تعیین مسیر بهینه راه ارتباطی با تحلیل رویکردهای زیست‌محیطی و توپوگرافی
(مطالعه موردی: مسیر دهگلان–سنندج)

مقاله در نوبت انتشار

چکیده

این پژوهش در راستای توسعه و بهینه‌سازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، به تحلیل و تعیین مسیر بهینه میان دو نقطه دهگلان و سنندج در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداخته است. انتخاب مسیر مناسب، نقشی حیاتی در کاهش هزینه‌های اجرایی، زمانی و همچنین به حداقل رساندن اثرات محیط‌زیستی ایفا می‌کند. هدف اصلی این تحقیق، مقایسه دو رویکرد مجزا در مسیریابی با استفاده از GIS و روش AHP است: رویکرد اول با تمرکز بر ملاحظات محیط‌زیستی و رویکرد دوم با اولویت‌بخشی به عوامل توپوگرافی و شناسایی مسیری که ضمن برخورداری از کارایی فنی، کم‌ترین آسیب را به محیط‌زیست وارد نماید. در پژوهش حاضر، پس از جمع‌آوری لایه‌های اطلاعاتی مرتبط شامل پوشش گیاهی، شیب، ارتفاع و سایر معیارهای تأثیرگذار، این لایه‌ها در محیط GIS درون یکدیگر تلفیق و وزن‌دهی شدند. فرآیند وزن‌دهی با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و بر اساس قضاوت‌های کارشناسی انجام گرفت تا نقشه‌های هزینه (Cost Map) برای هر یک از رویکردهای محیط–زیستی و توپوگرافی ایجاد شود. در ادامه، با بهره‌گیری از ابزارهای Cost Distance و Backlink در نرم‌افزار ArcGIS Pro، مسیرهای با کم‌ترین هزینه از مبدأ به مقصد در هر دو سناریو محاسبه و در نهایت، مسیر نهایی با استفاده از ابزار Cost Path استخراج شد. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که هر دو رویکرد، مسیرهای بهینه‌تری نسبت به مسیر موجود (با طول ۳۰/۹ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۸۵ درصد) ارائه می‌دهند. مسیر محیط‌زیستی با طول تقریبی ۱۸/۳ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۱۰ درصد، مناطقی با اثرات محیط‌زیستی کمتر را انتخاب می‌کند. در مقابل، مسیر توپوگرافی با طول حدود ۱۷/۸ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۰۷ درصد، از نظر فنی و طول مسیر، کارآمدتر است. این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن معیارهای چندگانه و تعادل بین ملاحظات فنی و محیط–زیستی در طراحی مسیرهای خطی پایدار تأکید دارد.

کلمات کلیدی: مسیر بهینه، ملاحظات محیط‌زیستی، عوامل توپوگرافی، جاده دهگلان–سنندج

نسخه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۱-مقدمه

مناطق کوهستانی همواره چالش‌های منحصر به فردی را برای مهندسی راه و ترابری ایجاد کرده‌اند (مصطفی و همکاران، ۱۳۹۶). ساخت و نگهداری جاده‌ها در چنین ناهمواری‌هایی نیازمند درک عمیق از توپوگرافی، شرایط زمین‌شناسی، و عوامل اقلیمی است (هاره[1] و همکاران، ۲۰۱۵). شیب‌های تند، پیچ‌های خطرناک، احتمال رانش زمین، و تاثیرات شدید شرایط آب و هوایی مانند برف، یخبندان و مه، همگی ایمنی و کارایی این مسیرها را تحت تاثیر قرار می‌دهند (سید[2] و همکاران، ۲۰۲٤). جاده‌های کوهستانی نه تنها به دلیل موقعیت جغرافیایی خود، بلکه به خاطر نقش حیاتی‌شان در اتصال مناطق دورافتاده، تسهیل تجارت، و ارائه خدمات ضروری، از اهمیت بالایی برخوردارند. با این حال، همین ویژگی‌های طبیعی که زیبایی و اهمیت این مناطق را دوچندان می‌کند، می‌تواند منجر به افزایش خطرات جاده‌ای، افزایش مصرف سوخت و استهلاک وسایل نقلیه شود (تاکنت[3] و همکاران، ۲۰۱۲).

در دنیای امروز، با پیشرفت فناوری، ابزارهای نوینی برای مواجهه با انتخاب مسیرهای بهینه، در دسترس قرار گرفته‌اند (مالیک و کیم[4]، ۲۰۱۹؛ ژانگ[5] و همکاران، ۲۰۲۰). سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور، و مدل‌های تحلیل مکانی، به مهندسان امکان می‌دهند تا با دقت بالاتری مسیرهای بهینه را شناسایی، طراحی و ارزیابی کنند (سوشما و ماجی[6]، ۲۰۲۰؛ وانگ[7] و همکاران، ۲۰۲۲؛ چاندرا سکار[8] و همکاران، ۲۰۲۳). این فناوری‌ها با ترکیب داده‌های مختلف مانند ارتفاع، شیب، کاربری اراضی، و عوامل محیطزیستی، قادر به ارائه راه‌حل‌هایی هستند که هم از نظر فنی کارآمدتر و هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر باشند (آکای[9] و همکاران، ۲۰۱۲). بهینه‌سازی مسیرهای جاده‌ای در مناطق کوهستانی، نه تنها به کاهش حوادث و هزینه‌های حمل‌ونقل کمک می‌کند، بلکه نقش مهمی در توسعه پایدار منطقه‌ای، تسهیل دسترسی به خدمات، و بهبود کیفیت زندگی ساکنان ایفا می‌نماید (پادیلو[10] و همکاران، ۲۰۱٦؛ وانگ[11] و همکاران، ۲۰۲۵؛ مجیا آگویلار[12] و همکاران، ۲۰۲٦). در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های مسیریابی چندمعیاره به‌عنوان ابزاری علمی برای بهینه‌سازی مسیرهای جاده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. طراحی مسیرهای جایگزین می‌تواند باعث کاهش تلفات جاده‌ای و بهبود بهره‌وری حمل‌ونقل شود (ژانگ[13] و همکاران، ۲۰۲۰).

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

1 . Hare
2 . Said
3 . Tacnet
4 . Malik & Kim
5 . Zhang
6 . Sushma & Maji
7 . Wang
8 . Chandra Sekar
9 . Akay
10 . Padillo
11 . Wang
12 . Mejia-Aguilar
13 . Zhang

در ارتباط با موضوع مورد مطالعه، تحقیقات متعددی در زمینه مسیریابی بهینه با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام شده است. این پژوهش‌ها را می‌توان بر اساس روش و رویکرد به چند دسته تقسیم کرد:

دسته اول: پژوهش‌هایی که از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی و الگوریتم‌های ژنتیک برای مسیریابی استفاده کرده‌اند. هری[1] و همکاران (۲۰۱٤) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی صحیح (MILP) به بهینه‌سازی مسیرهای عمودی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در نظر گرفتن عواملی مانند شیب‌های جانبی و موانع فیزیکی زمین، دقت مدل را افزایش می‌دهد و روش‌های پیشنهادی آن‌ها زمان محاسبات را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. اکمت[2] و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی مسیرهای عمودی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش پیشنهادی با استراتژی گرم‌سازی (warm start) عملکرد روش‌های اسکالری‌سازی را بهبود می‌بخشد و روش اپسیلون-محدودیت با گرم‌سازی، کارآمدترین روش برای مسئله مورد نظر است. سلجوقی و همکاران (۱٤۰۲) نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک به مسیریابی بهینه جاده‌ای در مسیر دامغان به دیباج پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مسیر پیشنهادی نسبت به محور موجود، ۹،۱ کیلومتر (۱۸ درصد) کوتاه‌تر و ۲۰ درصد کمتر از کاربری‌های پرهزینه عبور کرده است.

دسته دوم: پژوهش‌هایی که از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای انتخاب کریدور مناسب استفاده کرده‌اند. موساکو[3] و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به شناسایی مسیرهای مناسب خطوط لوله انتقال گاز پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که عوامل محیطی و زمین‌شناسی بیشترین اولویت و عامل اقتصادی کم‌ترین اولویت را در انتخاب مسیر داشته‌اند و مسیر شماره ۲ به‌دلیل طول کمتر، عبور کمتر از مناطق حساس و تعداد کم‌تر تقاطع با رودخانه‌ها، به‌عنوان مسیر بهینه انتخاب شد. یلدریم و کادی[4] (۲۰۲۰) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و بر مبنای پارامترهای محیطی، به تولید مسیرهای بهینه جنگلی و مقایسه آن‌ها با جاده‌های موجود در منطقه ماجکای ترکیه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۳۵ درصد از جاده‌های جنگلی موجود دارای ریسک بالایی هستند و مسیرهای تولیدشده توسط الگوریتم پیشنهادی، در تمام مناطق مورد مطالعه، از نظر طول کل و میانگین ریسک مناسب‌تر از جاده‌های موجود بودند. داورپناه و وحیدنیا (۱٤۰۰) با مقایسه روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره به تعیین مسیر بهینه خطوط انتقال آب از ارداک به مشهد پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که دقت این مطالعات به شدت وابسته به دقت داده‌های خروجی از GIS است و بدون استفاده از این سیستم‌ها، امکان در نظر گرفتن همزمان چندین معیار و دستیابی به نتایج قابل‌قبول وجود ندارد. ممبینی و جزایرمقدسی (۱٤۰۳) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به انتخاب گزینه مناسب مسیر جاده‌ای آبگنجی-مسجد سلیمان پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که عوامل مؤثر در انتخاب مسیر شامل ملاحظات ایمنی، معیارهای فنی، اثرات محیط‌زیستی و ساختار فیزیکی منطقه هستند و ارزش و تأثیر آن‌ها در مسیر یکسان نیست.

---

1 . Harea
2 . Akhmet
3 . Mosaku
4 . Yildirim & Kadi

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

دسته سوم: پژوهش‌هایی که صرفاً بر ملاحظات محیط‌زیستی و کاربری اراضی در مسیریابی تأکید داشته‌اند. پارساخو و یزدانی (۱۴۰۰) با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی به تعیین مناسب‌ترین مسیر برای جاده جنگلی منطقه ناهارخوران و سعدآباد پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که جاده موجود از نظر توزیع سطحی، پوشش مشترک و تن‌کیلومتر نسبت به گزینه‌های پیشنهادی مناسب‌تر است و تجمیع معیارهای ارزیابی باAHP ، درک دقیق‌تری از کارایی شبکه جاده فراهم می‌آورد. حبیبیان و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی به تعیین بهترین مسیر احداث خط دوچرخه‌سواری در منطقه ۱ شیراز با رویکرد حمل‌ونقل پایدار پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مهم‌ترین عوامل در اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه‌سواری، شیب و سرعت مجاز جریان ترافیک هستند و سایر عوامل در رده‌های بعدی قرار دارند.

