأثیرات محیط زیستی طرح‌ریزی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری ژنتیک، تبرید شبیه‌سازی‌شده و کلونی مورچگان برای تحقق اهداف توسعه داده شدند. در مجموع نتایج بیانگر کارایی الگوریتم فراابتکاری در مقایسه با روش‌های دستی و سنتی رایج بود.

باید توجه داشت که مسائل مربوط به شبکهٔ حمل‌ونقل با استفاده از الگوریتم‌های دقیق، نظیر شاخه و حد نیز حل‌شده است (Adlakha & Kowalski, 2003)، اما محدود به مسائلی کوچک‌مقیاس بوده است؛ چراکه با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل مسئله نیز به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد (Kowalski, 2005). حتی برای یک مسئله با مقیاس متوسط با چندصد یا چندهزار ریال، زمان حل بسیار بیشتر از حدی خواهد بود که قابلیت استفاده در مقاصد کاربردی را داشته باشد (Adlakha & Kowalski, 2003).

بنابراین با توجه به‌مرور سوابق تحقیقات انجام‌گرفته به‌طور کلی می‌توان گفت در پژوهش‌هایی که برای بهینه‌سازی طراحی جاده در خصوص الگوریتم‌ها وجود دارد، ترکیب لایه‌ها بدون در نظر گرفتن خصوصیات زیرسطحی و عمودی عرصه انجام گرفته و سهم آنان در تمام طول پروژه یکسان در نظر گرفته شده است، درحالی که براساس استانداردهای ارائه‌شده در طراحی و ساخت شبکهٔ جاده به‌عنوان‌مثال سرویس جنگل وزارت کشاورزی ایالات متحده[1] (۱۹۹۹) هزینه و عمق ساخت جاده در ارتباط با نوع خصوصیات زیرسطحی متفاوت است و باید گذشته از در نظر گرفتن واریانت‌های مختلف

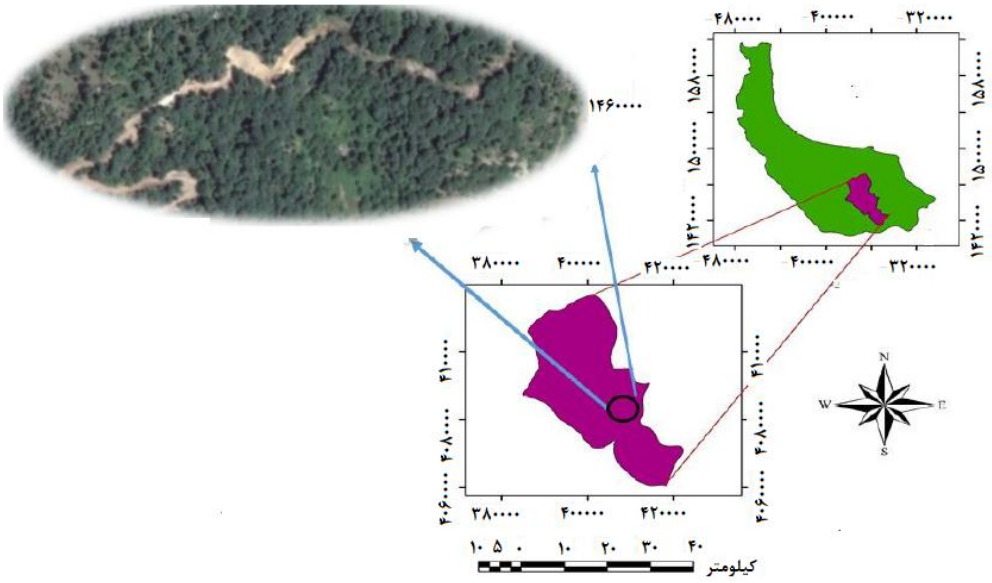
1 USDA Forest Service

طولی و افقی برای بهینه‌سازی جاده، ویژگی‌های بستر زیرسطحی جاده نیز که در ترکیب با خصوصیات توپوگرافی گزینه‌های بی‌شماری را ایجاد می‌کند، در طراحی خط پروژهٔ بهینهٔ جاده به‌منظور اصلاح خط پروژه وارد شود. در نظر گرفتن شیب‌های مختلف طولی و از طرف دیگر خصوصیات مختلف لایه‌های زیرسطحی و ترکیب آنها با هم، مستلزم انتخاب ترکیب بهینهٔ آنهاست. برای دستیابی به هدف تحقیق یعنی بهینه‌سازی عملیات ساخت جاده‌های جنگلی، از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان که از بارزترین نمونه‌ها از روش‌های هوش جمعی است (Maniezzo et al., 2005; Dorigo & Di Caro, 1999) استفاده خواهد شد. همچنین شایان ذکر است که در این تحقیق نخستین بار از داده‌های دو ابزار رادار نفوذی به زمین (GPR) و لیزر اسکنر زمینی (TLS) در عملیات جاده‌سازی جنگل استفاده می‌شود. در روش GPR بدون نیاز به ایجاد پروفیل می‌توان از خصوصیات لایه‌های زیرسطحی اطلاع پیدا کرد. GPR با استفاده از امواج الکتریکی لایه‌های زیرسطحی در اعماق کم را به‌طور غیرمخرب و با دقت زیاد آشکارسازی می‌کند و همچنین DEM استفاده‌شده در این تحقیق به‌منظور محاسبهٔ حجم عملیات خاکی حاصل از داده‌های لیزر اسکنر زمینی (TLS) تا دقت سانتی‌متر است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

این پژوهش در جاده‌ای پیش‌بینی و طراحی‌شده به طول یک کیلومتر در جنگل‌های سری چهار باباکوه سیاهکل در استان گیلان اجرا و پیاده‌سازی شد (شکل ۱). جادهٔ تحت بررسی از نظر مشخصات هندسی و فنی از نوع جاده‌های درجه دو جنگلی و پیش‌بینی‌شده برای ساخت است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، شیبدار بودن منطقه و برون‌زدگی‌های سنگی پیش‌بینی شد که سهم صخره و سنگ در خاک زیرسطحی بسیار زیاد است (Ghajar et al., 2013). دامنهٔ ارتفاعی منطقه بین ۴۵۰ تا ۷۰۰ متر و شیب منطقه در بخش‌های مختلف بین ۸ تا ۶۰ درصد است. همهٔ درختان موجود در عرض جاده قطع شده بودند و پس از تبدیل از منطقه خارج شدند، ولی تعداد اندکی از تنه‌ها در منطقه باقی مانده بود که توسط ماشین‌آلات خاک‌برداری در حین ساخت جابه‌جا شدند. عرض متوسط جاده ۵/۵ متر است.



شکل ۱- منطقهٔ تحت بررسی در جنگل‌های سری ۴ باباکوه شهرستان سیاهکل استان گیلان

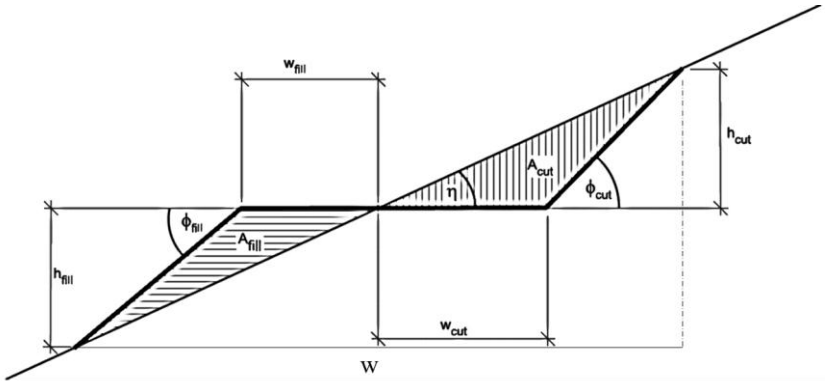
برای عملیات ساخت از ماشین‌های بیل مکانیکی و بولدوزر استفاده شد. سنگ مادر اغلب از بازالت فرسایش‌یافته با تداخل آهک و آرژیلیت تشکیل شده و خاک دارای وضعیت پایداری متوسط بود. آبکند (Gully) در منطقه مشاهده نشد. در شکل ۲ مراحل مختلف پروژهٔ جاده نشان داده شده است.

