نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم، شماره نخست، بهار ۱۴۰۲

Vol.11, No.1, Spring 2023

۸۳ -۱۰۳

مقاله پژوهشی

DOR: *20.1001.1.20089635.1402.11.1.5.6*

مسیریابی بهینه جاده با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: استان سمنان، مسیر دامغان به دیباج)

میثم سلجوقی[1*]، محمد حاجب[2]، علی‌اکبر متکان[3]

۱- کارشناس ارشد سنجش‌ازدور و *GIS*، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲- مربی مرکز سنجش‌ازدور و *GIS*، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استاد مرکز سنجش‌ازدور و *GIS*، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴

چکیده

وجود شبکه جاده‌ای مناسب، یکی از عوامل رشد اقتصادی و توسعه پایدار یک کشور است. روش‌های معمول طراحی مسیر، زمان‌بر و پرهزینه هستند بعلاوه مؤلفه‌های افقی و عمودی مسیر را جداگانه لحاظ می‌کنند. از دهه هفتاد میلادی تلاش‌هایی برای خودکارسازی عملیات مسیریابی صورت‌گرفته است. الگوریتم ژنتیک، روشی فراابتکاریست که برای حل مسائل بهینه‌سازی مختلف کاربرد دارد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای مسیریابی جاده استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی، ابعاد افقی و عمودی را به‌طور هم‌زمان لحاظ می‌کند. کروموزوم‌ها به‌صورت آرایه‌ای برداری از نقاط شکست مسیر تعریف می‌شوند. منطقه مطالعاتی محور موجود دامغان به دیباج است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روشی مبتکرانه با رویکرد مدل‌سازی معکوس به کشف درجه اهمیت توابع هدف مسیر موجود پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که سهم فاکتور طول تنها ۱۰ درصد است، بنابراین اهمیت پایین این تابع باعث تحمیل هزینه بسیار به کاربران مسیر شده و عامل اصلی ناپایداری محور موجود است. قبل از اجرای نهایی جهت بهبود عملکرد مدل، پارامترهای الگوریتم روی محیط شبیه‌سازی تنظیم می‌شوند. توابع هدف شامل طول مسیر، اصول فنی و مهندسی، اقتصادی، زمین‌شناسی و زیست‌محیطی است. در اجرای نهایی، الگوریتم در سطح راه‌سازی تفصیلی، کریدوری برای مسیر مشخص می‌کند. در سطح نیمه تفصیلی نسبت به یافتن بهترین مسیرها در این کریدور اقدام می‌شود و در سطح اجرایی مسیر بهینه تعیین می‌شود. نهایتاً قوس‌های مسیر براساس آئین‌نامه آشتو ۲۰۱۱ به صورت خودکار پیاده‌سازی گردیده و مسیر نهایی ترسیم می‌شود. نتایج نشان داد مسیر پیشنهادی نسبت به محور موجود به میزان ۹/۱ کیلومتری (۱۸درصد) کوتاه تر و ۲۰درصد کمتر از کاربری‌های پرهزینه عبور داشته است. بنابراین تحقیق حاضر بیانگر قابلیت بالای الگوریتم ژنتیک در طراحی مسیر است.

کلید واژه‌ها : بهینه‌سازی مسیر، فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک، مدل‌سازی معکوس، جاده دامغان به دیباج.

[*] نویسنده مکاتبه کننده: تهران، اوین، میدان شهید شهریاری، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین.

تلفن: ۰۹۱۳۹۵۶۸۷۹۶

Email: M_Saljughi@yahoo.com

۱- مقدمه

جاده‌ها یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های هر کشوری هستند و برای توسعه اقتصادی و اجتماعی، وجود یک شبکه راه بهینه ضروری است [۱]. با توجه به جنبه‌های فنی، سازه‌ای، زیست‌محیطی و اجتماعی مسیریابی جهت رسیدن به ساختار فضایی پایدار، رعایت استانداردهای طراحی الزامی است. در طراحی مسیر باید معیارهای فنی (توپوگرافی، جنس خاک)، هزینه-ساخت، مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی لحاظ شوند و از جهتی اصول مهندسی راه نیز اعمال گردند. روش‌های معمول طراحی بسیار زمانبر و پرهزینه هستند و وابستگی زیادی به دانش طراحان دارند [۲]. بنابراین از دهه ۷۰ میلادی تلاش‌هایی برای ارائه مدل‌های مسیریاب خودکار انجام شده است. عناصر اساسی این الگوریتم‌ها شامل متغیرهای طراحی (x,y,z)، مدل ریاضی (ارائه مسیری از این متغیرها)، محدودیت‌ها (شرایطی که هر مسیر باید رعایت کند) و توابع هدف (اندازه‌گیری دسترسی به اهداف طراحی مسیر) است. در این راستا مدل‌های پیشنهادی به سه دسته افقی، عمودی و سه بعدی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱].

مسیریابی افقی در صفحه دوبعدی به‌صورت مسطحاتی و با ارزش‌گذاری معیارهای اجتماعی، اقتصادی و فنی در قالب هزینه‌های مکان‌مبنا، اجرا می‌شود [۳]. مسیریابی عمودی، طراحی عمودی مسیر افقی از پیش طراحی‌شده (پلان) است. یعنی ابتدا مسیر افقی جست‌وجو سپس در مرحله‌ای جداگانه قوس‌های عمودی اعمال می‌گردند و هزینه عملیات‌خاکی کمینه می‌شود [۴]. در مسیریابی سه‌بعدی برای کاهش حجم عملیات‌خاکی مؤلفه‌های افقی و عمودی هم‌زمان لحاظ می‌گردند.

تحقیقات متعددی در زمینه‌ی بهینه‌سازی افقی مسیر انجام شده است. پارکر (۱۹۷۷) روشی دومرحله‌ای برای انتخاب کریدور مسیر پیشنهاد داد. ابتدا منطقه به زون‌هایی تقسیم شده و میانگین ارتفاعی به هر زون اختصاص داده می‌شود. در مرحله دوم شبکه گریدی تشکیل و سپس برای انتخاب بهترین مسیر از نظر کمینه‌سازی هزینه عملیات‌خاکی برنامه‌ای چندمسیره اجرا می‌گردد [۵]. فلاهری (۱۹۹۱) روشی براساس تصمیم‌گیری سلسله مراتبی برای مسیریابی ارائه داد. در گام اول نقاط ابتدا و انتها را تعین و سپس منطقه‌ای برابر با یک‌سوم پهنای طول تعریف می‌شود. در مرحله بعد فضای جست‌وجو را محدود کرده و کریدورهایی انتخاب می‌شوند. سپس در داخل مناسب‌ترین کریدور مسیریابی صورت می‌گیرد [۶]. ژا و اسچنفیلد (۲۰۰۰) با ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS[۱]) و الگوریتم ژنتیک مدلی برای بهینه‌سازی افقی مسیر پیشنهاد دادند. توابع هدف آن شامل هزینه‌ی تملک اراضی، اثرات زیست‌محیطی، هزینه‌های طول‌مبنا و هزینه کاربر است. مسیرهای پیشنهادی به‌صورت هموار و براساس استانداردهای طراحی می‌باشند در نتیجه مدل پیشنهادی توانایی تولید مسیر بهینه افقی را در فضاهای جغرافیایی پیچیده را دارا است [۷]. الگوریتمی اصلاح شده مبتنی بر برنامه‌ریزی حرکتی (گام‌به‌گام) توسط ماجی و سوشما (۲۰۲۰) برای بهینه‌سازی هزینه‌های مسیر افقی و کاهش تاثیرات زیست‌محیطی ارائه شد. مدل برحسب تراکم عارضه‌های منطقه مکان و تعداد نقاط شکست مسیر را مشخص می‌کند [۲].

از معایب اصلی روش‌های افقی عدم لحاظ هزینه‌های بعد ارتفاعی مسیر است. بدین منظور پژوهش‌های با بهره‌گیری از روش‌های ریاضی برای رفع این مشکل ارائه شد. فوا (۱۹۸۹) با توجه به محدودیت‌های شیب و انحناء از روش برنامه‌ریزی پویا به طراحی عمودی مسیر پرداخت. مدل به بررسی هزینه‌های عملیات‌خاکی، تملک زمین و هزینه وسائل نقلیه می‌پردازد. پروفیل عمودی به صورت تکه خطوط مستقیم در میان پلان مسیر است. اما با توجه به عدم هموواری، مسیر واقعی تولید نمی‌گردد [۸]. فوا و همکاران (۲۰۰۲) مدل

[۱] *Geographic Information System*

بهینه‌ساز مسیر عمودی براساس الگوریتم ژنتیک و با اعمال محدودیت‌های طراحی از قبیل شیب، انحناء، نقاط ثابت و شیب طولی مجاز را پیشنهاد دادند. مدل پیشنهادی هزینه اصلی کارفرما از قبیل تملک اراضی، هزینه ساخت و زیرسازی، عملیات‌خاکی، هزینه پل و تأثیر مسیر بر نواحی حساس محیطی را بررسی می‌کند [۹]. هری و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی صحیح (*MILP*) مدلی برای بهینه-سازی بعد عمودی مسیر ارائه دادند. روش پیشنهادی بدون افزایش زمان محاسبات و با توجه به شیب کناری مسیر و محدودیت‌هایی همچون رودخانه به بهینه‌سازی مسیر عمودی می‌پردازد [۱۰]. اکمت و همکاران (۲۰۲۰) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بعد عمودی مسیر استفاده کردند. این پژوهش از نسخه *NSGAII*[۱] با دوتابع هدف هزینه ساخت و هزینه سوخت سوخت اجرا شد. نتایج نشان داد روش پیشنهادی در زمان مناسب توانایی تولید مسیرهای متفاوت با درجه همگرایی بالا را دارد [۱۱]. با توجه به مزایای بهینه-سازی هم‌زمان افقی و عمودی مسیر، تحقیقات در زمینه مسیریابی جاده در طی زمان به سمت مسیریابی سه‌بعدی سوق پیداکرده است. لی و چنگ (۲۰۰۶) با تکنیک ابتکاری جست‌وجوی همسایه‌ای، مدلی سه‌بعدی را جهت کنترل نقاط اجباری، نمره سرعت وسایل و مناطق ممنوعه پیشنهاد دادند. هزینه‌های طول مبنا به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شوند. مسیر خروجی به صورت هموار و واقعی است. اما مدل هزینه‌های عملیات خاکی و محیطی را لحاظ نمی‌کند [۱۲]. جست‌وجوی تک مسیره در برخی از روش‌های پیشین می‌تواند منجر به گرفتار شدن آن‌ها در کمینه محلی شود. بنابراین قابلیت روش‌های فراابتکاری با جست‌وجوی جمعیت‌مبنا آن‌ها را گزینه‌ای مناسب برای حل مسئله بهینه‌سازی مسیر تبدیل کرده است [۱۳].

