نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴
Vol.13, No.3, Autumn 2025
۱۱۷ -۱۴۰
مقاله پژوهشی

مسیریابی بهینه خطوط انتقال برق با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (*GIS*) و الگوریتم هوش مصنوعی **RRT*: مطالعه موردی شهرستان مسجد سلیمان

فاطمه غزلی زاده [۱]، مصطفی کابلی زاده [۲*]، سید ساجدین موسوی [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و *GIS*، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲- دانشیار گروه سنجش از دور و *GIS* ، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز
۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

چکیده

طراحی بهینه مسیر خطوط انتقال برق، با هدف کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری و افزایش پایداری در برابر مخاطرات طبیعی، اهمیت قابل توجهی دارد. شهرستان مسجدسلیمان با توجه به تراکم رخداد زمین‌لرزه، پتانسیل زمین‌لغزش و شدت فرونشست زمین، یکی از مناطق پرریسک برای احداث شبکه‌های انتقال برق محسوب می‌شود. در این پژوهش، رویکردی ترکیبی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (*GIS*) و الگوریتم هوش مصنوعی **RRT* برای مسیریابی بهینه توسعه داده شد. به منظور ارزیابی مخاطرات، یک لایه مکانی تلفیقی ایجاد گردید که شامل سه شاخص کلیدی (تراکم رخداد زلزله، شدت فرونشست زمین و پتانسیل زمین‌لغزش) می‌باشد که در این لایه شاخص‌ها با وزن مساوی ترکیب شدند تا لایه مخاطرات طبیعی نهایی را تشکیل دهند. خطوط انتقال برق موجود با این لایه همپوشانی داده شدند و مسیرهای پرریسک شناسایی گردیدند. مسیرهای شماره صفر و هفت بیش از ۸۰ درصد طول خود را در نواحی پرخطر طی می‌کردند، بنابراین برای مسیریابی مجدد با الگوریتم *RRT* انتخاب شدند. نتایج نشان داد مسیرهای پیشنهادی الگوریتم به‌طور قابل توجهی از نواحی پرخطر اجتناب کرده و توزیع یکنواخت‌تری از کلاس‌های خطر را ارائه می‌دهند. به طور نمونه میانگین و انحراف معیار هزینه در مسیر موجود (شماره صفر) به ترتیب ۰۷/۱۴۴۷۹ و ۷۹/۱۲۷۱۳ بوده که در مسیر جدید به ۰۷/۶۲۱۶ و ۱۰۵۳۶/۶۵ کاهش یافت. همچنین در مسیر موجود (شماره هفت)، این مقادیر از ۱۸۱۲۴/۵۱ و ۱۴۴۷۴/۲۷ به ۱۱۵۴۸/۲۳و ۱۲۵۳۰/۵۸ کاهش یافت. این نتایج نشان‌دهنده کاهش سطح کلی خطر و افزایش پایداری مسیرهای جدید نسبت به مسیرهای موجود است. در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که ترکیب *GIS* و الگوریتم **RRT* می‌تواند ابزاری مؤثر برای طراحی مسیرهای پایدارتر و اقتصادی‌تر در مناطق دارای مخاطرات طبیعی بالا باشد و رویکردی کاربردی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های انتقال برق در شرایط مشابه ارائه نماید.

کلیدواژه‌ها : الگوریتم **RRT*، مسیریابی، خطوط انتقال برق، *GIS*.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: اهواز، بلوار گلستان، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین، گروه سنجش از دور و *GIS*.
تلفن: ۰۶۱۳۳۳۳۹۳۳۸

Email: m.kabolizade@scu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

۱- مقدمه

صنعت برق یکی از زیرساخت‌های اساسی در توسعه اقتصادی و اجتماعی جوامع است. انتقال بهینه و مطمئن جریان برق از نیروگاه‌ها به مراکز مصرف، مستلزم طراحی شبکه‌های انتقالی است که علاوه بر رعایت استانداردهای فنی، هزینه‌های ساخت و نگهداری را به حداقل برساند و کمترین آسیب را به محیط‌زیست وارد کند [۱]. در این راستا، مسیریابی خطوط انتقال برق یکی از چالش‌های مهم این صنعت محسوب می‌شود. عواملی مانند توپوگرافی زمین، کاربری اراضی، مناطق حفاظت‌شده، محدودیت‌های قانونی، هزینه‌های عملیاتی و تأثیرات زیست‌محیطی در تعیین مسیر بهینه نقش دارند. علاوه بر این، وقوع حوادث طبیعی و تأثیرات اقلیمی می‌تواند موجب اختلال در شبکه انتقال شده و هزینه‌های جبران خسارات را افزایش دهد. ازاین‌رو، یافتن مسیرهای بهینه که تمامی این محدودیت‌ها را در نظر بگیرد، امری ضروری است[۲]. روش‌های سنتی مسیریابی عمدتاً زمان‌بر، پرهزینه و ناکارآمد بوده و در بسیاری از موارد تمامی عوامل مؤثر را به‌طور جامع در نظر نمی‌گیرند. ازاین‌رو، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی[۱] *(GIS)* به‌عنوان ابزاری قدرتمند در اخذ، پردازش، نمایش و تحلیل داده‌های مکانی، نقش مهمی در بهینه‌سازی این فرآیند ایفا می‌کند[۳]. سیستم اطلاعات جغرافیایی امکان ترکیب لایه‌های مختلف اطلاعاتی را فراهم کرده و با ارائه یک محیط یکپارچه، امکان تصمیم‌گیری بهتر را به مهندسان و طراحان شبکه‌های انتقال برق می‌دهد[۴].

از سوی دیگر، استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی همچون الگوریتم ژنتیک، کلونی مورچگان، یادگیری ماشین و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، امکان حل مسائل پیچیده مسیریابی را با دقت و سرعت بالا فراهم می‌کند [۲]. مطالعات متعددی در زمینه بهینه‌سازی مسیریابی خطوط انتقال برق انجام شده است که هرکدام از روش‌های مختلفی برای حل این مسئله بهره برده‌اند. در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی مسیر خطوط انتقال برق با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و سیستم‌های اطلاعات مکانی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در همین راستا، رستگار و همکاران (۱۳۹۴) با به‌کارگیری الگوریتم تکاملی چندهدفه[۲] *(NSGA-II)*، مسیریابی خطوط انتقال بین دو پست ۴۰۰ کیلوولت در استان مازندران را بررسی کردند. آن‌ها سه تابع هدف شامل حداقل هزینه اقتصادی، کمترین اثرات زیست‌محیطی و سهولت دسترسی و نگهداری را مد نظر قرار داده و نتایج نشان داد که مسیر پیشنهادی به طور میانگین بهبودی ۱۵ درصدی نسبت به مسیر موجود داشته است[۳]. در ادامه این روند، صالحی وزیری و همکاران (۱۳۹۸) با ترکیب منطق فازی و مدل سلسله‌مراتبی[۳] *(AHP)* در مسیریابی خط انتقال برق در منطقه محمودآباد، ابتدا مناطق مناسب نصب دکل را با استفاده از منطق فازی شناسایی کرده و سپس با استفاده از تابع هزینه حرکت[۴] در هر سلول مسیر بهینه را تعیین کردند[۴]. یافته‌های این پژوهش نیز حاکی از آن بود که مدل فازی گاما، نسبت به سایر روش‌ها عملکرد مطلوب‌تری دارد. در حوزه الگوریتم‌های فراابتکاری، پمرتین و همکاران (۲۰۲۰) از الگوریتم کلونی مورچگان برای بهینه‌سازی مسیریابی بهره گرفتند و نشان دادند که اصلاح این الگوریتم می‌تواند در انتخاب مسیرهایی با کمترین طول و حداقل تعداد خم مؤثر باشد. رعایت الزامات فنی و ایمنی در زوایای خم‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته و نتایج مؤید کارایی این رویکرد بود[۵]. همچنین، چاکراورتی و همکاران (۲۰۲۰) با تمرکز بر انتخاب مکان بهینه پست‌های برق و مسیریابی خطوط

[1] *Geographic Information System*

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

[3] *Analytic Hierarchy Process*

[4] *Cost Path*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

توزیع، از تحلیل جریان بار و مدل‌های برنامه‌ریزی عددی بهره بردند. این پژوهش با هدف بهبود تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت داده‌ها طراحی شده بود[۶]. گن کالوز و همکاران (۲۰۲۱) با معرفی الگوریتم درختان تصادفی بهبود یافته[1](*RRT) به‌عنوان رویکردی نوین، نشان دادند که می‌توان از تشابه میان مسئله مسیریابی خطوط انتقال و برنامه‌ریزی حرکت ربات‌ها بهره‌برداری کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که روش پیشنهادی برای سناریوهای با پیچیدگی متوسط، عملکرد مناسبی دارد[۷]. همچنین، ایاضی و همکاران (۲۰۲۱) الگوریتم جستجوی کلاغ دیفرانسیل[2](*CSAdif*) را به منظور بهینه‌سازی مسیر فیدرها به‌کار گرفتند و عملکرد آن را در مقایسه با الگوریتم‌های الگوریتم جستجوی کلاغ (*CSA*)[3] و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (*PSO*)[4] بررسی کردند. نتایج حاکی از برتری *CSAdif* در کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری بود[۸]. در همین راستا، بوسیوس و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی مکان‌یابی بهینه پست‌های برق و توسعه شبکه توزیع پرداختند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و نمودار ورنوی نشان دادند که می‌توان هزینه‌های مربوط به فیدرها، تلفات انرژی و وقفه‌های خدماتی را کاهش داد[۹]. در ادامه، کن و همکاران (۲۰۲۳) با ترکیب *GIS* و الگوریتم ژنتیک، روشی برای بهینه‌سازی مسیریابی خطوط انتقال ارائه دادند که نه‌تنها دقت و سرعت حل مسئله را افزایش می‌دهد، بلکه میزان تداخل انسانی را نیز به حداقل می‌رساند[۱۰]. همچنین نان و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از الگوریتم دایکسترا بهبود یافته و بر پایه شبکه تطبیقی با وضوح متغیر (*ARG*) جهت برنامه‌ریزی خطوط انتقال پرداختند. این روش با کاهش تعداد شبکه‌های تکراری، بهبود جست‌وجوی دوطرفه و اصلاح نقاط شکست، سرعت اجرا را افزایش داده و هزینه و تعداد خم‌های مسیر را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که این الگوریتم نسبت به روش‌های مرجع، هم در زمان اجرا و هم در صرفه‌جویی هزینه عملکرد بهتری دارد[۱۱].

همچنین در جدیدترین مطالعات این حوزه، جونگ و همکاران (۲۰۲۴) رویکردی ترکیبی متشکل از پایگاه داده‌های جغرافیایی، مسئله فروشنده دوره‌گرد فازی (*FTSP*)[5] و برنامه‌نویسی اعداد صحیح باینری پیشنهاد دادند. هدف آن‌ها ادغام منابع انرژی‌های تجدیدپذیر با طراحی مسیر خطوط انتقال برق بود که گامی نوین در راستای توسعه پایدار در زیرساخت‌های انتقال انرژی به‌شمار می‌رود[۱۲]. همچنین کو و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی دو الگوریتم ای‌ستار(*A*) و الگوریتم درختان تصادفی(*RRT*)[6]را برای مسیریابی خطوط انتقال برق مقایسه کردند. نتایج نشان داد که اگرچه هر دو الگوریتم قادر به ارائه مسیرهای بهینه هستند، اما الگوریتم *RRT* به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر و کارایی بالاتر، برای کاربردهای عملی در طراحی شبکه‌های انتقال مناسب‌تر ارزیابی شد. این پژوهش مرجعی برای توسعه روش‌های هوشمند در انتخاب مسیر خطوط انتقال به شمار می‌رود[۱۳]. و وانگ و همکاران (۲۰۲۴) در یک پژوهش، رویکردی ترکیبی از تحلیل سلسله‌مراتبی با عدد فازی مثلثی و الگوریتم کلونی مورچگان بهبود یافته (*ACO*) برای مسیریابی خطوط انتقال ارائه دادند. این روش با وزن‌دهی دقیق به عوامل جغرافیایی و به‌کارگیری سازوکارهای هدایت، کاهش بُعد و اجتناب، توانست زمان برنامه‌ریزی را کاهش داده و کارایی مسیریابی را بهبود دهد. نتایج مطالعه موردی در استان گویژو نشان داد که مدل پیشنهادی نسبت به *ACO* سنتی عملکرد بهتری دارد[۱۴]. در پژوهشی

[1] *Rapidly-exploring Random Trees Star*
[2] *Crow Search Algorithm with Differential operator*
[3] *Crow Search Algorithm*
[4] *Particle Swarm Optimization*
[5] *Fuzzy Traveling Salesman Problem*
[6] *Rapidly-exploring Random Trees*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

دیگر، یانگ و همکاران (۲۰۲۴) به طراحی چیدمان دسته‌سیم‌های چندشاخه‌ای در صنعت هوافضا به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در فضای سه‌بعدی پرداختند. در این مطالعه، ترکیب الگوریتم *A* وکلونی مورچگان *(A*-ACO)* برای جلوگیری از ایجاد حلقه‌های سیم و کاهش هزینه کلی چیدمان کابل به‌کار گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این روش توانسته است هزینه‌های مرتبط با طول، خمیدگی و دسته‌بندی کابل را به‌طور چشمگیری کاهش دهد[۱۵].

هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل جامع و کارآمد برای مسیریابی بهینه خطوط انتقال برق با بهره‌گیری از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم بهینه‌سازی درخت‌های تصادفی بهبود یافته است. تمرکز این مطالعه بر منطقه مسجدسلیمان قرار دارد؛ منطقه‌ای که به دلیل ویژگی‌های خاص توپوگرافی و وجود محدودیت‌های محیطی و مخاطرات طبیعی نظیر فرونشست زمین، خطر زلزله و زمین‌لغزش، با چالش‌های جدی در طراحی و اجرای مسیر خطوط انتقال مواجه است.

۲- مواد و روش‌ها:

در این بخش، ابتدا منطقه موردمطالعه معرفی شده و سپس روش تحقیق و داده‌های مورد استفاده تشریح می‌شود.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه:

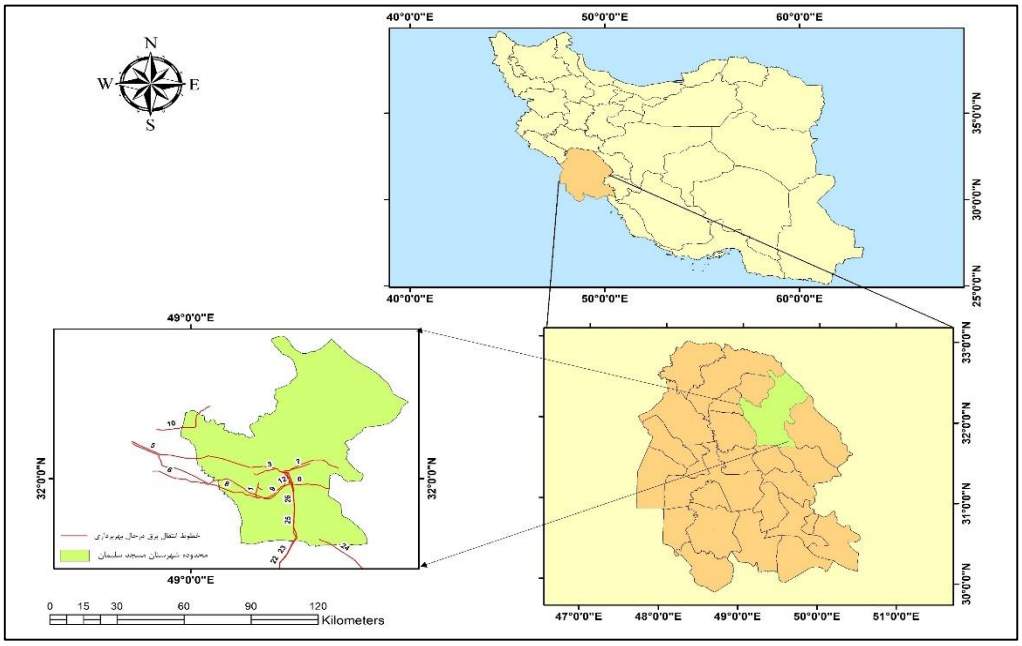
شهرستان مسجدسلیمان یکی از شهرستان‌های مهم و راهبردی استان خوزستان در جنوب‌غربی ایران است که به عنوان یکی از نخستین مناطق صنعتی و نفت‌خیز کشور شناخته می‌شود. این شهرستان به دلیل برخورداری از منابع غنی نفت، از دیرباز نقش بسزایی در اقتصاد ملی ایفا کرده و همچنان یکی از مراکز اصلی صنعت نفت کشور به شمار می‌آید. از جمله ویژگی‌های بارز شهرستان مسجدسلیمان، موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی پیچیده آن است که در طراحی و مسیریابی خطوط انتقال برق، چالش‌های فنی و مهندسی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند. این شهرستان در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی قرار دارد[۱۶]. موقعیت کوهستانی و وجود ارتفاعات و دره‌های متعدد، به‌ویژه در مناطقی با اقلیم گرم و خشک، از جمله عواملی است که شرایط ویژه‌ای را برای نصب دکل‌ها و اجرای شبکه‌های انتقال برق به‌وجود می‌آورد. همچنین، تابستان‌های بسیار گرم، وقوع سیلاب‌های فصلی و پدیده‌های ناپایدار جوی، لزوم توجه مضاعف به ملاحظات فنی و زیست‌محیطی را در فرآیند طراحی خطوط انتقال برق ایجاب می‌کند. از دیگر مخاطرات طبیعی تأثیرگذار در منطقه، زمین‌لغزش است.

مطالعات زمین‌شناسی نشان داده‌اند که دامنه‌های شرقی و شمال‌شرقی شهرستان دارای پتانسیل بالایی برای وقوع لغزش‌های زمین هستند. این پدیده عمدتاً به دلیل وجود سازندهای مارنی و آهکی با مقاومت کم و حساس به رطوبت، شکل می‌گیرد که پایداری شیب‌ها را کاهش می‌دهند [۱۷]. افزون بر این، شهرستان مسجدسلیمان در کمربند چین‌خورده زاگرس واقع شده و به‌عنوان یکی از مناطق با لرزه‌خیزی بالا در کشور محسوب می‌شود. وجود گسل‌های فعال مانند گسل مسجدسلیمان، گسل لهبری و گسل دزفول، سابقه وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد و بعضاً شدید را در این منطقه به‌دنبال داشته است. به‌عنوان نمونه، زمین‌لرزه‌ای به بزرگی ۵٫۶ ریشتر در تاریخ ۲۵ سپتامبر ۲۰۰۲ در شمال‌شرقی این شهرستان رخ داد که خساراتی به همراه داشت [۱۸]. پدیده فرونشست نیز از دیگر مخاطرات ژئوتکنیکی مهم منطقه به‌شمار می‌رود. بر اساس مطالعات انجام‌شده، در زمستان سال ۱۹۹۹ بارش‌های جوی نسبتاً شدیدی در محدوده سد مسجدسلیمان گزارش شده است. با توجه به اینکه پوسته سد به روش خشک کوبیده شده و تراکم آن با رطوبت اندک انجام شده بود، این بارش‌ها منجر به نشست و فروریزش در بخش پایین‌دست پوسته سد گردیده است [۱۹]. با توجه به اهمیت اقتصادی، صنعتی و انرژی‌بر شهرستان مسجدسلیمان، طراحی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

شبکه‌های انتقال برق ایمن، پایدار و بهینه در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. تأمین انرژی پایدار برای صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مستقر در منطقه، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق در زمینه مسیریابی خطوط انتقال و لحاظ کردن تمامی عوامل محیطی و زمین‌شناسی است.

از این رو، مسیریابی اصولی و علمی خطوط انتقال برق در شهرستان مسجدسلیمان، نقشی کلیدی در توسعه زیرساخت‌های انرژی و دستیابی به توسعه پایدار در منطقه ایفا می‌کند. شکل(۱) موقعیت جغرافیایی این شهرستان را به نمایش می‌گذارد.



شکل۱: منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش تحقیق:

در این تحقیق با هدف بهینه‌سازی مسیر خطوط انتقال برق و کاهش ریسک‌های ژئوفیزیکی، روش تحقیق در چهار گام اصلی طراحی شده است:

۱) آماده‌سازی لایه مخاطرات طبیعی: در این مرحله، با استفاده از داده‌های مکانی و زمین‌شناختی، لایه مخاطرات طبیعی مبتنی بر سه عامل کلیدی تراکم رخداد زلزله، زمین لغزش و فرونشست زمین تهیه می‌شود. داده‌های مربوط به این سه عامل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی تجزیه و تحلیل شد. در این پژوهش وزن هر یک از لایه‌ها برابر با ۰/۳۳ در نظر گرفته شد و بر این اساس، لایه مخاطرات طبیعی از ترکیب این سه عامل ایجاد گردید. طبق این لایه مناطق با خطر بالا شامل تراکم بالای رخداد زلزله، نواحی با پتانسیل بالای زمین لغزش و مناطقی با فرونشست شدید که احتمال آسیب به خطوط انتقال برق بیشتر است می‌باشد.

۲) تحلیل خطوط انتقال برق درحال بهربرداری: خطوط انتقال برق موجود در منطقه مطالعه، با لایه مخاطرات طبیعی هم‌پوشانی داده می‌شوند تا میزان هم‌پوشانی مسیرهای موجود با نواحی پرخطر مشخص شود. در این مرحله خطوطی که بخش عمده‌ای از مسیر خود را در نواحی با خطر بالا طی می‌کنند، به‌عنوان مسیرهای پرخطر(ناپایدار) شناسایی می‌شوند.

۳) مسیریابی مجدد با الگوریتم *RRT* : برای خطوط پرخطر، از الگوریتم *RRT** جهت یافتن مسیر بهینه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

جدید استفاده می‌شود. این الگوریتم، که یکی از روش‌های قدرتمند در برنامه‌ریزی مسیر در فضاهای پیچیده است، مسیر جایگزینی پیشنهاد می‌دهد که ضمن رعایت محدودیت‌ها و ملاحظات فنی، کمترین عبور از نواحی پرخطر را داشته باشد.

۴) مقایسه مسیر جدید با مسیر موجود: مسیر پیشنهادی توسط الگوریتم *RRT* با مسیر موجود مقایسه می‌شود. این مقایسه براساس معیارهایی مانند طول مسیر، میزان بهبود مسیر (براساس حضور در کلاس‌های کم خطر) و مقدار میانگین و انحراف معیار هزینه مسیر انجام می‌شود. نتایج این تحلیل به تصمیم‌گیری در مورد امکان اصلاح مسیرهای فعلی کمک می‌کند.

۲-۳- گردآوری و آماده سازی داده

در پژوهش حاضر، با هدف انجام تحلیل مکانی جامع و مسیریابی بهینه خطوط انتقال نیروی الکتریکی، از مجموعه‌ای از داده‌های مکانی بنیادین بهره گرفته شد. این داده‌ها، که هر یک جنبه‌های کلیدی مرتبط با زیرساخت‌های موجود و مخاطرات طبیعی منطقه مطالعاتی را پوشش می‌دهند، عبارتند از:

۲-۳-۱- داده‌های خطوط انتقال برق در حال بهره‌برداری

این مجموعه داده، که به صورت لایه‌های برداری چندخطی[1] از اداره برق منطقه‌ای استان خوزستان تهیه شده، پیکربندی و موقعیت جغرافیایی دقیق شبکه انتقال و فوق توزیع نیروی الکتریکی در حال بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این لایه، که ولتاژ خطوط آن معمولاً بسیار بالاست و وظیفه رساندن برق از نیروگاه به محدوده مصرف را بر عهده دارد، مبنای ضروری برای تحلیل وضعیت فعلی و شناسایی مسیرهای نیازمند بهینه‌سازی در شبکه فراهم می‌آورد.

۲-۳-۲- لایه فرونشست زمین

این لایه اطلاعاتی با بهره‌گیری از تکنیک پیشرفته تداخل‌سنجی راداری (*InSAR*)[2] تهیه گردیده است. داده‌های حاصل از *InSAR* با دقت بالا در شناسایی تغییرات جزئی ارتفاعی سطح زمین، امکان استخراج الگوی دقیق مناطق مستعد یا درگیر با پدیده فرونشست زمین را فراهم می‌سازند. در این پژوهش، به‌منظور محاسبه نرخ فرونشست در محدوده شهرستان مسجدسلیمان، از تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا۲۰۲۴ بهره گرفته شد.پردازش داده‌ها و اجرای فرآیند تداخل‌سنجی در محیط نرم‌افزار تخصصی *SNAP* صورت گرفت. لایه نهایی، با نمایش پهنه‌های ناپایدار از منظر تغییرات ارتفاعی، به عنوان یکی از ورودی‌های کلیدی در تحلیل ریسک و مسیریابی بهینه خطوط انتقال نیرو مورد استفاده قرار گرفت [۲۰].