شکل ۲- تصاویری از مراحل اجرای پژوهش: الف) عرض پاک‌تراشی شدهٔ جاده؛ ب) برداشت مسیر جاده با ابزار لیزر اسکنر زمینی؛ ج) عملیات ساخت با دستگاه بیل مکانیکی؛ د) مقطع عرضی جاده بعد از اجرای عملیات خاکی.

شیوهٔ اجرای پژوهش

مقاطع عرضی

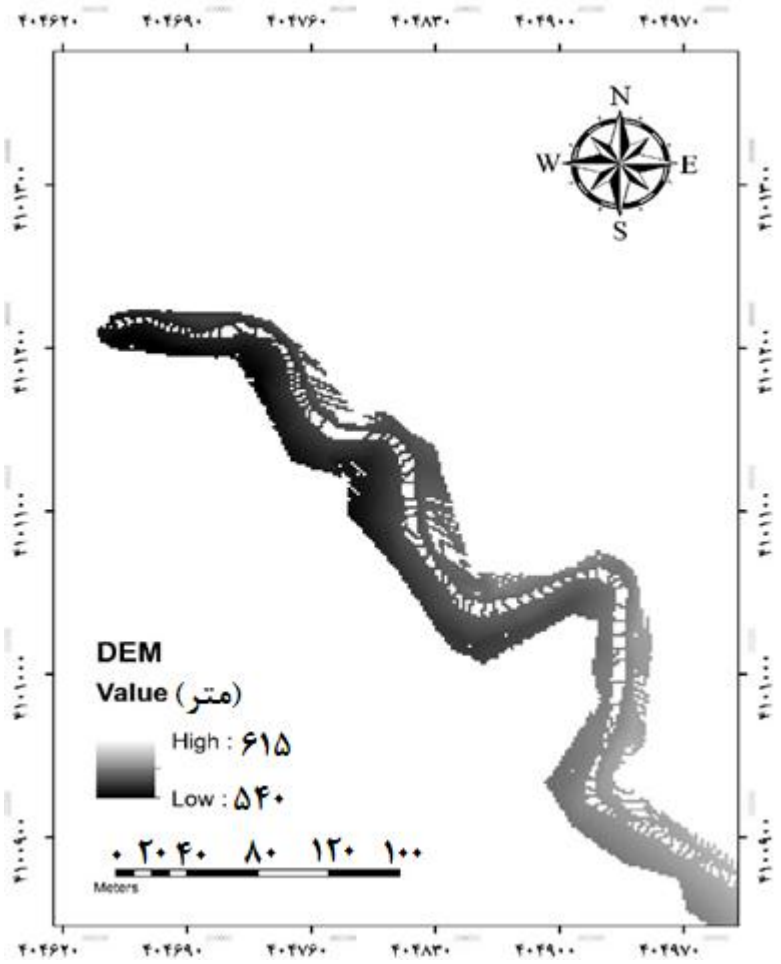
به‌منظور محاسبهٔ حجم عملیات خاکی لازم بود مقطع عرضی جاده (مقطع یا برش جانبی از بدنهٔ جاده) بازیابی شود. در این تحقیق ابعاد مقاطع عرضی شامل موارد زیر بود: عرض استاندارد بستر جاده ۵/۵ متر، شیب ترانشهٔ خاک‌برداری در مناطق صخره‌سنگی و مناطق خاک رس ۳۴/۹۹ و ۳۱ درجه و در مناطق خاک‌ریزی ۳۳ و ۲۶/۵۷ درجه در نظر گرفته شد (FAO, 2016). در مجموع ۱۱۰ مقطع عرضی در طول جاده برداشت شد. مساحت مقاطع عرضی نیز براساس اختلاف ارتفاع بین زمین و جاده اندازه‌گیری شد. شکل ۳ یک مقطع عرضی را با عدد قرمز صفر نشان می‌دهد.



شکل ۳- اجزای مقطع عرضی استاندارد جاده‌های جنگلی. W) عرض ساختمانی جاده؛ A_{cut}) سطح خاک‌برداری؛ A_{fill}) سطح خاک‌ریزی؛ ϕ_{fill}) شیب ترانشهٔ خاک‌ریزی؛ ϕ_{fill}) شیب ترانشهٔ خاک‌برداری؛ η) شیب زمین؛ W_{cut}) عرض خاک‌برداری؛ W_{fill}) عرض خاک‌ریزی؛ h_{cut}) ارتفاع خاک‌برداری؛ W_{fill}) ارتفاع خاک‌ریزی (Stuckelberger et al., 2006).

حجم و هزینهٔ عملیات خاکی

حجم عملیات خاکی با توجه به سطوح خاک‌برداری و خاک‌ریزی مقاطع عرضی و فواصل بین آنها محاسبه شد (در مجموع ۱۱۰ مقطع عرضی در فواصل ۵ تا ۱۰ متری). در این تحقیق از روابط مثلثاتی و روش هرمی برای محاسبهٔ حجم عملیات خاکی با تغییر در نقاط قرمز در محل پیکه‌های هکتومتری استفاده شد. شیب دامنه در این پژوهش از مدل رقومی ارتفاع به‌دست آمد که با استفاده از ابزار لیزر اسکنر زمینی (TLS) تا دقت سانتی‌متر استخراج شده بود (شکل ۴).



شکل ۴- نقشهٔ DEM استخراج‌شده از ابرنقاط حاصل از TLS بعد از عملیات ساخت

برای برآورد حجم عملیات خاکی در هر دو قسمت خاک‌برداری و خاک‌ریزی از روش میانگین مقاطع استفاده شد. رابطهٔ ۱ حجم عملیات خاکی در هر دو منطقهٔ خاک‌برداری و خاک‌ریزی مجاور را نشان می‌دهد (Stuckelberger, 2006):

$$V=1/3(A_0+\sqrt{A_0}\times A_1+A_1) \qquad \text{رابطهٔ ۱}$$

در این رابطه، V حجم خاک‌برداری یا خاک‌ریزی، A_0 مساحت مقطع ابتدایی خاک‌برداری و خاک‌ریزی و A_1 مساحت مقطع ابتدایی خاک‌برداری و خاک‌ریزی بعدی است.

در این پژوهش هزینهٔ عملیات خاکی برای هر متر مکعب خاک براساس نرم، سخت یا سنگی بودن آن محاسبه شد. اطلاعات مربوط به سهم صخره و سنگ

در لایه‌های زیرین در مرحلهٔ قبل از ساخت توسط دستگاه رادار نفوذی به زمین (GPR) برداشت شد (Pazhouhan et al., 2019). برای اطمینان از صحت لایه‌ها و تکمیل اطلاعات، لایه‌های زیرسطحی در هنگام عملیات ساخت جاده به‌طور دقیق برداشت شد Stuckelberger (2006) (رابطهٔ ۲).

رابطهٔ ۲

$$C_{emb}=V_{fill}\times C_{comp}+V_{cut}\ (C_{exe}+p_{rock}\times C_{rock})$$

در این رابطه، C_{emb} هزینهٔ عملیات خاکی، V_{fill} حجم خاک‌ریزی، C_{comp} هزینهٔ کوبیدگی در مترمکعب، V_{cut} حجم خاک‌برداری، C_{exe} هزینهٔ حفاری (خاک‌برداری)، P_{rock} سهم صخره‌سنگ از کل حجم خاک‌برداری و درنهایت C_{rock} هزینهٔ حفاری در مناطق سنگی در واحد حجم است.