کانگ و همکاران (۲۰۱۲) مدلی براساس الگوریتم ژنتیک برای بهسازی بزرگراهی در ایالت مریلند اجرا کردند. توابع هدف شامل ۶ مؤلفه عملیات‌خاکی، هزینه‌های طول مبنا، هزینه تملک اراضی، سازه، نگهداری و هزینه‌های پنالتی در نظر گرفته شد. مسیر خروجی با طول ۲۸٫۹ کیلومتر شباهت بسیاری به مسیر پیشنهادی شرکت مشاور داشت اما بخاطر عدم لحاظ مسئله زهکشی، هزینه ساخت مسیر کمتر از مقدار واقعی برآورد شد [۱۴]. روش جدیدی بر مبنای بهینه‌سازی ذرات (*PSO*[۲]) توسط شفاهی و باقریان (۲۰۱۳) برای بهینه‌سازی مسیر ارائه شد. تابع هدف شامل کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت، کاربر و تملک اراضی بود. برای محاسبه هزینه‌های واقعی از پیوند الگوریتم پیشنهادی با *GIS* استفاده می‌شود. پس از اجرا، نتایج نشان از قابلیت الگوریتم پیشنهادی در خودکارسازی فاز اولیه بهینه‌سازی مسیر را دارد [۱۵]. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) براساس روش ازدحام ذرات (*PSO*)، آنالیز چند هدفه‌ای برای بهینه‌سازی مسیر پیشنهاد دادند. اهداف دوگانه مدل شامل توابع زیست-محیطی و اقتصادی بودند که درجه تخریب پوشش گیاهی و فرسایش خاک به صورت کمی تعریف شدند و نواحی ممنوعه بعنوان قید عبوری لحاظ گردید. در نهایت مدل توانست به بالانس بین هزینه‌های اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی بپردازد [۱۶].

الگوریتم‌ها از منظر مدل جست‌وجو، به دو گروه وکتوری و رستری تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۷]. مسیرهای وکتوری به‌صورت عوارض خطی هستند و نقاط شکست جاده با نقاط گرهی[۳] مشخص می‌شوند که قابلیت ورود مستقیم مسیر به محیط *GIS* و امکان بهره‌گیری از توابع تحلیل مکانی را دارند. مسیرهای رستری با آرایه‌ای متوالی از پیکسل‌ها شکل می‌گیرند

[۱] *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*

[۲] *Particle Swarm Optimization*

[۳] *Node*

که جاده به صورت دندانه‌دار و دارای شکستگی‌های ناگهانی است و درجه نرمی مسیر وابسته به پیکسل سایز است. باوجود تلاش‌های صورت گرفته مدل‌های پیشنهادی دارای معایبی همچون عدم بهینه‌سازی هم‌زمان افقی و عمودی، وابستگی به‌اندازه پیکسل در مدل‌های با خروجی رستری و در مواردی عدم جستو-جوی جمعیت‌مبنا هستند.

در پژوهش حاضر سعی شده مدلی سه‌بعدی براساس الگوریتم ژنتیک ارائه شود. مسیر پیشنهادی در قالب مدل داده وکتوری است. الگوریتم در سه سطح راه‌سازی تفصیلی، نیمه‌تفصیلی و اجرایی به مسیریابی جاده می‌پردازد. سطح تفصیلی تعیین‌کننده بستر مسیر است همان مسیرهای شدنی (عملیاتی)، در این سطح برای تولید مسیرهای اقتصادی از لایه شیب استفاده می‌شود. جهت سرویس‌دهی به سکونتگاه‌ها از داده نقاط جمعیتی استفاده می‌گردد که مسیر پیشنهادی به سمت مراکز سکونتی با جمعیت بالا متمایل است. تنها سد مخزنی با اعمال حریم قانونی به عنوان منطقه ممنوعه است. سطح نیمه‌تفصیلی برای جست‌وجوی سه‌بعدی مسیرهای برتر در کریدور از لایه‌های کاربری، زمین‌شناسی و گسل، رودخانه، حجم عملیات خاکی و لحاظ مناطق ممنوعه‌ی از جمله حریم سد، شهرک صنعتی، کوه باستانی مهرنگار و کارخانه بالاست استفاده می‌کند. در سطح اجرایی با استفاده از لایه‌های شیب، کاربری، زمین شناسی و گسل، رودخانه، و لحاظ کردن مناطق ممنوعه مذکور مسیر بهینه حاصل می‌گردد. در پایان براساس آئین‌نامه آشتو ۲۰۱۱ قوس‌های دایره‌ای مسیر با روشی خودکار پیاده‌سازی می‌گردند. در این پژوهش همچنین روشی مبتکرانه با رویکرد مدل‌سازی معکوس برای کشف اهمیت معیارهای مختلف محور موجود ارائه می‌شود. در ادامه مطالب، در بخش مواد و روش‌ها، ابتدا ضمن معرفی منطقه مطالعاتی به داده‌های مسئله و تشریح روش‌های بکار گرفته‌شده در تحقیق پرداخته می‌شود. در بخش نتایج، یافته‌های حاصل از پیاده‌سازی مراحل مختلف مدل مسیریاب ارائه می‌گردند. بخش پایانی به بحث و نتیجه‌گیری پیرامون نتایج این پژوهش اختصاص دارد.

۲- مواد و روش‌ها

در این قسمت به تشریح داده‌ها و پارامترهای الگوریتم مسیریاب می‌پردازیم.

۲-۱- منطقه موردمطالعه

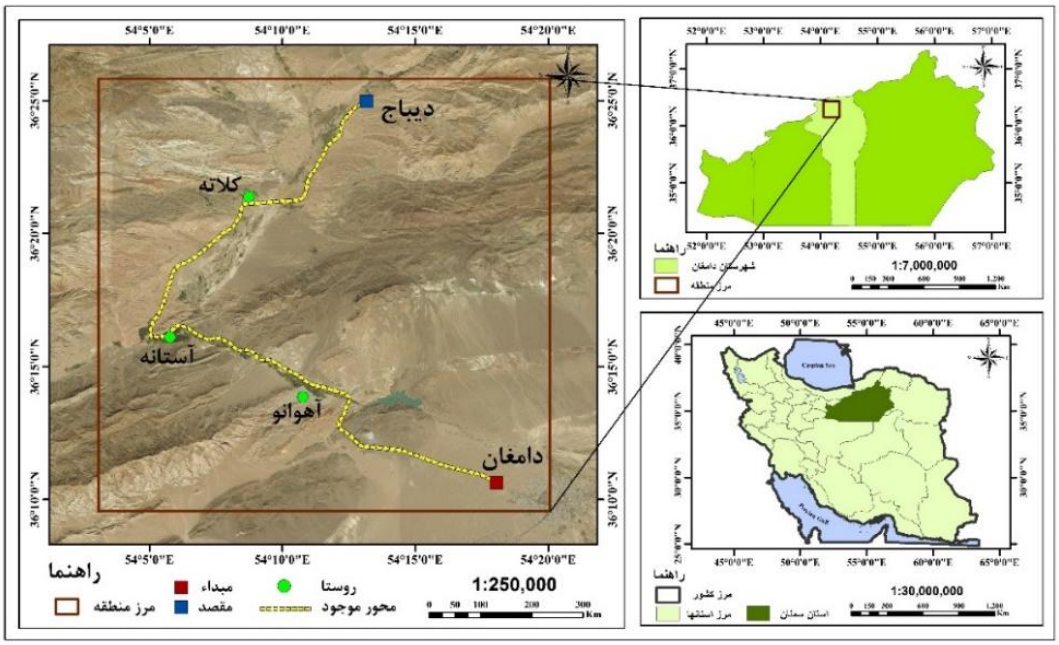
منطقه مورد مطالعه محور ارتباطی دامغان به دیباج در استان سمنان است. این مسیر قسمتی از کریدور شمال به جنوب کشور است. از نظر مختصات جغرافیایی ناحیه مطالعاتی در محدوده″ ۱ ′۲ °۵۴ تا″ ۵۶ ′۲۲ °۵۴ طول شرقی و″ ۱۲ ′۹ °۳۶ تا″ ۲۲ ′۲۶ °۳۶ عرض شمالی قرار دارد. دامنه ارتفاعی منطقه بین ۱۲۲۹ و ۳۳۳۱ متر از سطح دریا متغیر است و دارای میانگین ۲۱۴۲ متر می‌باشد. طول مسیر موجود منطقه ۴۷/۵۷۹ کیلومتر بوده که بخش ابتدایی محور در دشت واقع است اما رفته‌رفته از دشت به تپه‌ماهور و سپس از مناطق کوهستانی عبور می‌کند. روستاهای آهوانو، آستانه و کلاته در محور موجود واقع هستند.

شکل(۱) موقعیت منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

۲-۲- داده‌های مورداستفاده

مسیریابی جاده جزو مسائل پیچیده‌ای است که نیازمند دسترسی به حجم عظیمی از داده‌ها می‌باشد. در ابتدای این فرآیند باید معیارهای اصلی مشخص شوند [۱۸]. معیارهای موردنظر در این پژوهش شامل معیارهای طول-مبنا، اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی-اجتماعی و زمین شناسی است. هزینه‌های اقتصادی عمدتاً مربوط به هزینه احداث، تملک اراضی و عملیات خاکی است. معیارهای فنی استانداردهایی از قبیل طول مسیر، قوس‌ها و حداکثر شیب مجاز را در نظر می‌گیرند. معیارهای زیست‌محیطی و اجتماعی سازگاری مسیر با کاربری‌های موجود در منطقه را لحاظ می‌کنند و معیار زمین‌شناسی سازندهای بستر را از جهت جنس بستر و فاصله از گسل بررسی می-کند. در این تحقیق همچنین برخی قیود شامل عدم عبور مسیر از کاربری و مناطق ویژه همچون مناطق حفاظت‌شده و باستانی لحاظ می‌گردند که مناطق ممنوعه

نامیده می‌شوند. هر یک از معیارها و لایه‌های اطلاعاتی نظیر آن و منبع اخذ داده در جدول(۱) آورده شده‌اند.



شکل ۱: موقعیت منطقه موردمطالعه

جدول۱: داده‌های مورداستفاده

داده‌ها		معیار			منبع
		فنی	زیستی‌اجتماعی	اقتصادی	
DEM و شیب		*		*	نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور
کاربری اراضی	شهر			*	نقشه ۱:۵۰۰۰۰سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور
	باغ		*	*	
	کشاورزی		*	*	
	جنگل		*	*	
	مرتع		*	*	
	صخره			*	
	زمین بایر			*	
زمین‌شناسی		*		*	نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
گسل		*		*	
رودخانه		*	*	*	تصاویر موجود در گوگل ارث
مناطق سکونتی		*	*		سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰
مناطق ممنوعه (قیود)			*		تصاویر موجود در گوگل ارث

۲-۲-۱- توپوگرافی و شیب

در فرآیند مسیریابی، توپوگرافی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار برای تعدیل و کمینه نمودن حجم عملیات خاکی و تأمین خصوصیات هندسی راه مانند فاصله دید، سرعت طرح و حداکثر شیب مجاز است. شیب‌های بالا هزینه عملیات‌خاکی و ایجاد تونل برای کارفرما و هزینه زمان سفر، مصرف سوخت و استهلاک برای کاربران ایجاد می‌کند. لذا مسیر تا حد ممکن باید از شیب‌های با درصد پایین عبور کند [۳]. شکل(۲-الف) و شکل(۲-ب) به‌ترتیب توپوگرافی و شیب منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهند.