در شکل (۲)، نقشه فرونشست شهرستان مسجدسلیمان مشاهده می‌شود که مقادیر منفی نمایش داده شده در این نقشه، بیانگر نرخ فرونشست سالانه (بر حسب میلی‌متر) است.

۲-۳-۳- لایه تراکم رخداد زلزله

این لایه با رویکردی مبتنی بر ارزیابی خطر لرزه‌ای و از طریق تحلیل جامع سوابق زمین‌لرزه‌های تاریخی منطقه، تهیه شده است. فرآیند آماده‌سازی آن شامل تلفیق نقشه‌های گسل‌های فعال که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده‌اند با داده‌های لرزه‌خیزی ثبت‌شده در گذشته بوده است.

به منظور تعیین نواحی با پتانسیل لرزه‌ای بالا، از ابزار *Line Density* در محیط نرم‌افزار *ArcGIS* بهره گرفته شد تا تراکم خطوط گسل در سطح منطقه مطالعه به‌دقت محاسبه گردد[۲۱]. شکل (۳) نقشه لایه تراکم رخداد زلزله را به نمایش می‌گذارد و طبق این

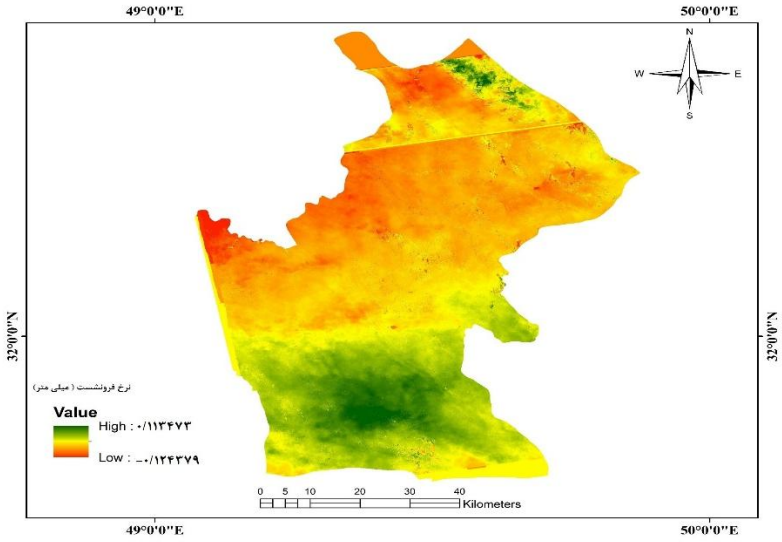
[1] *Polyline*

[2] *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

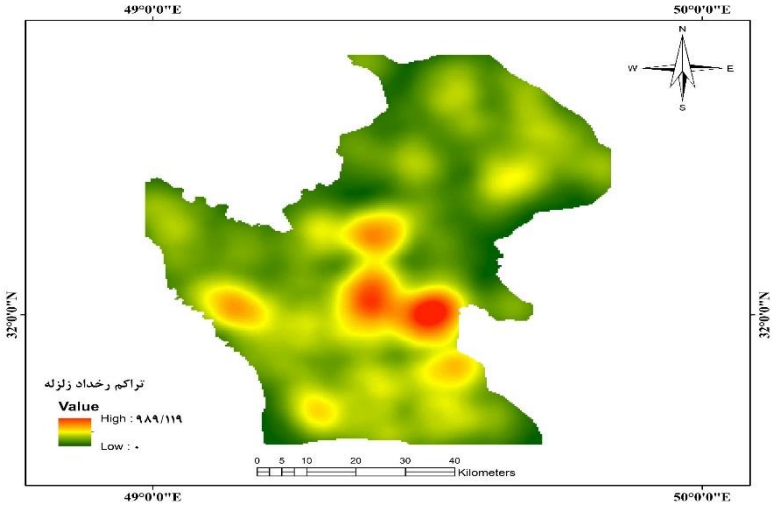
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

لایه مناطقی که دارای تراکم بالای رخداد زلزله و خطوط گسلی هستند، به دلیل احتمال بالاتر وقوع زمین‌لرزه‌های آتی و در نتیجه، افزایش ریسک آسیب به زیرساخت‌های حیاتی نظیر خطوط انتقال برق، به عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند.



شکل۲: لایه فرونشست



شکل۳: لایه تراکم رخداد زلزله

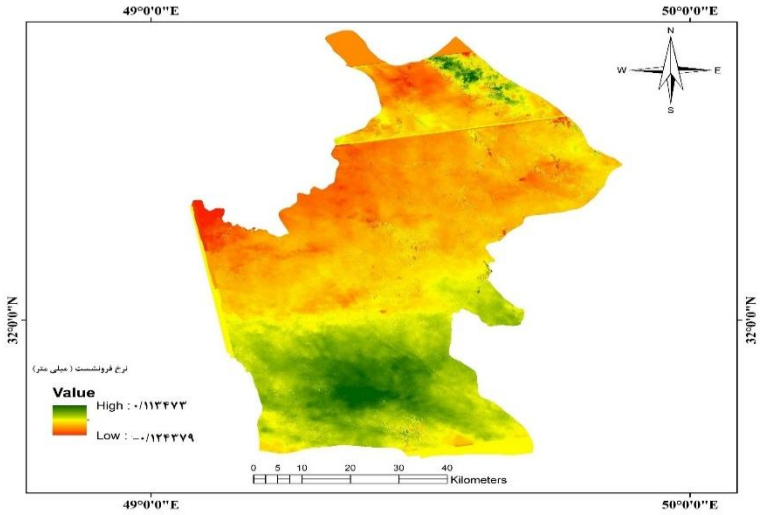
۲-۳-۴- زمین لغزش

جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، ده شاخص مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی (سنگ‌شناسی)، کاربری اراضی، شاخص توان آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، میزان بارش، فاصله از رودخانه و شاخص حمل رسوب مورد استفاده قرار گرفت [۱۷]. سپس در مرحله نخست، کلیه لایه‌های اطلاعاتی مذکور با استفاده از توابع فازی در محیط نرم‌افزاری *ArcGIS* استانداردسازی شدند. همچنین به منظور تعیین وزن و اهمیت نسبی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

هر شاخص در فرآیند پهنه بندی خطر زمین‌لغزش، روش تحلیل سلسله مراتبی (*AHP*) به کار گرفته شد و از طریق طراحی و توزیع پرسشنامه در میان خبرگان و متخصصان مرتبط، داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری گردید. در ادامه، با وزن‌دهی به شاخص‌ها و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی بر اساس وزن‌های محاسبه شده، نقشه نهایی خطر زمین‌لغزش تولید و تحلیل شد. شکل(۴) نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و زمین‌لغزش‌های رخ داده در شهرستان مسجدسلیمان را به نمایش می‌گذارد.



شکل۴: زمین لغزش

۲-۳-۵- لایه مخاطرات طبیعی

همچنین جهت مدل‌سازی مخاطرات طبیعی موجود در منطقه، یک لایه خطر مکانی *C(x,y)* که بیانگر میزان مخاطرات طبیعی و میزان عبور خطوط انتقال از نواحی پرخطر است به‌صورت رستر تهیه شد. این لایه با ترکیب سه شاخص کلیدی تراکم رخداد زلزله(*G*)، شدت فرونشست زمین(*S*)، پتانسیل زمین لغزش (*L*) به‌دست آمد (رابطه۵). در گام نخست، مقادیر هر یک از شاخص‌ها به پنج کلاس طبقه‌بندی شد. این طبقه‌بندی براساس ویژگی‌های آماری هر لایه و به‌گونه‌ای صورت گرفت که مقادیر بالاتر در لایه‌های زلزله و زمین‌لغزش نشان‌دهنده ریسک بیشتر و مقادیر پایین‌تر (منفی) در لایه فرونشست نمایانگر شدت بالاتر فرونشست تلقی گردید. سپس هر یک از لایه‌های استانداردشده، با استفاده از تابع عضویت خطی[1]، در بازه‌ی [صفر، ۱] فازی‌سازی شدند. در این فرآیند، مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده نواحی با خطر بالاتر و مقادیر نزدیک به صفر معرف نواحی کم‌خطر بودند. استفاده از تابع عضویت خطی به‌دلیل سادگی، قابلیت تفسیر آسان و هماهنگی مناسب با ماهیت داده‌ها انتخاب شد.

در گام نهایی، لایه‌های فازی‌شده با استفاده از روش میانگین وزنی و با وزن مساوی (۰/۳۳) برای هر شاخص تلفیق شدند.

دلیل انتخاب وزن یکسان، نبود تفاوت معنادار در اهمیت نسبی شاخص‌ها از دیدگاه کارشناسی و همچنین هدف تحقیق مبنی بر در نظر گرفتن تأثیر هم‌ارز هر سه عامل در ناپایداری خطوط انتقال برق می‌باشد. در نتیجه، مدل نهایی لایه مخاطرات طبیعی

[1] *Linear Membership Function*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

به صورت رابطه(۱) تعریف شده است:

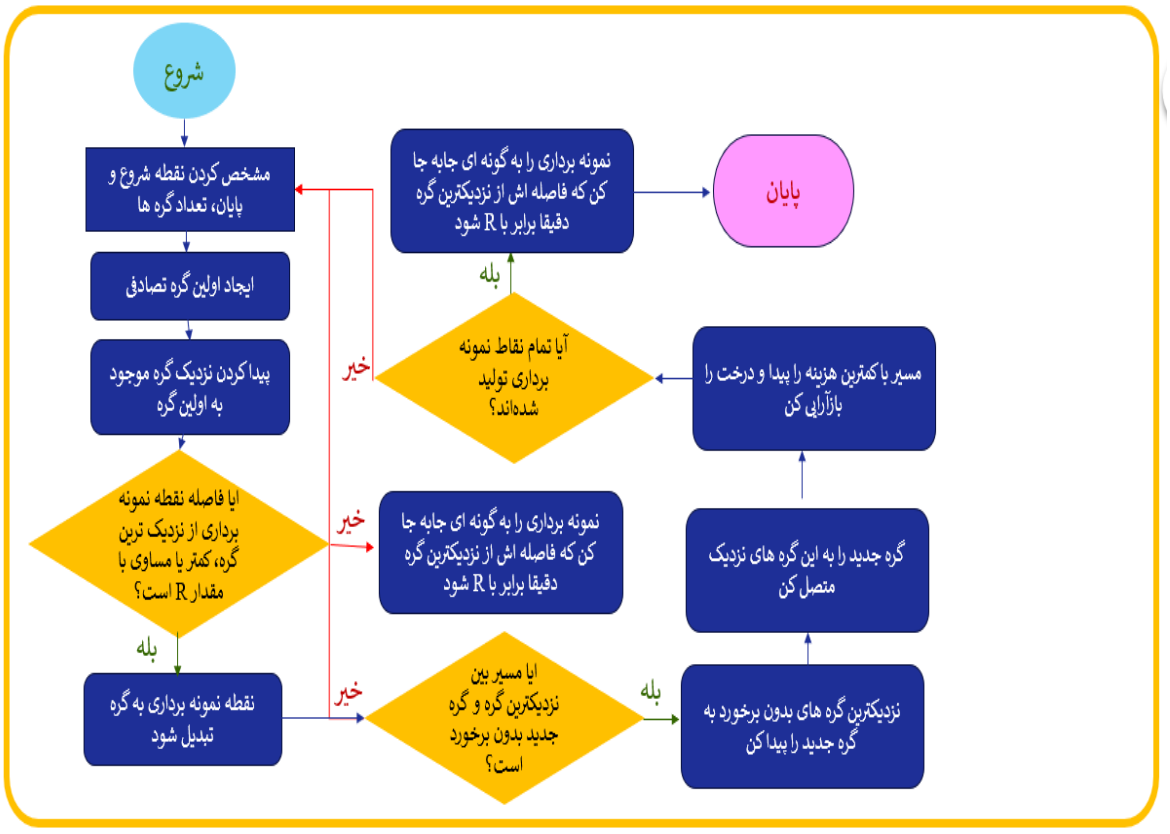
رابطه(۱)

$$C(x,y)=0.33\cdot G(x,y)+0.33\cdot S(x,y)+0.33\cdot L(x,y)$$

تلفیق داده‌ها در محیط نرم‌افزار *ArcGIS* انجام گرفت و خروجی نهایی به‌صورت تصویر رستری وارد متلب شد.