با وجود تنوع این پژوهش‌ها، اکثر آن‌ها بر یکی از حوزه‌های «ملاحظات فنی–اجرایی» یا «ملاحظات محیط‌زیستی» به‌صورت مجزا متمرکز بوده‌اند و کمتر به مقایسه همزمان این دو رویکرد در یک منطقه کوهستانی با شرایط خاص پرداخته‌اند. همچنین، در بسیاری از این مطالعات، تفکیک مقیاس کلان (تعیین کریدور عمومی) از مقیاس خرد (طراحی دقیق مسیر) به‌صراحت مورد توجه قرار نگرفته است. از سوی دیگر، با وجود پژوهش‌های ارزشمند انجام‌شده در مورد مخاطرات دامنه‌ای و زمین‌لغزش در گردنه صلوات‌آباد (مانند یوسفی و یاراحمدی، ۱۳۹۸؛ خدامرادی و همکاران، ۱۴۰۴)، تاکنون مطالعه‌ای که به شناسایی کریدور بهینه با تلفیق پارامترهای محیط‌زیستی و توپوگرافی در محور دهگلان–سنندج پرداخته باشد، انجام نشده است.

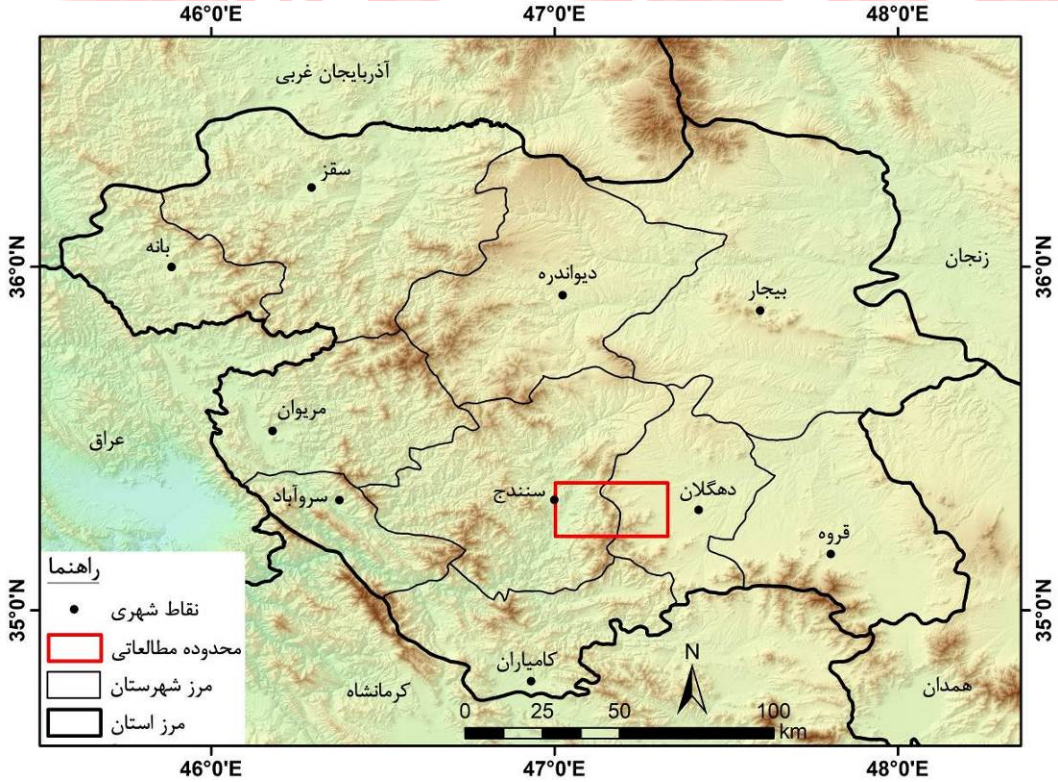
محور دهگلان–سنندج، به دلیل عبور از منطقه کوهستانی و وجود گردنه صلوات‌آباد، دارای پتانسیل مخاطره‌پذیری بالایی است. این گردنه علاوه بر مشکلات ایمنی و فنی ناشی از شیب زیاد، پیچ‌های خطرناک و لغزندگی سطح جاده در شرایط جوی نامساعد، اثرات نامطلوب زیست‌محیطی نیز بر جای گذاشته است. عبور جاده‌ی کنونی از مناطق با پوشش گیاهی متراکم و دامنه‌های حساس، موجب تخریب پوشش گیاهی، افزایش فرسایش خاک، تغییر مسیر رواناب‌های سطحی و ایجاد اختلال در زیست‌گاه‌های طبیعی منطقه شده است. همچنین، نزدیکی این جاده به آبراهه‌های فصلی و رودخانه‌ها، خطر آلودگی منابع آبی و تشدید رسوب‌گذاری را در پی داشته است. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش بارندگی‌های فصلی، شناسایی و ارزیابی مسیرهای جایگزین با حداقل اثرات مخرب زیست‌محیطی و بیشینه ایمنی، ضرورت یافته است. بنابراین، تحلیل دقیق محور دهگلان–سنندج با هدف یافتن مسیری بهینه و ایمن‌تر برای دور زدن گردنه‌ها ضروری است. این پژوهش با تکیه بر داده‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و شاخص‌های ایمنی، تلاش دارد مسیری جایگزین پیشنهاد دهد که ضمن حفظ ارتباط منطقه‌ای، تاثیر منفی عوامل جغرافیایی و زیست‌محیطی را به حداقل برساند. این رویکرد از منظر مهندسی راه و توسعه پایدار منطقه‌ای اهمیت دارد. فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی با بهره‌گیری از پارامترهای مختلف از جمله توپوگرافی و عوامل زیست‌محیطی، ابزار مناسبی برای استخراج مسیر بهینه فراهم می‌آورد.

بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق، پر کردن خلأ پژوهشی موجود از طریق شناسایی و مقایسه دو گزینه مسیر بهینه است: یکی با تأکید بر کاهش اثرات مخرب بر محیط‌زیست و دیگری با اولویت‌دهی به شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

اهداف فرعی پژوهش شامل (۱) تهیه نقشه‌های هزینه برای هر یک از رویکردهای زیست‌محیطی و توپوگرافی با استفاده از تلفیق GIS و AHP ، (۲) استخراج کم‌هزینه‌ترین کریدورها از مبدأ به مقصد با استفاده از ابزارهای Cost Distance و Cost Path، و (۳) مقایسه کمی مسیرهای پیشنهادی با مسیر کنونی از نظر طول، شاخص انحراف و میزان سازگاری با محیط‌زیست می‌باشد. مسئله اصلی این پژوهش، محدودیت‌های طبیعی مسیر فعلی دهگلان–سنندج است که بهره‌برداری ایمن را مختل می‌کند و همچنین اثرات زیست‌محیطی نامطلوب آن بر منطقه. این پژوهش، بر خلاف بسیاری از مطالعات پیشین که صرفاً به معرفی یک مسیر واحد پرداخته‌اند، با ارائه و مقایسه دو گزینه مجزا، امکان تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر را برای برنامه‌ریزان و مهندسان راه فراهم می‌آورد.

منطقه مورد مطالعه: محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر، شامل مسیر ارتباطی شهر دهگلان (از نزدیکی روستای هلیزآباد) به سنندج (تا مرکز شهر سنندج) در استان کردستان است (شکل ۱). این مسیر به طول حدود ۳۱ کیلومتر، مسیر اصلی شهر سنندج به شهرها مهم از جمله همدان و تهران است، به همین دلیل دارای تردد زیادی است و بنابراین از حساسیت بالایی برخوردار است. بخش زیادی از مسیر دهگلان به سنندج، یعنی بعد از روستای هلیزآباد را واحد کوهستان و گردنه صلوات‌آباد دربرگرفته است و همین مسئله سبب شده است تا این مسیر دارای پیچ و خم‌ها و شیب زیاد باشد. همچنین با توجه به اینکه بخش زیادی از این گردنه، در ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر قرار دارد، در فصل سرد سال با مشکل یخبندان، برف و کولاک نیز مواجه است.



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-روش تحقیق

در این تحقیق از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه و تصاویر ماهواره MODIS به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، ArcGIS Pro (به‌منظور اجرای فرایند مسیریابی و تهیه نقشه‌های مورد نظر)، سامانه گوگل ارث انجین (به‌منظور تهیه نقشه تراکم پوشش‌گیاهی) و Expert Choice (به‌منظور وزن‌دهی به پارامترها) بوده است. شایان ذکر است که این پژوهش در مقیاس کلان و در سطح شناسایی اولیه (Reconnaissance Level) طراحی شده و خروجی آن به‌عنوان «راه‌روی عمومی» یا «گزینه‌های بهینه» برای راهنمایی مطالعات تفصیلی آینده ارائه می‌شود. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (تهیه لایه‌های اطلاعاتی): در این پژوهش به‌منظور شناسایی بهترین مسیر ارتباطی بین دهگلان و سنندج، دو رویکرد مجزا برای مسیریابی تعریف شده است. رویکرد اول با تأکید بر وضعیت محیط‌زیستی منطقه، از ۸ پارامتر شامل تراکم پوشش گیاهی، فاصله از نقاط روستایی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و فاصله از گسل استفاده کرده است. رویکرد دوم با تأکید بر وضعیت توپوگرافی منطقه، از ٦ پارامتر شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و فاصله از گسل بهره برده است. لازم به ذکر است که انتخاب این پارامترها بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای، نظرات کارشناسان و وضعیت منطقه بوده است. شایان ذکر است که به‌دلیل مقیاس کلان این پژوهش، خروجی آن به‌عنوان «مسیر نهایی اجرایی» قابل‌استفاده نیست، بلکه به‌عنوان «راه‌روی عمومی» یا «گزینه‌های بهینه» برای راهنمایی مطالعات تفصیلی آینده در نظر گرفته شده است.

پس از شناسایی پارامترهای مورد نظر، لایه‌های اطلاعاتی هر پارامتر تهیه شده است. به منظور تهیه لایه اطلاعاتی تراکم پوشش‌گیاهی، از سامانه گوگل ارث انجین و تصاویر ماهواره مادیس مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ استفاده شده است. به‌منظور تهیه نقشه لیتولوژی و فاصله از گسل، از لایه رقومی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه استفاده شده است و به‌منظور تهیه نقشه‌های شیب، جهت شیب، ارتفاع و فاصله از رودخانه، از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR استفاده شده است. همچنین به‌منظور تهیه لایه نقاط روستایی، از تصاویر گوگل ارث استفاده شده است.

مرحله دوم (وزن‌دهی به پارامترها و تلفیق لایه‌ها): پس از آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، داده‌ها وارد نرم‌افزار ArcGIS Pro شدند. وزن‌دهی به پارامترهای هر رویکرد (محیط‌زیستی و توپوگرافی) بر مبنای نظرات کارشناسان و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در نرم‌افزار Expert Choice انجام شده است. در ادامه، با استفاده از ابزار Weighted Overlay در ArcGIS Pro، لایه‌های وزنی با یکدیگر تلفیق شدند تا نقشه هزینه (Cost Map) برای هر رویکرد ایجاد گردد. این نقشه، میزان نامطلوب بودن هر پیکسل را برای عبور جاده در مقیاس کلان نشان می‌دهد و به‌عنوان مبنایی برای شناسایی پهنه‌های مناسب و نامناسب عمل می‌کند.