۲-۲-۲- کاربری اراضی

کاربری‌های مختلف از لحاظ اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ارزش‌های متفاوتی دارند. به‌عنوان نمونه عبور دادن جاده‌ها از نواحی جنگلی یا حفاظت شده به لحاظ زیست‌محیطی پرهزینه است. بنابراین جهت ارزش‌گذاری کلاس‌های کاربری مختلف باید نقشه کاربری اراضی مدنظر قرار گیرد (شکل(۲-ج)).

۲-۲-۳- زمین‌شناسی و گسل

در راه‌سازی جنس سازندها و گسل‌های منطقه بسیار تأثیرگذار هستند. عبور جاده از سازندهای مقاوم دوام و کیفیت آن را تضمین می‌کند و برعکس عبور از سازندهای ضعیف و مجاورت با گسل‌ها منجر به تضعیف کیفیت آن می‌شود [۱۸]. بنابراین باید مطالعات زمین-شناسی و خاک‌شناسی انجام گیرد. نقشه زمین‌شناسی و گسل منطقه در شکل(۲-د) نمایان است.

۲-۲-۴- رودخانه

از دیگر پارامترهای مسیریابی نحوه برخورد با عوارض آبی است. با افزایش تعداد عبورهای مسیر از رودخانه‌ها نیاز به احداث پل افزایش‌یافته که درنتیجه هزینه‌های ساخت نیز افزایش می‌یابد. از طرفی، تقاطع جاده با رودخانه باعث ایجاد مسائل زیست‌محیطی از قبیل آلودگی رودخانه می‌شود. بنابراین مسیر احداثی باید کمترین تعداد برخورد را با رودخانه داشته باشد و از طرفی حریم را نیز رعایت کند [۳]. شکل(۲-ه) نقشه رودخانه‌های منطقه را نشان می‌دهد.

۲-۲-۵- قیود مسیریابی (مناطق ممنوعه)

در این پژوهش قیود مسیریابی شامل سد مخزنی دامغان، شهرک صنعتی، کارگاه تولید بالاست و کوه باستانی مهرنگار است. ازطرفی سرویس‌دهی جاده به مراکز سکونتی آهوانو، آستانه و کلاته به ترتیب با جمعیت ۶۵۰، ۵۱۰، و ۳۱۴۶ نفر باید لحاظ گردد (شکل(۲-و)).

۲-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک ابتدا در سال ۱۹۶۳ توسط هالند و همکارانش ارائه شد [۱۹]. آن‌ها برای مدل‌سازی سیستم‌های مصنوعی به فرآیند سازگاری در سیستم-های طبیعی روی آوردند. این تحقیقات باعث به وجود آمدن الگوریتم ژنتیک گردید. الگوریتم ژنتیک، روشی جمعیت مبنا است که در آن تمام مجموعه جواب‌ها و کل فضای جستجو به‌یک‌باره و هم‌زمان جستجو می-شوند. این الگوریتم جمعیتی از جواب‌های شدنی را در نظر می‌گیرد. این جواب‌ها با استفاده از دو مفهوم مهم کروموزوم[۱] و ژن[۲] تعریف می‌شوند. یک جواب یا قسمتی از یک جواب که به رمز درآمده را کروموزوم و عناصر تشکیل‌دهنده آن ژن نام دارد [۱۹]. کیفیت هر یک از این جواب‌ها به‌وسیله تابعی با نام تابع برازندگی برآورد می‌شود. عملگر انتخاب به جواب‌های بهتر شانس بیشتر و به جواب‌های بدتر شانس کمتری برای بقا می‌دهد. وظیفه اصلی عملگر انتخاب، هدایت الگوریتم به نواحی امیدبخش فضای جواب است. در تشکیل جمعیت جدید از دو عملگر ترکیب[۳] و جهش[۴] استفاده می‌شود.

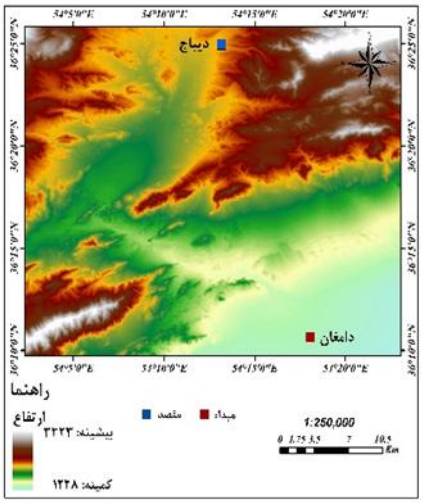
---

[۱] *Choromosome*

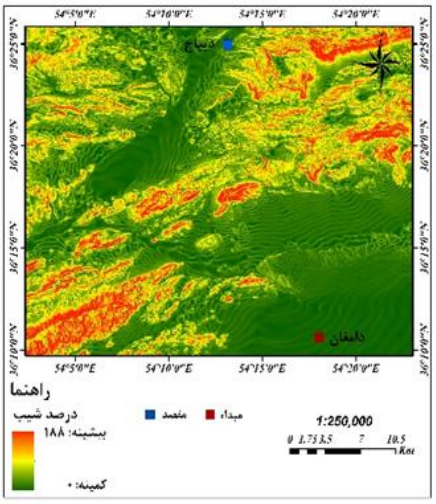
[۲] *Gene*

[۳] *Crossover*

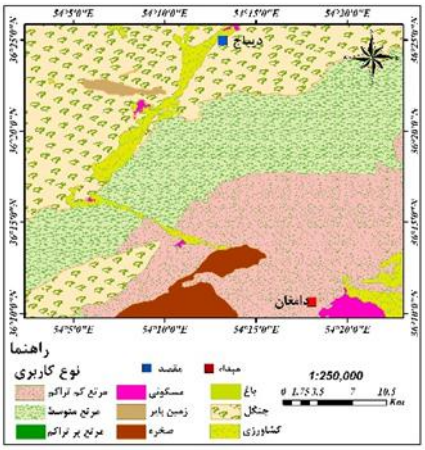
[۴] *Mutation*



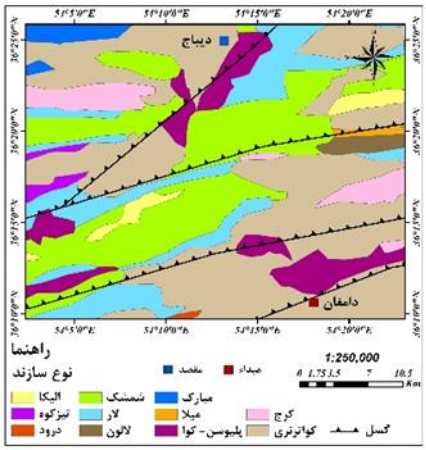
الف) توپوگرافی



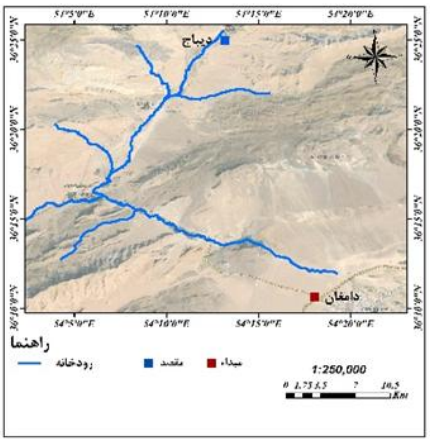
ب) شیب



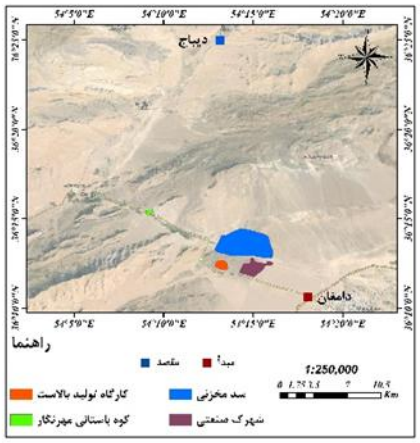
ج) کاربری اراضی



د) زمین‌شناسی و گسل



ه) رودخانه



و) مناطق ممنوعه

شکل۲: نقشه داده‌های مورداستفاده

فرآیند ترکیب، اطلاعات بین دو والد انتخاب‌شده را با یکدیگر مبادله می‌کند و منجر به تولید فرزندانی با ژن-های ترکیبی می‌شود [۲۰]. جهش نیز یکی از عملگرهای الگوریتم ژنتیک است که تنها بر روی یک فرزند اجرا می‌شود که به‌صورت تصادفی یک یا چندین ژن را برای حفظ و بهبود اطلاعات ژنتیکی تغییر می-دهد [۱۹ و ۲۱]. توانایی الگوریتم ژنتیک در هر نسل برای رسیدن به همگرایی، وابستگی مستقیمی به نحوه تعیین تابع برازندگی، روش انتخاب، ترکیب، جهش و در نهایت نخبه‌گرایی دارد.

۲-۳-۱- نمایش کروموزوم (ساختار جواب)

براساس اصل نقاط ایستگاهی، هر نقطه شکستگی در فضای دوبعدی با مختصات X و Y و در فضای سه‌بعدی با مختصات X، Y و Z است. هر نقطه ایستگاهی یک متغیر تصمیم است و هر مسیر پیشنهادی شامل تعدادی از این نقاط است. مجموع نقاط ایستگاهی وابسته به طول مسیر، انحنای موردنیاز و اندازه پیکسل لایه‌های اطلاعاتی ورودی است. یک جواب که بیانگر یک مسیر در فضای هدف است در شکل(۳) نشان داده شده است.

X_1	Y_1	Z_1	X_2	Y_2	Z_2	. . .	X_n	Y_n	Z_n

شکل۳: نمایش کروموزوم مسیر

۲-۴- روش پیشنهادی برای مسیریابی بهینه

مسیریابی جاده دارای منافع و ذینفعان مختلف است که باید اهداف متفاوتی را پوشش دهد. بنابراین الگوریتم چندهدفه گزینه مناسبی می‌باشد. الگوریتم ژنتیک دارای نسخه های چندهدفه و تک‌هدفه است. الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه، نسخه‌ای از الگوریتم چندهدفه است که توابع هدف را ترکیب کرده و حالتی برداری پیدا می‌کند. الگوریتم مسیریابی در این پژوهش ژنتیک تک-هدفه می‌باشد. توابع هدف شامل طول مسیر، فنی و مهندسی، اقتصادی، زیست‌محیطی و زمین‌شناسی است که درجه اهمیت هرکدام در قسمت اجرای مدل بیان شده است. تابع هدف طول مسیر شامل هزینه‌های روسازی و زیرسازی است در نتیجه مسیری که کوتاه‌تر باشد بهینه است. در تابع هدف فنی و مهندسی مهمترین اصل عبور مسیر تا حد ممکن از شیب‌های پایین برای اجرای قوس‌های عمودی و کمینه‌سازی عملیات‌خاکی است. در تابع هدف اقتصادی هزینه‌های تملک اراضی و هزینه عبور از رودخانه بررسی می‌شود. در عبور از هر کاربری باید ارزش متناسب آن پرداخت شود و در بحث تقاطع مسیر با رودخانه احداث پل الزامی است. مقدار تابع هدف اقتصادی بین ۰ تا ۱ ارزش گذاری شده است. مقادیر صفر دارای کمترین و ۱ دارای بیشترین هزینه است و این باعث ایجاد سطح مقاومت بالا برای عبور مسیر است.