۲-۴- الگوریتم درختان تصادفی بهبود یافته:

الگوریتم درختان تصادفی بهبود یافته *RRT** یک الگوریتم پیشرفته در حوزه برنامه‌ریزی مسیر (*Path Planning*) است که برای یافتن مسیر بهینه در فضاهای دارای موانع و هزینه‌های متغیر به کار می‌رود. این الگوریتم، نسخه بهبود یافته الگوریتم پایه *RRT* است که از نظر نظری، به سمت مسیر بهینه همگرا (*asymptotic optimality*) می‌شود [۷].*RRT** یک الگوریتم نمونه‌برداری افزایشی است که از نمونه‌برداری تصادفی در فضای جستجو، ابتدا مسیر اولیه را سریع پیدا کرده و سپس با افزایش تعداد نمونه‌ها، مسیر را بهینه می‌کند[۲۲]. شکل(۵) فلوچارت مراحل اجرای این الگوریتم را به نمایش می‌گذارد.



شکل۵: فلوچارت الگوریتم *RRT*

همچنین فرآیند اجرای این الگوریتم به تفصیل شامل مراحل زیر است:

۱) ایجاد درخت اولیه:

$T \leftarrow \text{InitializeTree}();$

یک درخت اولیه خالی(T) ایجاد می‌شود که این درخت شامل دو مجموعه است:

V: مجموعه گره‌ها (*Nodes*)

E: مجموعه یال‌ها (*Edges*) که گره‌ها را به هم متصل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

می‌کند.

۲) افزودن گره ابتدایی (شروع):

$T \leftarrow \text{InsertNode}(\varnothing , Z_{init}, T);$

گره اولیه Z_{init} به عنوان ریشه به درخت (T) اضافه می‌شود.

Z_{init} نقطه شروع حرکت.

۳) حلقه اصلی الگوریتم:

$\text{for i} = 0 \text{ to i} = N \text{ do}$

یک حلقه اجرا می‌شود که تعدادN نمونه تولید می‌کند و هر نمونه نشان‌دهنده یک مرحله از گسترش درخت است.

۴) نمونه‌برداری تصادفی:

$Z_{rand} \leftarrow \text{Sample(i)};$

در این مرحله یک نمونه تصادفی Z_{rand} در فضای جستجو X_{free} تولید می‌شود. این نقطه می‌تواند هر نقطه‌ای در فضای آزاد باشد (نه در منطقه موانع).

۵) یافتن نزدیک‌ترین گره:

$Z_{nearest} \leftarrow \text{Nearest}(T, Z_{rand});$

نزدیک‌ترین گره موجود در درخت T به Z_{rand} پیدا می‌شود. تابع $Nearest$ با استفاده از یک معیار فاصله (معمولاً فاصله اقلیدسی) عمل می‌کند که طبق رابطه(۲) محاسبه می شود.

رابطه(۲)

$$\sqrt{(y_{rand} - y_z)^2 + (x_{rand} - x_z)^2} = \|Z_{rand} - Z\|$$

در رابطه(۲) تمام گره هایی که قبلا در درخت Z اضافه شدند، بررسی شده و فاصله هرکدام تا Z_{rand} محاسبه می‌شود. گره‌ای که کمترین فاصله را نسبت به Z_{rand} دارد به عنوان $Z_{nearest}$ انتخاب می شود.

۶) حرکت به سمت نقطه نمونه‌برداری شده با گام ثابت یا محدود:

$(X_{new}, U_{new}, T_{new}) \leftarrow \text{Steer}(Z_{nearest}, Z_{rand});$

در اینجا مسیر بین $Z_{nearest}$ و Z_{rand} بررسی می‌شود اگر فاصلهU_{new} که ورودی کنترلی موردنیاز برای حرکت به سمت X_{new} است بسیار بزرگ باشد، نقطه X_{new} در امتداد این مسیر اما نزدیک‌تر به $Z_{nearest}$ انتخاب می‌شود و T_{new} وضعیت جدید درخت بعد از انتخاب نقطه X_{new} است.

۷) بررسی برخورد با موانع:

$\text{if IsPathOk } (X_{new}) \text{ then}$

بررسی می‌کند که آیا مسیر بین $Z_{nearest}$ و X_{new} برخوردی با موانع دارد یا خیر. اگر مسیر در منطقه آزاد باشد، به گام بعدی می‌رود. در واقع این تابع به این صورت عمل می‌کندکه آیا مسیر بین دو نقطه، یعنی از گره Z_1 تا گره Z_2 مجاز و معتبر هست یا نه. منظور از مسیر معتبر، مسیری است که از مناطق ممنوعه عبور نکند و هزینه عبور از آن در حد قابل قبول باشد. اگر برای تمام نقاط روی مسیر بین Z_1 وZ_2 ، مقدار هزینه $C(x,y)$ کمتر از یک آستانه به طور مثال C_{thresh} تعریف‌شده باشد، مسیر معتبر است و خروجی تابع درست $(True)$ است[۲۳]. در غیر این‌صورت، تابع مقدار نادرست $(False)$ برمی‌گرداند و مسیر رد می‌شود (رابطه(۳)).

۸) یافتن گره‌های نزدیک:

$Z_{near} \leftarrow \text{Near}(T, Z_{new}, |V|);$

گره‌های نزدیک به Z_{new} در درختT شناسایی می‌شوند که این کار را تابع $Near$ با استفاده از معیاری مانند شعاع r و محاسبه فاصله گره‌های نزدیک طبق رابطه(۴) انجام می‌دهد.

۹) انتخاب والد بهینه:

$Z_{min} \leftarrow \text{Chooseparent}(Z_{near}, Z_{nearest}, Z_{new}, X_{new});$

والد Z_{min} برای گره جدید Z_{new} انتخاب می‌شود و والد باید گره‌ای از Z_{near} باشد که کمترین هزینه مسیر را به Z_{new} دارا باشد.

۱۰) درج گره جدید:

$T \leftarrow \text{InsertNode}(Z_{min}, Z_{new}, T);$

گره جدید Z_{new} به درخت T اضافه می‌شود و به والد Z_{min}متصل می‌شود که هزینه Z_{new} شامل هزینه والد به علاوه هزینه مسیر بین آن‌هاست.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

۱۱) بازسازی درخت:

$T \leftarrow \text{Rewire}(T, Z_{near}, Z_{min}, Z_{new});$

در این مرحله درخت با تابع *Rewire* بازسازی می‌شود این تابع طبق رابطه (۵) بررسی می‌کند که آیا گره جدیدی که به درخت اضافه شده می‌تواند مسیرهای اطرافش را بهینه کند یا نه. به طور مثال اگر گره Z_i قبلا از یک مسیر به درخت متصل شده است ولی حال با اضافه شدنZ_{new} مسیر کم هزینه‌تر باشد، تابع *Rewire* والد گره Z_i را تغییر می‌دهد وآن را به جای والد قبلی از طریق Z_{new} به درخت متصل می‌کند. این فرایند باعث کاهش هزینه مسیر درخت می‌شود [۷].

این تابع مهم‌ترین تفاوت بین الگوریتم *RRT* و *RRT** است. در الگوریتم*RRT* مسیرها فقط ساخته می‌شوند اما در *RRT** مسیرها بعد از مسیریابی، مجدداً بهینه می‌شوند [۲۳].

۱۲) به روزرسانی مسیر:

return T

درخت T به‌روزرسانی‌شده و شامل مسیرهای بهینه برمی‌گردد. این درخت شامل همه گره‌ها و یال‌های اضافه‌شده طی حلقه است.

۱۳) هزینه مسیر:

جهت مدلسازی هزینه مسیر دو عامل در نظر گرفته شد:

الف) لایه مخاطرات طبیعی

ب) فاصله مکانی بین نقاط مسیر

فرض کنید مسیر شامل مجموعه از پیکسل‌ها یا گره‌ها ($i=1,2,...,N$) باشد. برای هر گره، کلاس خطربه صورت $C_i \in \{1.2.3.4.5\}$ تعیین شد و هزینه متناظر به صورت رابطه(۶) تعریف گردید.

رابطه(۳)
$$\text{IsPathOk}(Z_1, Z_2) = \begin{cases} \text{Path } (Z_1 \rightarrow Z_2), & C(x,y) < C_{thresh} \in (x,y) \quad \text{True} \\ \text{false} \quad \text{درغ یرای ذصور ت} \end{cases}$$

رابطه(۴)
$$\left\{ Z_i \in T \mid \left\| Z_i - Z_{new} \right\| \le r \right\} = X_{near}$$

رابطه(۵)
$$\text{Cost}(Z_i), \quad \text{then} \quad \text{update} \quad \text{parent} > \text{CostPath}(Z_{new}, Z_i) + \text{If} \quad \text{Cost}(Z_{new})$$

رابطه(۶)
$$\text{cost}(C_i) = \begin{cases} C_i = 1 & ,1 \\ C_i = 2 & ,2 \\ C_i = 3 & ,5 \\ C_i = 4 & ,15 \\ C_i = 5 & ,60 \end{cases}$$

همچنین فاصله فضایی بین نقاط ابتدا و انتهای مسیر(q_1 و q_2) با استفاده از فاصله اقلیدسی طبق رابطه (۷) محاسبه شد:

رابطه(۷)
$$\sqrt{d_{spatial} = (q_{x2} - q_{x1})^2 + (q_{y2} - q_{y1})^2}$$

در نهایت، هزینه کل مسیر(D) طبق رابطه(۸) تعریف گردید.

رابطه(۸)
$$D = d_{spatial} + \sum_{i=1}^{N} \text{cost}(C_i)$$

برای پیاده‌سازی این الگوریتم محیط متلب۲۰۱۴ استفاده شد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

۳- بحث و نتایج

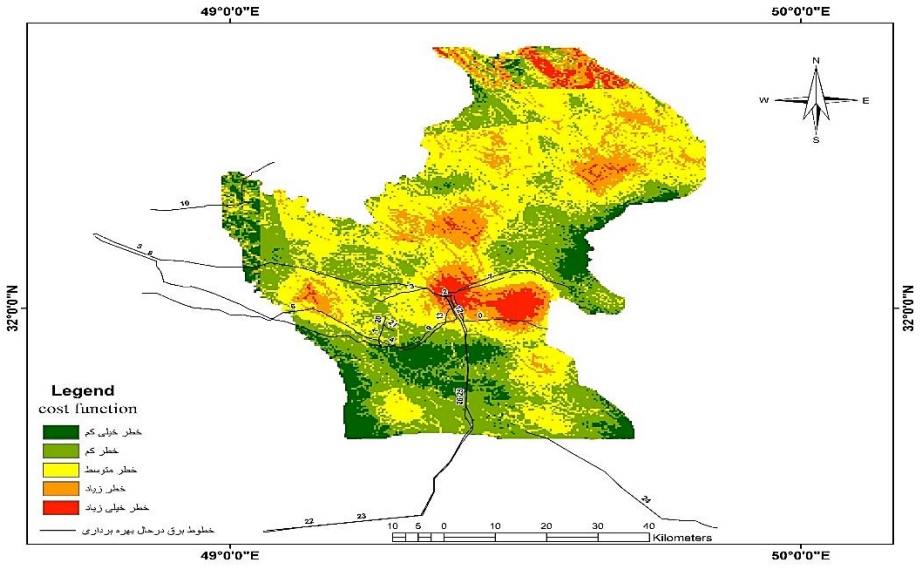
در این بخش، یافته‌های حاصل از تحلیل مکانی و پیاده‌سازی الگوریتم *RRT بـرای مسیریابی بهینه خطوط انتقال برق در منطقه مورد مطالعه ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. مراحل تحلیل شامل تولید لایه مخاطرات طبیعی، تحلیل مسیرهای موجود، انتخاب مسیرهای پرخطر جهت مسیریابی مجدد و ارزیابی نتایج حاصل از اجرای الگوریتم است.

۳-۱- تولید و تحلیل لایه مخاطرات طبیعی

لایه مخاطرات طبیعی به‌عنوان ورودی اصلی الگوریتم، بر پایه سه شاخص کلیدی تراکم رخداد زلزله، شدت فرونشست زمین و پتانسیل زمین‌لغزش تهیه شد. این سه لایه در محیط *ArcGIS* با استفاده از ابزار *Raster Calculator* تلفیق شدند و برای یکنواخت‌سازی اثر هر معیار، وزن مساوی ۰/۳۳ به آن‌ها اختصاص یافت. در نهایت، لایه نهایی به صورت رستر پیوسته تولید شد که مقادیر آن میزان تأثیرپذیری مناطق از مخاطرات طبیعی (زلزله، فرونشست و زمین‌لغزش) را نشان می‌دهد. به‌منظور ساده‌سازی تحلیل و شناسایی نواحی پرخطر، مقادیر این لایه با استفاده از تابع عضویت خطی و بازه‌بندی به پنج کلاس تفکیک شد که شامل: خطر خیلی کم (کلاس ۱)، خطر کم (کلاس ۲)، خطر متوسط (کلاس ۳)، خطر زیاد (کلاس ۴) و خطر خیلی زیاد (کلاس ۵) طبقه‌بندی گردید (شکل(۶)). سپس لایه خطوط انتقال برق درحال بهره‌برداری در شهرستان مسجدسلیمان با لایه مخاطرات طبیعی همپوشانی داده شد(جدول(۱) و (۲)). در این مرحله، طول هر خط انتقال در هر یک از کلاس‌های خطر (بر حسب کیلومتر) محاسبه گردید. همچنین برای تعیین درصد طول خطوط در کلاس‌های پرخطر، از رابطه (۹) استفاده شد.