مرحله سوم (مسیریابی و استخراج گزینه‌های بهینه): در این مرحله، نقاط شروع (نزدیک روستای هلیزآباد) و پایان (مرکز شهر سنندج) بر روی نقشه‌های هزینه مشخص گردیدند. در ادامه، با استفاده از ابزار Cost Distance در ArcGIS

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

Pro، فاصله هزینه از نقاط شروع به تمامی پیکسل‌های منطقه محاسبه و لایه Cost Distance ایجاد شد. همزمان، ابزار Backlink نیز اجرا گردید تا جهت حرکت به سمت نقطه شروع را برای هر پیکسل مشخص کند و لایه Backlink تولید شود. در گام نهایی، با استفاده از ابزار Cost Path و با در نظر گرفتن نقشه‌های Cost Distance و Backlink، بهترین گزینه‌های مسیر (Optimal Paths) محاسبه و استخراج گردید. این فرآیند برای هر دو رویکرد مسیریابی تکرار شد:

- **گزینه اول:** بر مبنای ۸ پارامتر (تراکم پوشش گیاهی، فاصله از نقاط روستایی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و فاصله از گسل)، که با هدف کم‌ترین تأثیر بر محیط زیست بهینه‌سازی شده است.
- **گزینه دوم:** بر مبنای ٦ پارامتر (شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و فاصله از گسل)، که با هدف بیش‌ترین انطباق با وضعیت زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه بهینه‌سازی شده است.

تأکید می‌گردد که با توجه به مقیاس پهنه‌بندی و عدم لحاظ استانداردهای هندسی راه‌سازی در این پژوهش، خروجی‌های حاصل، گزینه‌های پیشنهادی در مقیاس منطقه‌ای هستند و برای طراحی نهایی مسیر جاده، نیاز به مطالعات تکمیلی در مقیاس ۱:۲۰۰۰ با در نظر گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی، هیدرولوژی و استانداردهای هندسی راه می‌باشد.

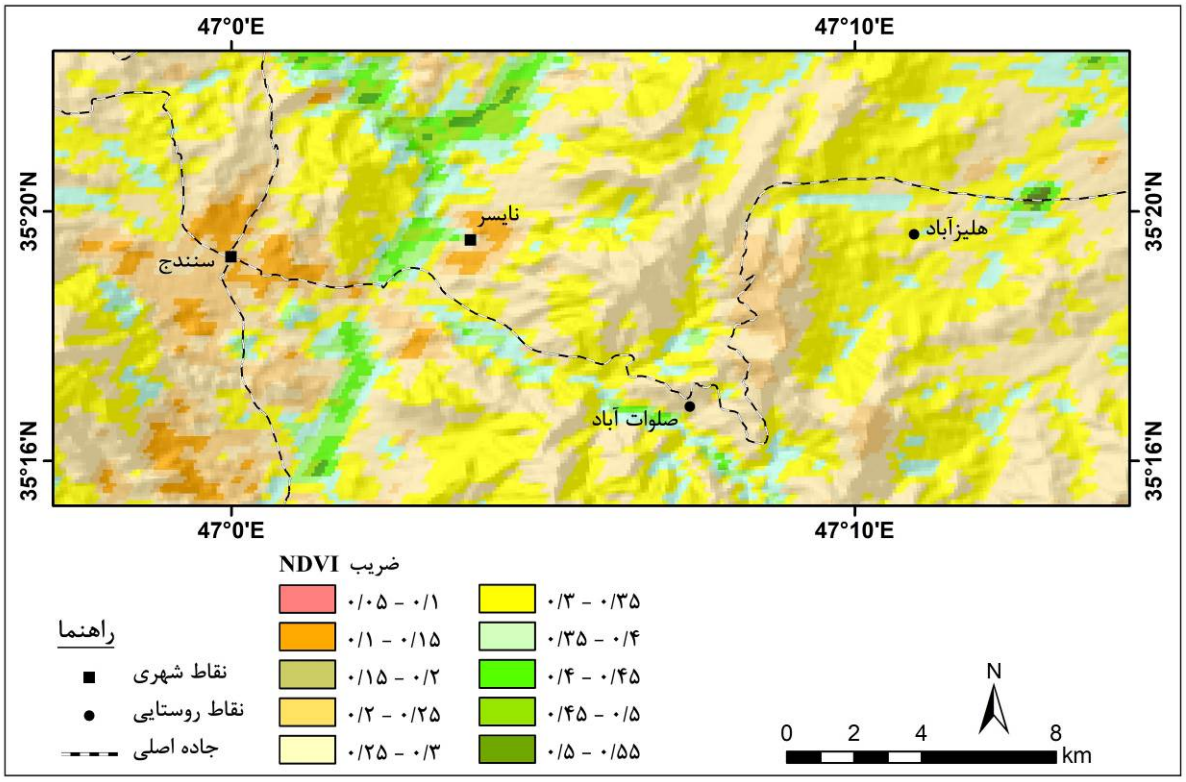
۳- نتایج

۳-۱-تشریح پارامترهای مورد استفاده

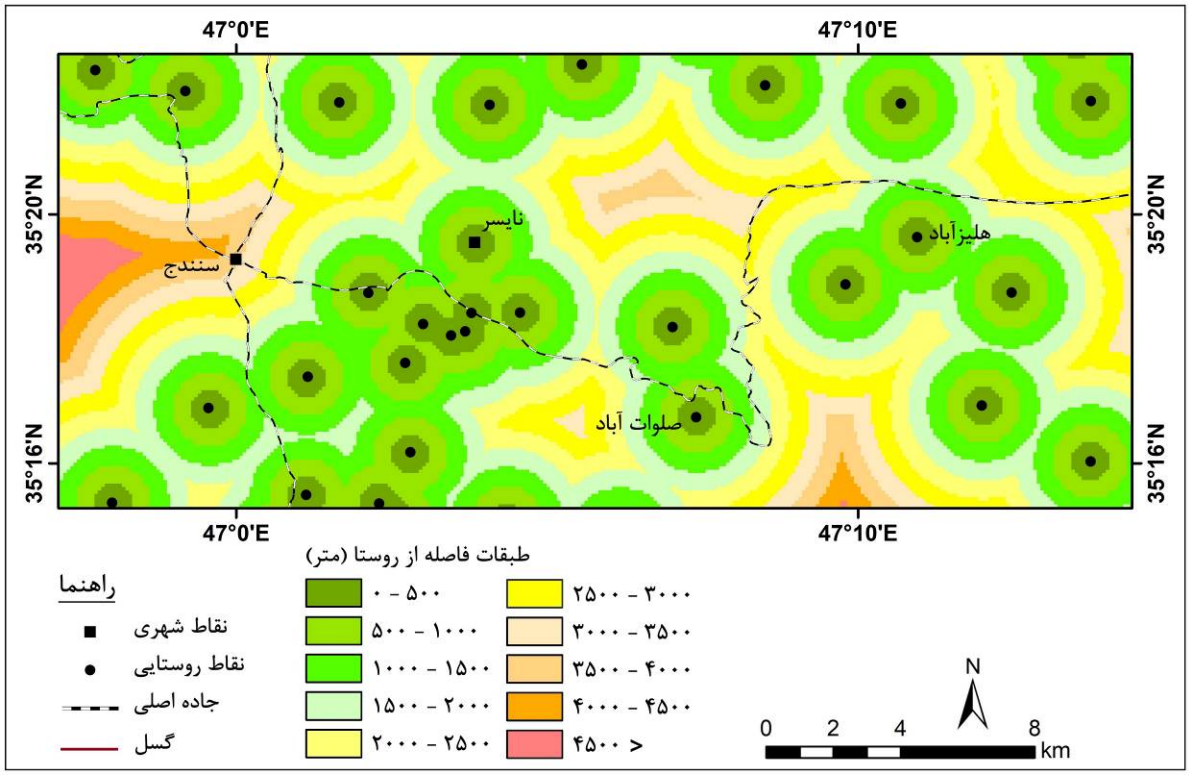
در این پژوهش، به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین مسیر ارتباطی بین دهگلان و سنندج، مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی مکانی و محیطی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. این پارامترها در قالب چهار گروه دوگانه شامل (۱) تراکم پوشش گیاهی و فاصله از نقاط روستایی، (۲) شیب و جهت شیب، (۳) ارتفاع و فاصله از رودخانه، و (٤) لیتولوژی و فاصله از گسل، طبقه‌بندی شده‌اند. در ادامه، هر گروه به‌طور مجزا تشریح می‌شود.

-**تراکم پوشش‌گیاهی و فاصله از نقاط روستایی:** در این پژوهش نقشه تراکم پوشش‌گیاهی با استفاده از شاخص NDVIو تصاویر ماهواره MODIS (۲۰۱۹-۲۰۲۳) در سامانه گوگل ارث انجین تهیه شده است. بر اساس نتایج حاصله، مقدار NDVI منطقه بین ۰/۰۵ تا ۰/۵۵ متغیر بوده و بالاترین تراکم در دره‌های کم‌ارتفاع مشاهده می‌شود (شکل ۲). بنابراین، به این مناطق هزینه بالاتری اختصاص یافته است. در مقابل، نقشه فاصله از نقاط روستایی در ۱۰ طبقه از تهیه شده است (شکل ۳). در این پارامتر نزدیکی به روستاها به‌عنوان عامل تسهیل‌کننده در نظر گرفته شده است؛ چراکه عبور جاده از نزدیکی سکونتگاه‌ها، دسترسی روستاییان به خدمات شهری را بهبود بخشیده، هزینه‌های نگهداری جاده را کاهش داده و به توسعه اقتصادی-اجتماعی منطقه کمک می‌کند. این پارامتر صرفاً در رویکرد محیط‌زیستی استفاده شده است.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