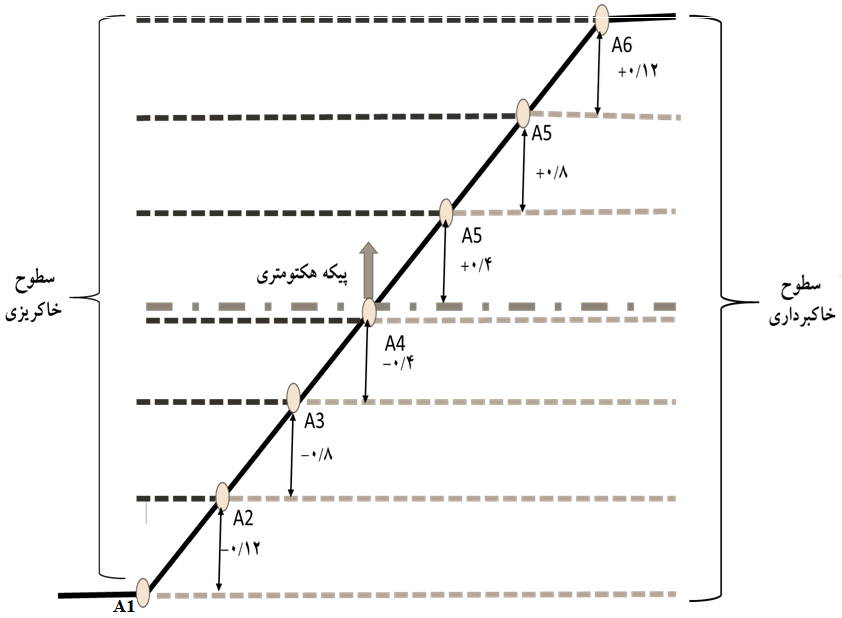
– به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان

به‌منظور محاسبهٔ حجم و هزینهٔ عملیات خاکی مقاطع مختلف، ابتدا براساس بازدیدهای صحرایی و اطلاعات موجود از نقشهٔ به‌دست‌آمده به‌وسیلهٔ لیزر اسکنر، دو نقطهٔ ابتدایی و انتهایی جادهٔ مورد نظر به‌عنوان نقطه‌های شروع و پایان انتخاب شد تا محور افقی جاده با در نظر گرفتن کمترین هزینه و حداقل کردن حجم عملیات خاکی بین دو نقطه طراحی شود. شایان ذکر است که این دو نقطه در واقع از ابتدا و انتهای سطح جاده به‌دست آمد. طراحان جاده به‌منظور مدیریت آسان‌تر، مسیر را به قطعات کوچک‌تری تقسیم می‌کنند. این بخش‌ها، قسمت‌هایی از جاده است که بین دو ایستگاه قرار می‌گیرد. به‌منظور مشخص کردن مقادیر خاک‌برداری و خاک‌ریزی، اختلاف بین سطح زمین و خط پروژهٔ طراحی‌شده که در قالب نقاط قرمز بیان می‌شود محاسبه شد، به‌طوری که مثبت بودن این اختلاف، نشان‌دهندهٔ مناطق خاک‌برداری و منفی بودن آن، نشان‌دهندهٔ مناطق خاک‌ریزی است.

پس از مشخص کردن مقاطع عرضی و محاسبات هزینه به‌منظور اصلاح خط پروژه، همهٔ طول جاده به مقاطعی با طول ۵ متر برای مسیرهای غیرمستقیم و ۱۰ متر برای مسیرهای مستقیم تبدیل شد. برای تعریف نزدیک به بهینهٔ خط پروژه اعداد قرمز با اختلاف ۰/۴ متر (انتخاب عدد ۰/۴ به‌دلیل پرهیز از لینک‌های بسیار زیاد بوده است) در بالا و پایین سطح ارتفاعی زمین تقسیم شد (شکل ۵). با توجه به تقسیم‌های انجام‌گرفته (در فواصل پنج تا ده متری) شیب طولی جاده بین حداقل ۴ و حداکثر ۸ درصد تعیین شد.

بنابراین امکان اتصال به لینک‌هایی که دارای شیب بیش از ۸ درصد بودند به صفر می‌رسد که این موارد از مدل حذف شدند؛ بر این اساس، از هر گره در مقطع اولی تا گره بعد در مقطع دومی حداقل یک و حداکثر پنج اتصال برقرار می‌شود. سپس برای همهٔ لینک‌های مربوط اطلاعات لایهٔ هزینه‌ها و حجم در اختیار مدل قرار داده شد. در این مقاطع با توجه به ارتفاع سطح زمین در دامنهٔ حداقل و حداکثر امکان خاک‌برداری اعداد قرمز با اختلاف ارتفاع ۰/۴ متری نسبت به هم ایجاد شد، به‌طوری که در هرکدام از این مقاطع اختلاف ارتفاع زمین و خط پروژه مبنای محاسبات حجم خاک‌برداری و خاک‌ریزی شد. ازآنجا که حداکثر شیب طولی جاده ۸ درصد در نظر گرفته شد، امکان عبور از شیب‌های بالای ۸ درصد در تابع مربوط، صفر در نظر گرفته شد.

ازآنجا که انتقال مواد خاک‌برداری خارج از سطح جاده مشکل و هزینه‌بر بود، برای جبران خاک‌ریزی در مناطقی که حجم خاک‌برداری کمتر از خاک‌ریزی بود از مقاطعی دیگر که این اختلاف مثبت باشد استفاده می‌شود. شایان یادآوری است که به‌منظور کاهش هزینهٔ حمل مواد حداکثر فاصلهٔ مورد قبول برای انتقال مواد به بخش خاک‌ریزی از دیگر مقاطع به‌منظور جبران مقادیر خاک‌ریزی ۲۰ متر و برای هر لینک هزینهٔ خاک‌برداری، خاک‌ریزی و حمل و کوبیدگی در نظر گرفته شد.



شکل ۵- نمایی از یک مقطع عرضی جاده و محل قرارگیری پیکه هکتومتری
(تغییر در اعداد قرمز با مقدار ۰/۴ ملاک محاسبهٔ مساحت بخش خاک‌برداری و خاک‌ریزی است).

در این فرمول مکان نقاط قرضه و دپو با خصوصیات خاکی مختلف در طول مسیر جاده در نظر گرفته شده است، ولی همان‌طور که ذکر شد در این تحقیق چون امکان انتقال مواد یا دپوی آنها در بخش‌های خارج از مسیر جاده به‌علت دسترسی سخت و کوهستانی بودن مسیر وجود نداشت، معادلات مربوط به نقاط دپو و قرضه از تابع هدف حذف شد. همچنین این فرض در نظر گرفته شده است که واحد هزینهٔ حمل دارای تناسب خطی با فاصل حمل است. واحد هزینهٔ فعالیت‌های عملیات خاکی متفاوت با مقدار مواد جابه‌جایی نیست، اما تحت تأثیر نوع خاک در هر مرحله است. در این روش، عامل تورم مواد جابه‌جاشده از منطقهٔ خاک‌برداری i و همچنین عامل انقباض موادی که در منطقهٔ خاک‌ریزی j کوبیده می‌شوند بررسی شد. تابع هدف Z در زیر ارائه شده است (رابطهٔ ۳). می‌توان گفت که لزوماً از هر لینک به لینک بعدی با کمترین هزینه یا به حداقل رساندن اختلاف بین خاک‌برداری و خاک‌ریزی هدایت نمی‌شود، بلکه از نقطهٔ شروع تا پایان به‌طور کلی از مسیری که کمترین هزینهٔ ساخت را داشته باشد و از طرفی توازن منطقی بین خاک‌برداری و خاک‌ریزی داشته باشد هدایت می‌شود. تابع هدف به‌صورت زیر ارائه شده است بخش اول تابع هدف به حداقل کردن هزینهٔ خاک‌برداری و بخش دوم به حداقل کردن هزینهٔ عملیات خاک‌ریزی مرتبط است.

