فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۲، زمستان ۱٤۰۱، ص. ۲۵۱۷-۲٤۹۵

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی مسیر قائم راه با در نظر گرفتن هزینه مصرف سوخت و استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

محسن بابائی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

Email: m.babaei@basu.ac.ir

امیرحسین چهارمحالی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

دریافت: ۱٤۰۰/۰۵/۰۳. پذیرش: ۱٤۰۰/۰۸/۱٦

چکیده

افزایش قیمت سوخت، محدودیت منابع انرژی و مسائل محیط‌زیستی منبعث از مصرف زیاد آن، روش‌هایی برای ارزیابی گزینه‌های خط پروژه (مسیر قائم) راه را می‌طلبد، که ضمن تأمین ایمنی و راحتی رانندگان و کاهش هزینه‌های احداث راه، کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه را به همراه داشته باشد. در این پژوهش سعی شده است میزان هزینه سوخت برآورد و اهمیت آن در مقایسه با هزینه عملیات خاکی سنجیده شود. همچنین، هزینه عملیات خاکی به جای روش مرسوم روش بروکنر که محدودیت‌هایی دارد، از روش مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی - که کارآیی بیشتری در محاسبه هزینه‌های واقعی جابجایی خاک دارد- استفاده شده‌است. در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی برای تعیین مسیر قائم راه ارائه شده است، که در آن سطوح بهینه در نقاط تغییر شیب طولی به گونه‌ای تعیین می‌شوند که مجموع وزن‌داده‌شده هزینه احداث و هزینه مصرف سوخت کمینه شود. برای حل این مسئله، چارچوبی دو سطحی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی تبرید ارائه شده است، به گونه‌ای که در سطح بالای آن سطوح بهینه در نقاط تغییر شیب طولی بر مبنای کمترین مجموع هزینه احداث و هزینه مصرف سوخت تعیین می‌شوند، و کمینه‌سازی هزینه احداث از طریق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی در سطح پایین آن انجام می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که سرعت و دقت اجرای الگوریتم ارائه‌شده در مقایسه با روش جست‌وجوی کامل بسیار مناسب است و می‌توان از آن در اجرای پروژه‌های واقعی بهره برد.

واژه‌های کلیدی: مسیر قائم راه (خط پروژه)، هزینه مصرف سوخت، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

۱. مقدمه

هدف از طراحی راه، ایجاد ارتباط بین دو نقطه با کمترین میزان هزینه و بیشترین کارآیی با توجه به محدودیت‌های زیست‌محیطی و اجتماعی است (Jha and Maji, 2007). از آنجا که تعداد مسیرهای ممکن بین دو نقطه بینهایت است، روش‌های سنتی که عمدتاً مبتنی بر قضاوت مهندسی هستند ممکن است که بعضی از گزینه‌های مطلوب را در نظر نگیرند (Li et al., 2013). برای در نظر گرفتن اینگونه مسیرها و کاهش حجم کاری مهندسان، برخی دستورالعمل‌های خودکار برای تعیین مسیرهای مناسب و تخمین تقریبی هزینه ها ایجاد شده‌اند (Jong and Schonfeld, 2003). طراحی خودکار راه‌ها باعث کاهش مشکلاتی نظیر خسته‌شدن طراح و امکان خطای انسانی می‌شود (Kim et al., 2004). ضمن اینکه این دستورالعمل‌ها اجازه استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی در جستجوی مسیر مناسب را می‌دهند. تکنیک‌های بهینه‌سازی باعث صرفه‌جویی در زمان طراحی شده و ابزار قدرتمندی را برای جست‌وجوی مسیر مناسب در اختیار تصمیم گیرندگان قرار می‌دهند (OECD, 1973).

خط پروژه (مسیر قائم)، خط مرکزی راه است که در امتداد مقطع طولی راه دیده می‌شود. طراحی خط پروژه طولی با توجه به تاثیرات آن بر هزینه احداث راه، مدیریت ترافیک، مصرف سوخت و ایمنی اهمیت بالایی دارد. در بهینه‌سازی طراحی خط پروژه یک مسیر با توجه به محدودیت‌ها و مشخصات مختلف راه با هدف کاهش هزینه ساخت و تاثیرات مخرب زیست‌محیطی انتخاب می‌شود (Fwa et al., 2002). در طراحی راه، پیدا کردن خط پروژه مناسب در راستای قائم را مسئله تعیین خط پروژه قائم می‌نامند (Jha et al., 2006). مدل‌های بهینه‌سازی متنوعی برای حل مسئله تعیین خط پروژه قائم در ادبیات موضوع پیشنهاد شده است، که هر یک از آن‌ها بر مبنای فرضیات و شرایط مشخصی از مسئله ارائه شده‌اند. این مدل‌ها را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم بندی کرد: مدل‌های دارای حل دقیق و مدل‌های دارای حل تقریبی.

مدل‌های دارای حل دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند، اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارآیی کافی ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. مدل‌های بهینه‌سازی دارای حل دقیق عبارت‌اند از: برنامه‌ریزی پویا (Hayman, 1970) و جست‌وجوی شمارشی (Goh et al., 1988). روش جست‌وجوی شمارشی محاسبات قابل توجهی نیاز دارد و نمی‌تواند بهینگی کلی در مدل‌های پیچیده را تضمین کند، زیرا در این روش سازوکاری برای کاستن دامنه جست‌وجو وجود ندارد و شمارش تمام حالات ممکن خط پروژه بسیار زمان‌بر یا غیرممکن خواهد بود. برنامه‌ریزی پویا نیز به علت گسسته بودن و وابستگی به اطلاعات فرآیندهای قبلی، بعضی از جواب‌های مناسب را از دست می‌دهد. تراپیا با استفاده از برنامه‌نویسی اعداد صحیح مختلط، هزینه‌های عملیات خاکی را حداقل کرد(Trypia, 1979). مایر و استارک مدل برنامه‌ریزی خطی را برای کاهش هزینه عملیات خاکی از طریق ایجاد تعادل در حجم خاک هر مقطع ارائه کردند (Mayer and Stark, 1981). اوگلسبی و هیکس تلفیقی از یک روش گرافیکی به نام نمودار مسافت جرم و برنامه‌ریزی خطی را برای بهینه‌سازی عملیات خاکی استفاده کردند (Oglesby and Hicks, 1982). عیسی مدل مایر و استارک را توسعه داد و الگوریتمی عددی را ارائه کرد که هنگامی که عملیات خاکی را به روش برنامه‌ریزی خطی بهینه‌سازی می‌کند، و به دنبال خطوط پروژه ممکن می‌گردد. او هزینه جابجایی واحد حجم از مسأله را به صورت غیرخطی در نظر گرفت و برای محاسبات خود از برنامه‌ریزی درجه دوم بهره برد (Easa, 1988). مارب و بافالی این تکنیک‌ها را بهبود بخشیده و نشان دادند که می‌توان از آن‌ها برای حل مسائل تسطیح اراضی استفاده کرد (Mareb and Bafali, 1994). عیسی مدل بهینه‌سازی خطی که بهترین قوس

قائم سهمی را متناسب با پروفیل داده شده تعیین می‌کند، ارائه کرد؛ تابع هدف مدل وی با کاهش اختلاف ارتفاع خط زمین با قوس قائم به بهینه‌سازی مسیر می‌پردازد (Easa, 1999). از آن‌جا که طراحی خط پروژه معمولاً تنها در محور راه صورت می‌گیرد، ممکن است سبب گمراهی تعادل احجام خاکی شود، بنابراین گوتپ و همکارانش در سال ۲۰۰۳، روشی را که در آن یک ارتفاع وزنی فرضی به نمایندگی از میانگین ارتفاع‌ها در افست‌های مختلف مقطع عرضی زمین گرفته می‌شد، ارائه نمودند. در نتیجه توانستند با نزدیک کردن خط پروژه به خط وزنی فرضی، تعادل میان احجام خاکبرداری و خاکریزی را برقرار کنند (Goktepe and Lav, 2009). هیر و همکاران در سال ۲۰۱٤ تکنیک‌های متنوعی را برای بهبود سرعت حل مسائل خط پروژه طولی بررسی کردند که از مهمترین آنها می‌توان به مدل گراف حمل و نقل کامل و مدل جریان شبه-شبکه اشاره کرد (Hare et al,. 2014). باباپور و همکاران در سال ۱۳۹۵، مدل 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. (Babapour et al., 2018).

یکی از مزیت‌های استفاده از مدل‌های دارای حل دقیق، یافتن جواب بهینه به صورت دقیق می‌باشد. اما، با توجه به چالش‌های موجود در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی در دنیای واقعی و الزام مدلساز برای استفاده از فرضیات ساده‌کننده، مدل‌های حل دقیق با مشکلات زیادی روبه رو هستند. به همین دلیل، در مواقعی که پارامترهای موثر در مسئله پیچیده هستند و باعث سخت‌تر شدن مسأله بهینه‌سازی می‌شوند، برای حل مسأله از الگوریتم‌های تقریبی استفاده می‌شود. به بیان دیگر، الگوریتم‌های تقریبی ابزار انعطاف‌پذیرتری برای مدلسازی یک مسأله در اختیار قرار می‌دهند. یکی از الگوریتم‌های کارآمد حل تقریبی که برای تعیین خط پروژه به کار گرفته شده است الگوریتم ژنتیک است (Li et al., 2017; Goktepe et al., 2009; Yang et al., 2014). در این مطالعات، معیارهایی علاوه بر هزینه احداث مانند، هزینه مصرف سوخت، زمان سفر، اثرات زیست‌محیطی با توجه به انعطاف و توانایی بالای الگوریتم حل، در نظر گرفته شده است. کانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ مدلی سه‌بعدی با استفاده از روش جست‌وجوی عددی جهت بهینه‌سازی مسیر قائم ارائه دادند. در این روش با توجه به این که ضوابط طراحی مانند قوس قائم و حداکثر شیب طولی در نظر گرفته نمی‌شوند، نتایج بدست آمده دور از واقعیت هستند و همچنین این مدل تنها توانایی یافتن بهینه‌های محلی را دارند (Kang et al., 2012). ژانگ مدلی جهت بهینه‌سازی طراحی مسیر با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون محدودیت‌های طراحی، امکان ساخت مسیرهای برگشتی و پارامترهای تاثیرگذار در تابع هزینه ارائه کرد. وی برای تولید مجموعه نقاط تقاطع به عنوان یک جواب ممکن از الگوریتم ژنتیک استفاده کرد. او همچنین ادعا کرد تمام روش‌های بهینه‌سازی مسیر به غیر از الگوریتم ژنتیک دارای نقص هستند (Jong et al., 2000). ژاو و شانفلد برای بهینه‌سازی مسیر از Gis و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آنها منطقه مورد مطالعه را به مربع‌های کوچک تقسیم کردند، طوری که هزینه خرید زمین، الگوی کاربری و ارتفاع در همه قطعات تقریبا مشابه باشد. در قطعات با شرایط نامناسب هزینه‌های زیاد اعمال شد تا مسیر از آن‌ها عبور نکند (Jha and Schonfeld, 2000). کانگ و همکاران مدلی ریاضیاتی ارائه کردند که مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است. این مدل تاثیر ترافیکی گزینه‌های مختلف مسیر را بر روی شبکه جاده‌ای موجود ارزیابی می‌کند (Kang et al., 2010). الحدادی و مادسلی با در نظر گرفتن نقاط تقاطع عمودی و نقاط تقاطع افقی، مدلی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه دادند که تکنیک جدیدی را برای بهینه‌سازی مسیر بزرگراه در یک فضای سه بعدی پیشنهاد می‌کند (Al-Hadad and Mawdesley, 2010). آنجولو و همکاران یک رویکرد مبتنی بر تقاضا برای ارایه مجموعه‌ای از راه‌های بالقوه ارائه کردند. آنها از دو نوع الگوریتم ازدحام ذرات برای ایجاد مدل

استفاده کردند. در این مدل از اطلاعات جغرافیایی برای برآورد هزینه‌ها استفاده شده است (Angulo et al., 2011). باباپور و همکاران با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات مدلی بهینه برای طراحی جاده جنگلی ارائه کردند. آنها چهار سناریو بر مبنای الگوریتم ژنتیک را با روش ازدحام ذرات مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری در یافتن مسیر بهینه با توجه به معیارهای مشخص دارد (Babapour et al., 2018).

