



مسیریابی بهینه خط لوله نفت با رویکرد تحلیل هزینه و ارزیابی کاربری اراضی در محیط GIS (مطالعه موردی: ممسنی - گچساران)

حمید باقری^{۱*}

^{۱*} گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

(Email: hamidbagheri87@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۰۳/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸)

چکیده

طراحی بهینه مسیر خطوط انتقال نفت، یکی از مهم‌ترین مراحل در توسعه زیرساخت‌های انرژی و کاهش مخاطرات اقتصادی و زیست‌محیطی پروژه‌های بزرگ انتقال است. با توجه به نقش مؤثر داده‌های مکانی و ابزارهای نوین تحلیل فضایی در تصمیم‌گیری‌های زیرساختی، پژوهش حاضر به بررسی و طراحی مسیر خط لوله انتقال نفت بین پتروشیمی‌های ممسنی و گچساران با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) می‌پردازد. در این تحقیق از دو رویکرد اصلی برای مسیریابی استفاده شد. ابتدا با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه، نقشه شیب تهیه و با استفاده از تحلیل هزینه (Cost Distance) مسیر اولیه طراحی گردید. در ادامه، نقشه کاربری اراضی منطقه به داده رستری تبدیل شد و با تعیین اولویت‌های مکانی شامل اراضی کشاورزی، جنگل‌ها، مناطق مسکونی، مرداب‌ها و شوره‌زارها، مسیر دوم پیشنهاد شد. نتایج حاصل از مقایسه دو مسیر طراحی‌شده نشان داد مسیر مبتنی بر تحلیل کاربری اراضی، با طول تقریبی ۸۹٫۶ کیلومتر، در مقایسه با مسیر مبتنی بر شیب منطقه با طول ۹۵٫۴ کیلومتر، کوتاه‌تر بوده و همچنین از مناطق پرخطر و حساس همچون مناطق شهری و زمین‌های پرکاربرد اجتناب کرده است. این مسیر از منظر اقتصادی نیز هزینه کمتری در ساخت و اجرا خواهد داشت. همچنین استفاده از داده‌های طبقه‌بندی‌شده کاربری اراضی در فرایند مسیریابی، سبب افزایش دقت و کاهش خطا در انتخاب مسیر نهایی شد. این پژوهش با بهره‌گیری از قابلیت‌های تحلیلی GIS و ترکیب لایه‌های مکانی مختلف، الگویی قابل‌اعتماد برای مسیریابی خط لوله در مناطق با شرایط پیچیده توپوگرافی ارائه می‌دهد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند راهگشای پروژه‌های مشابه در حوزه انتقال انرژی و توسعه پایدار زیرساختی در سایر نواحی کشور باشد.

کلمات کلیدی

مسیریابی خط لوله، تحلیل هزینه، کاربری اراضی، مدل رقومی ارتفاع، سیستم اطلاعات مکانی، ممسنی، گچساران.



Optimal Routing of Oil Pipeline Using Cost Analysis and Land Use Evaluation in a GIS Environment

(Case Study: Mamasani – Gachsaran)

Hamid Bagheri^{1*}

^{1*} Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, National University of Skill, Tehran, Iran

(Email: hamidbagheri87@gmail.com)

(Date of received: 31/05/2025, Date of accepted: 19/09/2025)

ABSTRACT

Optimizing the route of oil transmission pipelines is one of the most critical phases in the development of energy infrastructure and in reducing the economic and environmental risks of large-scale transmission projects. Given the pivotal role of spatial data and advanced geospatial analysis tools in infrastructure decision-making, the present study focuses on the design and routing of an oil pipeline between the petrochemical facilities of Mamasani and Gachsaran using Geographic Information Systems (GIS). Two main approaches were employed in this research. First, a Digital Elevation Model (DEM) of the region was used to generate a slope map, and a preliminary route was designed through Cost Distance analysis. Next, the land use map of the study area was converted into raster data, and a second route was proposed based on spatial prioritization of land types including agricultural lands, forests, residential areas, wetlands, and salt marshes. A comparison between the two designed routes revealed that the land use-based route, with an approximate length of 89.6 kilometers, was shorter than the slope-based route (95.4 kilometers) and also avoided high-risk and sensitive areas such as urban zones and heavily utilized lands. This route is also more cost-effective in terms of construction and implementation. Furthermore, the use of classified land use data in the routing process significantly enhanced accuracy and reduced errors in final path selection. By leveraging GIS analytical capabilities and integrating various spatial layers, this study offers a reliable model for pipeline routing in areas with complex topographic conditions. The findings of this research can inform similar energy transmission projects and contribute to sustainable infrastructure development across other regions of the country.