رابطه(۹)

$$\frac{L_{class4}+L_{class5}}{L_m}\times 100$$



شکل۶: لایه مخاطرات طبیعی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

جدول۱: هم‌پوشانی لایه مخاطرات طبیعی با خطوط انتقال برق درحال بهره‌برداری

شماره خط	طول در کلاس۱	طول در کلاس۲	طول در خطر کلاس۳	طول در کلاس۴	طول در کلاس۵	طول مسیر (km)	درصد طول خطوط در کلاس‌های پرخطر
۰	۰	۰	۲٫۱۲	۸٫۵۲	۱۰٫۶۶	۲۱٫۳۳	%۸۹٫۹۲
۱	۰٫۸۶	۳٫۳۶	۱٫۷۹	۰	۰	۶٫۰۱	%۰
۲	۰	۰	۰	۰	۰٫۵۳	۰٫۵۳	%۱۰۰
۳	۰	۰٫۷۹	۷٫۲۵	۲٫۴۶	۳٫۱	۱۳٫۵۹	%۴۰٫۹۱
۴	۲٫۳۹	۱٫۹۸	۱٫۰۷	۰	۰	۵٫۴۳	%۰
۵	۰٫۱۵	۱۴٫۷۶	۱۰٫۴۵	۴٫۱۳	۴٫۳۷	۶۳٫۷۴	%۱۳٫۳۴
۶	۰	۴٫۹۶	۵٫۷۵	۷٫۲۹	۱٫۳۶	۴۵٫۳۵	%۱۴٫۱۳
۷	۰	۰	۲٫۳۶	۲٫۸۱	۸٫۰۹	۱۳٫۲۶	%۸۲٫۲۰
۸	۳٫۸۳	۱۰٫۹۳	۱٫۲۷	۰٫۲	۰	۵۸٫۲۲	%۰٫۳۴
۹	۶٫۳	۵٫۴۸	۲٫۵۱	۰	۰	۱۴٫۲۹	%۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰٫۵۳	۰٫۵۳	%۱۰۰
۱۲	۰٫۸۵	۴٫۱	۳٫۵۸	۳٫۶۴	۲٫۵۱	۱۴٫۶۸	%۴۱٫۸۹
۱۳	۰	۰	۰	۱٫۶	۱٫۶۵	۳٫۲۵	%۱۰۰
۱۴	۰	۰	۰٫۴۰	۰٫۰۴	۰	۰٫۴۴	%۹٫۰۹
۱۵	۰	۰	۰٫۴	۰٫۰۵	۰	۰٫۴۵	%۱۱٫۱۱
۱۶	۰	۰	۰	۰	۰٫۵۸	۰٫۵۸	%۱۰۰
۱۷	۰	۰	۰	۰	۳٫۴۲	۳٫۴۲	%۱۰۰
۱۸	۰	۰	۰	۰	۰٫۵۷	۰٫۵۷	%۱۰۰
۱۹	۰	۰	۰	۰	۰٫۹۱	۰٫۹۱	%۱۰۰
۲۰	۰	۰٫۷۲	۱٫۹۳	۰	۰	۲٫۱۱	%۰
۲۱	۰	۲٫۵۲	۰	۰	۰	۲٫۵۲	%۰
۲۴	۰	۳٫۸۶	۰٫۷۶	۰	۰	۴۲٫۰۱	%۰
۲۵	۷٫۵۸	۲۰٫۳	۱۲٫۴۴	۶٫۳۸	۱۱٫۵۸	۶۰٫۷	%۲۹٫۵۸
۲۶	۷٫۵۵	۱۷٫۸۷	۳٫۳۱	۱٫۲	۵٫۴۸	۳۵٫۵	%۶٫۶۸

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

جدول۲: هم‌پوشانی لایه مخاطرات طبیعی با نقاط شروع و پایان خطوط انتقال برق درحال بهره‌برداری

شماره خط	نقطه شروع	نقطه پایان
۰	کلاس۳	کلاس۵
۱	کلاس۱	کلاس۲
۲	کلاس۴	کلاس۵
۳	کلاس۴	کلاس۲
۴	کلاس۳	کلاس۱
۵	کلاس۵	خارج از محدوده شهرستان مسجدسلیمان
۶	خارج از محدوده شهرستان مسجدسلیمان	کلاس۳
۷	کلاس۴	کلاس۳
۸	کلاس۱	خارج از محدوده شهرستان مسجدسلیمان
۹	کلاس۵	کلاس۳
۱۱	کلاس۴	کلاس۵
۱۲	کلاس۱	کلاس۴
۱۳	کلاس۴	کلاس۳
۱۴	کلاس۳	کلاس۳
۱۵	کلاس۳	کلاس۳
۱۶	کلاس۴	کلاس۴
۱۷	کلاس۴	کلاس۵
۱۸	کلاس۴	کلاس۴
۱۹	کلاس۵	کلاس۵
۲۰	کلاس۲	کلاس۲
۲۱	کلاس۲	کلاس۲
۲۴	خارج از محدوده شهرستان مسجدسلیمان	کلاس۴
۲۵	کلاس۲	کلاس۱
۲۶	کلاس۲	کلاس۵

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

مطابق جدول (۱)، مسیرهای خطوط انتقال برق درحال بهره برداری به ۵ دسته تقسیم شدند. که شامل:

۱) مسیرهای بسیار ایمن: مسیرهایی که حداکثر ۲۰ درصد از طول آن‌ها در کلاس‌های پرخطر قرار دارد (۰ تا ۲۰ درصد).

۲) مسیرهای ایمن: مسیرهایی که بین ۲۰ تا ۴۰ درصد از طول آن‌ها در محدوده پرخطر واقع شده است.

۳) مسیرهای با ایمنی متوسط: مسیرهایی که ۴۰ تا ۶۰ درصد از طول آن‌ها در محدوده پرخطر قرار دارد.

۴) مسیرهای با ایمنی کم: مسیرهایی که بین ۶۰ تا ۸۰ درصد از طول آن‌ها در محدوده پرخطر واقع شده است.

۵) مسیرهای ناپایدار: مسیرهایی که بیش از ۸۰ درصد طول آن‌ها در کلاس‌های پرخطر قرار دارد (۸۰ تا ۱۰۰ درصد)

طبق این دسته‌بندی مسیرهای ۱،۴،۵،۶،۸،۹،۱۴،۱۵،۲۰،۲۱،۲۴،۲۶ در دسته مسیرهای بسیار ایمن، مسیر۲۵ در دسته مسیرهای ایمن، مسیرهای ۳ و ۱۲ در دسته مسیرهای با ایمنی متوسط و مسیر های ۰،۲،۷،۱۳،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹ در دسته مسیرهای ناپایدار قرار دارند. اما از بین مسیرهای ناپایدار مسیرهایی وجود دارند که طبق لایه خطر بطور ۱۰۰ درصدی در محدوده خطرزیاد و بسیار زیاد قرار دارند و مسیریابی مجدد این مسیرها با الگوریتم *RRT نتیجه مطلوبی نخواهد داشت؛ زیرا نقطه شروع و هدف آنها در محدوده خطر واقع است و الگوریتم مسیر بهینه را طبق نقطه شروع و هدف مسیر موجود پیدا می‌کند. در نتیجه از بین مسیر های ناپایدار فقط مسیر های با شماره صفر و ۷ که بطور ۱۰۰ درصدی در محدوده پرخطر قرار ندارند برای مسیریابی مجدد با الگوریتم*RRT انتخاب گردیدند تا مسیر جایگزین با حداقل عبور از نواحی پرخطر و پایدار پیشنهاد شود.

۳-۲- الگوریتم *RRT:

جهت پیاده‌سازی الگوریتم *RRT، ابتدا با تنظیم پارامترهای مدل، اقدام به مسیریابی خواهد شد و در ادامه نیز مسیر پیشنهادی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. مراحل این کار در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲-۱- تنظیمات الگوریتم و پیاده‌سازی در محیط متلب:

همانطور که بیان شد، گام اول، پیاده‌سازی الگوریتم است که در ادامه تشریح خواهد شد.

۱) داده‌های ورودی:

جهت تعریف فضای مسئله، ابتدا مرز محدوده مطالعه و سپس مختصات نقاط مبدأ و مقصد به‌صورت شیپ‌فایل بارگذاری شد و به‌عنوان محدوده مجازِگسترش درخت جستجو در الگوریتم در نظر گرفته گردید. علاوه بر این، یک لایه مخاطرات طبیعی در قالب رستر مورد استفاده قرار گرفت. این لایه شامل اطلاعات مربوط به خطرهای زلزله، زمین‌لغزش و فرونشست زمین است و به‌عنوان داده ورودی برای الگوریتم به کار گرفته شد.

۲) پارامترهای الگوریتم:

الگوریتم *RRT به عنوان یک الگوریتم نمونه‌برداری افزایشی، نیازمند تعیین پارامترهایی کلیدی برای کنترل دقت، کارایی و سرعت همگرایی به مسیر بهینه است. در این پژوهش، پارامترهای الگوریتم با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه به شرح زیر انتخاب گردید:

الف) تعداد نقاط نمونه‌برداری[1]: تعداد نقاط تصادفی تولیدشده برابر با ۶۰۰۰۰ نقطه در نظر گرفته شد. این مقدار با توجه به وسعت جغرافیایی منطقه انتخاب گردید. افزایش تعداد نقاط به یافتن مسیرهایی با دقت بالاتر کمک می‌کند، اما هزینه محاسباتی را نیز افزایش می‌دهد.

ب) اندازه گام حرکتی[2]: گام حرکتی به عنوان فاصله مجاز بین دو گره متوالی در گسترش درخت در نظر

[1] *Sample Points*

[2] *Step Size*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

گرفته می‌شود. در این پژوهش مقدار گام حرکتی برابر با ۳۰۰ متر تنظیم شد. انتخاب این مقدار با هدف ایجاد تعادل بین جزئی‌نگری در فضای جستجو و جلوگیری از افزایش شدید حجم محاسبات انجام شد. گام‌های بسیار کوچک منجر به افزایش بی‌رویه زمان اجرا می‌شود، در حالی‌که گام‌های بسیار بزرگ ممکن است منجر به عبور نادقیق از موانع یا نقاط پرخطر شود.

ج) شعاع جستجوی همسایگی[1]: این پارامتر تعیین‌کننده شعاعی است که در آن، الگوریتم نزدیک‌ترین گره به گره جدید را شناسایی کرده و به‌منظور گره والد انتخاب و جهت بازسازی مسیر مورد استفاده قرار می‌دهد. در این پژوهش، شعاع ۴۵۰ متری در نظر گرفته شد که متناسب با تراکم نودها و ابعاد منطقه می‌باشد، همچنین امکان ارزیابی گره‌های مجاور در حد لزوم فراهم کرده و مانع از ایجاد خوشه‌های محلی غیر بهینه می‌شود.

د) شعاع بازسازی درخت[2]: بازسازی مسیر در اطراف گره جدید با هدف بهبود ساختار درخت و کاهش هزینه کل مسیر انجام می‌شود. شعاع ۱۰ متری برای این مرحله انتخاب شد. این مقدار کوچک در نظر گرفته شد تا بازسازی فقط در ناحیه‌ای محدود و حول گره‌های بسیار نزدیک صورت گیرد، که از بازنویسی بیش‌ازحد درخت و افزایش هزینه محاسبات جلوگیری می‌کند.