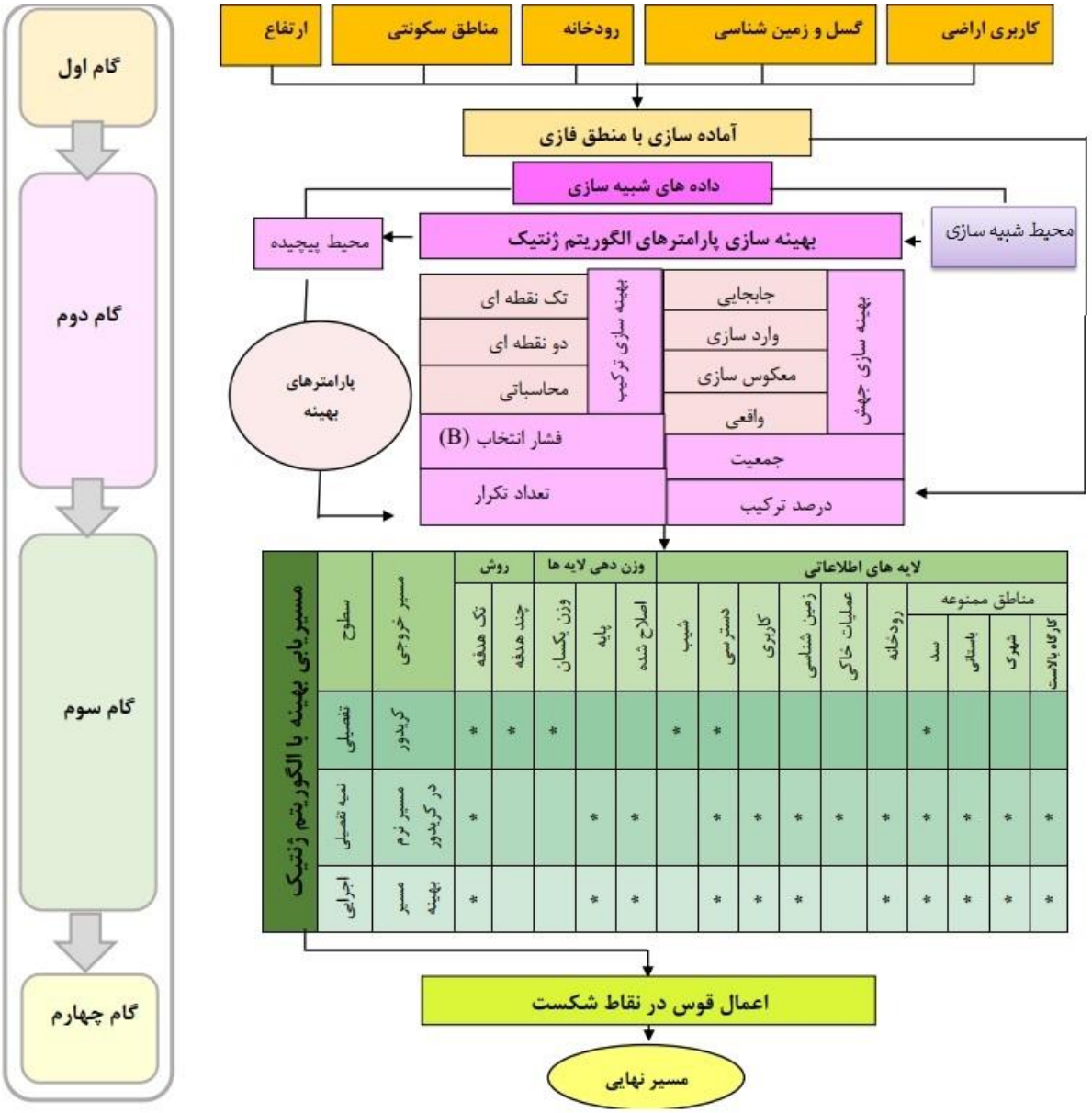
تابع هدف زیست‌محیطی و اجتماعی بیانگر قیود مسئله (مناطق ممنوعه) است به این مناطق هزینه ۱ اختصاص یافته است که دارای بالاترین مقدار است این امر باعث تحمیل جریمه به مسیر شده تا از عبور از این نواحی اجتناب گردد. این پژوهش نیز روشی با رویکرد مدل-سازی معکوس برای ارزیابی توابع هدف مسیر موجود منطقه ارائه می‌دهد. در قسمت اجرای نهایی، روش پیشنهادی در چهار مرحله به شرح زیر اجرا می‌شود:

۱) در گام اول به آماده‌سازی داده‌ها برای ورود به الگوریتم

۲) گام دوم به مقداردهی اولیه و تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم اختصاص دارد.

۳) در گام سوم برای یافتن مسیر بهینه، فرآیند مسیر-یابی در سه سطح راه‌سازی انجام می‌شود.

۴) درنهایت در گام چهارم با اجرای روشی خودکار براساس آئین‌نامه هندسی راه قوس‌ها اجرا شده و مسیر نهایی به دست می‌آید (شکل(۴)).



شکل۴: روند نمای مراحل انجام کار

۲-۴-۱- آماده‌سازی داده‌ها

با توجه به اختلاف توابع هدف از نظر مقادیر، مقیاس و دامنه پویایی آن‌ها لازم است ارزش لایه‌های به یک مقیاس یکسان و قابل‌مقایسه انتقال یابد. نقشه‌های معیار باید برحسب هزینه‌های راه‌سازی استانداردسازی شوند [۲۲]. به مقادیر یا کلاس‌های نامطلوب هزینه بالا و برعکس به کلاس‌های مطلوب هزینه کم اختصاص یابد. این پژوهش از منطق فازی برای استانداردسازی داده‌ها استفاده می‌کند [۲۳]. در ادامه مراحل استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی تشریح می‌گردد.

۲-۴-۱-۱- استانداردسازی لایه شیب

با اعمال روش درون‌یابی بر روی نقشه توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاع منطقه تولید و در مرحله بعد لایه شیب از آن مشتق گردید. مقادیر شیب به شش طبقه تقسیم‌بندی شده و متناسب با اصول راه‌سازی به هر طبقه هزینه‌ای اختصاص می‌یابد. طبقات شیب و هزینه

آن در جدول(۲)آورده شده‌اند، نقشه استانداردشده شیب در شکل(۶-الف) نمایان است.

۲-۴-۱-۲- استانداردسازی لایه کاربری اراضی

کلاس‌های مختلف کاربری اراضی از نظر معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی طبق نظر کارشناسان ارزش-دهی شدند. به کاربری‌های شهر، باغات یا جنگل‌ها هزینه بالا و به کاربری‌های مناسب هزینه کم اختصاص یافت. جدول(۳) نظرات کارشناسی برای کلاس‌های کاربری را نشان می‌دهد که نقشه هزینه استانداردشده کاربری از آن تولید شده است (شکل(۶-ب)).

۲-۴-۱-۳- استانداردسازی لایه زمین‌شناسی

ارزش‌گذاری هر سازند براساس مقبولیت آن در راه-سازی و طبق نظر کارشناسان صورت می‌گیرد. بدین به ترتیب سازندهای مقاوم‌تر هزینه کمتر و به سازندهای ضعیف‌تر هزینه‌های بالاتر اختصاص می‌یابد. جدول(۴) اسامی سازندهای منطقه و هزینه اختصاصی آنها را نشان می‌دهد. نقشه هزینه استانداردشده زمین‌شناسی در شکل(۶-ج) نشان داده‌شده است.

۲-۴-۱-۴- استانداردسازی لایه فاصله از گسل

ازنظر لرزه‌خیزی بیشترین آسیب گسل به جاده در فاصله ۱۰۰۰ متری اطراف خط شکستگی است. این اثر از فاصله ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری به‌صورت خطی کاهشی است. بیشتر از فاصله ۵۰۰۰ متری اثر گسل لحاظ نمی-شود [۱۸]. طبق رویکرد منطق فازی، تا فاصله ۱۰۰۰ متری از گسل هزینه یک و به فواصل بیش از ۵۰۰۰ متر، هزینه صفر اختصاص می‌یابد. فواصل بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر، هزینه به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. شکل(۵-الف) نمودار استانداردسازی لایه گسل را نشان می‌دهد که نقشه هزینه استاندارد شده آن نیز تهیه شده است (شکل(۶-د)).

جدول۲: ارزش‌گذاری هزینه لایه شیب

شماره	شیب(٪)	هزینه
۱	۳-۰	۰
۲	۵-۳	۰/۲
۳	۶-۵	۰/۴
۴	۸-۶	۰/۶
۵	۱۰-۸	۰/۸
۶	>۱۰	۱

جدول۳: امتیازدهی به کاربری‌ها

شماره	نام کاربری	هزینه
۱	شهر	۰/۸۵
۲	باغ	۰/۸
۳	کشاورزی	۰/۷
۴	جنگل	۰/۶
۵	مرتع پرتراکم	۰/۵
۶	مرتع متوسط	۰/۴
۷	مرتع‌کم‌تراکم	۰/۳
۸	صخره	۰/۱
۹	زمین خالی	۰/۱

جدول۴: امتیازدهی سازندها

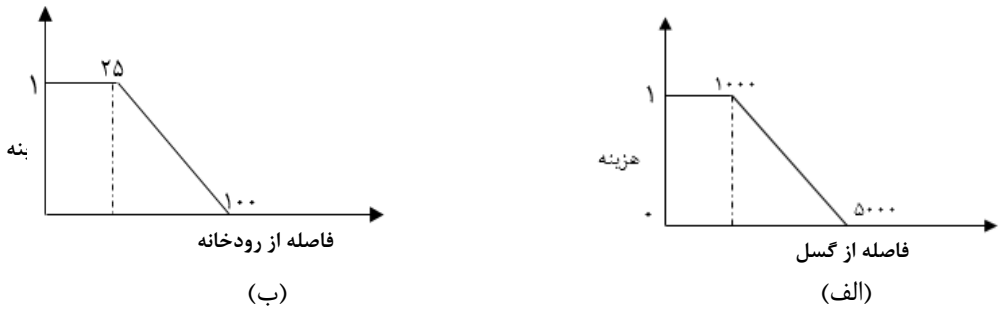
شماره	سازند	هزینه
۱	سازند ترکیبی(لار، الیکا، لالون در شیب‌های> ۵۰ درصد و کواترنری)	۱
۲	شمشک	۰/۹
۳	کرج	۰/۸
۴	پلئوسن-کواترنری	۰/۹۵
۵	درود	۰/۷
۶	مبارک	۰/۶
۷	تیزکوه	۰/۵
۸	میلا	۰/۴
۹	الیکا (شیب کمتر از ۵۰ درصد)	۰/۳
۱۰	لالون (شیب کمتر از ۵۰ درصد)	۰/۲
۱۱	لار (شیب کمتر از ۵۰ درصد)	۰/۱

۲-۴-۱-۵- استانداردسازی لایه فاصله از رودخانه

بیشترین هزینه اقتصادی، ایمنی و زیستی‌محیطی احداث مسیر در حریم رودخانه است. با فاصله تقریباً ۱۰۰ متری هزینه کاهش می‌یابد. براساس تابع پیشنهادی فواصل کمتر از ۲۵ متر بیشترین هزینه و در فواصل بین ۲۵ تا ۱۰۰ متر هزینه به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. شکل(۵-ب) نحوه استانداردسازی و شکل(۶-ه) هزینه استاندارد شده فاصله از رودخانه را نشان می‌دهد.