Keywords:

Pipeline Routing, Cost Analysis, Land Use, Digital Elevation Model (DEM), GIS, Mamasani, Gachsaran.



۱- مقدمه

در دنیای معاصر، رشد فزاینده مصرف انرژی و توسعه صنایع وابسته به نفت و گاز، ضرورت ایجاد شبکه‌های انتقال کارآمد و ایمن را بیش از پیش آشکار ساخته است. خطوط لوله انتقال نفت به عنوان یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های انتقال منابع انرژی از محل استخراج به مراکز پالایش و مصرف، نقش بسیار مهمی در زیرساخت‌های ملی کشورها ایفا می‌کند. طراحی بهینه مسیر این خطوط لوله، به‌ویژه در مناطق دارای ناهمواری‌های طبیعی یا تراکم جمعیتی بالا، همواره یکی از چالش‌های اساسی مهندسان و برنامه‌ریزان پروژه‌های انرژی بوده است. در دهه‌های گذشته، فرآیند طراحی مسیر خطوط لوله عمدتاً به روش‌های سنتی و مبتنی بر بررسی‌های میدانی و نقشه‌های کاغذی انجام می‌گرفت. این روش‌ها ضمن داشتن محدودیت‌های زمانی و مکانی، اغلب از دقت پایین و عدم توجه به تحلیل همزمان عوامل متعدد طبیعی و انسانی رنج می‌بردند. از سوی دیگر، با توجه به حجم سرمایه‌گذاری‌های گسترده در پروژه‌های انتقال نفت، کوچک‌ترین خطا در طراحی مسیر می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها، کاهش بهره‌وری و حتی وقوع بحران‌های زیست‌محیطی یا اجتماعی شود. از این‌رو، بهره‌گیری از روش‌های نوین در طراحی خطوط لوله، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در مدیریت پروژه‌های نفتی و توسعه پایدار محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های مکانی و ظهور سیستم اطلاعات مکانی (GIS) تحول بزرگی در عرصه تحلیل‌های فضایی و تصمیم‌گیری‌های مهندسی ایجاد کرده است. GIS به عنوان بستری قدرتمند برای جمع‌آوری، پردازش، تحلیل و نمایش داده‌های مکانی، امکان بررسی همزمان لایه‌های متعددی از اطلاعات مانند توپوگرافی، شیب، کاربری اراضی، منابع آب، زیستگاه‌های حساس، زیرساخت‌های انسانی، و سایر عوامل مؤثر بر طراحی مسیر خطوط لوله را فراهم می‌سازد. این قابلیت باعث شده است که طراحی مسیر خطوط انتقال، از یک فرایند تجربی و مبتنی بر قضاوت فردی، به یک تحلیل سیستماتیک، علمی و قابل تکرار تبدیل شود. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های GIS در طراحی مسیر خطوط لوله، امکان اجرای مدل‌های مسیریابی بر اساس تحلیل هزینه‌های فضایی (Cost Distance Analysis) و وزن‌دهی به عوامل مختلف طبیعی و انسانی است. با این روش، مسیرهایی پیشنهاد می‌شود که ضمن رعایت معیارهای فنی و اقتصادی، کمترین تأثیر منفی را بر محیط‌زیست و جوامع انسانی داشته باشند. به‌ویژه در مناطق کوهستانی یا مناطق دارای تنوع بالای کاربری اراضی، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری فضایی در محیط GIS به انتخاب مسیرهایی منجر می‌شود که توازن میان کارایی، ایمنی و پایداری محیطی را حفظ می‌کند. در ایران نیز به عنوان کشوری با ذخایر گسترده نفت و گاز و تنوع شدید اقلیمی و توپوگرافی، استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی در طراحی و اجرای پروژه‌های انتقال انرژی، ضرورتی دوچندان دارد. طراحی خط لوله نفت در مناطقی همچون استان‌های فارس و کهگیلویه و بویراحمد، که هم دارای ناهمواری‌های کوهستانی هستند و هم پوشش‌های متنوع کاربری از جمله جنگل، مراتع، زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی در آن‌ها وجود دارد، نیازمند دقت بالا و تحلیل چندمعیاره است. غفلت از هر یک از این عوامل می‌تواند در آینده به خسارات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی منجر شود.