۳) ارزیابی مسیر پیشنهادی

به‌منظور ارزیابی و مقایسه مسیر پیشنهادی با مسیر موجود، چند شاخص کلیدی مورد بررسی قرار گرفت:

- **توزیع کلاس خطر:** مسیرها با لایه مخاطرات طبیعی همپوشانی داده شدند و درصد حضور هر مسیر در کلاس‌های مختلف خطر محاسبه گردید. این شاخص نشان می‌دهد که چه بخشی از مسیر در نواحی پرخطر قرار دارد و مبنایی برای سنجش پایداری مسیر است.
- **میانگین هزینه:** میانگین مقادیر هزینه برای کل مسیر محاسبه شد تا شاخصی از سطح کلی خطر در طول مسیر به دست آید. مسیرهایی که میانگین پایین‌تری دارند، به‌طور کلی از ایمنی بیشتری برخوردار هستند.
- **انحراف معیار هزینه:** این شاخص بیانگر میزان پراکندگی و تغییرپذیری خطر در طول مسیر است. انحراف معیار پایین‌تر نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر و نبود تغییرات ناگهانی در میزان خطر می‌باشد. چنین مسیری از منظر پایداری برای خطوط انتقال برق مناسب‌تر تلقی می‌شود.
- **طول مسیر:** اگرچه مسیر پیشنهادی ممکن است طولانی‌تر از مسیر موجود باشد، اما در طراحی خطوط انتقال برق، پایداری و ایمنی مسیر اهمیت بیشتری از کوتاهی طول دارد. عبور از مناطق پرخطر، حتی در طول‌های کوتاه، می‌تواند منجر به خسارت‌های سنگین شود.

بر این اساس، ارزیابی مسیرها نه تنها بر مبنای طول بلکه با توجه به پایداری و سطح مخاطره انجام شد تا مسیرهای پایدارتر و ایمن‌تر نسبت به وضعیت موجود شناسایی شوند..

۳-۳- نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم:

این بخش به ارائه و تحلیل نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم *RRT* در راستای بهینه‌سازی مسیر خطوط انتقال برق می‌پردازد. تحلیل‌ها بر پایه لایه مخاطرات طبیعی استوار بوده که نشان‌دهنده مجموعه‌ای از خطرها شامل زلزله، زمین‌لغزش و فرونشست است و مسیرهای کاندید بر اساس ریسک ناشی از این خطرها ارزیابی شدند.

در همین راستا مسیر شماره صفر و شماره هفت به دلیل اینکه تقریبا ۸۰ درصد این مسیرها در محدوده پرخطر قرار دارند مجدد با الگوریتم *RRT* مسیریابی شدند. هدف از این کار ارائه مسیرهای جایگزین با سطح خطر کمتر و پایداری بالاتر می‌باشد. شکل(۷) نمودار میله‌ای حاصل از مقایسه طول مسیر موجود و

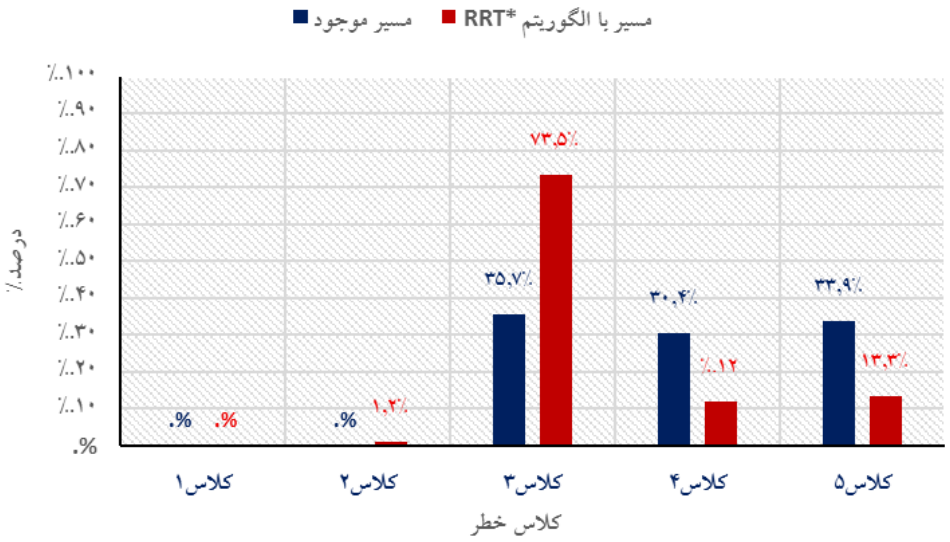
[1] *Neighborhood Radius*

[2] *Rewire Radius*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

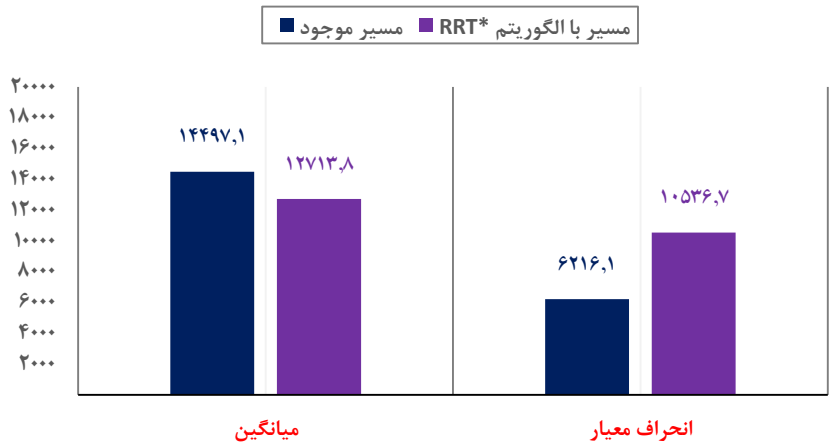
مسیر بهینه شده با الگوریتم درکلاس های خطر می باشد. این نمودار نشان می‌دهد که مسیر انتقال برق موجود بخش قابل توجهی از طول خود را در کلاس‌های پرخطر (۴ و ۵) سپری می‌کند، در حالی که مسیر جدید به دست آمده با الگوریتم *RRT به طور چشمگیری طول مسیر در این کلاس‌ها را کاهش داده و در عوض طول بیشتری را در کلاس خطر متوسط (۳) (۷۳/۵ درصد) طی می‌کند. این تغییر نشان می‌دهد که الگوریتم *RRT موفق به یافتن مسیری شده است که بیشتر در مناطق با خطر متوسط قرار دارد و از مناطق پرخطر اجتناب می‌کند، که می‌تواند منجر به ایجاد مسیری پایدارتر نسبت به مسیر موجود کند و باعث کاهش هزینه‌ها و مشکلات اجرایی در نگهداری خط انتقال شود.



شکل۷: مقایسه توزیع کلاس خطر بین مسیر موجود و مسیر بهینه شده با الگوریتم *RRT (مسیر شماره صفر)

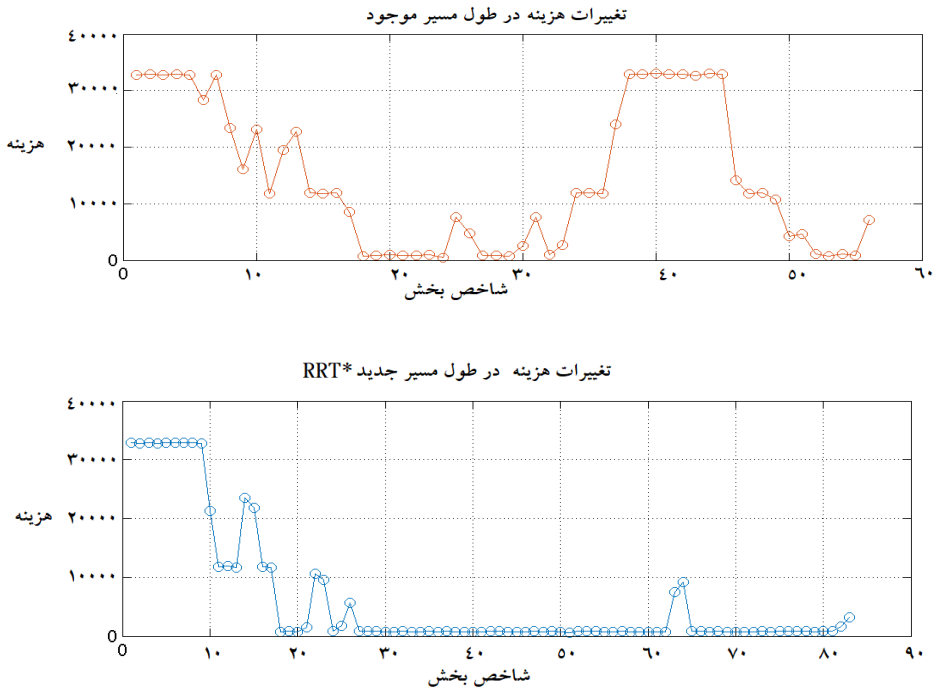
شکل (۸) به مقایسه میانگین و انحراف معیار هزینه‌ی مسیرها می‌پردازد. میانگین هزینه مسیر به عنوان شاخصی برای نمایش سطح کلی ریسک ناشی از مخاطرات طبیعی در طول مسیر عمل می‌کند؛ در این مقایسه، مسیر پیشنهادی حاصل از الگوریتم *RRT دارای میانگین کمتری است، که این امر مؤید پایداری بالاتر و اجتناب مؤثرتر از قرارگیری در نواحی پرخطر است. علاوه بر این، انحراف معیار هزینه که میزان پراکندگی و نوسان ریسک در طول مسیر را مشخص می‌سازد، برای مسیر جدید به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر است. این ویژگی نشان می‌دهد که مسیر بهینه‌سازی شده، توزیع ریسک یکنواخت‌تر و همگن‌تری را ارائه می‌دهد. این کاهش در نوسان ریسک، به نوبه خود، می‌تواند به تقلیل احتمال خرابی‌های ناگهانی ناشی از مخاطرات طبیعی و همچنین کاهش هزینه‌های آتی نگهداری و عملیات خطوط انتقال برق کارآمد باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]



شکل۸: میانگین و انحراف معیار مسیر موجود و مسیر بهینه شده با الگوریتم*RRT (مسیر شماره صفر)

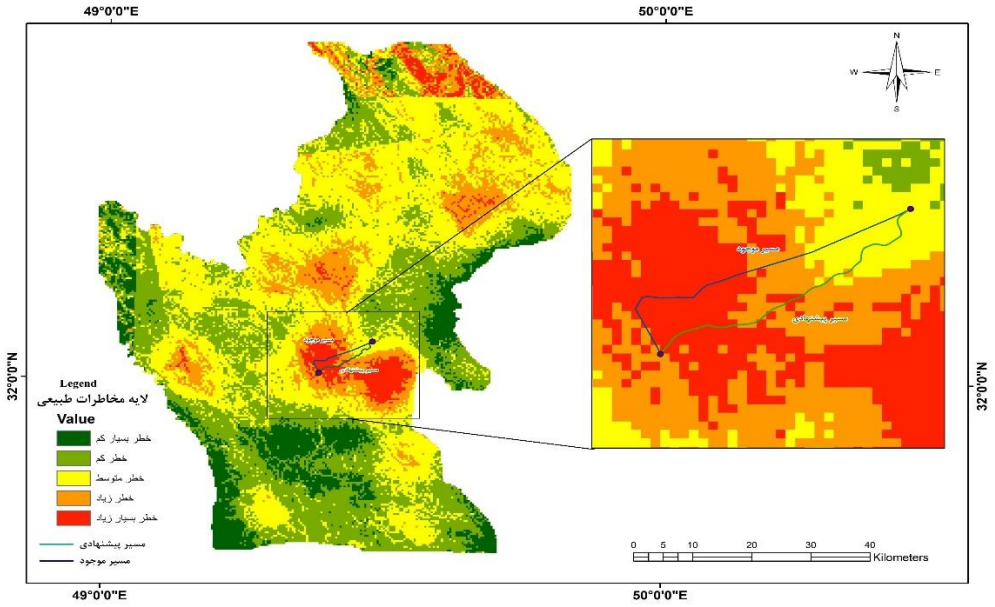
در شکل(۹) که تغییرات هزینه در طول قطعات مختلف مسیرها را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که مسیر جدید به دست آمده با الگوریتم *RRT در مقایسه با مسیر موجود، به طور قابل توجهی بهبود یافته است؛ نه تنها میانگین هزینه کلی آن به مراتب کمتر است، بلکه توزیع هزینه در طول مسیر نیز یکنواخت‌تر شده و از نوسانات شدید هزینه که در مسیر موجود دیده می‌شود، اجتناب کرده است. این امر به معنای عبور بیشتر طول مسیر بهینه شده از مناطق با هزینه پایین و کاهش قابل توجه حضور در مناطق پرهزینه است، این امر باعث افزایش پایداری مسیر نسبت به مخاطرات طبیعی و کاهش احتمال خرابی و هزینه‌های ساخت و نگهداری می‌شود.