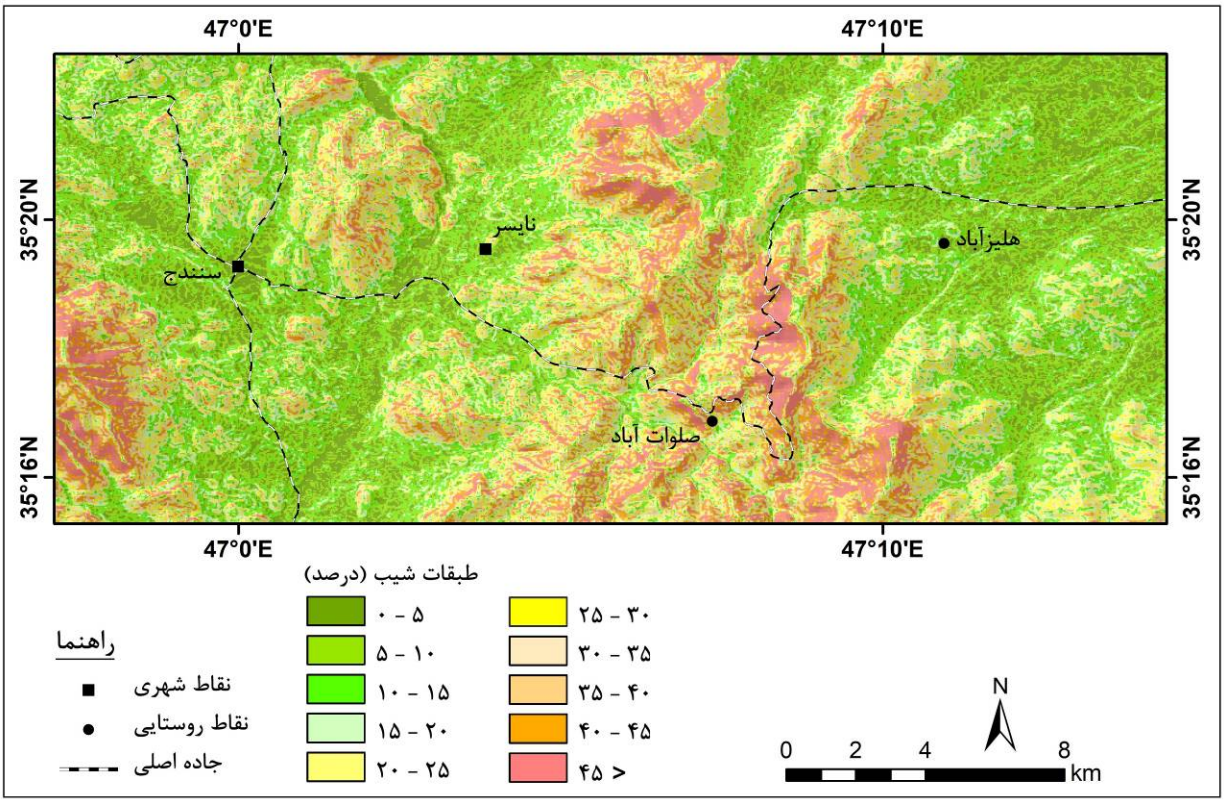
شکل ۲: نقشه طبقات تراکم پوشش گیاهی منطقه



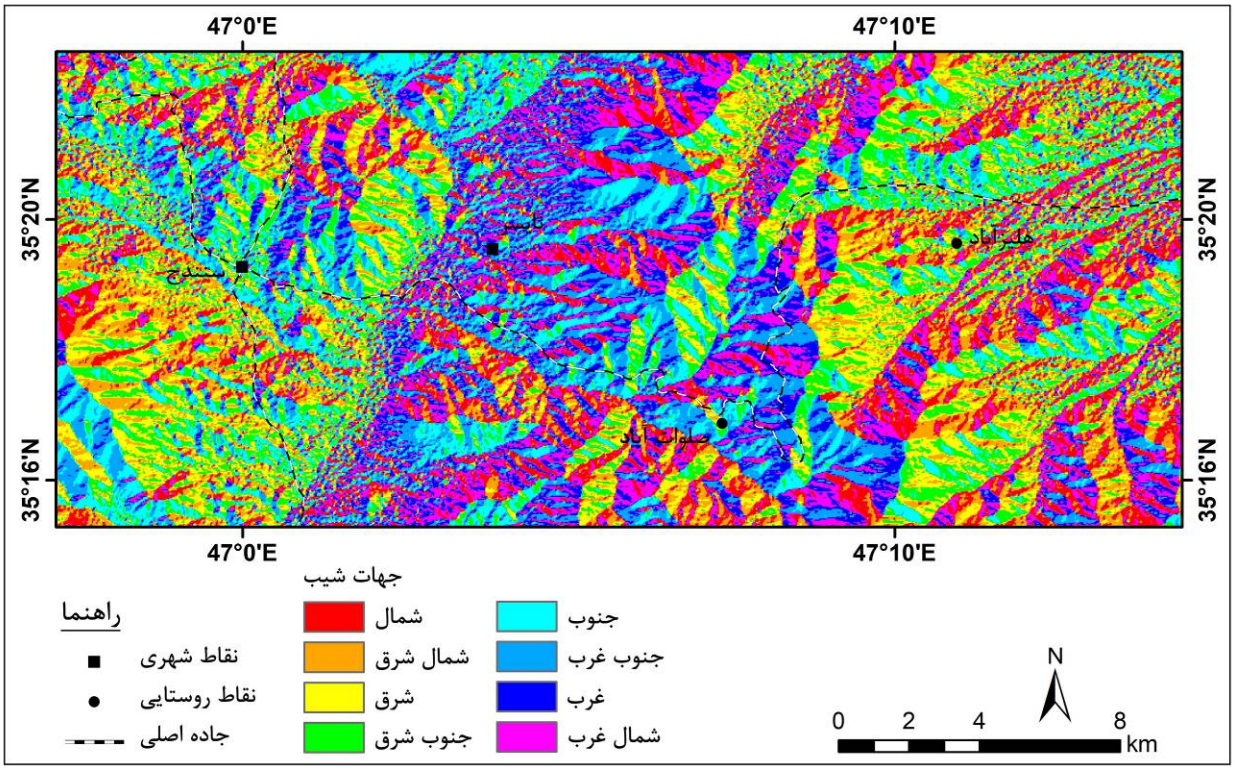
شکل ۳: نقشه طبقات فاصله از نقاط روستایی منطقه

-**شیب و جهت شیب:** میزان شیب زمین یکی از پارامترهای حیاتی در برنامه‌ریزی‌های عمرانی و به‌خصوص طراحی خطوط ارتباطی محسوب می‌شود. مناطق با شیب تند، چالش‌های فنی و اجرایی قابل توجهی را در فرآیند احداث جاده ایجاد می‌کنند. علاوه بر افزایش هزینه‌های ساخت‌وساز و نیاز به سازه‌های مهندسی پیچیده‌تر (مانند گالری‌ها و دیوارهای حائل)، نواحی پرشیب، پتانسیل بالاتری برای وقوع مخاطرات طبیعی مانند رانش زمین، ریزش کوه و فرسایش شدید دارند. بررسی وضعیت شیب در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از آن، در طبقات شیب بیش از ٤٠ درصد قرار دارد (شکل ٤). همچنین، جهت شیب می‌تواند تاثیرات متفاوتی بر شرایط اقلیمی و محیطی داشته باشد. به طور خاص، دامنه‌هایی که در معرض تابش مستقیم نور خورشید قرار ندارند (مانند دامنه‌های شمالی)، پتانسیل بالاتری برای یخبندان، تجمع برف و رطوبت طولانی‌مدت دارند. بنابراین، توجه به جهت شیب در ارزیابی خطرات احتمالی و انتخاب مسیرهای ایمن‌تر و با قابلیت بهره‌برداری بالاتر، از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی نقشه جهات شیب منطقه (شکل ٥)، بیانگر این است که بخش زیادی از آن را جهات غربی دربرگرفته است.