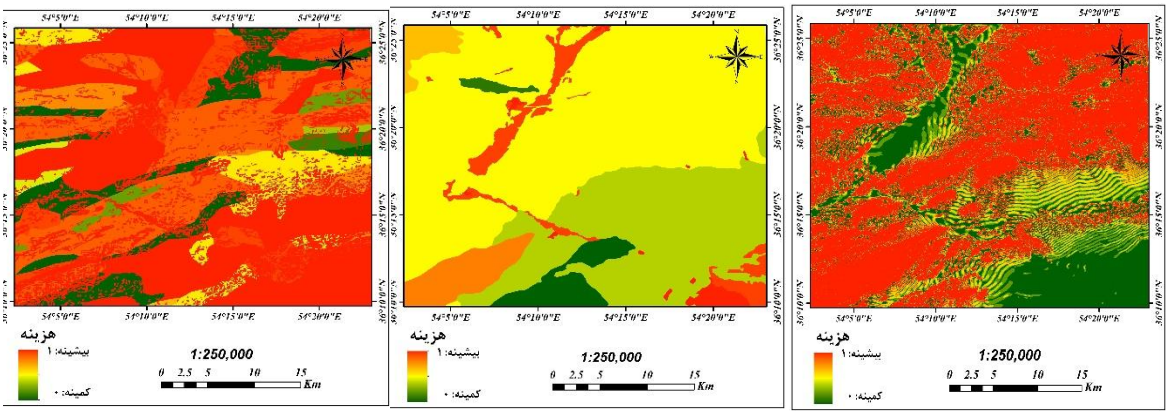
۲-۴-۱-۶- استانداردسازی قیود مسیریابی

در این پژوهش نواحی ممنوعه شامل سد مخزنی دامغان با ظرفیت ۲۱ میلیون مترمکعب، کارگاه تولید بالاست، شهرک صنعتی و کوه باستانی مهرنگار است که برای عدم عبور مسیر پیشنهادی از آن‌ها هزینه یک (هزینه بالا) اختصاص داده شد.

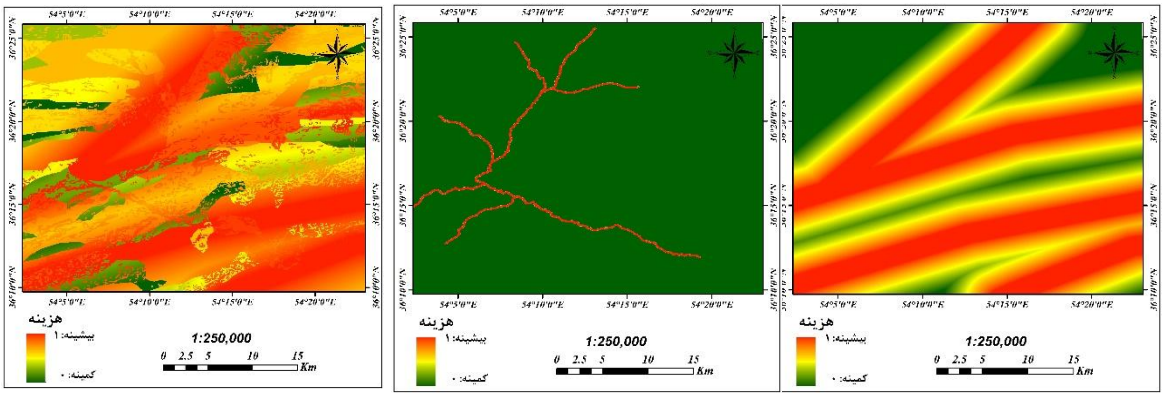


(الف) (ب)

شکل۵: تابع استانداردسازی فاصله از؛ الف) گسل، ب) رودخانه



الف) شیب ب) کاربری اراضی ج) زمین‌شناسی



د) گسل ه) رودخانه و) زمین‌شناسی و گسل

شکل۶: نقشه‌های هزینه استانداردشده با منطق فازی؛ (الف) شیب، (ب) کاربری اراضی، (ج)زمین‌شناسی، (د) گسل، (ه) رودخانه، و (و) ترکیب زمین‌شناسی و گسل

۲-۴-۲- تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

همانطور که پیشتر اشاره شد سرعت و کیفیت همگرایی الگوریتم ژنتیک تابعی از روش انتخاب، ترکیب، جهش، نخبه‌گرایی و تابع برازندگی است [۱۳]. با انجام آزمایش‌ها روی محیطی شبیه‌سازی‌شده مقدار پارامترهای بهینه‌ی طول کروموزوم، اندازه جمعیت، تعداد تکرار، روش انتخاب، ترکیب، جهش و نرخ آن‌ها تعیین می‌شود. سه نوع عملگر ترکیب تک‌نقطه‌ای (*SPCrO*)[۱]، دونقطه‌ای (*DPCrO*)[۲]، محاسباتی (*ACrO*)[۳] استفاده می‌شوند [۲۰]. عملگرهای جهش شامل جابجایی (*Swap*)، واردسازی (*Insertion*) و جهش معکوس‌سازی (*Inversion*) که به‌صورت ترکیبی و جهش واقعی (*Real Mutate (MMR)*) به‌صورت منفرد بکار گرفته می‌شوند.

[۱] *Single Point Crossover (SPCrO)*

[۲] *Double Point Crossover (DPCrO)*

[۳] *Arithmetic Crossover*

۲-۴-۳- مسیریابی بهینه توسط الگوریتم ژنتیک

پس از آماده‌سازی داده‌ها و تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک باید مدل مسیریاب پیاده‌سازی شود. در بخش آماده‌سازی داده‌ها (۲-۴-۱) اشاره گردید که برای یکسان‌سازی داده از منطق فازی استفاده می‌شود، بدین ترتیب که هر مسیر برآیندی از هزینه تجمعی توابع هدف است که میزان برازندگی آن براساس تابع هزینه ارزیابی می‌شود. عملیات مسیریابی در سه سطح راه-سازی تفصیلی، نیمه‌تفصیلی و اجرایی انجام می‌گیرد. در سطح تفصیلی با استفاده از لایه‌های شیب، دسترسی و با لحاظ حریم سد کریدوری برای مسیر تولید می-شود. در سطح نیمه‌تفصیلی با به‌کارگیری لایه‌های کاربری اراضی، زمین‌شناسی و گسل، رودخانه و حجم عملیات خاکی و لحاظ کردن تمام مناطق ممنوعه با جستجویی سه‌بعدی نسبت به یافتن مسیرهای بهینه در کریدور حاصل از سطح تفصیلی اجرا می‌شود. در سطح اجرایی از همان لایه‌های سطح نیمه تفصیلی استفاده می‌گردد فقط با این تفاوت که لایه شیب جایگزین عملیات خاکی می‌شود و با جست‌وجوی مجدد مسیر بهینه حاصل می‌گردد.

باهدف بررسی تغییر اهمیت معیارهای راه‌سازی (تغییر اوزان توابع هدف) در فرآیند مسیریابی، این پژوهش از دو مجموعه اوزان ورودی برای پنج معیار طول مسیر، فنی‌مهندسی، اقتصادی، زیست‌محیطی و زمین‌شناسی استفاده می‌کند. مجموعه اوزان اول براساس وزن‌دهی شرکت مشاور (طرح مطالعات محور دامغان- دیباج) به معیارهای راه‌سازی است که اوزان پایه نام دارد. دسته دوم مجموعه اوزان شامل تغییرات در وزن‌های پایه توسط نویسندگان است که با نام اوزان اصلاحی نامیده می‌شوند. در اوزان اصلاحی ده درصد از وزن معیار اقتصادی کاسته و به وزن معیار فنی مهندسی اضافه می‌گردد. بنابراین در اوزان اصلاحی ملاحظات فنی و مهندسی با ارزش ۲۹ درصد دارای بیشترین اهمیت است. اطلاعات کامل اوزان پایه و اصلاحی همچنین لایه اطلاعاتی مربوطه آن در جدول(۵) آورده شده است. باید اضافه گردد که در سطح تفصیلی برای معیارها از وزن‌های برابر استفاده می‌شود و مجموعه اوزان پایه و اصلاحی تنها در سطوح نیمه تفصیلی و اجرایی استفاده می‌شوند.

در سطح اول مسیریابی (کریدور)، الگوریتم چند هدفه طبق رابطه(۱) براساس دو تابع هدف طول مسیر و دسترسی اجرا می‌شود زیرا هدف از طرحی مسیر جدید، احداث محوری کوتاه‌تر و با دسترسی مناسب برای سکونتگاه‌ها منطقه است.

رابطه(۱)

$(F_1)= min (L)$
$(F_2)= min (A)$

در رابطه(۲) تابع طول مسیر برحسب فاصله اقلیدسی تعریف شده است.

رابطه(۲)

$$L=\sum_{k=1}^{n}\sqrt{((Xp-Xq^2)+(Yp-Yq)^2))}$$

رابطه(۳) اشاره به تابع دسترسی جاده به مراکز جمعیتی را دارد که مقادیر کمینه آن دارای برازندگی مناسب است.

رابطه(۳)

$$A=\sum_{k=1}^{n}\sqrt{((xr-xs)^2+(Yr-Ys)^2)}$$

در رابطه(۳)، n = تعداد روستاهای موجود در منطقه، Yr Xr = مختصات نزدیک‌ترین قسمت مسیر جهت دسترسی به سکونتگاه و Ys Xs = مختصات نقاط سکونت گاهی هستند.

تابع هدف کلی مسیریابی (الگوریتم تک‌هدفه در سطوح بعدی) طبق معیارهای پنجگانه در رابطه(۴) آمده است.