$$\min Z = \sum_i \sum_j \mathrm{C}\ (\mathrm{i},\mathrm{j})\mathrm{X}(\mathrm{i},\mathrm{j}) + \sum_i \sum_j \mathrm{C}_f(\mathrm{i},\mathrm{j})\mathrm{X}_\mathrm{h}(\mathrm{i},\mathrm{j}) \qquad \text{رابطهٔ ۳}$$

در مدل چهار محدودیت زیر تعریف شد:

۱- مقدار موادِ جابه‌جاشده از منطقهٔ خاک‌برداری i به بخش خاک‌ریزی j برابر با مقدار لازم در بخش خاک‌ریزی باشد؛

۲- حداکثر جابه‌جایی برای جبران کمبود مواد خاکی در بخش خاک‌ریزی j باید برابر با مواد خاک‌برداری در حداکثر فاصلهٔ ۲۰ متری از بخش خاک‌ریزی باشد؛

۳- اختلاف مجموع بخش‌های مختلف خاک‌ریزی و خاک‌برداری در طول مسیر بیش از ۵ درصد اختلاف بین حجم کل خاک‌برداری و خاک‌ریزی نباشد؛

۴- در مناطقی که شیب عرصه بیشتر از ۷۰ درصد است، به‌علت ناپایداری ترانشهٔ خاک‌ریزی و هزینهٔ زیاد برای پایداری آن، همهٔ عرض جاده روی سطح خاک‌برداری قرار گیرد.

$C(i,j)$ و $X(i,j)$ حجم و واحد هزینهٔ خاک‌برداری و $C_f(i,j)$ و $X_h(i,j)$ هزینهٔ جابه‌جایی و کوبیدگی خاک از بخش خاک‌برداری i به بخش خاک‌ریزی j به‌ترتیب است که براساس هزینهٔ حفاری (u_e)، حمل (u_h) و کوبیدگی (u_c) برآورد می‌شود. این فرمول بر اساس مقادیر تنظیم‌شده بر اساس فاصلهٔ بین مرکز خاک‌برداری i و بخش خاک‌ریزی j (d_{ij}) تنظیم شده است (رابطهٔ ۴) (Kataria et al., 2005).

$$C(i,j) = u_e + s_i^h \left(u_h d_{ij} + u_c\right) \qquad \text{رابطهٔ ۴}$$

که S_i^h عامل تورم از بخش خاک‌برداری i است.

عامل تورم برآوردی در ارتباط با حمل و عامل انقباض در بخش خاک‌برداری در طول مسیر جاده به‌ترتیب با ۱/۴ و ۰/۷۵ و برای صخره‌سنگ به‌ترتیب ۱/۶ و ۱/۳ در نظر گرفته شد (FAO, 2016). همهٔ هزینه‌های مربوط به بخش‌های مختلف عملیات خاکی شامل خاک‌برداری، خاک‌ریزی و حمل از فهرست‌بهای واحد پایهٔ رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه استخراج شد.

- بهینه‌سازی کلونی مورچگان

قانون تصمیم برای مورچه k واقع در گره i که می‌خواهد یکی از گره‌ها را از مجموعهٔ گره‌های ملاقات‌نشده N_i انتخاب کند از رابطهٔ ۵ به‌دست می‌آید. در اینجا τ_{ij} نشان‌دهندهٔ مقدار فرومون روی یال (i,j) است، درحالی که η_{ij} نشان‌دهندهٔ عکس مقدار فاصلهٔ بین دو گره i و j است (Lin et al., 2013).

$$P_{ij}^{\,k} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}\eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{j\in N_i}\tau_{ij}^{\alpha}\eta_{ij}^{\beta}} \rightarrow if\ \ j \in N_i \\ 0 \rightarrow if\ \ j \notin N_i \end{cases} \qquad \text{رابطهٔ ۵}$$

همچنین مورچه‌ها درحالی که از گره i به گره j می‌روند، اطلاعات فرومون $\Delta\tau_{ij}$، به‌طور معمول به اندازهٔ عکس مقدار یال (i,j)، را روی یال مربوط می‌ریزند. این عمل با استفاده از فرمول زیر انجام می‌گیرد (رابطهٔ ۶).

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \qquad \text{رابطهٔ ۶}$$

به‌علاوه الگوریتم مانند نسخهٔ طبیعی آن و برای اجتناب از همگرایی سریع همهٔ مورچه‌ها به یک مسیر بهینهٔ محلی، از سازوکار تبخیر فرومون استفاده می‌کند؛ یعنی غلظت فرومون به‌طور خودکار و در هر تکرار به مقدار ρ کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر اگر τ ماتریس فرومون موجود بر روی یال‌های گراف مربوط باشد، این ماتریس در هر تکرار به‌وسیلهٔ فرمول زیر بهنگام می‌شود (رابطهٔ ۷).

$$\tau \leftarrow (1-\rho)\tau \rightarrow \rho \in (0,1] \qquad \text{رابطهٔ ۷}$$

-حل مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان

یک الگوریتم چندهدفه مسیریابی با تغییر در ساختار الگوریتم پیشنهادشده توسط Dorigo (1992) در محیط نرم‌افزار Matlab طراحی شد که برای بهینه‌سازی عملیات خاکی با سه تابع هدف (هزینهٔ ساخت، خاک‌برداری و حمل) استفاده شد. برای انتخاب مسیر توسط عامل مورچه یک رتبهٔ موضعی براساس توابع هدف مشخص و تعریف شد. پس از آن مجموعه‌ای از جواب‌های نزدیک به بهینه ارائه شدند. به‌عبارت دیگر، یک جواب بهینه وجود ندارد، بلکه جواب نهایی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های نزدیک به بهینه

است که تنها یک نقطه نیست، بلکه مجموعه‌ای از نقاط است که می‌تواند یک سطح، منحنی و ... باشد. مراحل اجرای الگوریتم مورچگان در این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱- آماده‌سازی (ایجاد مدل و تنظیم شاخص‌ها)

۲- برای هر مورچه مراحل زیر انتخاب می‌شود:

الف) یک مبدأ ثابت انتخاب می‌شود.

ب) تا تکمیل مسیر مراحل زیر اجرا می‌شود:

ب-۱) احتمال انتخاب گره‌های بعدی قابل انتخاب محاسبه می‌شود؛ ب-۲) یکی از گره‌های قابل انتخاب توسط چرخ رولت انتخاب می‌شود؛ ب-۳) پس از ساخته شدن مسیر، آن مسیر ارزیابی می‌شود.

۳- یافتن بهترین مسیر طی‌شده توسط همهٔ مورچه‌ها از روی مسیرهای ارزیابی‌شده

پس از آنکه همهٔ مورچه‌ها مسیرهای خود را طی کردند:

الف) هر مورچه از روی یال‌هایی که عبور کرده است فرومون می‌ریزد.

ب) فرومون همهٔ یال‌ها، در اثر تبخیر کمتر می‌شود.

۴- در صورت نیاز (برآورده نشدن شرط خاتمه) به مرحلهٔ دوم وارد می‌شود.