مقاله در نوبت انتشار



شکل ٤: نقشه طبقات شیب منطقه

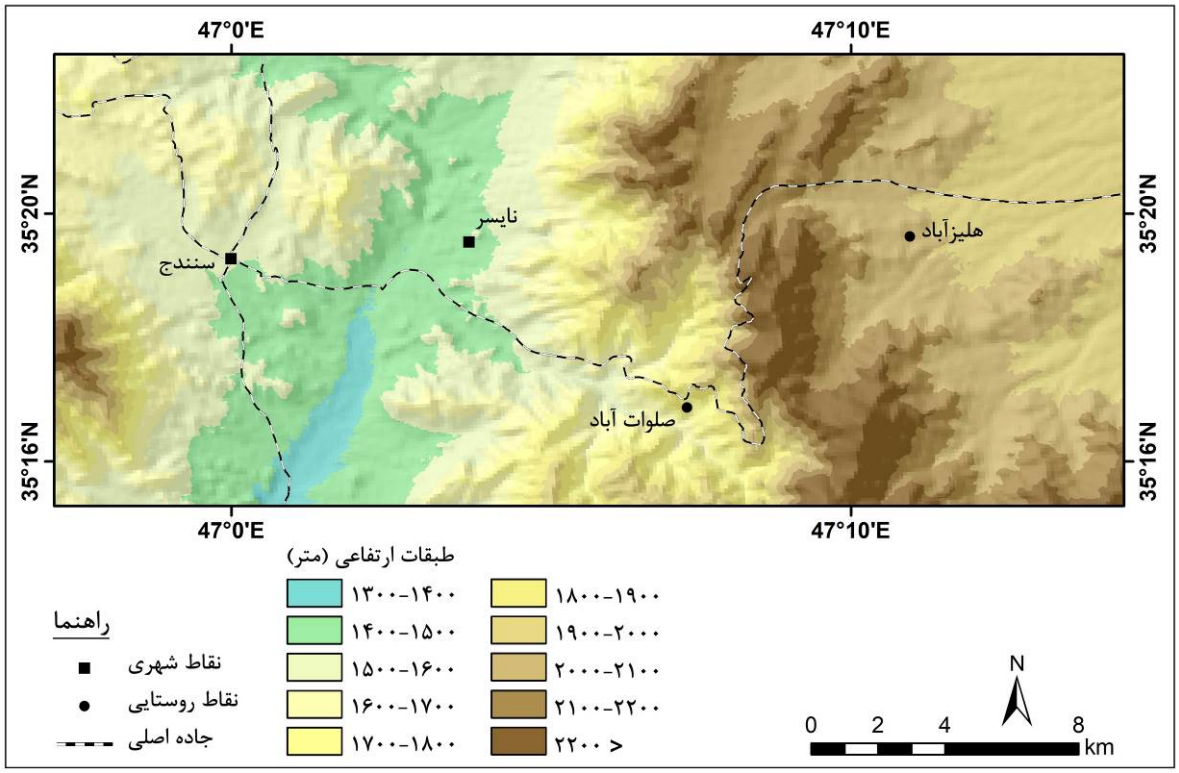


شکل ۵: نقشه جهات شیب منطقه

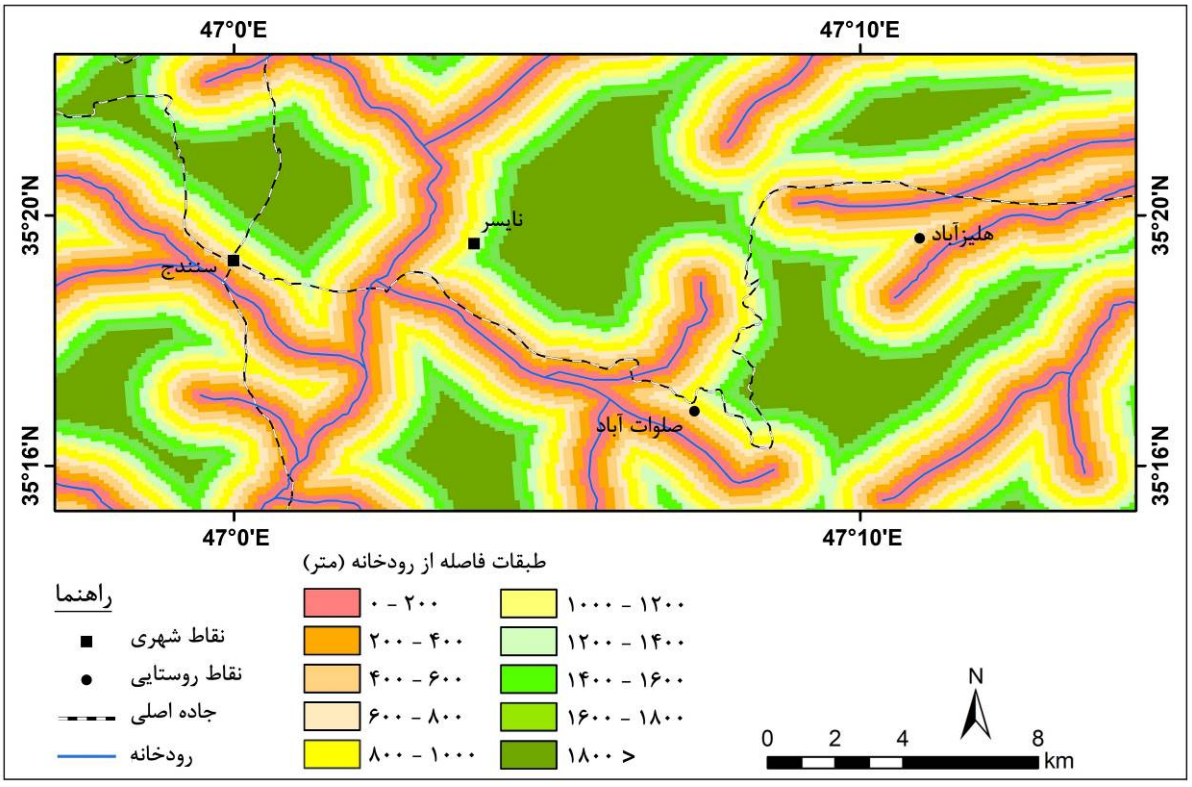
نشریه علمی پژوهشی

-**ارتفاع و فاصله از رودخانه:** نقشه ارتفاعی منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر تهیه شده و روند کاهشی ارتفاع از دهگلان به سمت سنندج را نشان می‌دهد (شکل ٦). مناطق پست‌تر از نظر اقلیمی (کاهش یخبندان و برف‌گیری) و اجرایی (کاهش هزینه‌های خاکبرداری) مطلوب‌تر هستند، بنابراین هزینه کم‌تری در مدل به آن‌ها اختصاص یافته است. نقشه فاصله از رودخانه‌های منطقه با استخراج شبکه آبراهه‌ها از مدل ارتفاعی ۱۲/۵ تهیه شده است (شکل ۷). عبور از حریم رودخانه‌ها به دلیل خطر سیل‌زدگی، فرسایش کناری و هزینه‌های بالای احداث پل، با هزینه بالا در نقشه هزینه مشخص شده است. تلفیق این دو پارامتر تضمین می‌کند که مسیر انتخابی، ضمن دوری از مناطق مرتفع و پرخطر اقلیمی، از حریم رودخانه‌ها نیز عبور نکند.

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

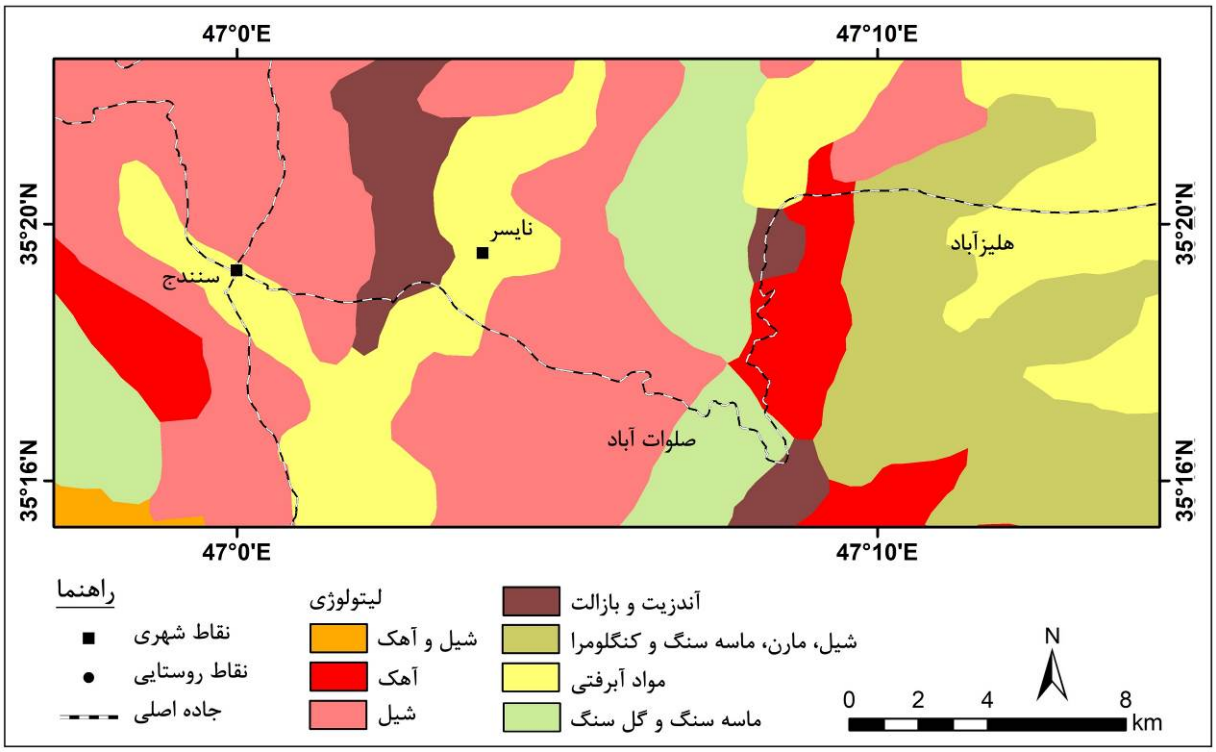


شکل ٦: نقشه طبقات ارتفاعی منطقه



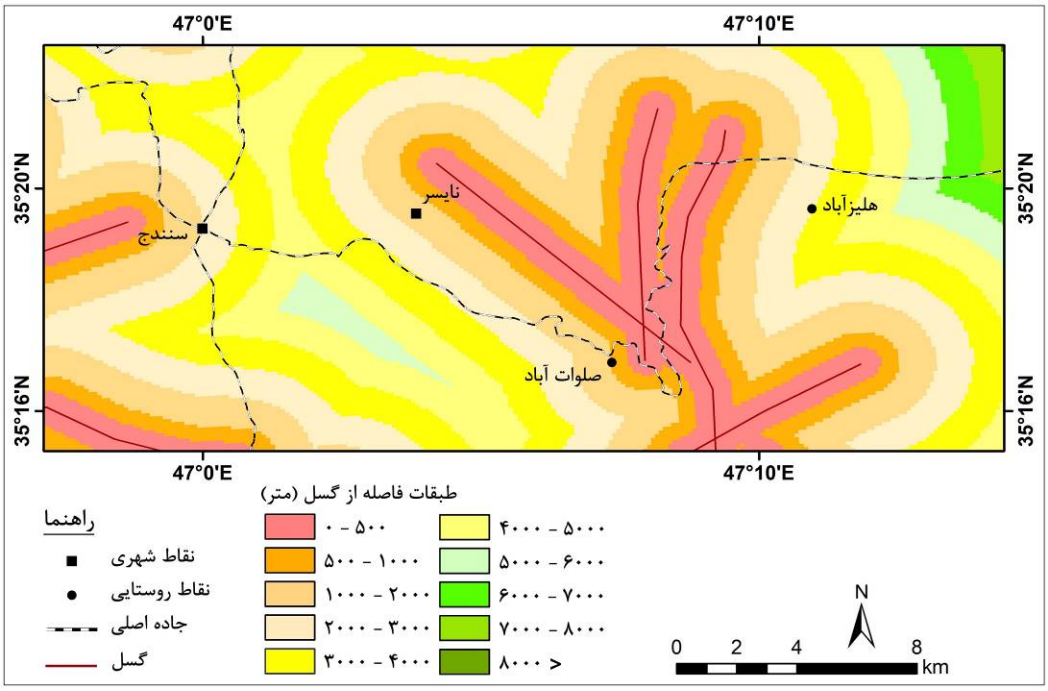
شکل ۷: نقشه طبقات فاصله از رودخانه‌های منطقه

-**لیتولوژی و فاصله از گسل**: نقشه لیتولوژی و فاصله از گسل، هر دو بر اساس لایه رقومی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه تهیه شده‌اند (شکل ۸ و ۹). واحدهای ماسه‌سنگی و آهکی به‌عنوان بسترهای مناسب برای احداث جاده شناسایی شدند، در حالی که واحدهای شیل (به دلیل خطر لغزش) و مواد آبرفتی (به دلیل نشست‌پذیری) که بخش زیادی از منطقه را دربرگرفته‌اند، مناطق نامناسب محسوب می‌شوند. همچنین خطوط گسلی که عمدتاً در بخش‌های شمالی روستای صلوات‌آباد قرار دارند، به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده و ناپایداری‌های دامنه‌ای محسوب می‌شوند. با توجه به قرارگیری منطقه در زون فعال سنندج-سیرجان، نزدیکی به گسل‌ها به‌عنوان یک عامل محدودکننده قوی در هر دو رویکرد وزن‌دهی شده است.