بهینه‌سازی مسیر قائم راه‌آهن نیز یکی از مسائلی است که اخیراً تحقیقات زیادی درباره آن انجام شده است و به دلیل ارتباط نزدیک آن با بهینه‌سازی مسیر قائم راه، مرور مختصری از آن در ادامه ارائه می‌شود. تاکنون مدل‌های متنوعی جهت بهینه‌سازی تراز قائم راه‌آهن با معیارهایی مانند: خطرات زمین‌شناسی (Song et al., 2020; Pu et al., 2021)، تاثیرات زیست محیطی (Pu and Song, 2019; Zhang et al., 2020; Yang et al., 2021; Song et al., 2021)، فعالیت‌های لرزه‌ای زمین (Song et al., 2020)، بهینه‌سازی همزمان تراز و ایستگاه‌ها (Song et al., 2021; Pu et al., 2019; Lai and Schonfeld, 2016)، چرخه عمر (Zhang et al., 2021) ارائه شده است. پو و سونگ با استفاده از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و عملگرهای ژنتیک که تراز افقی و عمودی را به عنوان دو ذره در نظر می‌گیرد، مدلی بهینه برای طراحی تراز قائم راه آهن در مناطق کوهستاتی ارائه کردند (Pu and Song, 2019). قریشی و همکاران با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و سیستم اطلاعات جغرافیایی مدلی جهت بهینه‌سازی مسیر قائم راه‌آهن ارائه کردند (Ghoreishi et al., 2019). لای و شونفلد روشی برای بهینه سازی همزمان ایستگاه‌ها و ترانزیت حمل‌ونقل ریلی که آن ایستگاه‌ها را به هم متصل می‌کند با اختیار قرار دادن اهداف سیستم، برآورد کردن محدودیت‌های محتلف طراحی، و یکپارچه‌سازی مدل‌های تحلیل با یک پایگاه داده اطلاعات جغرافیایی، پیشنهاد کردند. این روش از یک الگوریتم ژنتیکی برای بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم مکان‌های ایستگاه، انواع ایستگاه‌ها و ترازهای قائم استفاده می‌کند (Lai and Schonfeld, 2016). پو و سونگ مدلی ریاضیاتی ارائه کردند که تاثیر عواملی مانند هزینه عملیات خاکی، هزینه ساخت تونل، هزینه ساخت پل و تاثیرات زیست محیطی را روی ساخت راه‌آهن ارزیابی می‌کند. این مدل، مبتنی بر ترکیب الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات است (Pu and Song, 2019).

یکی از پارامترهای مهم در بهره‌برداری از زیرساخت‌های حمل‌ونقلی در نظر گرفتن هزینه مصرف سوخت است (Beheshtinia et al., 2021). مدل‌های زیادی برای محاسبه مصرف سوخت وسایل نقلیه وجود دارند، که به مهمترین آنها در ادامه اشاره می‌شود. اهن و همکاران مدلی را مبتنی بر سرعت لحظه‌ای و مقادیر شتاب ارائه کردند که در آن با استفاده ار یک مطالعه آزمایشگاهی، مقادیر گازهای منتشر شده از وسایل نقلیه را به عنوان تابعی از بیان شده ارائه کردند (Ahn and Rakha, 2008). فری و همکاران معیاری برای محاسبه نرخ مصرف سوخت براساس توان ویژه وسیله نقلیه (کیلووات بر تن وسیله نقلیه) ارائه کردند که پارامترهای سرعت، شتاب و شیب جاده را لحاظ می‌کند (Frey et al., 2008). پس از آن‌ها، باریبونسامسین و بارس در سال ۲۰۰۹ مدل کامل‌تری را با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتری نسبت به روش قبلی ارائه کردند که این پارامترها عبارت‌اند از: ضریب مقاومت لغزشی، چگالی هوا، سطح مقطع وسیله نقلیه و ضریب درگ آیرودینامیکی (Boriboonsomsin and Barth, 2009). از نتایج این مطالعات، در مطالعات بعدی و برای بهینه‌سازی و یا ارائه راهکارهای متفاوت در طراحی راه‌ها بهره گرفته شد. برای نمونه کانگ و همکاران این روش را برای طراحی راه‌ها با در نظرگرفتن کاهش مصرف سوخت در کنار افزایش ایمنی استفاده‌کنندگان از راه ارائه کردند. آن‌ها در این روش از فرضیات روش‌های قبلی مبتنی بر محاسبه‌ی نیروی لازم برابر غلبه بر نیروهای مقاوم و

تثبیت سرعت خودرو در سرعت مشخص استفاده کردند (Kang et al,. 2012).

مطالعات نشان داده‌اند که انتخاب مسیرهای مختلف بین یک زوج مبداء-مقصد مشخص می‌تواند باعث تفاوت‌های قابل توجهی در میزان مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای بشود (Frey et al., 2008; Ahn and Rakha 2008). به همین دلیل، در مقاله حاضر، میزان مصرف سوخت به عنوان یک عامل اصلی در طراحی مسیر افقی راه (خط پروژه) در نظر گرفته شده است. در این مقاله، جهت محاسبه هزینه مصرف سوخت از روش ارائه شده در Kang et al., 2013 استفاده شده است. که توضیحات مربوط به آن در بخش ۳-۳ آورده شده است.

یکی از عواملی که باید در طراحی راه‌ها جهت دستیابی به ایمنی و راحتی در نظر گرفته شود، فاصله دید است (Hassan et al., 1997). بیشتر مدل‌های تحلیلی برای تعیین فاصله دید موجود (ASD) در یک راه و تشخیص بخش‌هایی از راه که ASD در آنها کمتر از فاصله دید مورد نیاز (مثلا فاصله دید توقف SSD) است، توسعه یافته‌اند (Hassan, 2003; Easa, 2003). در این مقاله، برای کنترل مناسب بودن محل و ارتفاع نقاط اعمال قوس‌های قائم (به عتوان محدودیت اصلی مدل ارائه شده) از ضوابط آورده شده در آئین‌نامه‌های طراحی راه‌های ایران (۱۳۹۱) که تشابه زیادی با آئین‌نامه‌ی آشتو دارد، استفاده شده است.

همچنین، در این مقاله، علاوه بر هزینه احداث راه (هزینه عملیات خاکی) و هزینه مصرف سوخت وسایل نقلیه، ایمنی رانندگان، توجه به فاصله دید در قوس‌های قائم و سایر پارامترهای طراحی راه (مانند حداکثر شیب طولی) مطابق با آیین‌نامه طرح هندسی راه لحاظ شده است، به عنوان عامل تعیین‌کننده در نظر گرفته شده‌اند. جهت بررسی اهمیت هزینه مصرف سوخت و مقایسه آن با هزینه عملیات خاکی محاسبات توضیح‌داده‌شده در بخش ٤-۳ برای یک قطعه راه به طول ۳۰۰ متر به کار گرفته شده است. از آن‌جایی که تعداد حالات موجود ممکن برای احداث راه انتخاب خط پروژه طولی مناسب بی‌نهایت است، لذا در این پژوهش مسئله به شکل گسسته طرح و بررسی شده است و در انتخاب مسیر مناسب نیز از الگوریتم بهینه‌سازی تبرید استفاده شده است. همچنین، در این مطالعه، محاسبه هزینه حجم عملیات خاکی بر خلاف روش‌های سنتی که مبتنی بر روش‌های هندسی نظیر منحنی بروکنر بودند، براساس استفاده از برنامه‌ریزی خطی انجام می‌شود. بنابراین می‌توان به صورت خلاصه بیان کرد که این تحقیق تلفیقی از برنامه‌ریزی خطی و بهینه‌سازی به روش تبرید است.

در ادامه، در بخش ۲ تعریف کامل‌تر و دقیق‌تری از مسأله ارائه می‌شود. در بخش ۳ نحوه محاسبه هزینه مصرف سوخت، بکارگیری مدل جهت مقایسه هزینه عملیات خاکی و مصرف سوخت و نحوه گسسته‌سازی ارائه می‌شود. در بخش ٤ نحوه بکارگیری الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه می‌شود. بخش ۵ نتایج بکارگیری مدل و بخش ٦ نتیجه‌گیری مقاله را در بردارند.

۲. تعریف مسئله و حل‌های امکان‌پذیر

از آن‌جا که در پروژه‌های متداول راهسازی، تعیین خط پروژه مناسب و طراحی راه بر اساس کاهش هزینه‌های مرتبط با عملیات خاکی صورت می‌پذیرد، و نیز با توجه به افزایش روزافزون تعداد وسایل نقلیه و سفرها و نیز کاهش منابع انرژی مصرفی خودروها نظیر بنزین و گازوئیل، لازم است اهمیت میزان تغییرات مصرف سوخت در طراحی راه‌ها بررسی شود؛ لذا، در این پژوهش برای یک پلان مشخص -که به عنوان خروجی از نرم‌افزارهایی نظیر Civil-3D دریافت شده است- خط پروژه‌های مختلف را در نظر گرفته و برای هر یک از آن‌ها، میزان هزینه مربوط به عملیات خاکی بر اساس فهرست بهای رشته ابنیه سال ۱۳۹۵ و هم‌چنین هزینه ناشی از مصرف سوخت با استناد به روابطی که در مطالعات گذشته صورت پذیرفته است محاسبه گردیده و جایگاه هزینه مصرف سوخت در طرح راه‌ها بررسی می‌شود. در دیدگاه عامیانه، به طور معمول هزینه مصرف سوخت توسط استفاده‌کنندگان راه و هزینه ساخت در اکثر کشورها توسط

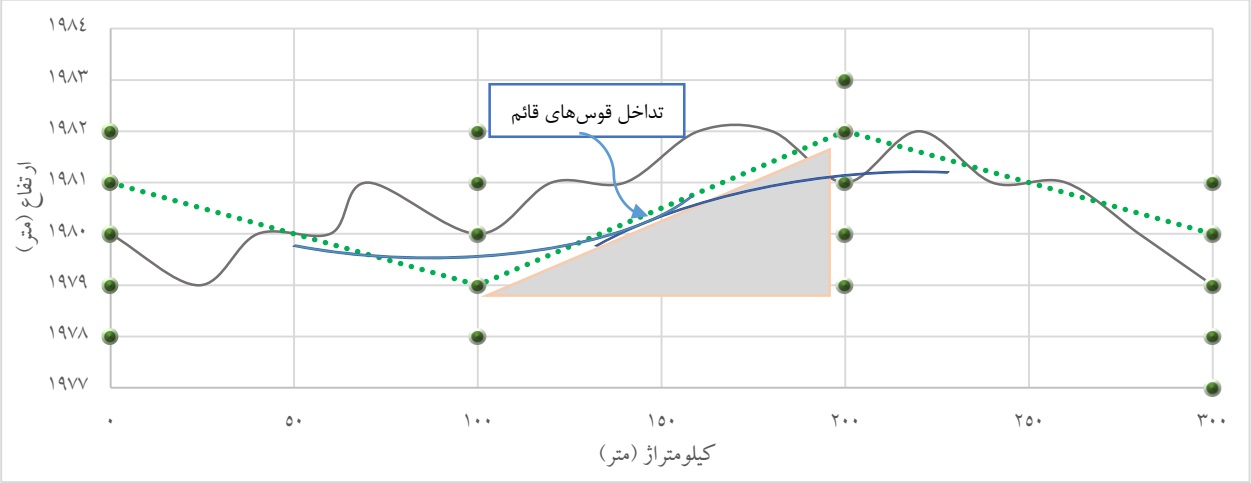
دولت پرداخت می‌شود، به همین جهت هزینه ساخت نسبت به دیگر هزینه‌ها برای دولت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اما، در نگاهی کلی هزینه‌ی ساخت و هزینه‌ی مصرف سوخت جزء هزینه‌هایی است که در نهایت توسط استفاده‌کنندگان پرداخت می‌شوند. به همین دلیل، این مطالعه به دنبال روشی برای کمینه کردن مجموع این دو هزینه در قالب یک تابع هدف است.