رابطه(۴)

$$min(F_{Total})= \lambda*C_L+ \lambda*C_F+ \lambda*C_E+ \lambda*C_N+ \lambda*C_G$$

در رابطه(۴)، C_L= هزینه طول مبنا، C_F= هزینه فنی-مهندسی، C_E= هزینه‌ساخت، C_N= زیست‌محیطی و اجتماعی C_G= هزینه زمین‌شناسی، λ= وزن هر یک از معیارها هستند. در رابطه(۵) جزئیات هر یک از توابع هدف مذکور اشاره می‌شود:

رابطه(۵)

$$CL= L* (P(w)+S(w))$$
$$CF=cut+fill$$
$$CE= (L*(cRiver*w)) + (L*(cLand*w))$$
$$CN= L*(cEnvironment*w)$$
$$CG= L*(cFormation*w) + L (cFault*w)$$

در رابطه(۵)، P= هزینه زیرسازی، S= هزینه روسازی، w= عرض جاده (عرض مسیر مطالعاتی ۱۱ متر است)، Cut= هزینه خاکبرداری، $fill$=هزینه خاکریزی، $cRiver$= هزینه برخورد با رودخانه، $cLand$= هزینه احداث مسیر درکاربری‌ها، $cEnvironment$= هزینه برخورد با مناطق زیستی و ممنوعه، $cFormation$= هزینه کیفیت سازند، $cFault$= هزینه عبور از گسل هستند.

جدول۵: اوزان معیارهای راه‌سازی

شماره	معیار	اوزان پایه (٪)	اوزان اصلاح‌شده (٪)	لایه مربوطه
۱	ملاحظات زیست‌محیطی	۲۳	۲۳	رودخانه- مناطق ممنوعه
۲	ملاحظات زمین‌شناسی	۱۷	۱۷	زمین‌شناسی-گسل
۳	ملاحظات اقتصادی	۲۳	۱۳	رودخانه-کاربری اراضی
۴	ملاحظات فنی- مهندسی	۱۹	۲۹	شیب- عملیات خاکی
۵	طول مسیر	۱۸	۱۸	طول پیکسلی مسیر

۲-۴-۴- روش پیشنهادی

در پژوهش حاضر، روش پیشنهادی در سه سناریو پیاده‌سازی و اجرا می‌گردد. در سناریوی اول که هدف آن مقایسه کارایی دو روش انتخاب چرخ رولت و رقابت دودویی است، الگوریتم چند هدفه در سطح اول و در سطوح بعدی از الگوریتم تک هدفه و اوزان پایه استفاده می‌شود. لایه‌های مورداستفاده در هر سطح مطابق شکل(۴) است. سناریوی دوم براساس اوزان پایه است و الگوریتم تک هدفه اجرا می‌شود. در سناریوی سوم که هدف مقایسه اوزان پایه و اصلاحی است تمام شرایط براساس سناریوی دوم است و با این تفاوت که اوزان اصلاحی جایگزین می‌شوند.

۲-۴-۵- طراحی و ترسیم قوس‌ها

همان‌طور که پیشتر اشاره شد در این تحقیق مختصات مسیر به صورت آرایه برداری است که در آن نقاط شکست به‌صورت گره‌هایی در طول خط مسیر مشخص می‌شوند. جهت تولید مسیر هموار باید شکست‌های مسیر با قوس‌های مناسب جایگزین شوند. پس از به دست آمدن مسیر نهایی در سطح اجرایی، الگوریتمی خودکار با دریافت مشخصات کلاس راه و سرعت طرح به‌عنوان ورودی، شعاع قوس را مطابق رابطه(۶) تعیین می‌کند.

رابطه(۶)

$$R\min = \frac{v^2}{127(f+e)}$$

در رابطه(۶)، R_{min} حداقل شعاع قوس، v سرعت طرح در واحد Km/h، f ضریب سایش لاستیک و e اندازه بر بلندی است [۵].

۲-۴-۶- ارزیابی اهداف موردتوجه در طراحی جاده موجود

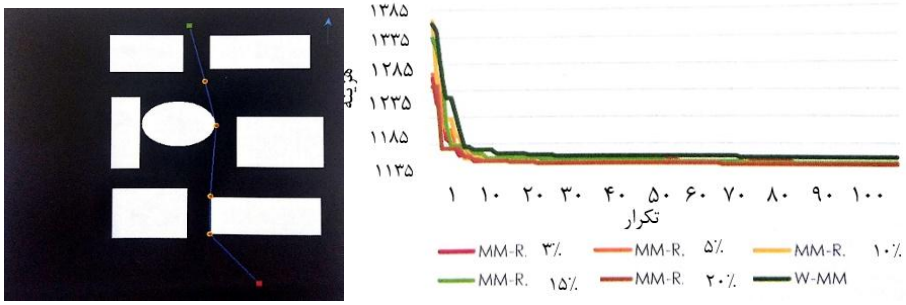
از نکات مهمی که در مسیریابی کمتر به آن توجه شده آنالیز توابع هدف جاده در زمان طراحی است. با این رویکرد می‌توان به اهداف تصمیم‌گیران و نحوه اولویت-دهی آن‌ها به معیارهای مختلف راه‌سازی در زمان طراحی مسیر پی برد. این امر به کسب دانشی می-انجامد که از آن برای طراحی مسیرهای جدید استفاده و بهسازی مسیرهای موجود مفید باشد. جهت استخراج اهداف مسیر موجود، این تحقیق روشی مبتکرانه مبتنی بر مدل‌سازی معکوس پیشنهاد می‌دهد که در سطح اول (کریدور) اجرا می‌شود. در مدل‌سازی مستقیم با داشتن لایه‌های ورودی و مشخص بودن اهمیت آن‌ها

مدل قادر به یافتن مسیر بهینه است. البته تغییر در اوزان معیارهای ورودی منجر به تولید مسیری جدید خواهد شد. با تکیه بر این اصل در مدل‌سازی معکوس، هدف تغییر در اوزان معیارهای ورودی تا جایی است که مسیر خروجی به مسیر موجود نزدیک شود به بیانی دیگر در مسئله معکوس‌سازی، تابع هزینه از اختلاف بین مسیر موجود با مسیر خروجی مدل به ازای یک دسته از اوزان معیارها محاسبه می‌شود. کمینه کردن این تابع هزینه به معنی انطباق هر چه بیشتر مسیر خروجی مدل با مسیر موجود است.

۳- نتایج

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از مراحل چهارگانه پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در منطقه مطالعاتی می‌پردازد. با انجام آزمایش‌ها روی محیط شبیه‌سازی مشخص شد که تعداد ۱۲۰ کروموزوم برای اندازه جمعیت و تعداد ۱۱۰ تکرار برای کسب نتیجه بهینه مناسب است. در این آزمایش همچنین مقدار نرخ بهینه ترکیب ۱۸ درصد تعیین شد و سهم مشارکت هر یک از روش‌های ترکیب تک نقطه‌ای، دونقطه‌ای و محاسباتی برای رسیدن به جواب بهینه مشخص شده که در جدول(۶) آورده شده است. نرخ بهینه جهش واقعی (*MMR*) ۳ درصد است (در این نوع جهش، نقاط ایستگاهی به مکانی جدید در فضای جست و جو جابجا می‌شوند). همچنین سهم جهش ترکیبی (*W_MM*) (مجموع روش‌های جهش جابجایی، واردسازی و معکوس‌سازی) در جدول(۶) مشخص می‌باشد (قابل ذکر است که در جهش ترکیبی، فقط توالی که همان ترتیب نقاط ایستگاهی است عوض می شود).

محیط شبیه‌سازی‌شده مطابق شکل(۷-الف) است. جواب آزمایش اتصال نقاط مبدأ و مقصد با مسیری بهینه و بدون برخورد به موانع است که الگوریتم به ازای مقادیر مختلف اجراشده و پارامترهای بهینه استخراج می‌شوند (جدول (۶)).



ب: بهبود تابع هدف براساس نرخ جهش های متفاوت

الف: محیط شبیه سازی

شکل۷: اجرای الگوریتم روی محیط شبیه سازی

جدول۶: نتایج آزمایش‌ها برای تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم

	نرخ ترکیب		نرخ جهش ترکیبی		نرخ جهش واقعی	اندازه جمعیت	فشار انتخاب	تعداد تکرار الگوریتم
	٪ ۱۸		٪ ۳					
مشارکت روش‌ها	تک نقطه‌ای	٪۳۵٫۵	جابجایی	٪۳۴	٪ ۳	۱۲۰	۶	۱۱۰
	دونقطه‌ای	٪۲۴٫۴	واردسازی	٪۳۳				
	محاسباتی	٪۴۰٫۱	معکوس‌سازی	٪۳۳				

۳-۱- مدل سازی معکوس

در اجرای مدل‌سازی معکوس (به صورت سعی و خطا) جهت تعیین ارزش معیارهای راه‌سازی مسیر موجود توابع شیب، طول مسیر، میزان دسترسی مراکز جمعیتی به مسیر، عبور از مناطق ممنوعه و کاربری اراضی بررسی شد. اوزان سایر معیارها به‌صورت ثابت در نظر گرفته شدند. با انجام این فرآیند مشخص شد که معیار شیب مسیر به‌تنهایی با سهم ۴۶ درصدی دارای بالاترین ارزش در بین اهداف پنج‌گانه است و طول مسیر که معیار مهمی بشمار می‌رود با ارزش ۱۰ درصد در رتبه سوم است. درصورتی که تابع طول دربردارنده هزینه‌های آتی ازجمله هزینه نگهداری، مصرف سوخت و سایر هزینه‌های کاربران است و بنابراین درجه اهمیت پایین معیار طول مسیر مسئله طراحی مجدد محور موجود را مطرح کرده است.

۳-۲- اجرای سناریوهای سه گانه

پس از آماده‌سازی داده‌ها و تنظیم پارامترها، مدل در قالب سه سناریوی اجرا می‌شود. در سناریوی اول هدف مقایسه روش‌های انتخاب چرخ رولت و رقابت دودویی مقایسه است. نتایج این اجرا نشان می‌دهد که مسیر پیشنهادی حاصل از روش انتخاب چرخ رولت براساس شکل(۸- الف) با طول ۳۵/۴۴۶ کیلومتر دارای هفت دهم درصد میانگین شیب کمتر و طول آن به میزان ۳۹۹ متر کوتاه‌تر از مسیر روش انتخاب رقابت دودویی است و به میزان ۲/۵ کیلومتر بیشتر بر مسیر موجود منطبق است. بنابراین در سناریوهای بعدی روش چرخ رولت لحاظ می‌گردد. ویژگی‌های این دو مسیر در جدول(۷) با هم مقایسه شده‌اند. شکل(۸-د) اشاره به فضای هدف الگوریتم ژنتیک چند هدفه در سطح تفصیلی با دو تابع هدف طول و دسترسی دارد.