شکل ۸: نقشه لیتولوژی منطقه مورد مطالعه

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



شکل ۹: نقشه طبقات فاصله از گسل‌های منطقه

۲-۳-وزن‌دهی و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

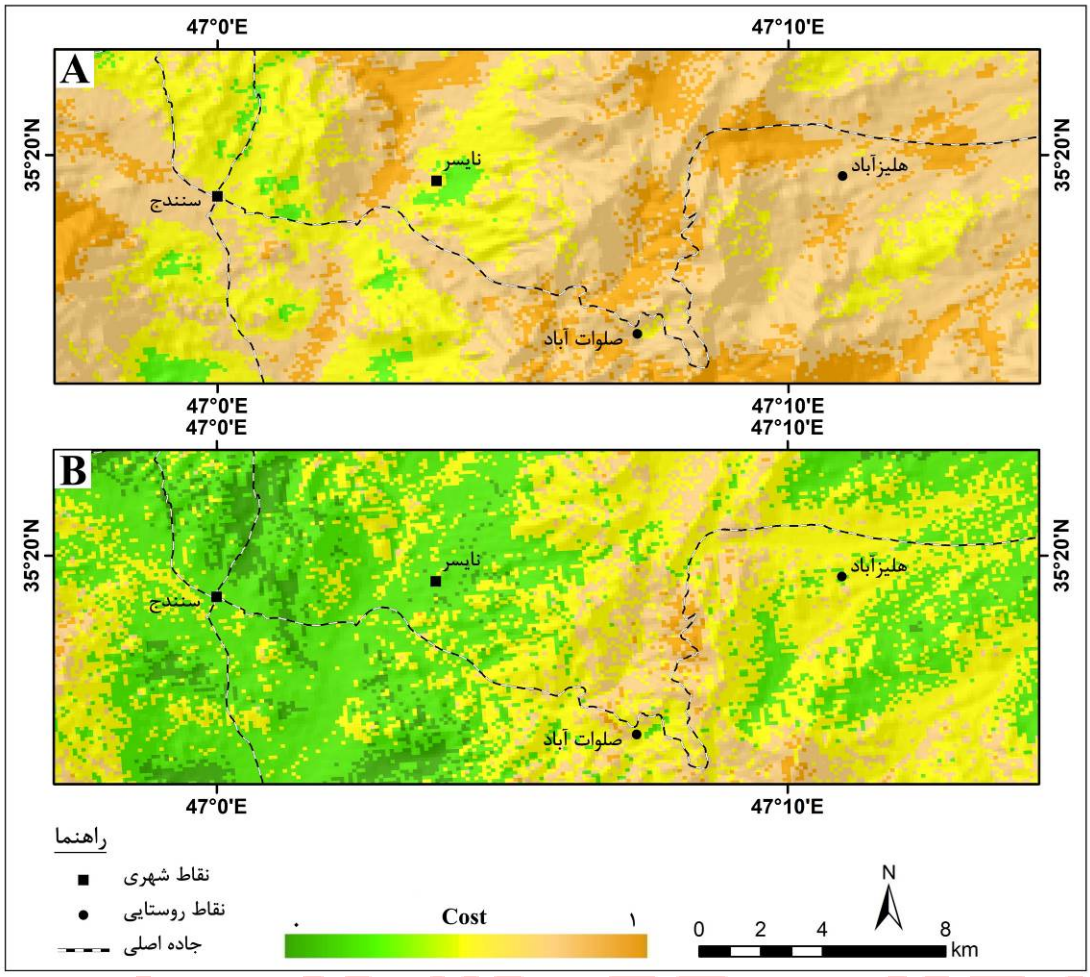
پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر، در این بخش با استفاده از نظرات کارشناسان و مدل AHP، به لایه‌ها وزن داده شده است (جدول ۱). در ادامه، لایه‌های اطلاعاتی با هم تلفیق شده و به این صورت نقشه Cost Map (هزینه) برای هر دو رویکرد تهیه شده است (شکل ۱۰). نقشه تهیه شده بر اساس رویکرد محیط‌زیستی بیانگر این است که بخش زیادی از مناطقی که دارای شیب و ارتفاع کمی هستند ولی تراکم پوشش‌گیاهی زیادی دارند، به‌عنوان مناطق با هزینه بالا شناخته شده است. در نقشه تهیه شده با رویکرد توپوگرافی، مناطقی که شیب و ارتفاع زیادی دارند، به‌عنوان مناطق با هزینه بالا شناخته شده است.

جدول ۱: وزن‌دهی به پارامترها بر اساس مدل AHP

ردیف	رویکرد محیط‌زیستی		رویکرد توپوگرافیک	
	پارامتر	وزن	پارامتر	وزن
۱	پوشش‌گیاهی	۰/۲۴۰	شیب	۰/۳۲۰
۲	فاصله از نقاط روستایی	۰/۱۱۵	جهت شیب	۰/۰۷۰
۳	شیب	۰/۲۰۵	ارتفاع	۰/۲۴۰
٤	جهت شیب	۰/۰۵۵	فاصله از رودخانه	۰/۱۳۰
۵	ارتفاع	۰/۰۷۰	لیتولوژی	۰/۱۱۰
٦	فاصله از رودخانه	۰/۱۲۵	فاصله از گسل	۰/۱۳۰

نسریه علمی پژوهشی «اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

۷	لیتولوژی	۰/۰۷۵	–	–
۸	فاصله از گسل	۰/۱۱۵	–	–
مجموع	–	۱	–	۱

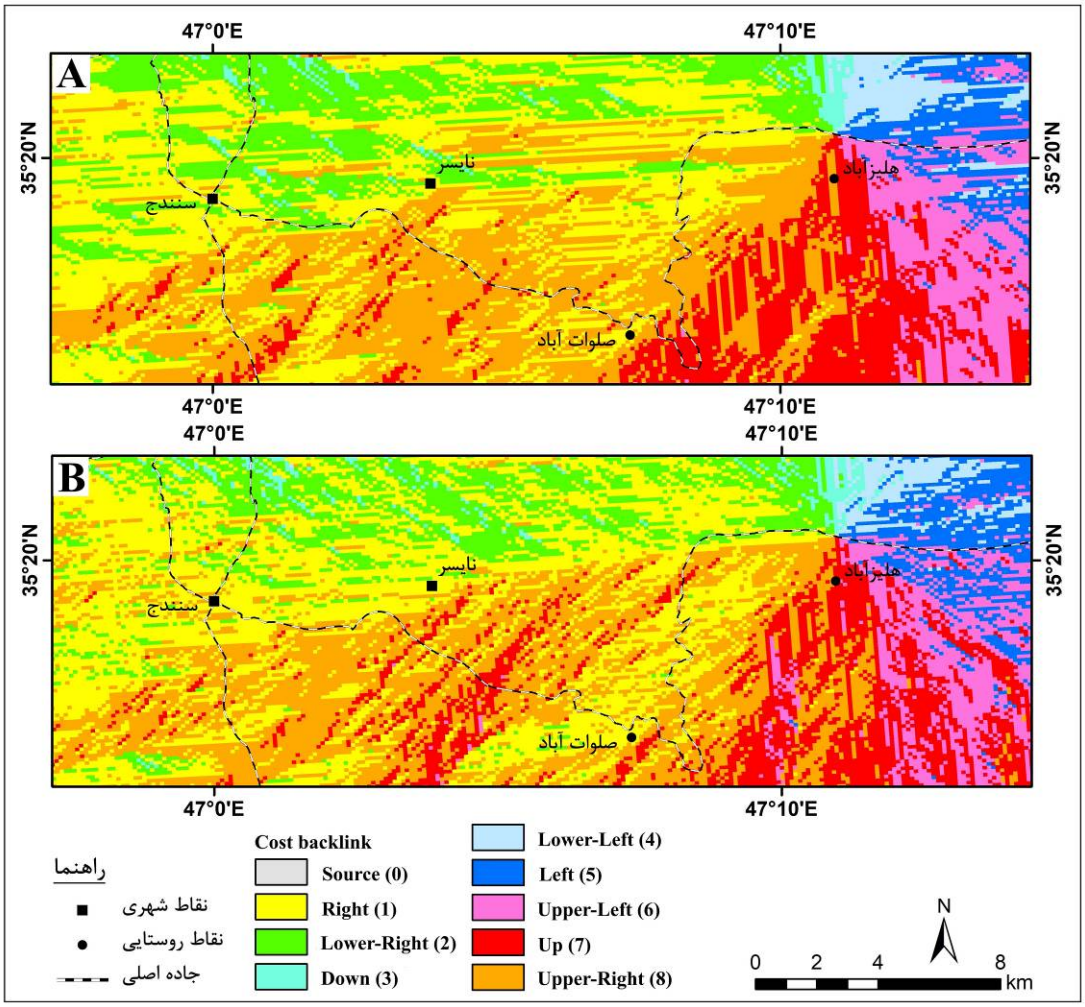


شکل ۱۰: نقشه‌های Cost Map، A) بر اساس رویکرد محیط‌زیستی B) بر اساس رویکرد توپوگرافی

۳-۳-مسیریابی و استخراج مسیر بهینه

نتایج حاصل از تحلیل‌های مکانی نشان داد که الگوی توزیع هزینه عبور در دو رویکرد محیط‌زیستی و توپوگرافی تفاوت قابل‌توجهی دارد. نقشه Backlink (شکل ۱۱) جهت‌های بهینه حرکت از مبدأ به مقصد را در هر دو رویکرد نمایش می‌دهد و بیانگر آن است که در مسیر محیط‌زیستی، جهت‌گیری مسیرها عمدتاً به‌سمت نواحی با پوشش گیاهی کمتر و شیب ملایم‌تر گرایش دارد. در مقابل، مسیر استخراج‌شده بر اساس رویکرد توپوگرافی، به‌دلیل وزن بالاتر عوامل ارتفاع و شیب، از مناطق مرتفع‌تر و ناهموارتر عبور می‌کند. به‌طور کلی، مقایسه‌ی دو مسیر نشان می‌دهد که رویکرد محیط‌زیستی

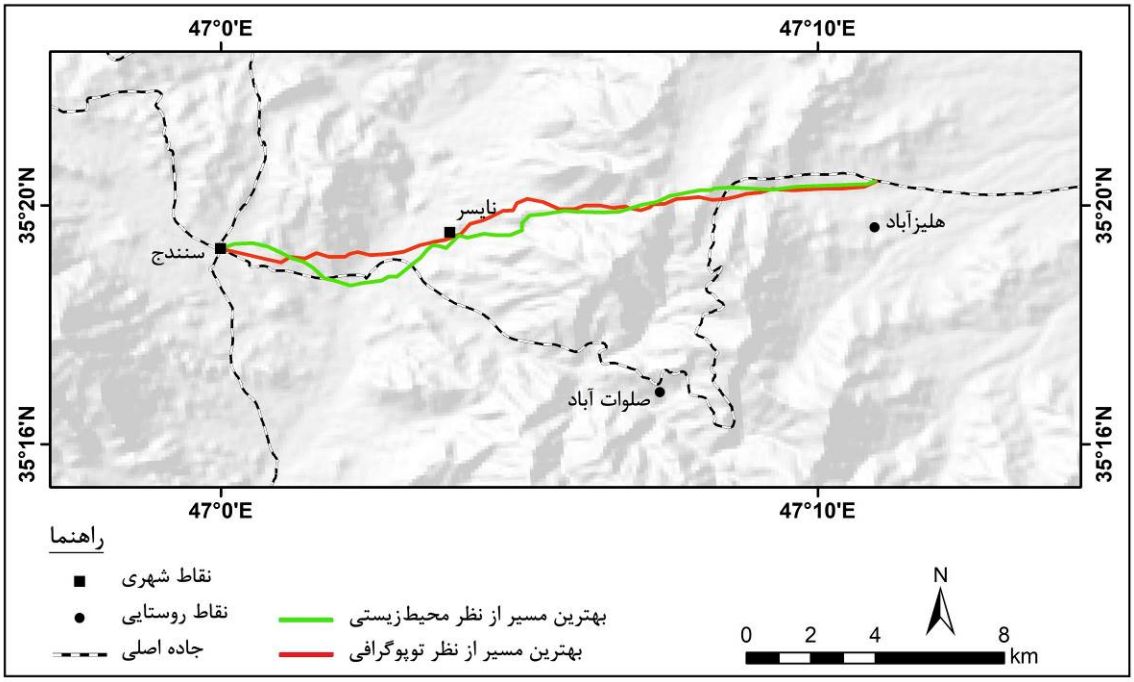
گرچه طول مسیر بیش‌تری را ایجاد کرده است، اما از منظر حداقل‌سازی تأثیرات بر محیط‌زیست گزینه‌ی مطلوب‌تری محسوب می‌شود. در مقابل، مسیر توپوگرافی با تمرکز بر کاهش دشواری‌های فنی و مهندسی احداث جاده، گزینه‌ای کاراتر از نظر تطبیق با شرایط زمین‌شناسی منطقه است.