برای این منظور، پس از مشخص شدن پروفیل طولی راه، می‌توان خط پروژه‌های مختلفی ایجاد کرد. باید توجه داشت که ممکن است تعدادی از خط پروژه‌های ایجاده‌شده با توجه به محدودیت‌ها و الزامات آیین نامه‌ی طراحی راه‌ها قابلیت اجرا نداشته باشند. در این مقاله، امکان‌پذیر بودن هر یک از مسیرهای قائم تولیدشده با توجه به دو معیار: الف) رعایت حداکثر شیب طولی مجاز ب) حداقل و حداکثر طول قوس قائم، به نحوی که قوس‌ها با یکدیگر تداخل نداشته باشند، بررسی می‌گردد. دو معیار اشاره شده برای درک بهتر و توضیح دقیق‌تر در ادامه شرح داده می‌شوند.

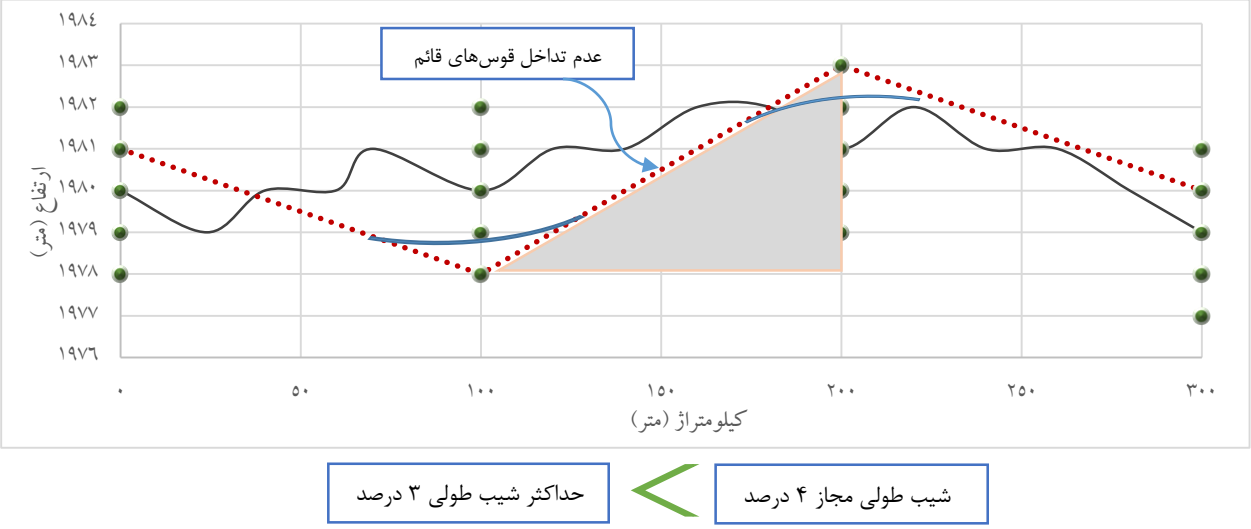
الف) حداکثر شیب طولی مجاز: طبق آیین‌نامه‌ی طرح هندسی راه‌های ایران، حداکثر شیب طولی مجاز با توجه به سرعت طرح، نوع راه و شرایط پستی و بلندی منطقه تعیین می‌شود؛ به طور مثال، برای راه‌های فرعی درجه یک و دو قرار گرفته در منطقه هموار و با فرض سرعت ۹۰ کیلومتر در ساعت، حداکثر شیب طولی مجاز برابر ٦ درصد است. بنابراین، اگر در بخشی از خط پروژه ایجاد شده، شیب طولی بیش از ٦ درصد شود، این مسیر شدنی (امکان‌پذیر) نیست و از لیست مسیرهای تولید شده حذف می‌شود. یا برای آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی قرار گرفته در منطقه کوهستانی و با فرض سرعت ۱۱۰ کیلومتر در ساعت، حداکثر شیب طولی مجاز برابر با ۳ درصد است. پس اگر در بخشی از خط پروژه شیب طولی بیش از ۳ درصد شود، مسیر حذف می‌شود. حداکثر شیب طولی مجاز برای تمامی راه‌ها در نشریه ٤١٥ (طرح هندسی راه ایران) ذکر شده است.

ب) طول قوس قائم: قوس‌هایی هستند که تقاطع دو شیب قائم در مسیر راهسازی را به طور یکنواخت و صاف، بدون تغییر حرکت عمودی به هم وصل می‌کنند. طبق آیین‌نامه طراحی راه‌های ایران، طول قوس باید به اندازه‌ای باشد که حداقل فاصله دید را برای راننده وسیله نقلیه فراهم آورد. حداقل طول از رابطه $\mathrm{L} \geq \mathrm{KA}$ بدست می‌آید که در آن L برابر با حداقل طول قوس برحسب متر، A برابر قدر مطلق جمع جبری شیب طرفین و K پارامتری است که بسته به نوع قوس (محدب یا مقعر) و همچنین سرعت طراحی توسط آیین‌نامه‌های طراحی هندسی ارائه می‌گردد و میزان انحنای قوس قائم را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی بیان‌شده می‌توان حداقل طول قوس قائم مورد نیاز در هر تغییر شیب را به‌دست آورده و کنترل کرد که آیا دو قوس قائم متوالی با یکدیگر تداخل دارند یا خیر؟ به طور مثال، اگر طول قوس مورد نیاز برای تغییر شیب اول برابر ۱۳۰ متر و برای تغییر شیب دوم برابر ١٦٠ متر باشد و فاصله بین دو رأس پشت سر هم برابر با ۱۲۰ متر باشد، در این صورت دو قوس مذکور با یکدیگر تداخل خواهند داشت، زیرا: $\frac{130}{2} + \frac{160}{2} = 145 > 120$

برای درک بهتر معیارهای مذکور شکل (۱) در دو حالت (الف) و (ب) ارائه شده است (با فرض اینکه شیب ٤ درصد است).



شکل ۱. (الف) تداخل قوس‌های قائم



شکل ۱. (ب) عدم تداخل قوس‌های قائم

۳. مدلسازی و روش حل

مسائل بهینه‌سازی در ابعاد واقعی در بیشتر مواقع، پیچیده و بزرگ می‌شوند. در این پژوهش، همانطور که در بخش ٤ خواهد آمد، بررسی تمام مسیرهای ممکن برای یک پروژه واقعی امری غیرممکن یا حداقل غیراقتصادی است. بنابراین، روش‌های سنتی و استاندارد حل کارایی لازم را ندارند و معمولاً نیازمند زمان‌های طولانی برای محاسبات هستند. خوشبختانه با پیشرفت در فناوری رایانه و افزایش توان محاسباتی، امروزه به کارگیری روش‌های ابتکاری و جست‌وجوگرهای هوشمند همچون الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کاملاً متداول شده است. در این مقاله، برای حل مسئله تعیین مسیر قائم راه، چارچوبی دو سطحی برمبنای الگوریتم شبیه سازی تبرید ارائه شده است، به گونه‌ای که در سطح بالای آن سطوح بهینه در نقاط تغییر شیب طولی بر مبنای کمترین مجموع هزینه احداث و هزینه مصرف سوخت تعیین می شوند، در حالی‌که کمینه سازی هزینه احداث از طریق یک مدل برنامه‌ریزی ریا ضی خطی در سطح پایین آن انجام می‌شود.

۳-۱ روش تولید مسیرهای قائم امکان‌پذیر

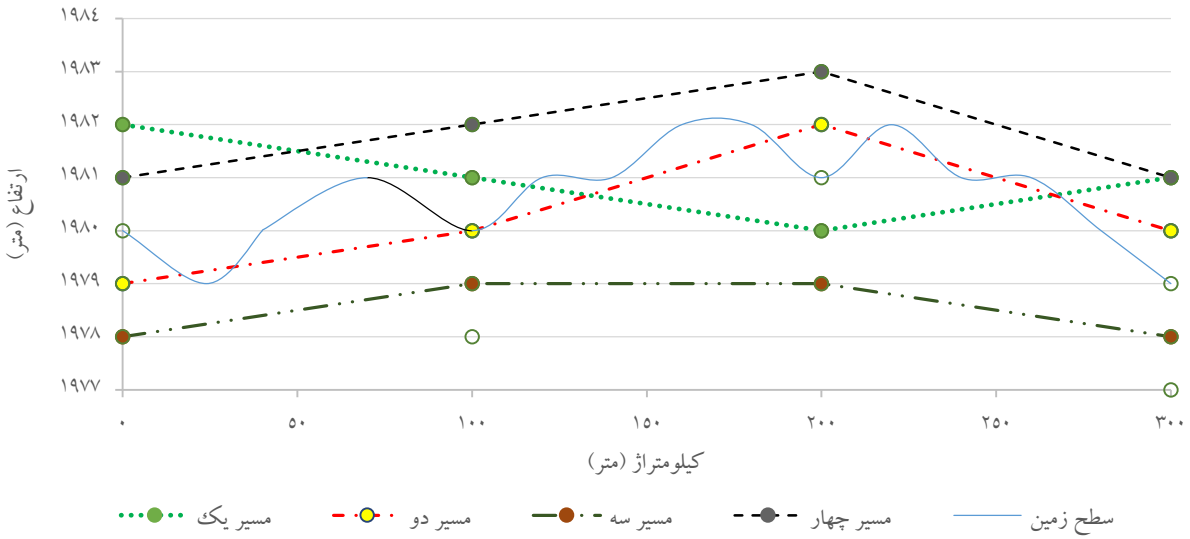
واضح است که برای یک پروفیل قائم زمین می‌توان بینهایت مسیر قائم (خط پروژه) ترسیم کرد. لکن، از آن جا که ارزیابی و تولید چنین مسیرهای قائمی در عمل ممکن نیست، در این پژوهش برای ایجاد خطوط پروژه مختلف، نقاطی در طول مسیر به عنوان رئوس احتمالی (بالقوه) قوس‌های قائم در نظر گرفته شده است. در حقیقت، با این روش می‌توان فضای جواب را از حالت پیوسته به گسسته تبدیل کرد. از سوی دیگر، در هر یک از این رئوس نیز می‌توان با توجه به شیب‌های مجاز، بینهایت تراز ارتفاعی قائل شد. به همین دلیل، برای قرارگیری رئوس خط پروژه نیز ارتفاع‌هایی به صورت گسسته و با اختلاف‌های مشخص انتخاب می‌شود. برای مثال، اگر برای یک خط پروژه N رأس را بتوان در M تراز ارتفاعی قرار داد، تعداد کل مسیرهای قائم M^N حالت خواهد بود. البته، ذکر مجدد این نکته ضروری است که بعضی از این مسیرها ممکن است طبق ضوابط آیین‌نامه طرح هندسی راه امکان‌پذیر نبوده و از لیست خط پروژه‌های ممکن برای ادامه محاسبات (مربوط به تعیین حداقل هزینه عملیات خاکی و مصرف سوخت) حذف شوند.