اصول احتمال: احتمال رفتن از گره اولیه به همهٔ حالت‌های ممکن گره‌های بعدی برای مورچهٔ k ام محاسبه می‌شود، به‌طوری که مجموع احتمالات رفتن از گره i به همهٔ گره‌های ممکن در همسایگی آن برابر با ۱ خواهد بود.

برای محاسبهٔ احتمال گره‌های بعدی شرایط زیر وجود دارد:

الف) گره j باید همسایهٔ گره i باشد؛ ب) انتخاب احتمال گره‌هایی که هزینهٔ کمتری دارند بیشتر از انتخاب دیگر گره‌های قابل انتخاب باشد؛ ج) احتمال انتخاب گره‌هایی که همسایهٔ گره i نیستند، صفر است؛ د) مورچه k ام نباید قبلاً از گره j عبور کرده باشد.

ایجاد مجموعهٔ همسایه‌های گره i:

$$N_i = \left[j / L_{ij} \in L \right]$$

مجموعهٔ همسایه‌های گره i با N_i نشان داده می‌شود. مجموعهٔ همسایه‌های گره i برابر است با mهایی که حداقل یک لینک بین m و i وجود دارد.

محاسبهٔ احتمال گره بعدی از طریق رابطهٔ ۵ انجام می‌گیرد.

قانون تصمیم

برای مورچهٔ k واقع در گره i که می‌خواهد یکی از گره‌ها را از مجموعهٔ گره‌های ملاقات‌نشده N_i انتخاب کند، از فرمول بالا به‌دست می‌آید. در اینجا τ_{ij} نشان‌دهندهٔ مقدار فرومون روی یال (i,j) است، درحالی که η_{ij} نشان‌دهندهٔ عکس مقدار فاصلهٔ بین دو گره i و j است که در این پژوهش فاصله یا هزینهٔ بین دو گره برمبنای هزینهٔ عملیات خاکی و افزایش اختلاف بین مقدار خاک‌برداری و خاک‌ریزی در نظر گرفته شد. α و β ضرایب وزنی هستند و تعادل بین اطلاعات فرومون و اطلاعات هیورستیک از طریق این ضرایب اعمال می‌شود.

برای انتخاب گره بعدی از اصول احتمال و روش چرخ رولت (Roulette Wheel) استفاده شد (Hu et ali., 2008).

- انواع شرایط خاتمه

شروط خاتمه در همهٔ الگوریتم‌ها قابل استفاده هستند. سه نوع شرط خاتمه در ارتباط با الگوریتم برقرار است:

الف) شرایط خاتمهٔ آرمانی: در این پژوهش رسیدن به حداکثر اختلاف ۵ درصد بین مقدار خاک‌برداری و خاک‌ریزی یکی از شروط خاتمه است.

ب) تعیین یک سقف مشخص برای الگوریتم که در آن مقدار خاص روند تکرار متوقف شد. این سقف می‌تواند شامل زمان، تعداد تکرار یا فراخوانی تعداد تابع هدف باشد که بعد از آن فرایند بهینه‌یابی

متوقف می‌شود.

ج) مشخص کردن یک مقدار خاص به‌عنوان زمان خاتمهٔ عملیات؛ به‌طوری که در آن مقدار به بعد، تغییر خاصی در نتایج ایجاد نشود. به‌عنوان مثال در صورتی که در طی ۲۰ ثانیه تغییری در نتایج ایجاد نشود می‌توان ادامهٔ روند رسیدن به نتایج بهتر را خاتمه داد.

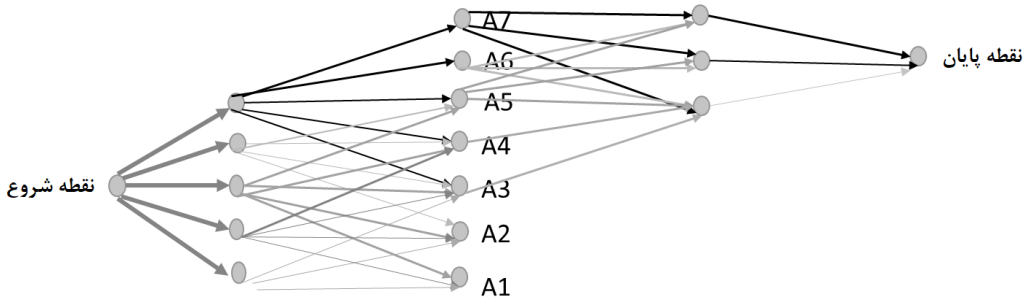
- ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان

به‌منظور ارزیابی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان، گزینه‌های پیشنهادی این الگوریتم با روش ساخت سنتی جاده که به‌صورت دستی توسط یک کارشناس کارآزموده روی یک نقشهٔ توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ طراحی شده بودند مقایسه شدند. در این پژوهش گزینه‌های طراحی‌شده توسط روش‌های مختلف شامل گزینهٔ طراحی‌شده توسط کارشناسان بخش طراحی که در بخش فنی ادارهٔ مربوط موجود است، گزینه‌ای که توسط الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان در این تحقیق پیاده‌سازی و اجرا شد و در نهایت مسیری که توسط پیمانکار و در بخش اجرا (واقعیت زمینی) به‌دست آمد مقایسه شدند.

نتایج

بهینه‌یابی خط پروژه از طریق الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان

نتیجهٔ بهینه‌یابی مسیر عمودی جاده با تغییر در اعداد قرمز و شیب مجاز حداکثر ۸ درصد (از یک گره به گره بعدی) در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمایی شماتیک از نحوهٔ اتصال گره‌های مختلف برای رسیدن از نقطهٔ شروع به پایان

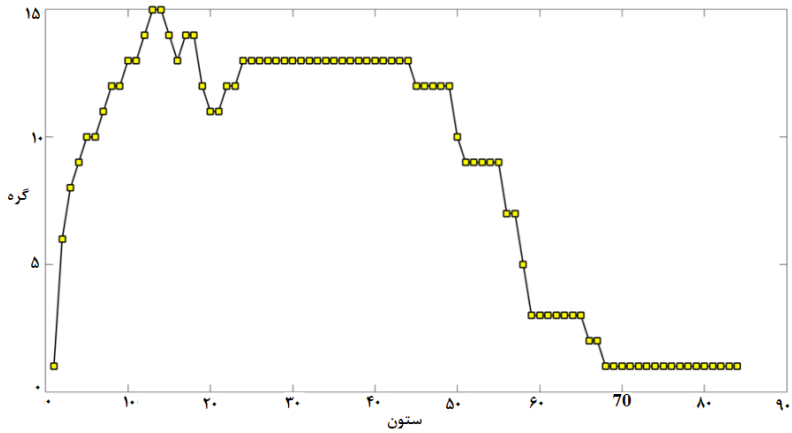
بهینه‌ترین مسیر از بین گره‌های موجود و اتصال آنها به هم به‌منظور حداقل کردن حجم و هزینهٔ عملیات خاکی به‌دست آمد. مسیرهای ممکن از نقطهٔ شروع تا نقطهٔ پایان از میان همهٔ لینک‌های قابل عبور با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان تهیه و بهترین مسیر انتخاب شد (شکل ۷). پروفیل طولی مسیر نیز در شکل ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، الگوریتم در دور ۴۵ به جواب نزدیک به بهینه رسیده و عملکرد الگوریتم در دورهای بعدی ثابت بوده است. در نتیجه می‌توان گفت یکی از سه شروط خاتمه (نقطهٔ ثبات) در دور ۴۵ محقق شده است (شکل ۹).