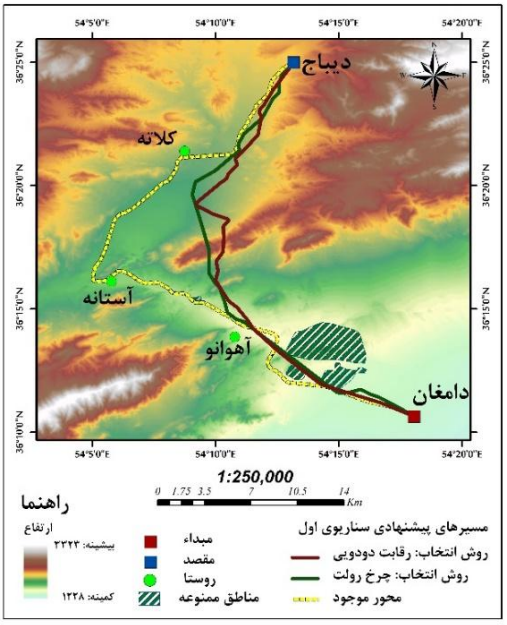
اجرای سناریوی دوم براساس اوزان پایه است. پس از اجرا مشخص شد این مسیر دارای طول۳۵/۲۸۸ کیلومتر و شیب ۱۱/۲ درصدی است که مسیر پیشنهادی در شکل (۸-ب) نمایان است.

اجرای سناریوی سوم با هدف مقایسه نتایج حاصل از دو گروه اوزان انجام می‌گیرد. در این سناریو برای اجرای مدل از اوزان اصلاحی استفاده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که مسیر پیشنهادی با استفاده از اوزان اصلاح‌شده با طولی معادل ۳۸/۴۴۴ کیلومتر است.

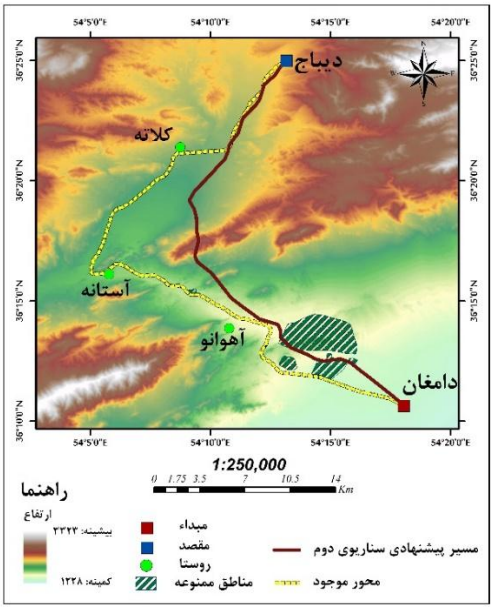
براساس شکل(۸-ج) ۷۲٪ از آن معادل ۲۷/۶۸ کیلومتر منطبق بر محور موجود منطقه است و تنها نیاز به طراحی ۱۰/۷۷۵ کیلومتر مسیر جدید الاحداث دارد. در این سناریو باتوجه به وزن بیشتر به لایه شیب به‌عنوان معیار فنی‌مهندسی مسیر پیشنهادی دارای متوسط شیب ۷/۶ درصد است که به میزان ۳/۶ درصد کمتر از مسیر حاصل از سناریوی دوم است. ویژگی‌های مسیرهای خروجی الگوریتم حاصل از سناریوهای مختلف در جدول(۷) باهم مقایسه شده‌اند.

جدول ۷: نتایج مسیریابی بهینه در سناریوهای مختلف

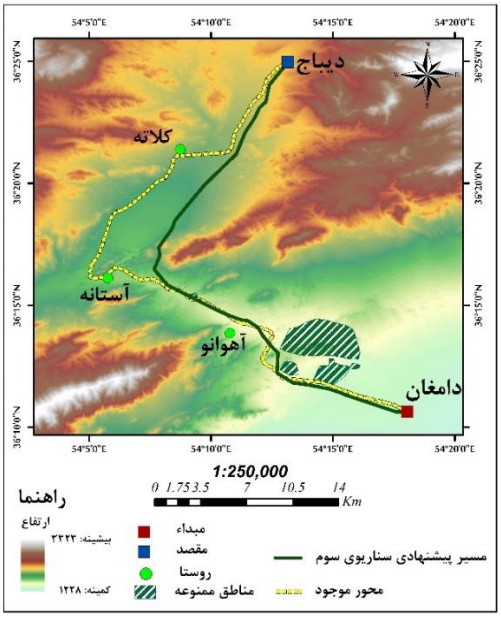
نوع مسیر		طول مسیر (کیلومتر)	شیب (٪)	عبور از مناطق ممنوعه (متر)	استفاده از مسیر موجود (کیلومتر)	عبور از رودخانه
سناریوی اول	چرخ رولت	۳۵/۶۴۴	۹/۲	۶۰۳	۱۹/۰۵۱	۲
	رقابت دودویی	۳۶/۰۴۳	۹/۹	۱۰	۱۶/۶۱۷	۲
سناریوی دوم		۳۵/۲۸۸	۱۱/۱	۱۵۰۳	۱۲/۸۷۲	۲
سناریوی سوم		۳۸/۴۴۴	۷/۶	۲۳۰	۲۷/۶۸۹	۲



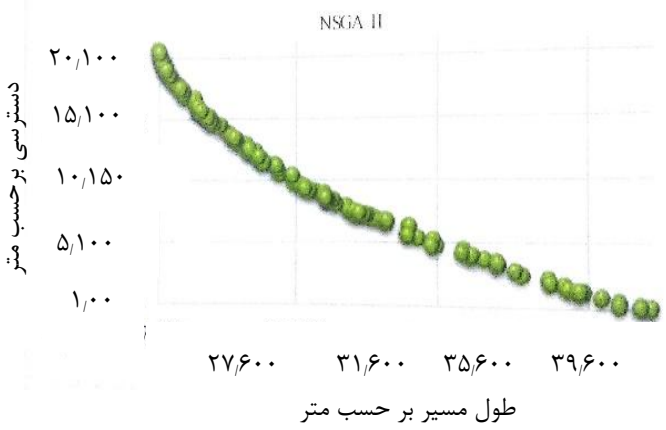
(الف)



(ب)



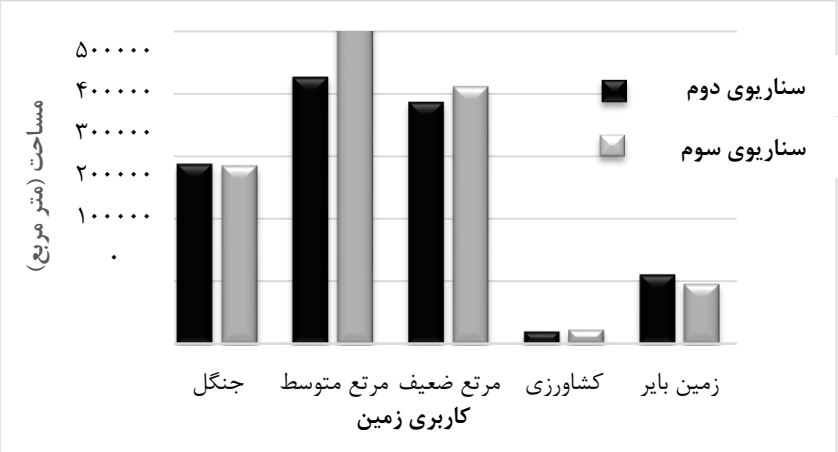
(ج)



(د)

شکل۸: مسیر خروجی الگوریتم ژنتیک بر اساس؛ الف) سناریوی اول ب) سناریوی دوم ج) سناریوی سوم

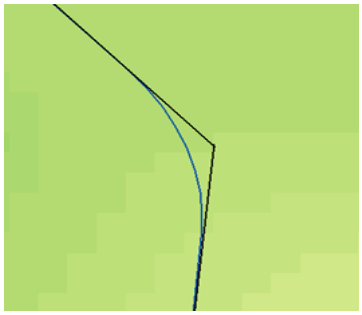
میزان عبور مسیر پیشنهادی سناریوهای دوم و سوم از کاربری‌های منطقه در شکل(۹) نشان داده شده است. همان‌طورکه در شکل(۹) نمایان است، مسیرهای پیشنهادی، از کاربری‌های ارزان‌قیمت همچون مراتع ضعیف و متوسط و زمین‌های بایر عبور کرده‌اند. دراین-بین مسیر حاصل از سناریوی سوم به دلیل افزایش سهم معیار فنی و مهندسی (افزایش سهم شیب بستر و عملیات خاکی) مسیر سعی در عبور از زمین‌های دارای پستی بلندی کمتر داشته است که این امر باعث افزایش طول مسیر شده است. این مسیر علیرغم طول بیشتر نسبت به مسیر حاصل از سناریوی دوم، از کاربری‌های مرتع ضعیف و متوسط بیشتر عبور کرده و برعکس میزان برخورد آن با زمین‌های کشاورزی و جنگل که دارای هزینه اقتصادی و زیست‌محیطی بالا هستند کمتر بوده است.



شکل۹: میزان عبور هر مسیر از کاربری‌ها

۳-۳- پیاده‌سازی قوس‌ها

پس از اجرای مدل در سطوح سه‌گانه، خروجی نهایی مسیری عملیاتی می‌باشد. اما این مسیر به دلیل شکستگی‌های (نقاط ایستگاهی) باید با اعمال قوس‌ها هموار گردد. با توجه به کلاس مسیر مطالعاتی که راه درجه ۱ است، بنابراین سرعت طرح ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت، ضریب سایش لاستیک ۰/۱۱ و میزان بربلندی ۱۱٪ می‌باشد که با جایگذاری آن در رابطه(۶)، حداقل شعاع قوس محاسبه می‌گردد (شکل(۱۰)).