شکل ۲ یک نمونه ایجاد رئوس مختلف بالقوه ایجاد قوس‌های قائم را با ترازهای ارتفاعی مشخص‌شده برای آن‌ها نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، تراز ارتفاعی بالقوه در هر رأس با رئوس دیگر می‌تواند مختلف باشد و با توجه به ارتفاع خط زمین در آن رأس تعیین شده است. به این صورت، که نقطه مرکزی در هر رأس دقیقاً روی خط زمین و نقاط دیگر هر یک با اختلاف ارتفاع ثابت از یکدیگر قرار گرفته‌اند. در این مثال، N برابر ٤ و M برابر با ٥ است و در نتیجه تعداد حالات ممکن برای ایجاد مسیر قائم ٦٢٥ مسیر است، که تنها ٤ نمونه از مسیرهای بالقوه در آن نمایش داده شده‌است.

در ادامه، برای راحتی در بیان، هر یک از ترازهای بالقوه برای هر رأس بالقوه یک گره نامیده می‌شود. بنابراین، با انتخاب یک گره در هر رأس و سپس اتصال گره‌های به‌دست‌آمده می‌توان یک مسیر قائم بالقوه (البته بدون قوس‌های قائم) ایجاد کرد. حال می‌توان مسیرهای ایجادشده را با دو ضابطه حداکثر شیب طولی مجاز و عدم تداخل قوس‌های قائم (طبق ضوابط ارائه شده در بخش ۲) کنترل کرد و در صورت نقض هر یک از این ضوابط، مسیر ایجادشده از ادامه محاسبات حذف می‌شود. در صورت امکان‌پذیر بودن مسیر ایجادشده، مقدار هزینه عملیات‌خاکی از روش برنامه‌ریزی خطی و مقدار هزینه مصرف سوخت از روابط و برنامه‌ریزی ریاضی توضیح‌داده‌شده در بخش ۳-۳ محاسبه می‌شود.

۳-۲ محاسبه هزینه عملیات خاکی

برای محاسبه هزینه عملیات خاکی، روش‌های متعددی وجود دارد که از جمله معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به روش استفاده از منحنی بروکنر اشاره کرد. اما، در این پژوهش به جهت افزایش دقت و هم‌چنین نوآوری حل مسئله و استفاده از روش‌های به‌روز و نوین، برای محاسبه عملیات خاکی از روش برنامه‌ریزی خطی ارائه شده توسط عیسی (Easa, 1987) استفاده شده‌است.



شکل ۲. نحوه ایجاد رئوس بالقوه قوس‌های قائم و تعیین ترازهای مختلف برای آن‌ها در پروفیل طولی

۳-۳ محاسبه هزینه مصرف سوخت

برای محاسبه هزینه مصرف سوخت خودروهای درحال استفاده از مسیر، به دو پارامتر اصلی نیاز است: میزان مصرف سوخت و قیمت واحد سوخت برای خودروهای عبوری از مسیر در طول عمر مفید پروژه. برای این منظور، ابتدا برآیند نیروهای وارد بر اتومبیل را محاسبه کرده و پس از آن توان موتور لازم برای غلبه بر این نیروها و به نوعی به حرکت درآوردن اتومبیل محاسبه می‌شود. سپس، با داشتن نرخ مصرف سوخت اتومبیل، قیمت واحد سوخت، ترافیک سالانه و عمر مفید پروژه می‌توان میزان مصرف سوخت اتومبیل را در قطعه مشخصی از مسیر بدست آورد.

برای محاسبه مقدار نیروی محرکه موتور رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$F_p = R_A + R_R + R_G \qquad (۱)$$

که هر یک از نیروهای مقاوم نیز طبق روابط ۲ الی ٤ محاسبه خواهند شد:

$$R_A = \left(\frac{A\rho C_a}{2}\right)V^2 \qquad (۲)$$

$$R_R = mgC_r\cos(\alpha) \qquad (۳)$$

$$R_G = mg\sin(\alpha) \qquad (٤)$$

که در روابط بالا، m جرم اتومبیل، g شتاب گرانش، C_r ضریب مقاومت لغزشی، α زاویه سطح جاده با افق، A سطح مقطع اتومبیل، ρ چگالی هوا، C_a ضریب درگ هوا و V سرعت اتومبیل است.

پس از محاسبه نیروی محرکه موتور، طبق روابط ۵ و ٦ می‌توان به ترتیب توان موتور و هزینه مصرف سوخت در طول عمر مفید پروژه را محاسبه کرد.

$$W_P = \int_{Xstart}^{Xend} F_P dx \qquad (۵)$$

$$C_{fuel} = W_P R_{fuel} U_{fuel} \times (AADT) \times n \times 365 \qquad (٦)$$

که در روابط فوق نیز C_{fuel} هزینه مصرف سوخت وسایل نقلیه استفاده کننده از راه در طول عمر پروژه، W_P توان موتور، R_{fuel} نرخ مصرف سوخت وسایل نقلیه، U_{fuel} قیمت هر واحد سوخت، $AADT$ متوسط ترافیک روزانه عبوری از راه و n عمر بهره‌برداری از راه را نشان می‌دهند.

۳-٤ بکارگیری مدل

در این بخش، برای توضیح بهتر تعیین میزان هزینه مصرف سوخت کاربران و مقایسه آن با هزینه عملیات خاکی، روش‌های توضیح‌داده‌شده در بخش ۳-۲ و ۳-۳ در قالب یک مثال از قطعه راهی به طول ۳۰۰ متر بیان شوند. پروفیل طولی زمین انتخابی در شکل ۳ نشان داده شده است. دلیل انتخاب قطعه نسبتاً کوتاه این است که کنترل تمام مسیرهای قائم بالقوه، طرح

قوس‌های قائم و محاسبات مربوط به هزینه‌ها بسیار زمان‌بر است و نیز امکان مقایسه بهتر گزینه‌ها را سخت می‌کند. در این قطعه، تعداد رأس‌ها و ترازهای ارتفاعی آن‌ها (تعداد گره‌ها) مانند آنچه است که در شکل ۲ آمده است و بنابراین تعداد مسیرهای بالقوه کنترل‌شده ٦٢٥ عدد است. از بین مسیرهای بالقوه ایجادشده ۸۱ مسیر ضوابط مربوط به آئین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران (نشریه شماره ٤١٥) را رعایت کرده‌اند.

برای محاسبه هزینه مصرف سوخت پارامترها به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

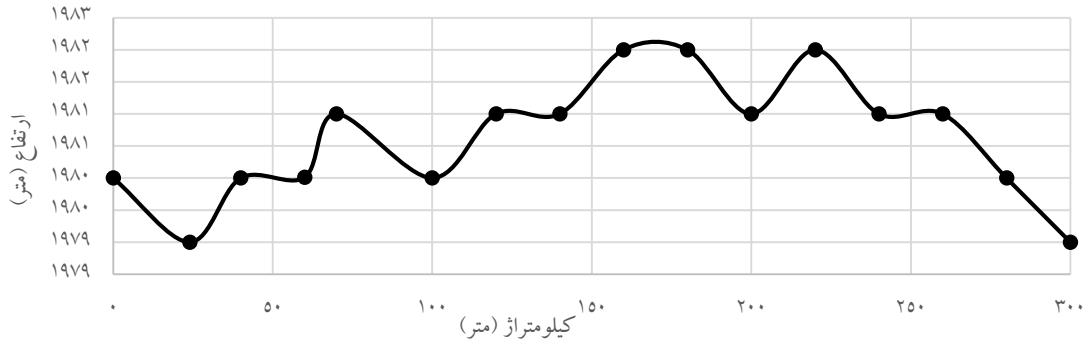
جرم اتومبیل (m)= ۱۷٦۰ کیلوگرم، شتاب گرانش (g)= ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه، ضریب مقاومت لغزشی (C_r)= ۰/۰۱۳، سطح مقطع موثر اتومبیل (A)= ۲/۲۷٦ مترمربع، چگالی هوا (ρ)= ۱/۲۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب، ضریب درگ هوا (C_a)= ۰/۵، سرعت اتومبیل (V)= ۸۰ کیلومتر بر ساعت، نرخ مصرف سوخت=($10^{-8} \times lit/_{N \cdot m}$) ۳/۱ ، هزینه سوخت= ۱۰،۰۰۰ ریال بر لیتر، متوسط ترافیک روزانه= ۱۰،۰۰۰ خودرو در روز و عمر مفید پروژه= ۲۰ سال.

همچنین، برای محاسبه هزینه عملیات خاکی از هزینه‌های ذکر شده در فهرست بهای ابنیه ویرایش ۱۳۹۵ استفاده شده است. قابل ذکر است که برای محاسبه احجام خاکبرداری و خاکریزی عرض راه ۱۱ متر و در کل سطح مقطع عرضی در یک طراز ارتفاعی در نظر گرفته شده است.

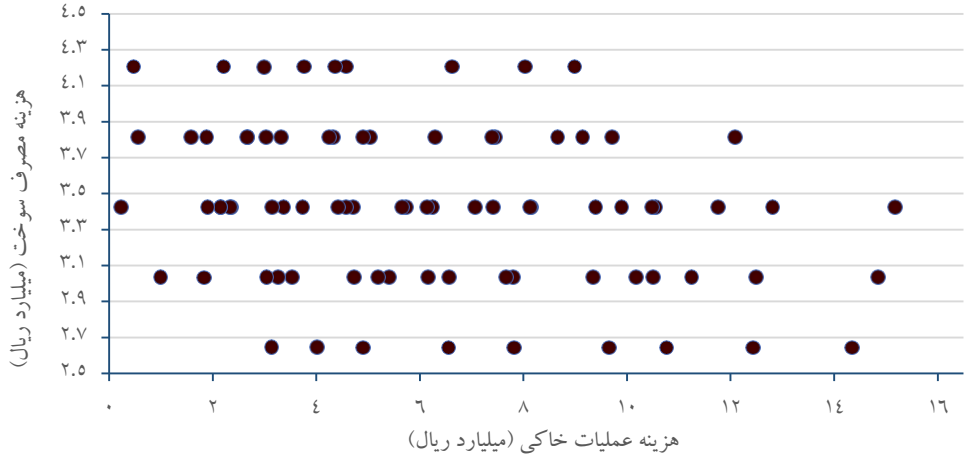
شکل ٤ مقایسه هزینه عملیات خاکی و مصرف سوخت را برای ۸۱ مسیر بالقوه مذکور نشان می‌دهد، به گونه‌ای که هر نقطه روی شکل نماینده یک مسیر قائم بالقوه است. همان‌طور، که در شکل دیده می‌شود، بین میزان هزینه مصرف سوخت و هزینه عملیات خاکی هیچگونه همبستگی خطی دیده نمی‌شود، به طوری که مقدار ضریب همبستگی محاسبه‌شده برای این دو متغیر ۰/۲۷- است. علاوه بر این، منفی بودن ضریب همبستگی خود نشان‌دهنده تضاد بین این دو عامل هزینه است؛ به این معنی، که نمی‌توان گفت با افزایش هزینه عملیات خاکی در یک راه هزینه مصرف سوخت آن نیز افزایش می‌یابد، بلکه ممکن است افزایش یکی باعث کاهش دیگری شود. بنابراین، یکی از نتایج مهمی که از تحلیل این قطعه راه می‌توان گرفت لزوم در نظر گرفتن هزینه مصرف سوخت در تعیین مسیر قائم راه‌ها است. نکته قابل توجه دیگر در شکل ٤ این است که هزینه مصرف سوخت، با مقدار متوسط حدود ۳/۵ میلیارد ریال، در مقابل متوسط هزینه عملیات خاکی، با متوسط حدود ۷/۵ میلیارد ریال، عدد قابل توجهی است و نمی‌توان از آن در احداث یک راه صرف‌نظر کرد.