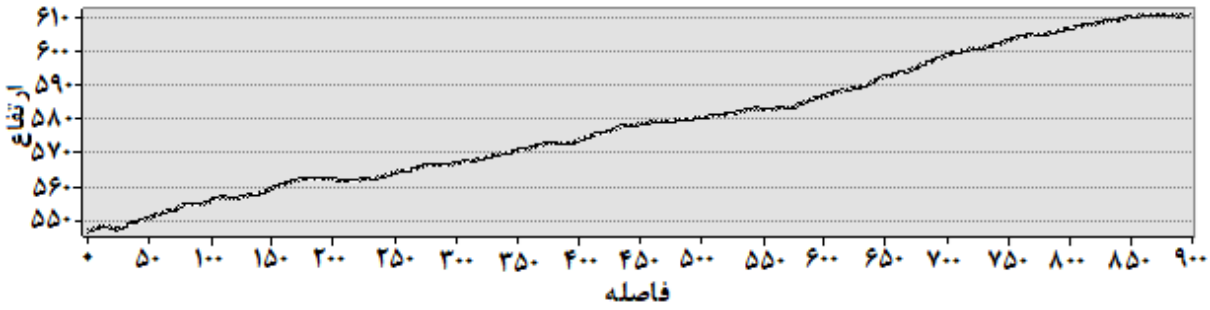
در این تحقیق مقدار واقعی حجم عملیات خاک و هزینهٔ مربوط به آن با توجه به نوع خاک زیرسطحی و بر اساس فهرست‌بهای واحد راه محاسبه شد. واقعیت زمینی عملیات خاکی ۱۷۴۰۰ متر مکعب برآورد شد که هزینهٔ آن نیز براساس نوع مواد زیرسطحی و فهرست‌بهای واحد پایهٔ رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه برابر ۱۰۲۰۰۰۰۰۰ ریال است.

در این تحقیق سه روش برآورد هزینه و حجم عملیات خاکی با یکدیگر مقایسه شدند. اولین روش برآورد حجم و هزینهٔ عملیات خاکی طراحی و اجرای

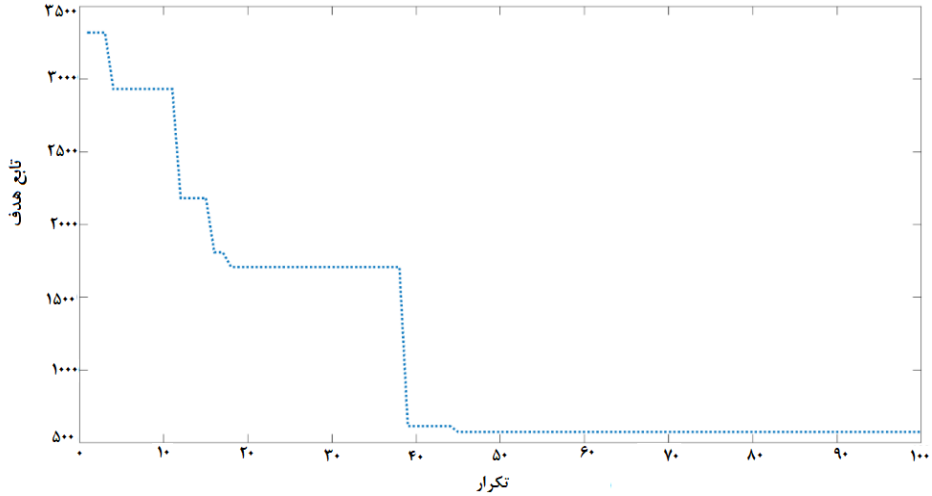
خط پروژه توسط کارشناسان بخش اجرا به‌منظور واگذاری به پیمانکاران بوده است. در این روش کل هزینهٔ در نظر گرفته‌شده برای ۱۰۰۰ متر در حدود ۹۵۰ میلیون ریال در سال ۱۳۹۸ (فعلی‌سازی بر اساس فهرست هزینه‌ها) برای ۱۲۰۰۰ متر مکعب خاک‌برداری و ۴۰۰۰ مترمکعب خاک‌برداری بوده است. ازآنجا که شرایط ناشناخته و پیش‌بینی‌ناپذیر در مناطق جنگلی وجود دارد، مقادیر محاسبه‌شده با مقدار واقعی و آنچه در بخش اجرا به‌دست می‌آید تفاوت چشمگیری دارد.



شکل ۷- گره‌های انتخاب‌شده در مقطع به‌وسیلهٔ الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان



شکل ۸- پروفیل طولی راه حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان



شکل ۹- روند انتخاب جواب نزدیک به بهینه توسط الگوریتم کلونی مورچگان

در نهایت گزینهٔ پیشنهادی این پژوهش نتایج مقبول‌تری را نسبت به دو روش طراحی‌شده توسط کارشناسان بخش طراحی و مسیری که توسط پیمانکار و در بخش اجرا (واقعیت زمینی) شده به‌دست آورده است، به‌طوری که حجم خاک‌برداری در این روش برابر با ۴۹۳۷/۴۶ متر مکعب و حجم خاک‌ریزی برابر با ۴۷۶۲/۸۸ متر مکعب محاسبه شد که در واقع اختلاف بین خاک‌برداری و خاک‌ریزی به ۳/۶ درصد کاهش یافته است. هزینهٔ عملیات خاکی با در نظرگیری نوع طبقات زیرسطحی و هزینهٔ حمل و کوبیدگی تا حداکثر ۲۰ متر به حدود ۴۱۰ میلیون ریال رسیده است (جدول ۱).

جدول ۱- مقایسهٔ حجم و هزینهٔ عملیات خاکی در سه روش مختلف

	طراحی دستی (کارشناسان بخش اجرا)	مقدار واقعی (ساخته‌شده توسط پیمانکار)	روش حاضر (الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان)
حجم عملیات خاکی (متر مکعب)	۱۶۰۰۰	۱۷۴۰۰	۹۶۹۹
هزینه به ریال	۹۵۰/۰۰۰/۰۰۰	۱/۰۲۰۰/۰۰۰/۰۰۰	۴۱۰/۰۰۰/۰۰۰

با مقایسهٔ اعداد قرمز در هر سه سناریو، این نکته مشخص شد که در هر سه روش اعداد قرمز متفاوتی در محل پیکه‌های هکتومتری انتخاب شد، ازآنجا که تعداد پروفیل‌های جاده در این تحقیق زیاد بود به‌صورت تصادفی از هر طبقهٔ سختی یک نمونه برای مقایسهٔ نتایج انتخاب شد.

براساس نتایج در سه مقطع انتخاب‌شده در هر سه روش، انتخاب اعداد قرمز بیشتر به‌سمت منفی است، به‌طوری که در این دامنه تمایل به خاک‌برداری بیشتر از خاک‌ریزی است. با این‌حال به نظر می‌رسد در روش الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان در طبقهٔ سخت، اختلاف بین خط پروژه و زمین طبیعی کمتر از دیگر روش‌ها بوده است؛ این در حالی است که در طبقهٔ نرم عدد قرمز بیشتر از دیگر روش‌ها بوده است. علت را می‌توان چندهدفه بودن توابع در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان دانست، به‌طوری که در طبقهٔ سنگی به‌علت چندبرابر بودن هزینهٔ حفاری در مناطق سنگی نسبت به مناطق دارای خاک نرم، الگوریتم گره‌هایی را انتخاب کرد که نیاز به خاک‌برداری چندانی نداشتند (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسهٔ اعداد قرمز در محل پیکه هکتومتری در مقاطع با درجات سختی مختلف

	نوع طبقه	اعداد قرمز		
		روش اول	روش دوم	روش سوم
پروژه ۱	سنگی	-۴	-۵	-۲
پروژه ۲	سخت	-۵	-۶/۵	-۵
پروژه ۳	نرم	-۲	-۳	-۴