شکل ۱۱: نقشه‌های Backlink، A) بر اساس رویکرد محیط‌زیستی B) بر اساس رویکرد توپوگرافی

پس از تهیه نقشه Backlink، نقشه نهایی مسیرهای بهینه از دهگلان (نزدیک روستای هلیزآباد) تا سنندج (مرکز شهر سنندج) تهیه شده است (شکل ۱۲). بررسی مسیرهای پیشنهادی نشان می‌دهد که هر دو مسیر پیشنهادی نسبت به مسیر کنونی (با طول ۳۰/۹ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۸۵ درصد) از طول و انحراف کم‌تری برخوردار هستند. مسیر مبتنی بر رویکرد توپوگرافی با طول ۱۷/۷۹ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۰۷ درصد، کارآمدترین گزینه از نظر طول و انطباق مکانی محسوب می‌شود. در مقابل، مسیر حاصل از رویکرد محیط‌زیستی با طول ۱۸/۳۱ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۱۰ درصد، اگرچه اندکی طولانی‌تر است، اما با عبور از نواحی دارای تراکم پوشش گیاهی کمتر، شیب ملایم‌تر و فاصله

مناسب از گسل‌ها و رودخانه‌ها، اثرات منفی کم‌تری بر محیط‌زیست وارد می‌کند. به‌طور کلی، مقایسه سه مسیر نشان می‌دهد که رویکرد محیط‌زیستی با وجود طول بیشتر، از نظر حفاظت از اکوسیستم و کاهش مخاطرات زمین‌شناسی گزینه‌ی مطلوب‌تری است، در حالی که رویکرد توپوگرافی از نظر فنی و هزینه‌های اجرایی اولویت دارد. ترکیب این دو رویکرد می‌تواند در برنامه‌ریزی مسیرهای جدید، توازنی میان ملاحظات فنی و الزامات حفاظتی ایجاد کند و تصمیم‌گیری نهایی را با دقت و پایداری بیش‌تری همراه سازد.



شکل ۱۲: نقشه مسیرهای بهینه شناسایی شده بر اساس رویکردهای محیط‌زیستی و توپوگرافی

جدول ۲: وضعیت طول و شاخص انحراف مسیرها

مسیر	طول مسیر مستقیم (کیلومتر)	طول قابل احداث (کیلومتر)	شاخص انحراف (درصد)
مسیر کنونی	۱۶/۷	۳۰/۹	۱۸۵
مسیر پیشنهادی بر اساس رویکرد محیط‌زیستی	۱۶/۷	۱۸/۳۱	۱۱۰
مسیر پیشنهادی بر اساس رویکرد توپوگرافی	۱۶/۷	۱۷/۷۹	۱۰۷

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

٤-بحث

روش تحلیلی به‌کاررفته در این پژوهش، یعنی تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP) و نیز طراحی دو رویکرد موازی محیط‌زیستی و توپوگرافی، امکان مقایسه نظام‌مند گزینه‌های مسیر را فراهم آورده است. مقایسه یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که دسته اول پژوهش‌ها (اکمت و همکاران،

۲۰۲۲؛ سلجوقی و همکاران، ۱٤۰۲) عمدتاً بر بهینه‌سازی ریاضی و الگوریتم‌های ژنتیک متمرکز بوده‌اند و کمتر به تلفیق هم‌زمان معیارهای مکانی چندگانه در محیط GIS پرداخته‌اند. در مقابل، پژوهش حاضر با لحاظ هم‌زمان هشت معیار محیط‌زیستی و شش معیار توپوگرافی در قالب نقشه‌های هزینه، با یافته‌های داورپناه و وحیدنیا (۱٤۰۰) هم‌سو است که دقت مسیریابی را وابسته به توانایی تحلیل هم‌زمان چندین معیار در GIS دانستند.

دسته دوم پژوهش‌ها (موساکو و همکاران، ۲۰۲۰؛ یلدریم و کادی، ۲۰۲۰) عمدتاً به معرفی یک کریدور بهینه واحد بسنده کرده‌اند. نوآوری پژوهش حاضر در آن است که بر خلاف آن‌ها، دو گزینه مسیر مجزا با منطق وزن‌دهی متفاوت تولید و به‌صورت کمی با مسیر کنونی سنجیده شده است. این ساختار دو رویکردی، امکان تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر را برای برنامه‌ریزان فراهم می‌آورد و با نتیجه ممبینی و جزایرمقدسی (۱٤۰۳) که ارزش و تأثیر معیارها را در مسیرهای مختلف یکسان ندانستند، هم‌خوانی دارد. همچنین یافته‌ها تأییدی بر نتیجه یلدریم و کادی (۲۰۲۰) است که مسیرهای تولیدشده با روش‌های چندمعیاره را از نظر طول و ریسک مناسب‌تر از جاده‌های موجود یافتند.

دسته سوم پژوهش‌ها (پارساخو و یزدانی، ۱٤۰۰؛ حبیبیان و همکاران، ۱۳۹٦) صرفاً بر ملاحظات محیط‌زیستی تأکید داشته‌اند، در حالی که پژوهش حاضر با ارائه هم‌زمان دو رویکرد، تعادلی میان ملاحظات فنی–اجرایی و الزامات حفاظت محیط‌زیستی برقرار کرده است. با وجود پژوهش‌های ارزشمند در مورد مخاطرات دامنه‌ای گردنه صلوات‌آباد (یوسفی و یاراحمدی، ۱۳۹۸؛ خدامرادی و همکاران، ۱٤۰٤)، تاکنون مطالعه‌ای به شناسایی کریدور بهینه با تلفیق پارامترهای محیط‌زیستی و توپوگرافی در محور دهگلان–سنندج نپرداخته بود و پژوهش حاضر این خلأ را پر می‌کند.

بر این اساس، نوآوری تحقیق را می‌توان در سه محور خلاصه کرد: نخست، ارائه و مقایسه هم‌زمان دو گزینه مسیر با معیارهای متفاوت در یک منطقه کوهستانی حساس که پیش‌تر فقط از منظر مخاطرات دامنه‌ای مطالعه شده بود؛ دوم، سنجش کمی مسیرهای پیشنهادی در برابر مسیر موجود با شاخص انحراف، به‌جای بسنده کردن به توصیف کیفی برتری مسیر؛ و سوم، تفکیک صریح مقیاس کلان (شناسایی کریدور) از مقیاس خرد (طراحی اجرایی) که در بسیاری از مطالعات پیشین مبهم مانده است. از این منظر، مسیر کنونی (جاده اصلی موجود) نه به‌عنوان یک گزینه رقیب، بلکه به‌عنوان مبنای سنجش نشان می‌دهد که هر دو مسیر پیشنهادی، صرف‌نظر از تأکید بر ملاحظات محیط‌زیستی یا توپوگرافی، کارایی بالاتری نسبت به وضع موجود دارند؛ با این تفاوت که مسیر توپوگرافی اولویت را به کارایی فنی و مسیر محیط‌زیستی اولویت را به پایداری اکولوژیکی می‌دهد. این تعادل، همان چیزی است که در تصمیم‌گیری‌های واقعی برنامه‌ریزی راه، امکان انتخاب آگاهانه بر اساس اولویت‌های سیاست‌گذاری را فراهم می‌سازد.

۵–نتیجه‌گیری

بررسی نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق داده‌های مکانی با رویکرد تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، می‌تواند ابزاری کارآمد برای شناسایی کریدورهای بهینه در محیط GIS باشد. مقایسه دو رویکرد محیط‌زیستی و توپوگرافی در مسیریابی میان دهگلان و سنندج نشان داد که هر رویکرد با تأکید بر معیارهای متفاوت، خروجی‌های متمایزی ارائه می‌دهد. مسیر

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

به‌دست‌آمده از رویکرد محیط‌زیستی (با طول قابل‌احداث ۱۸/۳۱ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۱۰ درصد) با عبور از نواحی دارای پوشش گیاهی کمتر، شیب ملایم‌تر و فاصله مناسب از گسل‌ها و رودخانه‌ها، از لحاظ کاهش اثرات انسانی بر محیط‌زیست گزینه مطلوب‌تری است، در حالی که مسیر برآمده از رویکرد توپوگرافی (با طول قابل‌احداث ۱۷/۷۹ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۰۷ درصد) از مسیر کوتاه‌تری برخوردار بوده و از منظر هزینه‌های احداث و مسائل فنی، انتخاب مناسب‌تری محسوب می‌شود. مسیر کنونی نیز با طول قابل‌احداث ۳۰/۹ کیلومتر و شاخص انحراف ۱۸۵ درصد، کم‌ترین کارایی را در بین این سه مسیر داراست.

با این حال، این پژوهش به‌عنوان یک مطالعه کلان‌نگر و در سطح شناسایی اولیه برای انتخاب مسیر اولیه طراحی شده است و نمی‌توان از خروجی آن به‌عنوان «مسیر نهایی اجرایی» یاد کرد. از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی ۱۲٫۵ متر که برای طراحی دقیق مسیر (با مقیاس ۱:۲۰۰۰ و کوچک‌تر) کافی نیست، (۲) عدم لحاظ پارامترهای ژئوتکنیکی نظیر ظرفیت باربری خاک، نوع و ضخامت لایه‌های سطحی و سطح ایستابی، (۳) صرف‌نظر از استانداردهای هندسی راه‌سازی نظیر حداقل شعاع قوس افقی، حداکثر شیب طولی مجاز و سرعت طرح، (٤) عدم بررسی هزینه‌های واقعی اجرایی از جمله برش، خاکریز، پل‌سازی و ابنیه فنی، (۵) عدم انجام تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis) بر روی وزن‌های اختصاص‌یافته به پارامترها.

در مجموع، یافته‌ها بیانگر آن است که استفاده از ترکیب معیارهای چندگانه، به‌ویژه در قالب مدل‌های وزنی و تلفیق لایه‌ها، می‌تواند رویکردی مؤثر در تصمیم‌گیری‌های مکانی و شناسایی کریدورهای پایدار و سازگار با محیط‌زیست فراهم آورد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از رویکردهای تلفیقی بهره گرفته شود که بتوانند هم‌زمان مؤلفه‌های محیطی، توپوگرافی، اجتماعی و اقتصادی را در فرآیند مسیریابی لحاظ کنند. به‌کارگیری تکنیک‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در کنار روش‌های کلاسیک نظیر AHP می‌تواند دقت وزن‌دهی به لایه‌ها و اولویت‌بندی مسیرها را افزایش دهد. همچنین، استفاده از داده‌های جدید سنجش‌ازدور با قدرت تفکیک مکانی بالا و به‌روزرسانی لایه‌های محیطی (نظیر پوشش‌گیاهی، فرسایش و کاربری اراضی) موجب واقع‌گراتر شدن نتایج خواهد شد. از سوی دیگر، پیشنهاد می‌شود ارزیابی اقتصادی و محیط‌زیستی مسیرهای پیشنهادی به‌صورت هم‌زمان انجام شود تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند با دیدی جامع‌تر میان هزینه ساخت و پایداری اکولوژیکی تعادل برقرار کنند. در نهایت، تأکید می‌گردد که برای طراحی نهایی مسیر، انجام مطالعات تکمیلی در مقیاس ۱:۲۰۰۰ با در نظر گرفتن استانداردهای هندسی و ژئوتکنیکی ضروری است.