همچنین، ذکر این نکته ضروری است که در محاسبه هزینه مصرف سوخت تنها شکل خط پروژه تعیین‌کننده نیست، و نمی‌توان گفت که دو خط پروژه با هزینه مصرف سوخت یکسان حتماً موازی یکدیگر خواهند بود؛ بلکه ممکن است دو خط پروژه با شکل کاملاً ناهمسان هزینه مصرف سوخت برابری داشته باشند. برای مثال، شکل ۵ دو مسیر را نشان می‌دهد که هزینه مصرف سوخت در آن‌ها یکسان و برابر با ۳/۰٤ میلیارد ریال است، و این در حالی است که شکل خط پروژه در دو مسیر قائم کاملاً متفاوت است.

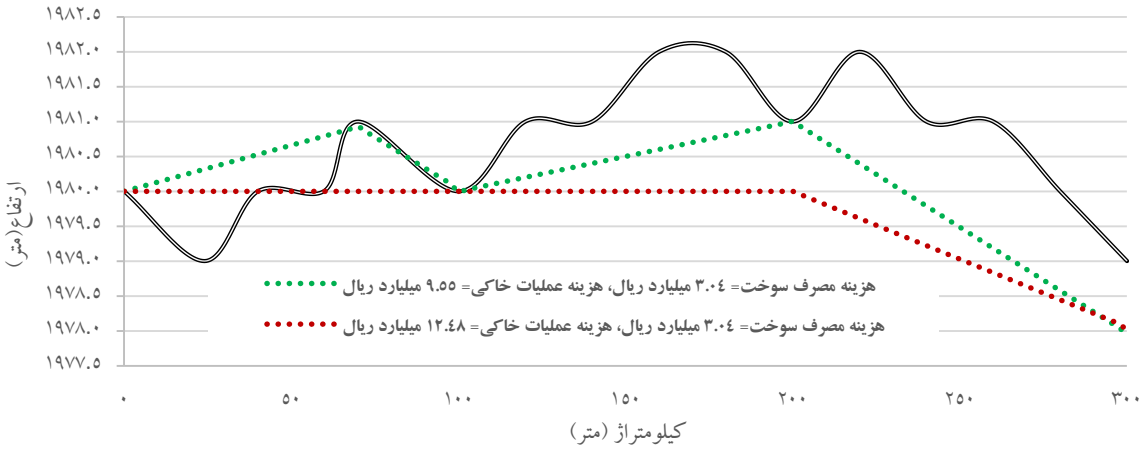
شکل ٦ دو خط پروژه با کمترین مجموع هزینه عملیات خاکی و مصرف سوخت را نشان می‌دهد. با مقایسه هزینه‌های مصرف سوخت و عملیات خاکی در این دو خط پروژه به راحتی می‌توان دریافت که عامل تعیین‌کننده در انتخاب بهترین خط پروژه در قطعه راه مورد نظر هزینه‌های مصرف سوخت بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که هرچند میزان تغییرات هزینه مصرف سوخت نسبت به هزینه عملیات خاکی کمتر بوده است (شکل ٤ را ببینید)، لکن در مسیرهای با مجموع هزینه کمتر (بهینه و نزدیک به بهینه) هزینه مصرف سوخت عامل تعیین‌کننده است که نمی‌توان از آن در تعیین خط پروژه بهینه چشم‌پوشی کرد. همچنین، در برخی از خطوط پروژه، هزینه مصرف سوخت بسیار بالاتر از هزینه عملیات خاکی است، که اتفاقاً همین خطوط پروژه بهترین خطوط کاندیدا برای احداث هستند.



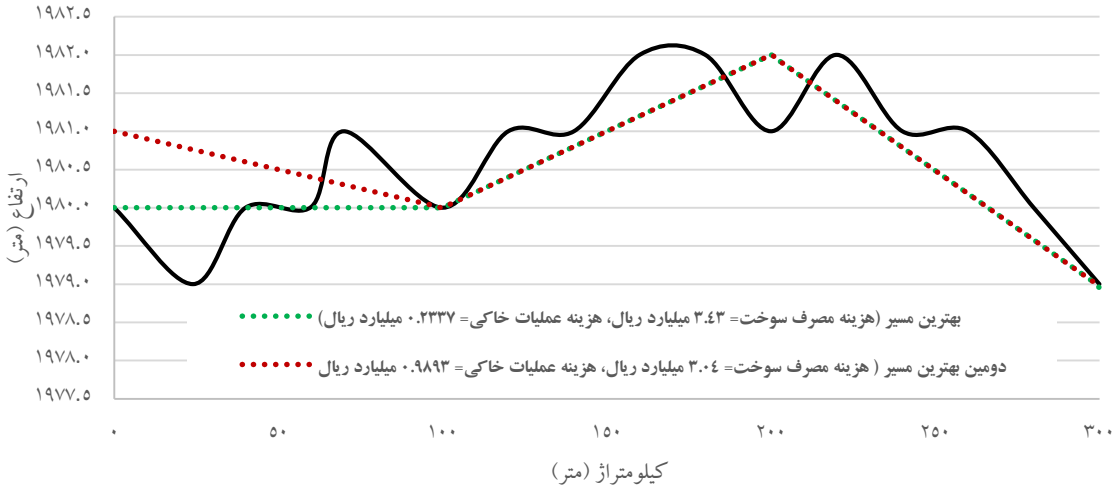
شکل ۳. پروفیل طولی زمین در قطعه راه ۳۰۰ متری



شکل ٤. مقایسه هزینه عملیات خاکی و مصرف سوخت برای مسیر ۳۰۰ متری



شکل۵. مسیرهای با هزینه مصرف سوخت یکسان و هزینه عملیات خاکی متفاوت



شکل ٦. مقایسه دو خط پروژه برتر

٤. بهینه‌سازی

با توجه به توضیحات بیان‌شده در بخش ۱-۳، تعداد مسیرهای ایجاد شده در یک پروژه واقعی بسیار زیاد می‌شود. به طور مثال، در یک مسیر ۳ کیلومتری اگر در هر ۱۰۰ متر بخواهیم یک رأس و در هر رأس ۷ گره ایجاد کنیم، N برابر با ۳۱ و M برابر با ۷ خواهد بود، بنابراین تعداد مسیرهای انتخابی برابر با 7^{31} خواهد شد. این حجم از محاسبات بسیار طولانی، پیچیده و هزینه‌بر است؛ به همین دلیل، لزوم استفاده ار الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهتر درک می‌شود. در این مقاله، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسأله استفاده شده است و مراحل کلی آن به صورت زیر طراحی شده است:

مرحله ۱- در مرحله اول، بصورت تصادفی تعدادی از مسیرهای قائم بخش ۱-۳، که با توجه به معیارهای بخش ۲ خطوط قائم امکان‌پذیر هستند، انتخاب شده و هزینه‌های مربوط به مسیرهای قائم با توجه به بخش ۲-۳ و ۳-۳ محاسبه می‌شوند.

مرحله ۲- مسیرهای قائم انتخاب‌شده با توجه به هزینه (مجموع هزینه عملیات خاکی و هزینه مصرف سوخت) محاسبه شده برای هر یک ارزیابی و رتبه‌بندی می‌شوند. به طوری که کمترین هزینه در بالاترین رتبه (رتبه ۱) قرار می‌گیرد.

مرحله ۳- دمای مسأله T برابر با دمای اولیه (T_0) قرار داده می‌شود.

مرحله ٤- مراحل ۵ تا ۷ به تعداد مشخص تکرار it، که it یک شمارنده برای تعداد تلاش‌های مورد نیاز برای دستیابی به جواب بهینه است، انجام می‌شود.

مرحله ۵- با توجه به مکانیزم‌های احتمالاتی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مسیر قائمی تصادفی در همسایگی مسیر قائم فعلی ایجاد شده و هزینه مسیر قائم همسایه محاسبه می‌شود.

مرحله ٦- در صورتی که هزینه مسیر قائم همسایه نسبت به مسیر قائم فعلی بهتر بود، مسیر قائم همسایه را پذیرفته می‌شود، در غیر اینصورت مسیر مذکور بصورت مشروط (احتمالی) پذیرفته می‌شود.

مرحله ۷- در صورت عدم اتمام تعداد تکرار تعیین‌شده، دمای مسأله کاهش داده می‌شود و به مرحله ٤ رجوع می‌شود.

٤-۱ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید توسط کرکپاتریک و همکاران ارائه شده است (Kirkpatrick et al., 1983). الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی در فضاهای جست‌وجوی بزرگ است. این

الگوریتم بیشتر زمانی استفاده می‌شود که فضای جست‌وجو گسسته باشد. با توجه به نظریه‌ی کرک‌پاتریک ارتباط جالبی بین الگوی سرمایش یک جسم جامد و حرکت به سوی بهینه‌ی یک تابع ریاضی وجود دارد. در الگوریتم تبرید پاسخ‌های پیشنهادی برای مسئله در دمای بالاتر قرار دارند و غالباً پاسخ‌های نامناسبی هستند. دما در مسائل بهینه‌سازی تبرید به عنوان یک پارامتر کنترلی عمل می‌کند. برای رسیدن به پاسخ‌های مناسب متغیری که نقش دما را بر عهده دارد به مرور زمان کاهش داده می‌شود تا به این ترتیب پاسخ‌های بهتری در دماهای پایین تشکیل شوند. پارامترهای مورد استفاده در کاربرد SA در این پژوهش در جدول ۱ تعریف می‌شوند:

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم SA پیشنهادی

تعداد تکرارها	it
تعداد جمعیت اولیه	$npop$
دمای اولیه	T_0
نرخ کاهش دما	α
ماتریسی جهت نمایش جمعیت‌ها (مسیرها)	C
دما در هر تکرار	T
ماتریسی جهت نمایش یک جمعیت همسایگی (مسیر همسایگی)	$Cnew$
مقدار اختلاف هزینه جمعیت فعلی و هزینه جمعیت همسایگی	$DELTA$
تابع احتمال بولتزمان	P

٤-۲ ایجاد جمعیت اولیه C و مکانیزم همسایگی $Cnew$

جهت ایجاد جمعیت اولیه، تعدادی مسیر (جمعیت) مطابق با توضیحات بخش ۱-۳ ایجاد می‌شود. مسیرهای ایجادشده با توجه به توضیحات بخش ۲ ارزیابی کرده و مسیرهای شدنی به عنوان جمعیت اولیه در نظر گرفته می‌شود و هر یک برداری از ماتریس C را نمایش می‌دهند. به این صورت که گره‌های (سطوح ارتفاعی) موجود در هر رأس را از بالا به پایین شماره گذاری کرده و سپس به صورت تصادفی در هر رأس یک گره انتخاب می‌شود. با وصل کردن گره‌ها با حفظ ترتیب انتخاب به یکدیگر یک مسیر ایجاد می‌شود. باید توجه کرد که در هر رأس فقط یک گره را می‌توان انتخاب کرد. به طور مثال، برای دو بردار جدول ۲ که به صورت تصادفی به دست آمده‌اند، به شکل زیر عمل می‌شود:

جدول ۲. مسیرهای تصادفی ایجادشده

بردار تصادفی (مسیر) یک	۱	۳	۳	۲
بردار تصادفی (مسیر) دو	۵	٤	۲	۱

مسیر یک: گره ۲ از رأس ۱ ← گره ۳ از رأس ۲ ← گره ۳ از رأس ۳ ← گره ۲ از رأس ٤

مسیر دو: گره ۵ از رأس ۱ ← گره ٤ از رأس ۲ ← گره ۲ از رأس ۳ ← گره ۱ از رأس ٤

سپس در هر تکرار it با استفاده از چرخه رولت‌ویل یکی از عملگرهای درج تصادفی، مبادله و بازگردانی را انتخاب کرده و برای تولید جواب همسایه $Cnew$ استفاده می‌شود. مقدار تابع احتمال بولتزمن (P) از رابطه ۷ $e^{\frac{-\Delta E}{Tc}}$ بدست می‌آید که در آن $DELTA\ (\Delta E)$ اختلاف انرژی (تابع‌هدف) دو جمعیت فعلی و جدید است و T نیز دمای فعلی الگوریتم است. اگر $\Delta E > 0$ باشد جواب کنونی (همسایه) پذیرفته می‌شود. درغیراین‌صورت، مقدار P با یک عدد تصادفی در بازه‌ی (۰،۱) که با تابع $RND()$ تولید می‌شود مقایسه می‌شود. اگر مقدار P

بزرگتر از مقدار برگشتی تابع $RND()$ باشد، جواب کنونی (همسایه) پذیرفته می‌شود.