شکل۹: تغییرات هزینه در طول قطعات مختلف مسیر موجود و مسیر بهینه شده با الگوریتم*RRT (مسیر شماره صفر)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

شکل(۱۰) موقعیت مسیر موجود و مسیر پیشنهادی را نسبت به لایه مخاطرات طبیعی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر جدید توانسته از نواحی با کلاس‌های خطر بالا اجتناب کند و عمدتاً در کلاس‌های کم‌خطر قرار گیرد. این تغییر باعث افزایش طول مسیر شده است (مسیر موجود۲۱٫۳۳ کیلومتر، مسیر جدید ۲۲٫۶۷کیلومتر). با این حال، همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، پایداری مسیر نسبت به طول مسیر از اهمیت بیشتری برخوددار است، زیرا هزینه نگهداری و بازسازی خطوط انتقال برق معمولاً بیشتر از هزینه ساخت اولیه آن‌ها است.

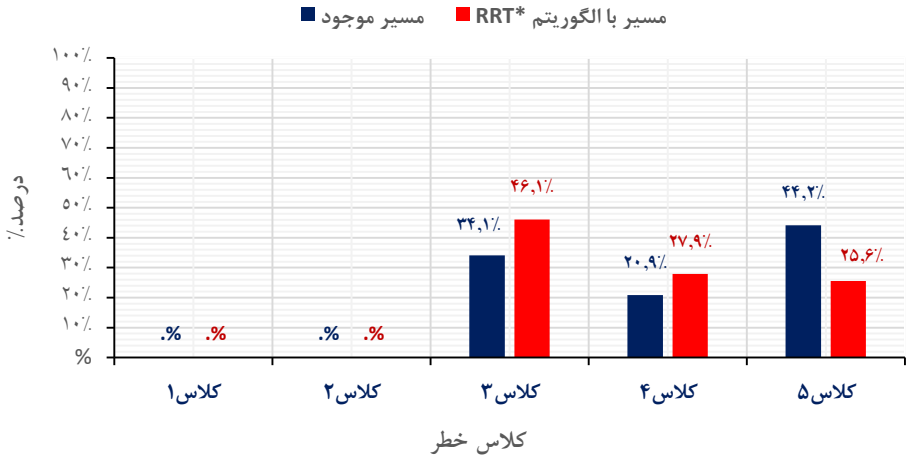


شکل۱۰: موقعیت مسیر موجود و مسیر پیشنهادی نسبت به لایه مخاطرات طبیعی

الگوریتم *RRT برای مسیریابی دو خط انتقال برق به‌کار گرفته شد. در بخش قبل نتایج مربوط به مسیر شماره صفر ارائه گردید و در این بخش نتایج مسیر شماره هفت بررسی می‌شود.

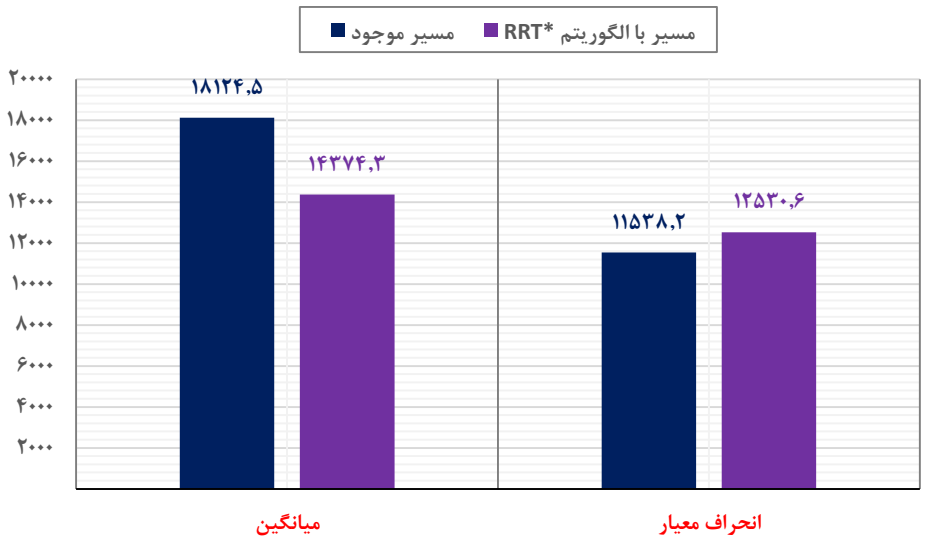
مطابق نمودار میله‌ای شکل (۱۱)، مسیر جدید حاصل از اجرای الگوریتم *RRT بهبود قابل‌توجهی در توزیع کلاس‌های خطر، نسبت به مسیر موجود نشان می‌دهد. هرچند هیچ‌یک از دو مسیر، تخصیص طولی در مناطق دارای کمترین خطر (کلاس‌های ۱ و ۲) نداشته‌اند، اما الگوریتم تمایل بیشتری به نواحی با خطر متوسط داشته و سهم مسیر در کلاس خطر ۳ را از ۳۴٫۱ به ۴۶٫۱ درصد افزایش داده است. مهم‌تر از همه، کاهش چشمگیر حضور در کلاس خطر ۵ (از ۴۴٫۲٪ به ۲۵٫۶٪) بیانگر توانایی الگوریتم در اجتناب مؤثر از مناطق پرخطر است. این تغییرات اساسی در توزیع ریسک، نشان‌دهنده موفقیت الگوریتم در یافتن مسیری پایدارتر و ایمن‌تر نسبت به مسیر موجود است، که در نهایت به کاهش خطرات ناشی از مخاطرات طبیعی و تقلیل هزینه‌های نگهداری خطوط انتقال برق منجر می‌شود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]



شکل۱۱: مقایسه توزیع کلاس خطر بین مسیر موجود و مسیر بهینه شده با الگوریتم*RRT (مسیر شماره۷)

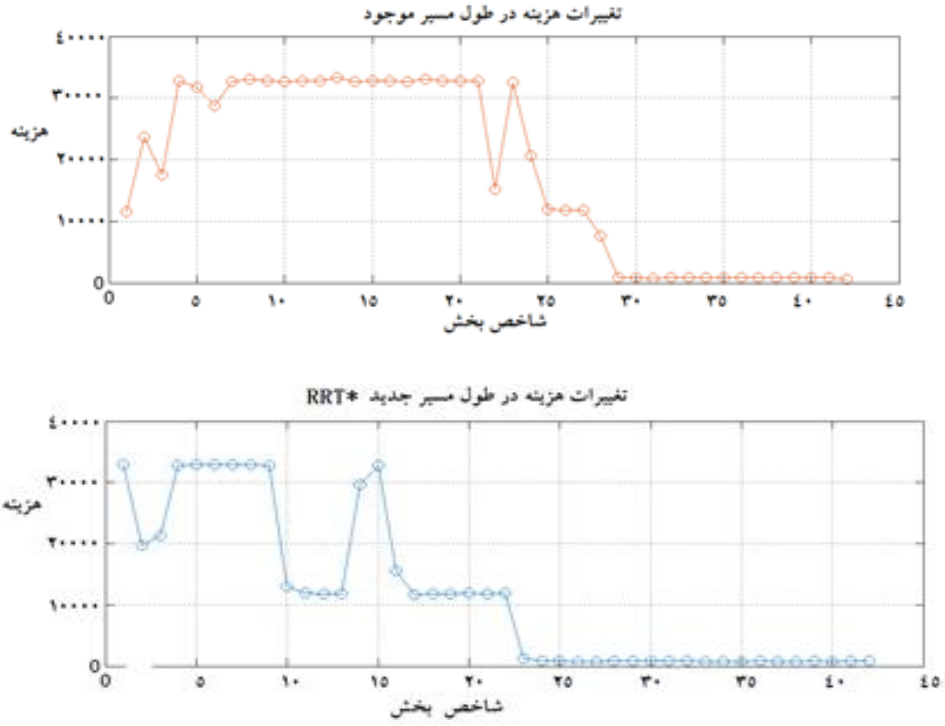
شکل (۱۲) نتایج مقایسه میانگین و انحراف معیار هزینه بین مسیر موجود و مسیر بهینه شده با الگوریتم *RRT را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر جدید به طور میانگین هزینه بسیار کمتری نسبت به مسیر موجود دارد (۱۱۵۳۸٫۲۳ در مقابل ۱۸۱۲۴٫۵۱). همچنین انحراف معیار هزینه‌ها در مسیر جدید کاهش یافته است (۱۲۵۳۰٫۵۸ در مقابل ۱۴۳۷۴٫۲۷)، که بیانگر یکنواختی بیشتر توزیع هزینه در طول مسیر است. به عبارت دیگر، الگوریتم *RRT نه تنها میانگین هزینه کلی را کاهش داده، بلکه پایداری بیشتری را در برابر تغییرات هزینه فراهم کرده است. این نتایج در کنار کاهش طول مسیر در کلاس‌های پرخطر و افزایش حضور در کلاس‌های کم‌خطر، نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در ارائه مسیری پایدارتر و کم‌خطرتر نسبت به مسیر موجود است.



شکل۱۲: میانگین و انحراف معیار مسیر موجود و مسیر بهینه شده با الگوریتم*RRT (مسیر شماره۷)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

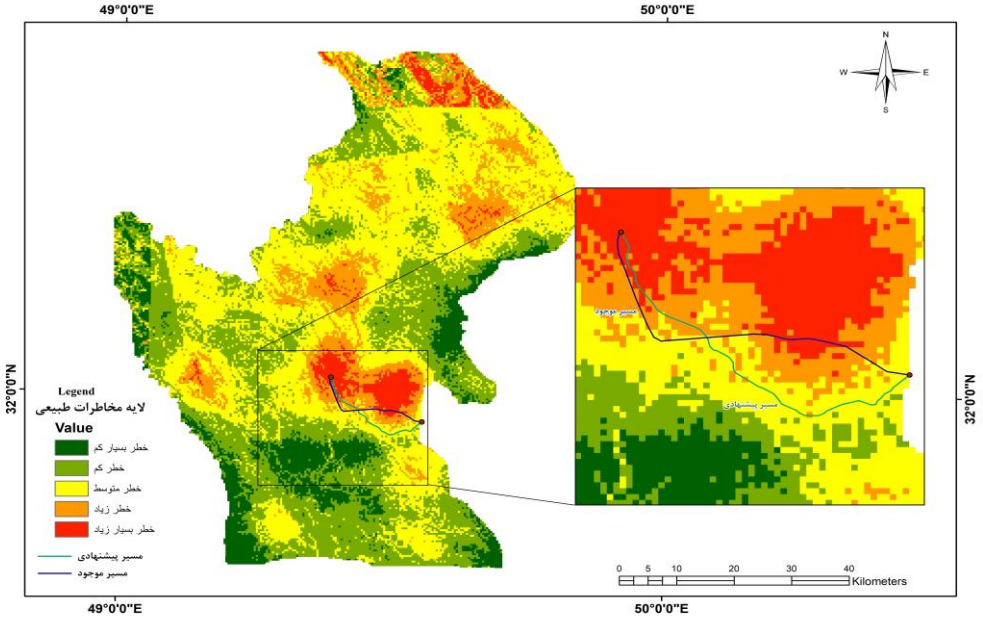
شکل(۱۳) تغییرات هزینه در طول قطعات مختلف مسیرها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر موجود در ابتدا با هزینه‌های نسبتاً پایین آغاز شده و سپس وارد بخشی با هزینه بالا می‌شود. پس از قطعه ۲۲، هزینه‌ها به تدریج کاهش یافته و در انتهای مسیر به مقادیر بسیار پایین می‌رسند. در مقابل، مسیر جدید *RRT اگرچه در بخش‌های ابتدایی با نوسانات بیشتری در هزینه مواجه است، اما پس از قطعه ۲۵ به سطحی بسیار پایین و پایدار دست می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که الگوریتم *RRT توانسته مسیریابی را به گونه‌ای انجام دهد که بخش عمده‌ای از مسیر در نواحی کم‌هزینه و یکنواخت قرار گیرد. در حالی که مسیر فعلی برای رسیدن به مناطق کم‌هزینه، تغییرات تدریجی‌تری را تجربه می‌کند و در بخش‌هایی هزینه بالاتری را حفظ می‌کند.