شکل۱۰: نمونه قوس پیاده‌سازی‌شده

۴- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش از الگوریتم ژنتیک به صورت آرایه‌ای برداری برای مسیریابی بهینه جاده دامغان به دیباج در استان سمنان استفاده می‌کند. الگوریتم پیشنهادی دارای چهار گام آماده‌سازی داده‌ها، تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک، مسیریابی بهینه در سه سطح راه‌سازی تفصیلی، نیمه‌تفصیلی و اجرایی و ترسیم قوس‌ها براساس آئین‌نامه آشتو ۲۰۱۱ است. در این پژوهش تلاش شده تا تمام معیارهای اساسی راه‌سازی منطبق با استانداردهای روز این فرآیند در نظر گرفته شوند. این معیارها شامل طول مسیر، ملاحظات فنی-مهندسی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی و زمین-شناسی هستند. اهمیت هر یک از این معیارها و همچنین تعیین هزینه کلاس‌های مختلف لایه‌های اطلاعاتی که نماینده معیارهای مذکور هستند با نظر کارشناسان خبره راه‌سازی انجام شده است. نتیجه این تلاش‌ها با مشاهده ویژگی‌های مسیر پیشنهادی و مقایسه آن با محور موجود مشخص می‌باشد. با توجه به وابستگی عملکرد الگوریتم ژنتیک به پارامترهای ورودی در این تحقیق برای مقداردهی اولیه این پارامترها از فضایی شبیه‌سازی‌شده استفاده شد. استفاده از این رویکرد در تحقیقات قبلی نظیر حداد (۲۰۱۱) نیز توصیه شده است زیرا انجام این عمل به همگرایی سریع‌تر الگوریتم کمک می‌کند [۱]. اجرای مدل مسیریاب به‌صورت سلسله مراتبی در سه سطح راه-سازی تفصیلی، نیمه‌تفصیلی و اجرای باعث حذف محاسبات تکراری و زمان‌بر و درنهایت تولید مسیری واقعی می‌شود. در این تحقیق مدل پیشنهادی در قالب سه سناریو اجرا می‌گردد. در سناریوی اول هدف مقایسه کارایی روش‌های چرخ رولت و رقابت دودویی در فرآیند پارامتر انتخاب در الگوریتم ژنتیک بود که نتایج برتری روش چرخ رولت را نشان می‌دهد. در سناریوهای دوم معیار اقتصادی و زیست‌محیطی دارای بیشترین اهمیت است اما در سناریوی سوم ملاحظات فنی‌مهندسی ارجحیت بیشتری دارد. ارزش فاکتورها در سناریوی دوم براساس اوزان پایه بوده که توابع هدف هزینه طول مسیر، فنی‌مهندسی، هزینه‌ساخت، زیست-محیطی و اجتماعی و زمین‌شناسی است و در تمام سطوح آن از الگوریتم تک هدفه استفاده شد. این تفاوت در اوزان معیارهای راه‌سازی باعث شده است که طول مسیر سناریوی دوم بیش از ۳ کیلومتر از مسیر حاصل از سناریوی سوم کوتاه‌تر باشد که دلیل آن اهمیت بیشتر معیار اقتصادی است. اما با مقایسه ویژگی‌های شیب و میزان عبور از مناطق ممنوعه می-توان نتیجه گرفت که مسیر سناریوی سوم مسیر بهتری است. به‌علاوه ۲۷/۶۸۹ کیلومتر از این مسیر بر محور موجود منطقه منطبق است که نسبت به مسیر سناریوی دوم بیش از ۱۵ کیلومتر انطباق بیشتری با مسیر موجود دارد. این امر می‌تواند هزینه‌های عملیات خاکی، زیرسازی و تملک اراضی را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهد.

الگوریتم طراحی‌شده برای طراحی قوس‌های مسیر قادر است شعاع مناسب قوس‌های مسیر را براساس استانداردهای موجود در آئین‌نامه هندسی راه را محاسبه و به‌طور خودکار قوس موردنظر را اجرا کند. اجرای این روش خودکار می‌تواند هزینه‌های طراحی مسیر را کاهش دهد. مسیر نهایی پیشنهادشده با مسیر موجود حاکی از آن است که نه‌تنها طول مسیر پیشنهادی به میزان ۹/۱ کیلومتر معادل ۱۸ درصد از طول مسیر موجود کمتر است بلکه به میزان ۲۰ درصد کمتر از کاربری‌های پرهزینه عبور داشته است.

در این پژوهش روشی ابتکاری با رویکرد مدل‌سازی معکوس ارائه شد که اهمیت معیارهای طراحی محور موجود منطقه را استخراج می‌نماید. نتایج پیاده‌سازی نشان داد که بیشترین اهمیت به میزان ۴۶ درصد به معیار شیب اختصاص یافته است و اهمیت پایین (۱۰ درصدی) طول مسیر عامل اصلی ناپایداری بوده است. زیرا مسیری که از نظر تابع طول بهینه نباشد در درازمدت هزینه‌های سنگینی بر کاربران تحمیل خواهد کرد. یکی از ویژگی‌های برجسته روش پیشنهادی

توانایی مسیریابی خودکار است که علاوه بر پوشش تمام اهداف و نظرات تصمیم گیران، درصورتی‌که درجه اهمیت هر یک از اهداف تغییر کند مدل بدون صرف هزینه‌های اضافی، تغییرات به وجود آمده را لحاظ کرده و در کمترین زمان مسیر بهینه را پیشنهاد می‌دهد. با توجه به یافته‌های تحقیق حاضر می‌توان نتیجه گرفت که تجربه انجام مسیریابی بهینه جاده توسط الگوریتم ژنتیک بیانگر قابلیت بالای این الگوریتم در طراحی مسیر جاده به‌ویژه در حالت سه‌بعدی است.

تقدیر و تشکر:

در این قسمت باید از زحمات مهندس حقی رئیس راه-های جنوب کشور در سازمان زیرساخت های کشور و مهندس غنی‌زاده از شرکت مشاور سازیان که کمال همکاری را داشتند تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

مراجع

[1] A. Al-Hadad, "An approach to the highway alignment development process using genetic algorithm based optimization", PhD Thesis, Department of University of Nottingham, 2011.

[2] M. Sushma, and A. Maji, "Modified motion planning algorithm for horizontal highway alignment development", Journal of the Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.35, pp. 1-14, 2020.

[3] S. Monajjem, Road Construction. Tehran: Publication of university of Khaje asiraldini Tossi press, 2009 (Persian).

[4] W. Hare, S. Hossain, Y. Lucet, and F. Rahman, "Models and strategies for efficiently determining an optimal vertical alignment of roads", Journal of the Computers & Operations Research, Vol.44, pp. 161-173, 2014.

[5] N. A. Parker, "Rural highway route corridor selection", Journal of the Transportation Planning and Technology, Vol.3, pp. 247-256, 1997.

[6] C. A. O'Flaherty, Highways, American: CRC Press, 2001.

[7] M. Jha, and P. Schonfeld, "Integrating genetic algorithms and geographic information system to optimize highway alignments", Journal of the Transportation Research Board, Vol.1719(1), pp. 233-240, 2000.

[8] T. Fwa, "Highway vertical alignment analysis by dynamic programming", Journal of the Transportation Research Record, Vol.1239, pp. 1-9, 1989.

[9] T. Fwa, W. Chan, and Y. Sim, "Optimal vertical alignment analysis for highway design", Journal of Transportation Engineering, Vol.128, pp. 395-402, 2002.

[10] W. Harea, Y. Lucetb, and F. Rahman, "A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considring blocks and side-slopes", Journal of the Elsevier, Vol.241, pp. 631-641, 2014.

[11] A. Akhmet, W. Hare, and Y, Lucet, "Bi-objective optimization for road vertical alignment design' Journal of the Computers & Operations Research, Vol 143, pp. 1-20, 2022.

[12] J. F. Cheng, and Y. Lee, "Model for three-dimensional highway alignment", Journal of the Transportation Engineering, Vol.132, pp. 913-920, 2006.

[13] F. Samadzadegan, A. A. Naeini, Computational Crowding Intelligence: Fundamentals and Applications. Tehran: University of Tehran Press, 2011.

[14] M. W. Kang, M. K. Jha, and P. Schonfeld, "Applicability of highway alignment optimization models", Journal of the Transportation Research, Vol.21, pp. 257-286, 2012.

[15] Y. Shafahi, and M. Bagherian, "A customized particle swarm method to solve highway alignment optimization problem",

Journal of the Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.28, pp. 52-67, 2013 (Persian).

[16] H. Zhang, H. Pu, P. Schonfeld, T. Song, W. Li, J. Wang, X. Peng, and J. Hu, "Multi-objective railway alignment optimization considering costs and environmental impacts", Journal of the Applied Soft Computing, Vol.89, pp. 1-23, 2020.

[17] S. M. Easa, and A. Mehmood, "Optimizing design of highway horizontal alignments: new substantive safety approach", Journal of the Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.23, pp. 560-573, 2008.

[18] M. Rostami , R. Kiamehr , and R. Bayat, "A knowledge-based approach for inter-laye weighting in order to optimal route location using Geospatial Information System (GIS) (case study: Ilam-Homeil road)", Journal of the Geographical Data, Volume.24, pp. 5-19, 2015 (Persian).

[19] D. Beasley, D. R. Bull, and R. R. Martin, "An overview of genetic algorithms: Part 1, fundamentals", Journal of the University computing, Vol.15, pp. 56-69, 1993a.

[20] J. C. Jong, and P. Schonfeld, "An evolutionary model for simultaneously optimizing three- dimensional highway alignments", Journal of the Transportation Research: Methodological, Vol.37, pp. 107-128, 2003.

[21] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms +Data Structures = Evolutionary Algorithms". Berlin: Springer Press,1996.

[22] A. Salmanmahiny, S. Abedian, A. Alizadeh, and N. A. Khorasani, "Using Least Cost Pathway in road routing in Kordkuy, Bandar-e-Gaz and Galugah towns', Journal of the Geographical Planning of Spacce Quarternerly. Vol.5, pp. 81-94, 2015 (Persian).

[23] J. Eastman, Idrisi Selva Manual. American: Clark University Press, 2012.

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.11, No.1, Spring 2023

Research Paper

Path Optimization with Genetic Algorithm (Case Study: Road of Damghan to Dibaj in Semnan County)

Meysam Saljughi [1*], Mohammad Hajeb [2], Aliakbar Matkan [3]

1- Master degree, GIS & Remote sensing, Faculty of Earth Science, university of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
2- Lecturer degree, GIS & Remote sensing, Faculty of Earth Science, university of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
3- Professor degree, GIS & Remote sensing, Faculty of Earth Science, university of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

Abstract

The existence of a proper road network is one of the factors of economical growth and sustainable development. Traditional routing methods are time-consuming and costly. In addition, the horizontal and vertical components of the route are taken into consideration separately. Since 1970, efforts have been made to automate routing optimization. The Genetic Algorithm is a heuristic method that is used for solving different optimization problems. This research uses the genetic algorithm for path optimization. This algorithm takes both horizontal and vertical dimensions into consideration simultaneously. Chromosomes are defined as a vector array of station points. The suggested method was implemented for the route of Damghan to Dibaj. At first this research explores the importance of the objective functions of the existing route by using an innovative method with an inverse modeling approach. The results show that the share of the length factor is only 10%, so the low degree of the importance of the path length function imposes a lot of cost on the path users, and as a result, it is the main factor of the instability of the existing path. In order to improve the performance, the algorithm parameters were tuned on a simulation region before the final implementation. The objective functions are: route length, technical and engineering, economical, geological and environmental principles. In the final implementation, the algorithm specifies a corridor for the path at the level of the detailed routing. Then in semi-detailed level, the best paths in this corridor will be found. At the end, the optimal alignment is determined at the executive level. Finally the circular arches were implemented automatically based on the Policy and Geometric Design of Highways. By comparing the proposed alignment with the existing road, it shows a reduction in the length of the road by 9.1 km (%18), and 20% less passing than high-cost landuses. The present study shows the high ability of the genetic algorithm in path optimization.

Key words: *Path Optimization, Heuristic, Genetic Algorithm, Recursive modeling, Damghan-Dibaj road.*

Correspondence Address*: Shahid Beheshti University, Shahid Shahriari Square, Evin, Tehran, Iran.*
Tel*: +98 9139568796.*
Email*: M_saljughi@yahoo.com*