منابع

- پارساخو، آیدین، یزدانی، مهرسا. (۱٤۰۰). تعیین مناسب ترین مسیر پیشنهادی از طریق تحلیل سلسله مراتبی (AHP) معیارهای ارزیابی شبکه جاده‌های جنگلی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۳(۳)، ۲۲۷-۲۳٦. https://doi.org/10.30495/jest.2019.29189.3775

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

- حبیبیان، میقات؛ هامونی، پرهام؛ حق‌شناس، پریسا. (۱۳۹۶). تعیین بهترین مسیر احداث خط دوچرخه سواری با رویکرد حمل ونقل پایدار (مطالعه موردی: منطقه ۱ شهر شیراز). *مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)*، ۴۹(۳)، ۶۰۲-۵۹۳. https://doi.org/10.22060/ceej.2016.683
- خدامرادی, فرهاد؛ روستایی, شهرام؛ زارعیان, علی. (۱۴۰۴). شناسایی و پهنه‌بندی حرکات پیوسته مواد دامنه‌ای با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ و ارتباط آن با کاربری اراضی، مطالعه موردی: گردنه صلوات‌آباد استان کردستان. *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۲(۴۴)، ۱۷-۱. https://doi.org/10.22034/hyd.2025.64092.1768
- داورپناه، امین؛ وحیدنیا، محمدحسن. (۱۴۰۰). تعیین مسیر بهینه خطوط انتقال آب با مقایسه روش‌های مختلف تصمیم-گیری چندمعیاره و الگوریتم مسیر بهینه در رستر (مطالعه موردی: از ارداک تا مشهد). *فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی منابع آب*، ۱۴(۵۱)، ۵۶-۳۹. https://dx.doi.org/10.30495/wej.2022.22648.2193
- سلجوقی، میثم؛ حاجب، محمد؛ متکان، علی‌اکبر. (۱۴۰۲). مسیریابی بهینه جاده با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: استان سمنان، مسیر دامغان به دیباج). *مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، ۱۱(۱)، ۱۰۳-۸۳. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089635.1402.11.1.5.6
- مصطفی، محسن؛ شتایی جویباری، شعبان؛ لطفعلیان مجید؛ سعدالدین، امیر. (۱۳۹۶). ارزیابی اتصال شبکه‌ای جاده‌های حوزه‌های آبخیز کوهستانی با استفاده از تئوری گراف در حوزه چهل چای استان گلستان. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۸(۱۵)، ۲۶۷-۲۵۹. http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.8.15.259
- ممبینی، علی؛ جزایری مقدس، سیدمحمود. (۱۴۰۳). انتخاب گزینه مناسب مسیرهای جاده‌ای در مناطق کوهستانی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره. *نشریه جاده*، ۳۲(۴)، ۴۱۴-۴۰۱. https://doi.org/10.22034/road.2024.433565.2236
- یوسفی، حسین؛ یاراحمدی، یزدان. (۱۳۹۸). ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل شبکه (ANP) و منطق فازی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ صلوات‌آباد، سنندج). *مجله اکوهیدرولوژی*، ۶(۴)، ۱۰۰۲-۹۹۳. https://doi.org/10.22059/ije.2019.282485.1128
- Akay, A. E., Wing, M. G., & Sivrikaya, F. (2012). A GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: A case study in Mediterranean Region of Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment, 184,* 1391–1407. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2049-z
- Akhmet, A., Hare, W., & Lucet, Y. (2022). Biobjective optimization for road vertical alignment design. *Computers & Operations Research*, *143*, 1-20. https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105764
- Chandra Sekar, P., Rajasekar, P., Suresh Kumar, S., Manivasagam, M. A., & Subash Kumar, C. S. (2023). Firefly optimized resource control and routing stability in MANET. *Engineering Proceedings*, *59*(1), 18. https://doi.org/10.3390/engproc2023059018
- Davarpanah, A., & Vahidnia, M. H. (2022). Optimal route finding of water transmission lines using different MCDM methods and the least-cost path algorithm in a raster GIS (Case study: from Ardak to Mashhad). *Water Resources Engineering Journal*, *14*(51), 39-56. https://dx.doi.org/10.30495/wej.2022.22648.2193 (In Persian)
- Habibian, M., Hamouni, P., & Haghshenas, P. (2017). Determining the best path for bicycle lane construction using sustainable transportation approach (Case study: District 1 of Shiraz). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *49*(3), 593-602. https://doi.org/10.22060/ceej.2016.683 (In Persian)

مقاله در مرحله انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

- Hare, W., Hossain, S., Lucet, Y., & Rahman, F. (2014). Models and strategies for efficiently determining an optimal vertical alignment of roads. *Computers & Operations Research, 44*, 161-173. https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.11.005
- Hare, W., Lucet, Y., & Rahman, F. (2015). A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and side-slopes. *European Journal of Operational Research, 241*, 631-641. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.035
- Khodamoradi, F., Roostaei, S., & Zareiyan, A. (2025). Identification and mapping of continuous landslide material movements using Sentinel-1 radar images and their relationship with land use: Case study of Salavat Abad Pass, Kurdistan Province. *Journal of Hydrogeomorphology, 12*(44), 1-17. https://doi.org/10.22034/hyd.2025.64092.1768 (In Persian)
- Malik, S., & Kim, D. (2019). Optimal travel route recommendation mechanism based on neural networks and particle swarm optimization for efficient tourism using tourist vehicular data. *Sustainability, 11*(12), 3357. https://doi.org/10.3390/su11123357
- Mejia-Aguilar, A., Strapazzon, G., Fajardo-Figueroa, E., & van Veelen, M. J. (2026). Strategic vertical port placement and routing of unmanned aerial vehicles for automated defibrillator delivery in mountainous areas. *Drones, 10*(1), 38. https://doi.org/10.3390/drones10010038
- Mombeini, A., & Jazayeri Moghadas, S. M. (2024). Selecting the appropriate option of road routes in mountainous areas using multi-criteria decision model. *Road Journal, 32*(4), 401-414. https://doi.org/10.22034/road.2024.433565.2236 (In Persian)
- Mosaku, I. A., Oguntade, O. F., Ifeanyi, V. I., Balogun, A. L., & Jimoh, O. A. (2020). Evolving a comprehensive geomatics multi-criteria evaluation index model for optimal pipeline route selection. *Structure and Infrastructure Engineering, 16*(10), 1382–1396. https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1712435
- Mostafa, M., Shataee Jouibary, S., Lotfalian, M., & Sadoddin, A. (2017). Assessment of road network connectivity using graph theory in the Chehel-Chai Watershed, Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research, 8*(15), 259-267. http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.8.15.259 (In Persian)
- Padillo, A., Ruiz, D., Torija, A., & Ángel, R. (2016). Selection of suitable alternatives to reduce the environmental impact of road traffic noise using a fuzzy multi-criteria decision model. *Environmental Impact Assessment Review, 61*, 8-18. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.06.003
- Parsakhoo, A., & Yazdani, M. (2021). Determination of the most appropriate recommended route using analytical hierarchy process (AHP) of forest road network evaluation criteria in geographical information system (GIS). *Environmental Science and Technology, 23*(3), 227-236. https://doi.org/10.30495/jest.2019.29189.3775 (In Persian)
- Said, D., Foda, A., Abdelhalim, A., & Elkhedr, M. (2024). Performance-based route selection for mountainous highways: A numerical approach to addressing safety, hydrological, and geological aspects. *Applied Sciences, 14*(13), 5844. https://doi.org/10.3390/app14135844
- Saljughi, M., Hajeb, M., & Matkan, A. (2023). Path optimization with genetic algorithm (Case study: Road of Damghan to Dibaj in Semnan County). *Journal of Geospatial Information Technology, 11*(1), 83-103. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089635.1402.11.1.5.6 (In Persian)
- Sushma, M., & Maji, A. (2020). Modified motion planning algorithm for horizontal highway alignment development. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 35*, 1-14. https://doi.org/10.1111/mice.12534
- Tacnet, J. M., Mermet, E., & Maneerat, S. (2012, April 24-27). Analysis of importance of road networks exposed to natural hazards. In *Multidisciplinary Research on Geographical Information in Europe and Beyond – Proceedings of the AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science*, Avignon,
France. https://www.researchgate.net/publication/313722343_Analysis_of_importance_of_road_networks_exposed_to_natural_hazards

- Wang, X., Zhao, X., Wang, G., Wang, Q., & Feng, K. (2022). Weather route optimization method of unmanned ship based on continuous dynamic optimal control. *Sustainability, 14*(4), 2165. https://doi.org/10.3390/su14042165
- Wang, Y., Zhang, X., Yuan, S., Huang, H., Tang, Y., & Shi, C. (2025). Analysis and optimization prioritization of school routes in mountainous cities based on child-friendly principles: A case study of Chongqing. *Sustainability, 17*(9), 3936. https://doi.org/10.3390/su17093936
- Yildirim, F., & Kadi, F. (2020). Production of optimum forest roads and comparison of these routes with current forest roads: A case study in Maçka, Turkey. *Geocarto International*, 1–23. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1818852
- Yousefi, H., & Yarahmadi, Y. (2019). Landslide hazard assessment and zonation using a network analysis (ANP) and the fuzzy logic model (Case study: Salavat Abad Basin, Sanandaj). *Journal of Ecohydrology, 6*(4), 993-1002. https://doi.org/10.22059/ije.2019.282485.1128 (In Persian)
- Zhang, H., Pu, H., Schonfeld, P., Song, T., Li, W., Wang, J., Peng, X., & Hu, J. (2020). Multiobjective railway alignment optimization considering costs and environmental impacts. *Applied Soft Computing, 89*, 1-23. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106105
- Zhang, Y., Yuan, C., & Wu, J. (2020). Vehicle routing optimization of instant distribution routing based on customer satisfaction. *Information, 11*(1), 36. https://doi.org/10.3390/info11010036

Determining the Optimal Communication Route by Analyzing Environmental and Topographic Approaches (Case Study: Dehgolan-Sanandaj Route)

Abstract

This research, in line with the development and optimization of transportation infrastructures, has analyzed and determined the optimal route between Dehgolan and Sanandaj within a Geographic Information System (GIS) environment. Selecting an appropriate route plays a vital role in reducing implementation costs, time, and also minimizing environmental impacts. The primary objective of this study is to compare two distinct approaches to route selection using GIS and the AHP method: the first approach focuses on environmental considerations, and the second prioritizes topographical factors, aiming to identify a route that, while possessing technical efficiency, inflicts the least harm on the environment. In this research, after collecting relevant information layers including vegetation cover, slope, elevation, and other influential criteria, these layers were integrated and weighted within the GIS environment. The weighting process was performed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) based on expert judgments to create Cost Maps for each of the environmental and topographical approaches. Subsequently, using the Cost Distance and Backlink tools in ArcGIS Pro software, the least-cost paths from origin to destination were calculated for both scenarios, and finally, the ultimate route was extracted using the Cost Path tool. The results of the analysis indicated that both approaches provide more optimal routes compared to the current route (with a length of 30.9 km and a deviation index of 185%). The environmental route, with a length of approximately 18.31 km and a deviation index of 110%, selects areas with lesser environmental impacts. In contrast, the topographical route, with a length of approximately 17.79 km and a deviation index of 107%, is technically more efficient in terms of route length. These findings emphasize the importance of considering multiple criteria and balancing technical and environmental considerations in designing sustainable linear routes.

Keywords: Optimal Route, Environmental Considerations, Topographical Factors, Dehgolan-Sanandaj Road.