٤-٣ دمای اولیه (T_0) و نرخ کاهش دما (α)

معمولاً در ابتدای الگوریتم دما برابر یک در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش با توجه به این که در تابع احتمال بولتزمن ΔE مقدار بسیار بزرگی است برای هم واحد شدن ΔE و T طبق رابطه ۷ از مقدار نرمالایز شده ΔE استفاده شده است:

$$\Delta E = \frac{E(\acute{s}) - E(s)}{E(s)} \qquad (۷)$$

روابط متعددی جهت تعیین نرخ کاهش دما وجود دارد که از پرطرفدارترین آن‌ها می‌توان به کاهش خطی، کاهش هندسی و کاهش لگاریتمی اشاره کرد.

قاعده کاهش خطی: رابطه زیر رابطه کاهش دما به صورت خطی را بیان می‌کند که در آن T_0 دمای اولیه ، n شماره‌ی مرحله و β ضریب ثابتی بین صفر و یک است.

$$T_n = T_0 - n \times \beta \qquad (۸)$$

قاعده کاهش هندسی: یکی از قواعد مشهور کاهش دما است که به دلیل سادگی، کاربرد گسترده‌ای دارد و بصورت رابطه زیر بیان می‌شود. α ضریب ثابتی بین صفر و یک است.

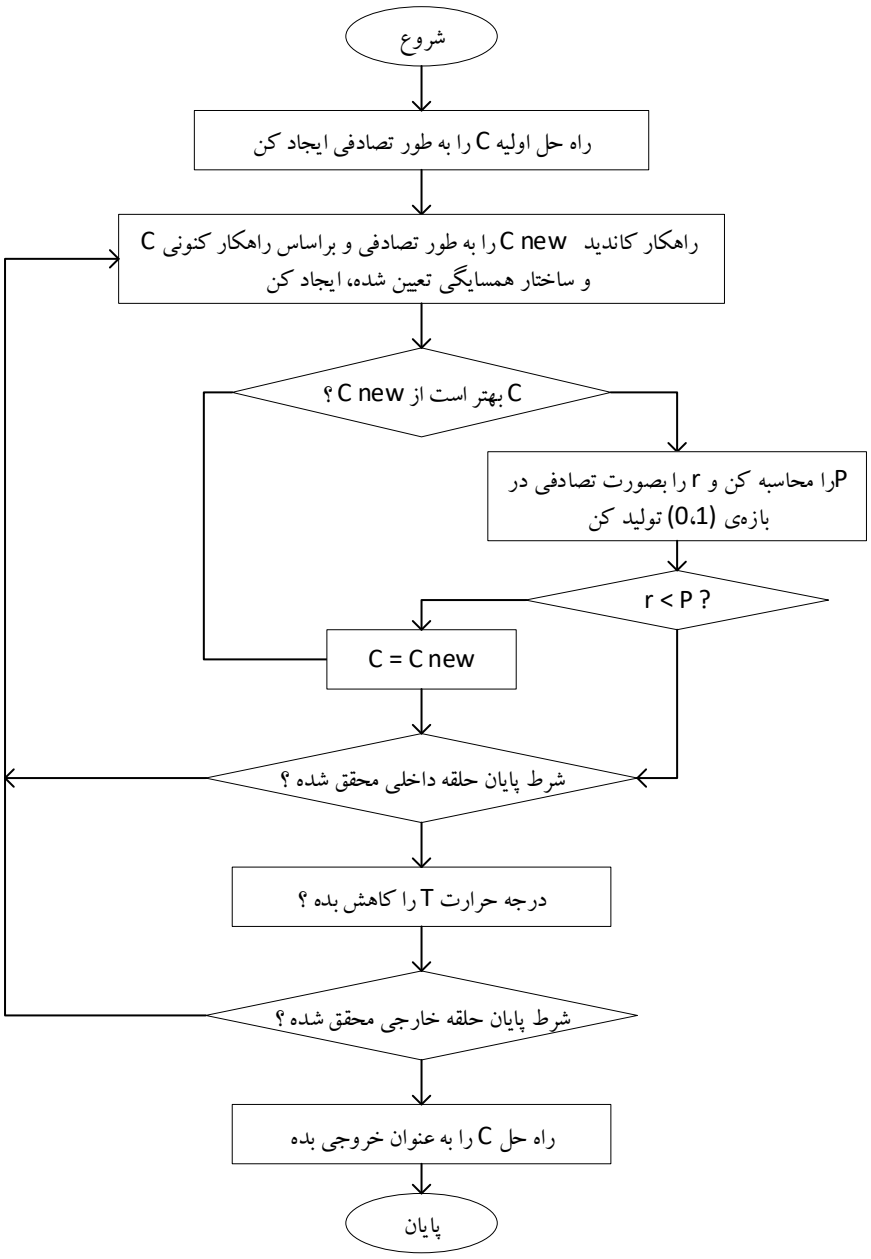
$$T_{n+1} = \alpha \times T_n \qquad (۹)$$

قاعده کاهش لگاریتمی: در این رابطه نسبت به دو رابطه دیگر، سرعت کاهش دمای کمتر است و همگرایی بیشتری را به سمت بهینه سراسری موجب می‌شود . ثابت شده است که مقدار $(alpha)$ در بازه‌ی $0.8 < \alpha < 0.99$ برای کاهش دما به صورت نسبتا آهسته مناسب است. هر چقدر مقدار α زیادتر باشد، سرعت کاهش دما کمتر خواهد بود و امکان جست‌وجوی بیشتر در فضای مسئله را می‌دهد.

در این مقاله، از قاعده کاهش هندسی که روشی مرسوم‌تر است استفاده می‌شود:

$$T_n = \frac{T_0}{1 + \log(n)} \qquad (۱۰)$$

در شکل ۷ فلوچارت الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مشاهده می‌شود.



شکل ۷. فلوچارت الگوریتم SA در این مقاله

۵. نتایج و بحث

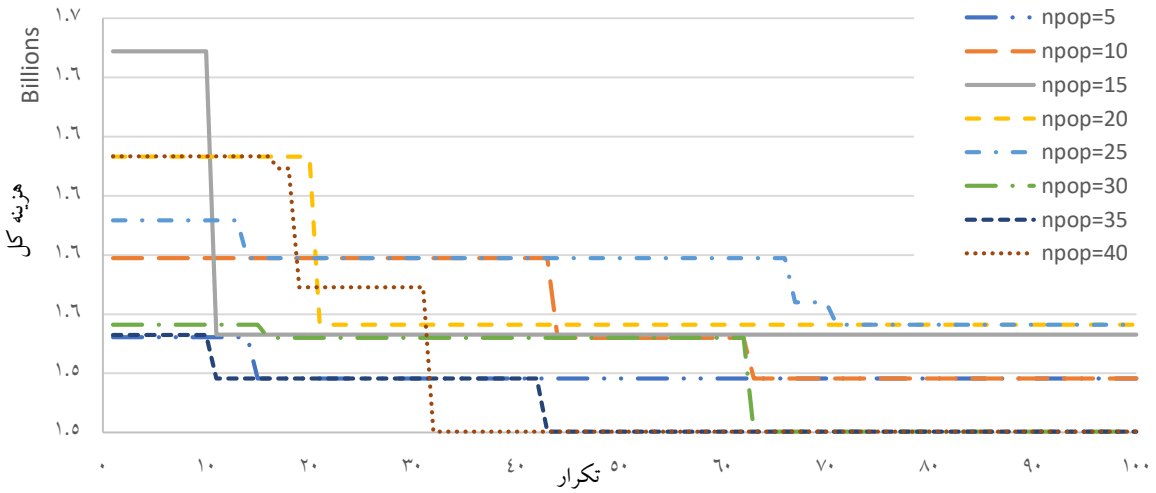
در روابط بیان شده برای الگوریتم بهینه‌سازی شبیه‌سازی تبرید، پارامترهای دمای اولیه (T) و نرخ کاهش دما (α) باید تعیین شوند، و عملکرد الگوریتم SA متاثر از این پارامترهاست، چرا که این پارامترها شدت و تنوع جست‌وجو را تعیین می‌کنند. از طرفی مقادیر مشخص برای این پارامترها وجود ندارد که بتواند تمامی مسائل را به طور موثر و مناسب تحلیل کند. برای بررسی بهتر عملکرد الگوریتم استفاده‌شده جهت بهینه‌سازی، در این مقاله دو مسئله با طول ۵۰۰ متری و ۲۰۰۰ متری بررسی شده است که در مسئله ۲۰۰۰ متری برای ارزیابی عملکرد در شرایط پروژه واقعی، از نقشه توپوگرافی و پروفیل طولی واقعی یک مسیر بهره گرفته شده است. در این مطالعه، ابتدا پارامترها با استفاده از نتایج و توصیه مطالعات گذشتگان و همچنین با تکرارهای مختلف اجرای برنامه برای رسیدن به بهترین حل‌ها بدست آمده‌اند. با توجه به این که در رابطه بولتزمن مقدار نرمالایز

شده ΔE استفاده شده است مقادیر پیشنهادی دمای اولیه و نرخ کاهش دما به ترتیب برابر ۱ و ۹۵/. می‌باشد.

۵-۱ مثال ۵۰۰ متری

با توجه به این که تعداد حالات مسیر در این مثال خیلی زیاد نیست، می‌توان جواب مسئله را از طریق الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم جست‌وجوی کامل بدست آورد و با یکدیگر مقایسه کرد تا میزان کارآیی الگوریتم پیشنهادی نیز تعیین شود.

برای تعیین تأثیر تعداد جمعیت بر روند همگرایی الگوریتم پیشنهاد شده، الگوریتم پیشنهادی با تعداد جمعیت مختلف روی یک قطعه راه ۵۰۰ متری اجرا شده است. هزینه‌ی بهینه احداث (شامل هزینه عملیات خاکی با ضریب ۱۰۰ و هزینه مصرف سوخت) قطعه راه مذکور از طریق الگوریتم جست‌وجوی کامل برابر ۱/۵۲۵ میلیارد تومان بدست آمده است. لازم به ذکر است که ضریب ۱۰۰ برای هزینه عملیات خاکی برای در نظر گرفتن اهمیت نسبی بیشتر هزینه عملیات خاکی نسبت به هزینه سوخت استفاده شده است. با توجه به شکل ۸ برای جمعیت‌های تا تعداد ۲۵، الگوریتم پیشنهادی به جواب اشتباهی رسیده است. اما، با افزایش تعداد جمعیت دقت الگوریتم بالا رفته و دقیقا به جواب بهینه رسیده است. اما باید توجه شود که افزایش تعداد جمعیت باعث افزایش زمان عملیات محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه توضیح فوق، تعداد جمعیت مناسب برای این عملیات برابر با ۴۰ عدد در نظر گرفته شده است.