بحث

دستیابی به جاده‌ای با حداقل هزینهٔ ساخت از نظر خاک‌برداری، مورد علاقه بسیاری از طراحان و همچنین حامیان محیط زیست است. می‌توان گفت که به حداقل رساندن حجم عملیات خاکی و مقدار خاک‌برداری و خاک‌ریزی تقریباً متعادل از شروط اساسی در ترسیم

خط پروژه است. افزون‌بر این پیش‌شرط‌ها، توجه به نوع خاک زیرسطحی از دیگر شاخص‌های مهم در حداقل کردن هزینهٔ عملیات خاکی ساخت جاده است (Stuckelberger et al., 2006; Ghajar et al., 2012). از این‌رو در این تحقیق طراحی مدل براساس دو رویکرد بود. رویکرد اول، به حداقل رساندن حجم خاک‌برداری و خاک‌ریزی از بین همهٔ حالت‌های ممکن حاصل از تغییر در اعداد قرمز و رویکرد دوم، به حداقل رساندن هزینه‌های ساخت با توجه به نوع خاک زیرسطحی بود. با توجه به این شروط، برنامه بهترین مسیر مورد نظر در فضای جست‌وجو را تولید می‌کند. نتایج روش الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان موفق به انتخاب مسیر شد که در نهایت موجب کاهش ۵۸/۵۵ درصدی هزینهٔ ساخت جاده نسبت به روش طراحی دستی و ۶۵/۰۹ درصدی نسبت به مقدار واقعی اجراشده در عرصه شد؛ بنابراین می‌توان گفت روش معرفی‌شده در این تحقیق گذشته از محاسبات مربوط در زمان کمتر، آزمون حالت‌های ترکیبی ممکن از محل قرارگیری خط پروژه جاده را برای طراح امکان‌پذیر می‌کند. از دیگر ویژگی‌های این روش این است که مطابق با اولویت‌ها و اهداف طراح، با اندکی تغییر به کارایی و نتیجهٔ خوبی دست می‌یابد. یکی از دلایل اصلی کاهش چشمگیر هزینهٔ عملیات خاکی، در نظر گرفتن محدودیت حمل در تابع مربوط بود، درحالی که در دو روش دیگر اختلاف بسیار زیادی بین حجم خاک‌برداری و خاک‌ریزی وجود داشت و پیمانکاران بخش اجرا مجبور به حمل مواد اضافی به منطقه‌ای خارج از محدودهٔ ساخت جنگل هستند. از دلایل دیگر می‌توان به در اختیار قرار دادن اطلاعات پهنه‌بندی صخره‌سنگ در توابع الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان اشاره کرد، به‌طوری‌که الگوریتم با روشی هوشمند عبور از این مناطق را به‌دلیل هزینهٔ بسیار زیاد در حد امکان کاهش داد. ولی در دو روش دیگر عمق خاک‌برداری در مناطق سنگی به‌طور چشمگیری زیاد بود. تحقیقات متعددی به تأثیر پیش‌بینی سهم صخره‌سنگ و نوع مواد زیرسطحی در هزینهٔ ساخت اشاره کرده‌اند (Rostami et al., 1995; Ghajar et al., 2012; Stückelberger et L. 2006)، به‌طوری که اگر بتوان نوع مواد زیرسطحی را در مدل‌های برآورد هزینه وارد کرد، می‌توان هزینهٔ ساخت را تا حد زیادی کاهش داد.

در تحقیقات گوناگون دربارهٔ بهینه‌سازی مسیر افقی جاده با الگوریتم‌های فراابتکاری متنوع، نتایج قابل قبولی به‌دست آمده است (Aruga et al., 2005a; Aruga et al., 2005b; Kataria et al., 2005).

امروزه توجه به گسترش دیدگاه‌های محیط زیستی در طراحی و ساخت جاده‌های جنگلی، تعداد اهداف و همچنین محدودیت‌ها بیش از پیش خواهد شد که در این حالت ابعاد مسئله را بزرگ‌تر و پیچیده‌تر خواهد کرد. می‌توان اذعان داشت که همسو با نتایج این تحقیق، پژوهش‌های متعددی موفق بودن الگوریتم چندهدفهٔ مسیریابی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان در مسائل پیچیدهٔ بزرگ‌مقیاس و مبتنی بر واقعیت را تأیید کرده‌اند (Contreras et al., 2008; Lin et al., 2014; Lin et al., 2016).

در پژوهشی مشابه در جنگل‌های هیرکانی استان گیلان توسط Babapour et al. (2018) از دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA) به‌منظور حل مشکل بهینه‌یابی مسیر عمودی جاده جنگلی استفاده شد. یافته‌های آنان نشان داد که الگوریتم ژنتیک نتایج قابل قبول‌تری در زمینهٔ کاهش هزینهٔ ساخت نسبت به بقیه روش‌ها دارد و می‌تواند راه‌حل‌های بهتر را در زمان کمتر به‌دست آورد. تفاوت چشمگیر با تحقیق حاضر در این است که در پژوهش مذکور سهم صخره‌سنگ توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN[1]) برآورد و وارد مدل شد، درحالی که در این تحقیق از داده‌های واقعی استفاده شد.

1 Artificial neural network

همچنین در پژوهش مذکور از روش کلونی مورچگان نیز استفاده شد که به‌علت حاصل نشدن نتایج ضعیف نادیده گرفته شد؛ بنابراین اهمیت تحقیق حاضر می‌تواند وارد کردن اطلاعات لایه‌های زیرسطحی به مدل مربوط باشد که به دستیابی به نتایج بسیار خوبی منجر شد.

از سوی دیگر، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان که توانایی و قدرت زیادی در مسائل مربوط به مسیریابی دارد در این پژوهش راضی‌کننده بوده است. می‌توان گفت که تبخیر فرومون و "احتمال-تصادف" به مورچه‌ها امکان یافتن کوتاه‌ترین مسیر را می‌دهد. این دو ویژگی موجب ایجاد انعطاف در حل هر گونه مسئلهٔ بهینه‌سازی می‌شوند. به این ترتیب که اگر یال (گرهی) حذف شود، دیگر لازم نیست که الگوریتم از ابتدا مسئله را حل کند، بلکه از جایی که مسئله حل شده تا محل حذف یال (گره) هنوز بهترین مسیر وجود دارد و از این به بعد مورچه‌ها می‌توانند پس از مدت کوتاهی مسیر بهینه (کوتاه‌ترین مسیر) را بیابند.

نتیجه‌گیری

طراحان و پیمانکاران باید گذشته از حداقل‌سازی هزینهٔ ساخت، رضایت طرفداران محیط زیست را نیز جلب کنند. در این پژوهش به‌منظور محاسبهٔ حجم دقیق عملیات خاک‌برداری و خاک‌ریزی و شیب دقیق عرصه از داده‌های لیزر اسکنر زمینی استفاده شد و نوع مواد زیرسطحی نیز به‌طور دقیق در عرصه برداشت و وارد مدل هزینه شد. پس از استخراج اطلاعات کیفی و کمی هر مقطع، شرایط برای بهینه کردن عملیات خاکی که سبب اصلاح خط پروژه می‌شود مهیا شد. در این پژوهش از الگوریتم کلونی مورچگان به‌دلیل توانایی زیاد آن در حل مسائلی با مقیاس بزرگ و در زمان کوتاه و قابلیت خودتنظیمی در بهینه‌یابی عملیات ساخت جاده استفاده شد. هزینه، حجم و مقدار جابه‌جایی مواد و شیب به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از این است که مدل استفاده‌شده توانست هزینهٔ ساخت جاده را تا یک‌سوم مقدار سنتی تعدیل کند. همچنین حجم خاک‌برداری و خاک‌ریزی نیز به مقدار یک‌سوم کاهش پیدا کرد. با توجه به یافته‌های تحقیق می‌توان پیشنهاد داد که در پروژه‌های ساخت جاده‌های جنگلی با توجه به حساسیت و اهمیت زیاد این مناطق از ابزارهای دقیق مانند لیزر اسکنر زمینی استفاده شود. از طرفی در این تحقیق توابع هزینه مبتنی بر نوع مواد زیرسطحی و حجم عملیات خاکی بوده است، از این‌رو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی شاخص‌هایی مانند تغییر گرادیان شیب یا خصوصیات طرح نیز مدنظر قرار گیرد. در نهایت پیشنهاد می‌شود ازآنجا که نتایج این تحقیق به‌منظور اصلاح خط پروژه و با هدف کاهش حجم و هزینهٔ عملیات خاکی مؤثر بوده است، دیگر قسمت‌های عملیات ساخت جاده با این الگوریتم بررسی شود.