شکل۱۳: تغیرات هزینه در طول قطعات مختلف مسیر موجود و مسیر بهینه شده با الگوریتم *RRT (مسیر شماره۷)

شکل (۱۴) موقعیت مسیر موجود و مسیر پیشنهادی را نسبت به لایه مخاطرات طبیعی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر جدید توانسته از نواحی با کلاس‌های خطر بالا اجتناب کند و عمدتاً در کلاس‌های با خطر متوسط قرار گیرد. همچنین طول مسیر جدید از مسیر موجود کمتر است (مسیر موجود ۱۳٫۲۶ کیلومتر و مسیر جدید ۱۱٫۱۸کیلومتر). این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم *RRT توانسته مسیری ارائه دهد که نه‌تنها پایدارتر و ایمن‌تر است، بلکه از نظر طول نیز بهینه‌تر بوده و می‌تواند هزینه‌های اجرایی و نگهداری خطوط انتقال برق را کاهش دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]



شکل۱۴: موقعیت مسیر موجود و مسیر پیشنهادی نسبت به لایه مخاطرات طبیعی

۴- نتیجه‌گیری:

پژوهش حاضر نشان داد که به‌کارگیری الگوریتم *RRT در کنار سامانه اطلاعات مکانی (GIS) می‌تواند رویکردی مؤثر برای مسیریابی بهینه خطوط انتقال برق در مناطق تحت تأثیر مخاطرات طبیعی نظیر زلزله، زمین‌لغزش و فرونشست باشد. برخلاف روش‌های سنتی که عمدتاً طول مسیر را به‌عنوان معیار اصلی در نظر می‌گیرند، در این تحقیق هزینه مسیر علاوه بر طول مسیر بر اساس لایه‌ی مخاطرات طبیعی مدل‌سازی شد. نتایج حاکی از آن است که الگوریتم *RRT قادر است مسیرهایی با حداقل عبور از نواحی پرخطر و در نتیجه پایداری بالاتر شبکه انتقال ارائه دهد. به‌عنوان نمونه، در مسیر شماره صفر، درصد حضور در کلاس خطر بسیار بالا (کلاس ۵) از ۳۳٫۹ درصد به ۱۳٫۳ درصد کاهش یافت و در مقابل، حضور در کلاس خطر متوسط به ۷۵٫۵ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین در مسیر شماره هفت، طول مسیر از ۱۳٫۲۶ کیلومتر به ۱۱٫۱۸ کیلومتر کاهش یافت و درصد حضور در کلاس خطر بسیار بالا (کلاس ۵) از ۴۴٫۲ درصد به ۲۵٫۶ درصد کاهش پیدا کرد. مقایسه مسیرهای پیشنهادی با مسیرهای موجود از نظر میانگین هزینه، انحراف معیار هزینه و توزیع مسیر در کلاس‌های خطر نشان داد که مسیرهای جدید از ثبات و ایمنی بیشتری برخوردارند و ریسک ناشی از آسیب‌پذیری خطوط انتقال را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. به‌طور مشخص، در مسیر موجود شماره صفر، میانگین و انحراف معیار هزینه به‌ترتیب از ۱۴۴۷۹٫۰۷ و ۱۲۷۱۳٫۷۹ به ۶۲۱۶٫۰۷ و ۱۰۵۳۶٫۶۵ کاهش یافت. همچنین در مسیر موجود شماره هفت، این مقادیر از ۱۸۱۲۴٫۵۱ و ۱۴۴۷۴٫۲۷ به ۱۱۵۴۸٫۲۳و ۱۲۵۳۰٫۵۸ کاهش پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد پیشنهادی می‌تواند در کاهش هزینه‌های نگهداری و بازسازی خطوط انتقال که معمولاً بیش از هزینه اولیه ساخت هستند نقش مؤثری ایفا کند. مزیت اصلی این روش، انعطاف‌پذیری بالا در برابر تغییرات محیطی و امکان به‌روزرسانی لایه‌های مخاطره بدون نیاز به تعریف تابع هدف پیچیده است. با این حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد؛ از جمله حساسیت الگوریتم به پارامترهایی مانند گام حرکتی و شعاع بازسازی درخت و وابستگی شدید به دقت داده‌های ورودی. هرگونه خطا در داده‌ها می‌تواند منجر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

به انتخاب مسیرهای غیر بهینه شود. در نهایت، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از ترکیب الگوریتم *RRT با روش‌های یادگیری ماشین یا الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شود تا کارایی و سرعت همگرایی مدل افزایش یابد. همچنین افزودن معیارهای فنی، اقتصادی و اجتماعی نظیر دسترسی به زیرساخت‌های موجود، قابلیت اطمینان شبکه و ملاحظات بهره‌برداری می‌تواند مدل ارائه شده را به تصمیم‌گیری‌های واقعی و کاربردی‌تر، نزدیک‌تر سازد.

مراجع

[1] *N. Mohammadi and M. Chabok, "Multi-objective routing of power transmission lines based on environmental, accessibility, and economic criteria (Case study: Sari County)," Sepehr: Scientific-Research Quarterly of Geographical Information, vol. 27, no. 108, pp. 183–196, 2019 (Persin). doi: 10.22131/sepehr.2019.34629*

[2] *A. Kargar and F. Rezaei, "AHP incorporation and fuzzy inference system for power transmission route finding (Case study: Kahak County)," Geography and Environmental Planning, vol. 26, no. 1, pp. 157–166, 2015 (Persian).*

doi: 10.22108/gep.2015.18715GEP

[3] *A. Rastegar, A. Mansourian, M. Taleai, D. Yari, and S. Beheshtifar, "Power transmission lines routing using the NSGA-II algorithm," Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, vol. 6, no. 4, pp. 1–12, 2014 (Persian).*

[4] *S. Salehi-Vaziri and A. Almodarresi, "Optimal routing of power transmission lines using fuzzy logic and hierarchical analysis model in Yazd Regional Electricity Company based on the new routing guidelines of Tavanir Company: Case study of Tiaf-Mohammadabad line," GIS and Remote Sensing Applications in Planning, vol. 35, no. 10, pp. 107–128, 2019 (Persian).*

[5] *W. P. J. Pemarathne and T. G. I. Fernando, "Multi-objective ant colony algorithm for electrical wire routing," International Journal of Swarm Intelligence, vol. 5, no. 1, pp. 97–135, 2020, doi: 10.1504.2020.106411*

[6] *S. Chakravorty, K. S. Sherpa, and A. Ray, "Optimal power distribution nális planning and nálisis using Q-GIS and soft computing," International Journal of Decision Support System Technology, vol. 12, no. 1, pp. 70–83, 2020. doi: 10.4018/IJDSST.2020010104*

[7] *V. M. Gonçalves, E. M. B. Bolonhez, G. E. M. Campos, and L. H. Sathler, "Transmission line routing optimization using rapid random trees," Electric Power Systems Research, vol. 194, p. 107096, 2021. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107096*

[8] *S. Ayazi and A. Askarzadeh, "Finding optimal path of feeder routing problem in power distribution network by an efficient and new methodology," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 31, no. 12, p. e13196, 2021. doi: 10.1002/2050-7038.13196*

[9] *A. Bosisio, A. Berizzi, M. Merlo, A. Morotti, and G. Iannarelli, "A GIS-Based Approach for Primary Substations Siting and Timing Based on Voronoi Diagram and Particle Swarm Optimization Method," Applied Sciences, vol. 12, no. 12, p. 6008, 2022. doi: 10.3390/app12126008*

[10] *Y. Qin, Z. Li, J. Ding, F. Zhao, and M. Meng, "Automatic optimization model of transmission line based on GIS and genetic algorithm," Array, vol. 17, p. 100266, 2023. doi: 10.1016/j.array.2022.100266*

[11] *Nan, G., Liu, Z., Du, H., Zhu, W., & Xu, S. (2023). Transmission Line-Planning Method Based on Adaptive Resolution Grid and Improved Dijkstra Algorithm. Sensors, 23(13), 6214. doi:10.3390/s23136214*

[12] *F. C. Jong and M. M. Ahmed, "Power line routing design by GIS-driven fuzzy*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

traveling salesman problem-binary integer programming for green energy integration," Applied Energy, vol. 374, p. 124092, 2024. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124092

[13] Cao, Y., Zheng, X., Gu, Q., Hu, L., Geng, Y., Zhu, X., Chen, J., Peng, L., & Han, Y. (2024). A Comparation Study of Transmission Line Routing Based on A and RRT Algorithms. Journal of Computer Science Research, 6(3), 10–16. doi:10.30564/jcsr.v6i3.6714*

[14] Wang, B., Hua, C., Luo, H., Suo, B., & Zu, G. (2024). Research on transmission line path planning model based on TFN - AHP and ACO. IET Generation, Transmission & Distribution, 18(13), 2373-2381. https://doi.org/10.1049/gtd2.13208

[15] Yang, F.; Wang, P.; Zhang, R.; Xing, S.; Wang, Z.; Li, M.; Fang, Q. A–Ant Colony Optimization Algorithm for Multi-Branch Wire Harness Layout Planning. Electronics 2024, 13, 529. https://doi.org/ 10.3390/electronics13030529*

[16] S. Nazari, "The economic role of oil and its effects on the city of Masjed Soleyman," Sepehr: Geographical Information Quarterly, vol. 21, no. 81, pp. 35–37, Spring 2012 (Persian).

[17] Z. Zargani and H. Alamizadeh, "Landslide susceptibility zoning and geological impact assessment in the Masjed Soleyman basin using GIS," presented at the 17th National Conference on Management and Humanities Research in Iran, Tehran, 2024 (Persian).

[18] S. Mosavi, Z. Savari, A. Cherchi, and B. Samani, "Seismotectonic deterministic analysis of the southern Masjed Soleyman fault," presented at the 11th National Specialized Conference on Geology of Payame Noor University and the 21st Conference of the Geological Society of Iran, Qom, 2018 (Persian).

[19] A. Barati Nia and A. Pak, "Investigation of collapse settlement of Masjed Soleyman dam shell due to rainfall," presented at the 3rd National Conference on Geotechnical Engineering of Iran, Tehran, 2018 (Persian).

[20] M. Rajabi, S. Roostaei, and S. Mataee, "Assessment of land subsidence time series in Kermanshah Plain using InSAR methods," Physical Geography Research, vol. 55, no. 1, pp. 19–37, 2023 (Persian). doi:10.22059/jphgr.2023.354497.1007744

[21] S. Baharvand, A. Firoozfar, and S. Soori, "Identification of fault lineaments and earthquake hazard zoning using remote sensing and GIS: A case study of Rumeshkan County, Lorestan Province," Geography and Environmental Planning, vol. 34, no. 2, pp. 1–16, 2023 (Persian). doi:10.22108/gep.2022.132279.1484

[22] Z. Wu, Z. Meng, W. Zhao, and Z. Wu, "Fast-RRT: A RRT-based optimal path finding method," Applied Sciences, vol. 11, no. 24, p. 11777, 2021. doi: 10.3390/app112411777

[23] Y. Guo, X. Liu, X. Liu, Y. Yang, and W. Zhang, "FC-RRT: An Improved Path Planning Algorithm for UAV in 3D Complex Environment," ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 11, no. 2, p. 112, 2022. doi: 10.3390/ijgi11020112.MDPI.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.3, Autumn 2025

Research Paper

Optimized Routing of Power Transmission Lines Using Geographic Information Systems (GIS) and Artificial Intelligence Algorithms (RRT): A Case Study of Masjed Soleyman County*

Fatemeh Ghazalizadeh [1], Mostafa Kabolizadeh [2*], Seyed Sajedin Mousavi [3]

1- M.Sc. Student, RS and GIS Department, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Associate Professor, RS and GIS Department, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3- Assistant Professor, Geology Department, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Abstract

The optimal routing design of the power transmission lines holds significant importance, primarily to reduce the construction and maintenance costs while enhancing stability against natural hazards. Given its high density of earthquake occurrences, landslide potential, and the severity of land subsidence, Masjed Soleyman County is considered a high-risk area for establishing power transmission networks. In this research, a hybrid approach, leveraging the Geographic Information System (GIS) and the RRT Artificial Intelligence algorithm, was developed for optimal route identification. A composite spatial layer, incorporating three key indicators—earthquake occurrence density, land subsidence severity, and landslide potential—was created for hazard assessment. These indicators were combined using equal weights to generate the final natural hazards layer. By overlaying the existing power transmission lines onto this layer, the high-risk routes were identified. Specifically, Routes Zero and Seven were found to traverse over 80% of their total length within high-risk zones, so it was necessary to select new routes for them using the RRT* algorithm. The results indicated that the routes proposed by the algorithm significantly avoided high-risk areas and presented a more uniform distribution of risk classes. For instance, the mean and standard deviation of the cost for the existing route (number zero) were 14497.07 and 12713.79 respectively, which were reduced to 6216.07 and 10536.65 in the new route. Similarly, for the existing route (number seven), these values decreased from 18124.51 and 14474.27 to 11548.23 and 12530.58. These findings demonstrate a reduction in the overall risk level and an increase in the stability of the new routes compared to the existing ones. In summary, the findings suggest that the combination of GIS and the RRT* algorithm is an effective tool for designing more sustainable and economical routes in areas with high natural hazards, offering a practical approach for power transmission network planning under similar conditions.*

Key words : *RRT* Algorithm, Routing, Power Transmission Lines, GIS.*

Correspondence Address*: Department of Remote Sensing and GIS, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.*
Tel*: : +98 6133339338*
Email : *m.kabolizade@scu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.117]