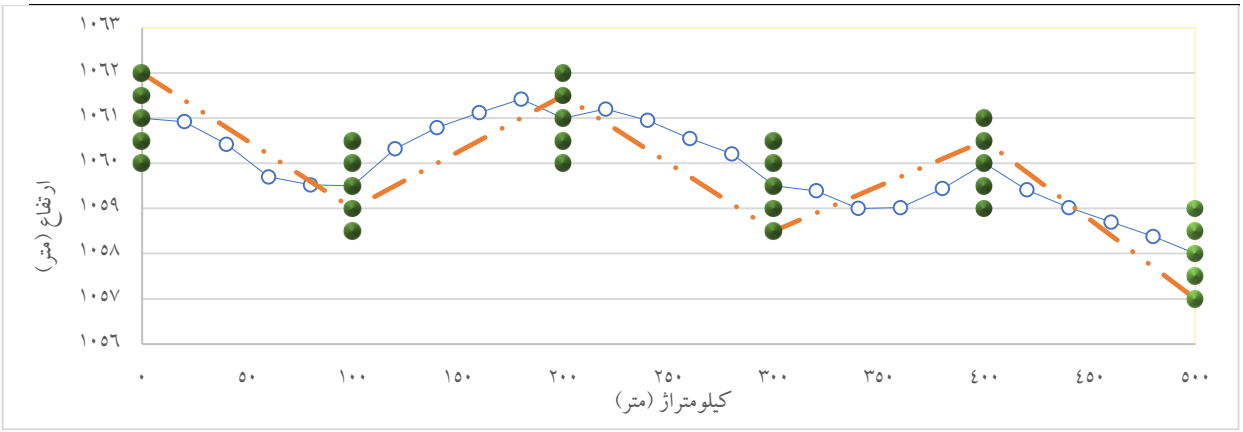
شکل ۸ نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مسیر ۵۰۰ متری

سپس، برای تعیین کارآیی روش، ۹ قطعه مختلف مسیر ۵۰۰ متری دیگر از هر دو روش مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج آن‌ها و همچنین زمان محاسبات آن‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که زمان انجام محاسبات در الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم جست‌وجوی کامل در تمامی موارد بهتر است در صورتی که جواب‌های بدست‌آمده از دو روش اختلافی ندارند. برای مثال، در قطعه راه ٤، پروفیل طولی و خط پروژه قائم بهینه مطابق شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی مسیرهای ۵۰۰ متری

شماره قطعه راه	زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی (ثانیه)	زمان اجرای الگوریتم جست‌وجوی کامل (ثانیه)	جواب بهینه (ردیف بهینه در ماتریس C)	هزینه (میلیارد تومان)
۱	٤٨,٧٧	۱۱۲,۰۱	۱۵۲٤۱۳	۱,۷۵۷
۲	۳۵,۲۵	۹۵,۳۱	۳۲۳۲۳۳	۲,۳۲۲

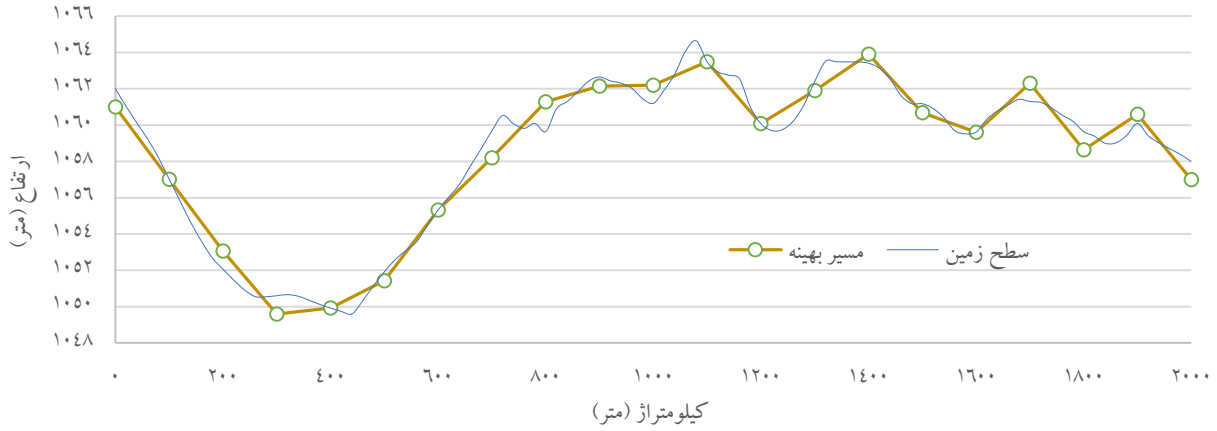
شماره قطعه راه	زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی (ثانیه)	زمان اجرای الگوریتم جست‌وجوی کامل (ثانیه)	جواب بهینه (ردیف بهینه در ماتریس C)	هزینه (میلیارد تومان)
۳	۱۵,۴۲	۲۲,۸۱	۵۳۱۴۵۵	۰,۸۴
٤	۱۸,٦۸	۳۵۲,۹۲	۱٤۱۵۲۵	۱,۲۷۳
۵	۳۷,۵۹	۱٦٦,۹۵	۱٤۲٤۳۲	۱,٦۲۲
٦	۳۵,۰۷	۱۰۲,۲۱	۲۳٤۳۳۲	۰,۹٤
۷	۵۳,٦۱	۲۳۱,۰۱	۱۵۳۲۱۵	۱,۰۵٦
۸	۲۹,۰۲	۹۳,۷۳	۳۳٤۲۳۲	۱,۳۳۹
۹	۳۲,۸۹	۱۰۷,۰۱	۵۳٤۳۲۳	۱,۵۲۵



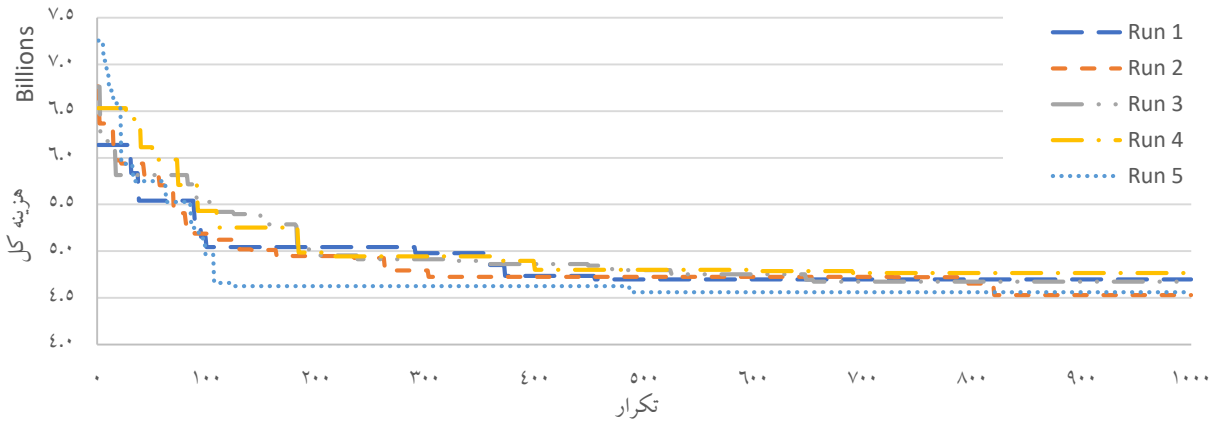
شکل ۹. مسیر قائم بدست آمده برای قطعه راه ۵۰۰ متری ٤

۵-۲ مثال ۲ کیلومتری

پس از اجرای الگوریتم پیشنهادی برای قطعات ۵۰۰ متری و تنظیم پارامترها، الگوریتم پیشنهادی برای یک مسیر واقعی ۲ کیلومتری بکارگیری شد. در این پروژه بیشترین شیب عمومی زمین در طول خط پروژه طولی برابر با ۲/۰۲ درصد است که با توجه به نشریه ٤۱۵ آیین نامه طراحی راه‌های ایران که بیشترین شیب طولی موجود در هر نوع از مسیرها را مشخص می‌کند. از آنجا که شیب موجود کمتر از ۳ درصد است، این مسیر در دسته راه هموار(دشتی) قرار می‌گیرد و در آیین‌نامه حداکثر شیب طولی مجاز راه برای آن (با سرعت طرح بین ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت) برابر با ٤ درصد توصیه شده است. مسیر قائم بهینه به دست آمده برای این مثال در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، و هزینه عملیات خاکی و مصرف سوخت برای آن به ترتیب ۱۰/۳ و ۳۵/۲ میلیارد ریال به بدست آمده است. نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادشده برای این مسیر ۲ کیلومتری نیز با تکرار ۱۰۰۰ و تعداد جمعیت ٤۰ مطابق شکل ۱۱ ارائه شده است. منظور از "هزینه کل" در این شکل مجموع هزینه مصرف سوخت و هزینه عملیات خاکی است. لازم به ذکر است که برای در نظر گرفتن اهمیت هزینه عملیات خاکی نسبت به هزینه سوخت از یک ضریب ۱۰۰ برای آن (نسبت به ضریب ۱ برای هزینه سوخت) استفاده شده است.



شکل ۱۰. مسیر قائم بهینه به دست آمده برای مسیر ۲ کیلومتری



شکل ۱۱. نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهاد شده برای مسیر ۲ کیلومتری (۱۰۰۰ تکرار)

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، در دو مورد نتیجه به جواب بهینه رسیده است و در ۳ مورد دیگر، مقدار اختلاف جواب با جواب بهینه کمتر از ۳ در صد است که در یک پروژه واقعی معقول به نظر می‌رسد. همچنین، مشاهده می‌شود که به طور میانگین بعد از ۵۰۰ تلاش، جواب بهینه حاصل شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی جهت تعیین پروفیل طولی راه‌ها با توجه به هزینه عملیات خاکی و هزینه مصرف سوخت ارائه شده است. نقاط ایجاد شده در جهت افقی موقعیت یک خط پروژه را نشان می‌دهند، در حالی که در جهت عمودی ارتفاع احتمالی که خط پروژه می‌تواند قرار بگیرد را ارائه می‌دهند. مسأله با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید که الگوریتمی کارآمد برای مشکلات مسیریابی است، مسئله حل شد. الگوریتم ارائه شده جهت کالیبره کردن پارامترهای الگوریتم و همچنین نشان دادن کاربرد و کارایی، در نمونه‌های با اندازه کوچک و در دنیای واقعی اعمال شد. به عنوان نتایج خاص می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- نتایج برای یک قطعه راه به طول ۳۰۰ متر نشان می‌دهد که بین میزان هزینه مصرف سوخت و هزینه عملیات خاکی همبستگی خطی وجود نداشته و بنابراین نمی‌توان گفت که با افزایش هزینه عملیات خاکی در یک راه هزینه مصرف سوخت آن نیز افزایش می‌یابد. بلکه ممکن است افزایش یکی باعث کاهش دیگری شود. بنابراین، می‌توان گفت در تعیین مسیر قائم راه‌ها باید هزینه مصرف سوخت را در نظر گرفت. از سوی دیگر، در این قطعه راه، هزینه مصرف سوخت در

مقابل متوسط هزینه عملیات خاکی عدد قابل توجهی بود و نمی‌توان از آن صرفه نظر کرد.