References

Aruga, K., Sessions, J. & Akay, A.E. (2005a). Heuristic planning techniques applied to forest road profiles. *Journal of Forest Research*, *10*(2), 83-92.

Aruga, K., Sessions, J. & Akay, A.E. (2005b). Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes. *Journal of Forest Research*, *10*(2), 113-123.

Babapour, R., Naghdi, R., Ghajar, I. & Mortazavi, Z. (2018). Forest road profile optimization using meta-heuristic techniques. *Applied Soft Computing*, *64*, 126-137.

Bruce, J.C., Han, H.S., Akay, A.E. & Chung, W. (2011). ACCEL: Spreadsheet-based cost estimation for forest road construction. *Western Journal of Applied Forestry*, *26*(4), 189-197.

Cheng, J.C. & Jiang, L.J. (2013). Accuracy comparison of roadway earthwork computation between 3D and 2D methods. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *96*, 1277-1285.

Contreras, M.A., Chung, W. & Jones, G. (2008). Applying ant colony optimization metaheuristic to solve forest transportation planning problems with side constraints. *Canadian Journal of Forest Research, 38* (11), 2896-2910.

Dorigo M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms, Ph.D. Dissertation, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy.

Dorigo, M. & Di Caro, G. (1999). Ant colony optimization: a new meta-heuristic. *In Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation*, Washington, USA, 1470-1477.

Dowsland, K. (1995). Variants of simulated annealing for practical problem solving. Applications of Modern Heuristic Methods. Henley-on-Thames: Alfred Waller Ltd., in association with UNICOM, 209 p.

Ghajar, I., Najafi, A., Ali Torabi, S., Khamehchiyan, M. & Boston, K. (2012). An adaptive network-based fuzzy inference system for rock share estimation in forest road construction. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, *33*(2), 313-328.

Glover, F. (1989). Tabu search—part I. *ORSA Journal on computing*, *1*(3), 190-206.

Hu, X.M., Zhang, J. & Li, Y. (2008). Orthogonalorthogonal methods based ant colony search for solving continuous optimization problems. *Journal of computer science and technology*, *23*(1), *2-18.*

Jaafari, A. (2015). Planning forest transportation network under a multi-objective perspective using metaheurstic algorithms, Ph.D thesis, Tarbiat modares university, Tehran, Iran.

Kang, M.W., Jha, M.K. & Schonfeld, P. (2012). Applicability of highway alignment optimization models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *21*(1), 257-286.

Kataria, S., Samdani, S.A. & Singh, A.K. (2005). Ant colony optimization in earthwork allocation. In *International Conference on Intelligent Systems, Kuala Lumpur, Malaysia*.

Lin, P., Contreras, M., Zhang, J. & Chung, W. (2013). Applying ant colony optimization to solve constrained forest transportation planning problems. *In Council on Forest Engineering Annual Meeting*, Missoula, Montana, USA.

Lin, P., Contreras, M.A., Dai, R. & Zhang, J. (2016). A multilevel ACO approach for solving forest transportation planning problems with environmental constraints. *Swarm and Evolutionary Computation*, 28, 78-87.

Lin, P., Zhang, J. & Contreras, M.A. (2014). Applying pareto ant colony optimization to solve bi-objective forest transportation planning problems. *In Proceedings of the 2014 IEEE 15th International Conference on Information Reuse and Integration*, San Francisco, USA, 795-802.

Maniezzo, V., Gambardella, M. & de Luigi, F. (2004). Ant colony optimization. *New Techniques in Engineering Research, 125* (5), 377–390.

Nicholson, A.J., Elms, D.G. & Williman, A. (1976). A variational approach to optimal route location. *Highway Engineer*, *23*(3).

Pazhouhan, I., Najafi, A., KamkarRouhani, A. & Vahidi, J. (2019). Subsurface elements prediction for the design of forest road using ground penetrating radar technique. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *78*(2), 753-761.

Reeves, C.R. (1993). Using Genetic Algorithms with Small Populations, Using genetic algorithms with small populations. In: *Proceedings of the 5th international conference on genetic algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA, 92–97.

Rostami, J., Ozdemir, L. & Neil, D.M. (1995). Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 4* (32), 171A.

Stuckelberger J., Heinimann H.R. & Chung W. (2004). Improving the effectiveness of automatic grid cell based road route location procedures. *In Proceedings of the 12th International Mountain Logging Conference,* Vancouver, Canada, 13-16.

Stuckelberger J.A., Heinimann H.R. & Burlet E.C. (2006). Modelling spatial variability in the life-cycle costs of low-volume forest roads. *European Journal of Forest Research, 125* (5), 377–390.

Stückelberger, J.A., Heinimann, H.R., Chung, W. & Ulber, M. (2006a). Automatic road-network planning for multiple objectives. *The 29th Council on Forest Engineering*, Coeur d' Alene, USA, 233-248.

Trietsch, D. (1987). A family of methods for preliminary highway alignment. *Transportation Science*, *21*(1), 17-25.

Yang, N., Kang, M.W., Schonfeld, P. & Jha, M.K. (2014). Multi-objective highway alignment optimization incorporating preference information. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. *40*, 36-48.

Iranian Journal of Forest
Vol. 12, No. 1, Spring 2020
pp. 113-130

Research Article

Optimization Forest Road Construction Using Ant Colony Metaheuristic

I. Pazhouhan[1*], A. Najafi[2], J. Vahidi[3], A. Kamkar Rouhani[4]

[1] Assistant Prof., Natural Resource and Environment Faculty, Malayer University, Malayer, I. R. Iran
[2] Associate Prof, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, I. R. Iran
[3] Associate Prof, Faculty of Mathematics, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran
[4] Associate Prof, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, I. R. Iran

(Received: 10 June 2019, Accepted: 21 February 2020)

Abstract

For designing forest roads that in addition to minimize the cost of constructing, satisfy environmentalists, it is necessary to provide designers and contractors accurate data from surface and subsurface conditions of the road area due to the large-scale of data using of optimization methods (metaheuristic algorithms) with the help of computers is necessary. For this purpose, this research was carried out on a proposed forest road whit length of 1 km in the forests of the district 4 of Babakoh in the city of Siahkal in Guilan province. The cycle of all earthwork work was studied by continuous time study method and the information of the subsurface layers terms of digging was carefully recorded. The results of comparing the method of the ant colony with the hand-made design scenario showed that the multi-objective algorithm presented in this study has great potential for reducing the cost of earthwork operations and its volume. Based on the results, the algorithm is able to reduce 58.55 and 64 percent the cost of earthwork operations and the volume of operations, respectively. Finally, the results of this research can be used as a guide to better management of forest areas, especially forest roads with the development of efficient methods in all forestry forests.

Keywords: Cost Model, Earthwork Volume, Road Profile, Road Line.

∗Corresponding author Tel: +989189518806 Email: imanpazhouhan@gmail.com