۲- با توجه به اینکه میزان هزینه مصرف سوخت در یک پروژه واقعی، عددی قابل توجه و تقریبا ۳ برابر عملیات خاکی می‌باشد، لذا اثر قابل توجهی بر هزینه‌های کلی احداث راه دارد و بایستی مورد توجه سیاست‌گذاران قرار بگیرد.

۳- سرعت دستیابی به جواب بهینه در روش پیشنهادی، چیزی در حدود 10^{10} برابر روش جست‌وجوی شمارشی تمام حالا ممکن است. این امر بخصوص در گروه‌های بزرگتر منجر به صرفه‌جویی بیشتر در زمان و نیز هزینه‌های احتمالی برای انجام محاسبات خواهد شد.

٤- دقت جواب بدست آمده از روش پیشنهادی بیش از ۹۸ درصد بوده که در یک پروژه واقعی این مقدار از دقت قابل توجه است.

در این پژوهش، میزان مصرف سوخت به عنوان شاخصی برای تاثیرات زیست محیطی در طراحی جاده در نظر گرفته شد. این پژوهش را می‌توان با در نظر گرفتن شاخص‌های دیگر مانند مقدار آلاینده‌های هوا ساطع شده، هم در مراحل ساخت و هم در طول چرخه عمر پروژه در مطالعات آینده انجام داد. پیشنهاد دیگر برای ادامه پژوهش در این زمینه، تلاش برای در نظر گرفتن هزینه‌های احداث در مناطق کوهستانی با ابنیه خاص است که می‌تواند ابعاد پیچیده‌تری به مسأله اضافه کند.

۷. مراجع

-Angulo, E., Castillo, E., García-Ródenas, R., and Sánchez-Vizcaíno, J. (2011) "Determining highway corridors". Journal of Transportation Engineering, Vol. 138, No. 5, pp. 557-570.

-Ahn, K., and Rakha, H. (2008) "The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions". Transp. Res. Part Transp. Environ., Vol.13, 151-167.

-Beheshtinia, M.A., Ahmadi, B. and Fathi, M. (2021) "A Genetic Algorithm with Multiple Population to Reduce Fuel Consumption in Supply Chain". International Journal of Transportation Engineering, Vol.8, No. 3, pp. 225-246.

-Babapour, R., Naghdi, R., Ghajar, I., and Mortazavi, Z. (2018) "Forest Road Profile Optimization Using Meta-Heuristic Techniques". Applied Soft Computing, Vol. 64, pp. 126-137.

-Boriboonsomsin, K., and Barth, M. (2009) "Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation system", Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board, pp. 21-30.

-Easa, S.M. (1988) "Selection of roadway grades that minimize earthwork cost using linear programming". Transportation Research, Part A, Vol. 22, No. 2, pp. 121-136.

-Easa, S.M. (1999) "Optimum vertical curves for highways profiles". Journal of Surveying Engineering, Vol. 125., No. 26, pp. 147-157.

-Frey, H.C., Zhang, K., and Rouphile, N.M. (2008) "Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements". Environ. Sci. Technol., Vol. 42, pp. 2483-2489.

-Fwa, T.F., Chan, W.T., and Sim, Y.P. (2002) "Optimal vertical alignment analysis for highway design". J. Transp. Eng., Vol. 128, pp. 395-402.

-Goh, C.J., Chew, E.P., and Fwa, T.F. (1988) "Discrete and continuous models for computation of optimal vertical highway alignment". Transp. Res. Part B Methodol. Vol. 22, pp. 399-409.

-Goktepe, A.B., Lav, A.H., and Altun, S. (2009) "Method for optimal vertical alignment of highway", in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport. ICE.

-Ghoreishi, B., Shafahi, Y., Hashemiyan, S.E. (2019) "A Model for optimizing railway alignment considering bridge costs, tunnel costs and transition curves". Urban Rail Transit, Vol. 5, No. 4, pp. 207-224.

-Hayman, R.W. (1970) "Optimization of vertical alignment for highways through mathematical programming". Highw. Res. Rec.

-Hare, W., Hossain, S., Lucet, Y., and Rahman, F. (2014) "Models and strategies for efficiently determining an optimal vertical alignment of roads". Comp. and Oper. Res., Vol. 44, pp. 161-173.

-Hosseini, S.A., Khalilpour, H., Mohammad Nejad, A., Moafi, M. and Sotoudeh Foumani, B. (2012) "Comparing the expenses of forest road cut and fill operations with standard rules (Study Area: Northern Forests of Iran)". Europ. J. Exp. Biol., Vol. 2, No. 4, pp. 1023-1028.

-Hassan, Y. (2003) "Improved design of vertical curves with sight distance profiles". Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board, pp. 13-24.

-Jha, M.K, Maji, A. (2007) "A multi-objective genetic algorithm for optimizing highway alignments, in: Computational Intelligence in Multi criteria Decision Making", IEEE Symposium On. IEEE, PP. 261-266.

-Jha, M. K., Schonfeld, P., and Jong, J.-C. (2006) "Intelligent Road Design", Vol. 19, WIT Press.

-Jha, M.K. and P. Schonfeld (2000) "Integrating genetic algorithms and geographic information system to optimize highway alignments". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1719, No. 1, pp. 233-240.

-Jong, J.C., Jha M.K., and Schonfeld, P. (2000) "Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 261-271.

-Jong, J.C., Schonfeld, P. (2003) "An evolutionary model for simultaneously optimizing tree-dimensional highway alignment Transp. Res. Part B Methodol". Vol. 37, pp. 107-128.

-Kim, E., Jha, M.K., Lovell, D.J., Schonfeld, P. (2004) "Intersection modeling for highway alignment optimization". Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng., Vol. 19, pp. 119-129.

-Kang, M., Yang., N., Schonfeld, P., Jha, M.K. (2010) "Bilevel highway route optimization". Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board, pp. 107-117.

-Kang, M.-W., Jha, M.K., Schoneld, P. (2012) "Applicability of highway alignment optimization models". Transp. Res. Part C Emerg. Technol., Vol. 21, pp. 257-286.

-Kirckpatric, S., Gellat, C.D., Vecchi, M.O. (1983) "Optimization simulated annealing, Science", Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.

-Li, W., Pu, H., Schonfeld, P., Yang, J., Zhang, H., Wang, L., Xiong, J. (2017) "Mountain railway alignment optimization with bidirectional distance transform and genetic algorithm". Comput. Civ. Infrastruct. Eng, Vol. 32, pp. 691-709.

-Li, C., Ding, L., and Zhong, B. (2019) "Highway planning and design in the Qinghai–Tibet Plateau of China: A cost–safety balance

perspective.” Engineering, Vol. 5, No., 2, pp. 337–349.

-Lai, X. and Schonfeld, P. (2016) “Concurrent Optimization of Rail Transit Alignments and Station Locations”. Urban Rail Transit, Vol. 2, No. 1, pp. 1–15.

-Mayer, R. H., and Stark, R. M. (1981) “Earthmoving logistics”. Journal of the Construction Division, Vol. 107, No. 2, pp. 297-312.

-Oglesby, C. H., and Hicks, R. G. (1982) “Highway Engineering”, 4th ed., John Wiley, New York.

-Oh, S. E., and J.W. Hong. 2017. “Parallelization of a finite element Fortran code using OpenMP library.” Adv. Eng. Software, Vol. 104, pp. 28–37.

-Pu, H., Song, T., Schonfeld, P., Li, W., Zhang, H., Hu, J., Peng, X., and Wang, J. (2019) “Mountain railway alignment optimization using stepwise & hybrid particle swarm optimization incorporating genetic operators”, Appl. Soft Comput., Vol. 78, pp. 41–57.

-Pu, H., Zhang, H., Li, W., Xiong, J., Hu, J., and Wang, J. (2019) “Concurrent optimization of mountain railway alignment and station locations using a distance transform algorithm”. Computers & Industrial Engineering, Vol. 127, pp. 1297-1314.

-Pu, H., Song, T., Schonfeld, P., Li, W., Zhang, H., Wang, J., and Peng, X. (2019) “A three-dimensional distance transform for optimizing constrained mountain railway alignments”. Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng., Vol. 34, pp. 972–990.

-Pu, H., Xie, J., Schonfeld, P., Song, T., Li, W., Wang, J., and Hu, J. (2021) “Railway Alignment Optimization in Mountainous Regions Considering Spatial Geological Hazards: A Sustainable Safety Perspective.” Sustainability, Vol. 13, No. 4, 1661.

- Pu, H., Li, X., Schonfeld, P. M., Li, W., Zhang, J., Wang, J., and Peng, X. (2021) “Concurrent Optimization of Mountain Railway Alignment and Station Locations with a Three-Dimensional Distance Transform Algorithm Incorporating a Perceptual Search Strategy.” IEEE Access, Vol. 9, pp. 34736-34754.

-Yang. D., He. Q., Yi. S., (2021) “Bilevel Optimization of Intercity Railway Alignment.” Transportation Research Record.

-Pu, H. and Song, T. (2019) “Mountain railway alignment optimization using stepwise & hybrid particle swarm optimization incorporating genetic operators”. Applied Soft Computing Journal., Vol. 78, pp. 41-57.

-Pu, H., H. Zhang, W. Li, J. Xiong, J. Hu, and J. Wang. 2018. “Concurrent optimization of mountain railway alignment and station locations using a distance transform algorithm.” Comput. Ind. Eng., Vol. 127, pp. 1297–1314.

-Song, T., Pu, H., Schonfeld, P., Zhang, H., Li, W., Hu, J., and Wang, J. (2020) “Mountain railway alignment optimization considering geological impacts: A cost-hazard bi-objective model.” Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 35, No. 12, pp. 1365-1386.

-Song, T., Pu, H., Schonfeld, P., Zhang, H., Li, W., Hu, J., and Wang, J. (2021) “Bi-objective Mountain railway alignment optimization incorporating seismic risk assessment.” Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 35, No. 12, pp. 1365-1386.

- Song, T., Pu, H., Schonfeld, P., Zhang, H., Li, W., Peng, X., and Liu, W. (2021) “GIS-based multi-criteria railway design with spatial

environmental considerations.” Applied Geography, 102449.

- Song, T., Pu, H., Schonfeld, P., Zhang, H., Li, W., & Hu, J. (2021) “Simultaneous optimization of 3D alignments and station locations for dedicated high-speed railways.” Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering.

-Trypia, M. (1979) “Minimizing cut and fiil costs in roadmaking”. Computer-Aided Design., Vol. 11, No. 6, pp. 337-339.

-Yang, N., Kang, M.-W., Schonfeld, P., Jha, M.K. (2014) “Multi-objective highway alignment optimization incorporating preference information”. Transp. Res. Part C Emerg. Technol., Vol. 40, pp. 36-48.

-Zhang, H., Pu, H., Schonfeld et al., (2021) “Railway Alignment Optimization Considering Lifecycle Costs.” IEEE intelligent Transportation Systems Magazine.

-Zhang, H., Pu, H., Schonfeld et al., (2020) “Multi-objective railway alignment optimization considering costs and environmental impacts”. Applied Soft Computing Journal, Vol. 89, 106105.

محسن بابائی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل و طراحی شبکه‌های حمل و نقلی، و بهینه‌سازی و قابلیت اطمینان در انواع مسائل مهندسی بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه بوعلی‌سینا است.

امیرحسین چهارمحالی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه بوعلی‌سینا اخذ کرد و در حال حاضر دانشجوی کارشناسی ارشد عمران در همان دانشگاه و در شرف دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود تحت عنوان "ارائه یک الگوریتم متاهیورستیک مرکب برای بهینه‌سازی مسیر قایم راه" است. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی مرکب و الگوریتم‌های متاهیوریستیک در پروژه‌های ساخت است.