در پژوهش حاضر، با هدف طراحی بهینه مسیر خط لوله انتقال نفت بین شهرستان‌های ممسنی و گچساران، از تلفیق داده‌های ارتفاعی (DEM)، نقشه‌های شیب، و نقشه‌های کاربری اراضی در محیط GIS استفاده شده است. این دو شهرستان به عنوان نقاط مبدا و مقصد در یک مسیر انرژی بالقوه تعریف شده‌اند و انتخاب مسیر بهینه بین آن‌ها می‌تواند الگویی برای سایر پروژه‌های مشابه نیز باشد. پژوهش، دو رویکرد موازی را دنبال می‌کند: نخست، طراحی مسیر بر اساس تحلیل توپوگرافی و شیب منطقه با هدف کاهش هزینه‌های اجرایی و سازه‌ای؛ دوم، طراحی مسیر بر اساس اولویت‌بندی کاربری اراضی با تأکید بر اجتناب از نواحی حساس، کاهش خطرات زیست‌محیطی و حفظ ایمنی مسیر.

نوآوری این مطالعه در ترکیب و مقایسه این دو رویکرد تحلیلی است که در نهایت منجر به ارائه مسیر نهایی بهینه‌تری می‌شود. استفاده از مدل Cost Distance و نقشه‌های Reclass شده در تحلیل شیب و کاربری اراضی، و همچنین ارزیابی نتایج در محیط ArcGIS، مبنای روش‌شناسی پژوهش را تشکیل می‌دهد. در انتها، نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به عنوان الگویی کاربردی برای سایر پروژه‌های مشابه انتقال خطوط نفت و گاز در مناطق کوهستانی و ناهموار ایران مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مروری بر فعالیت‌های پیشین

در سال‌های اخیر، فناوری GIS به‌عنوان ابزاری مؤثر برای طراحی مسیر بهینه خطوط انتقال نفت محسوب شده و پژوهش‌های معتبر به تحلیل لایه‌های توپوگرافی، تحلیل هزینه و ارزیابی خطرات محیطی پرداخته‌اند. برای مثال، CostMAP به‌عنوان یک نرم‌افزار متن‌باز، امکان ساخت سطوح هزینه (cost surfaces) با وزن‌دهی به عوامل مکانی و موانع خطی را فراهم می‌کند که در مسیریابی خطوط لوله کاربرد یافته است (Hoover et al. 2019). همچنین مطالعه Mus Project در ترکیه (۲۰۲۲) نشان می‌دهد استفاده از تحلیل Least-Cost Path



و ساده‌سازی خطوط مکانی می‌تواند هزینه ساخت را تا حدود ۲۰٪ کاهش دهد و مسیرهایی قابل قبول و عملیاتی ارائه کند. پژوهش دیگری در شمال یونان (۲۰۲۴) با توسعه ابزار تصمیم‌گیری GIS مبتنی بر معیارهای چندمعیاره و تحلیل خطرات زمین‌لرزه‌ای، موفق به طراحی مسیر گاز شد که هم هزینه و هم خطرات زلزله را در نظر می‌گرفت (Masrakis et al. 2024). در مطالعه Chittumuri et al (۲۰۲۵) با ترکیب GIS و یادگیری ماشین برای تحلیل ریسک flowline ها، دقت شناسایی مناطق پرخطر را افزایش دادند، رویکردی که می‌تواند در مدیریت ایمنی مسیر خطوط نفت نیز کاربردی باشد.

مطالعات صنعتی اخیر در حوزه انرژی مانند گزارش Oilfield Intel (2025) نشان داد به کارگیری داده‌های GIS شامل شیب، مالکیت و تولید در طراحی مسیر می‌تواند هزینه ساخت را تا ۱۵٪ کاهش داده و فرآیندهای محیطی را تسهیل کند. همچنین در پروژه انتقال گاز hydrogen در سطح جهانی (۲۰۲۵)، Weißenburger و همکاران با مدل GIS نشان دادند ترکیب ویژگی‌های جغرافیایی، کاربری اراضی و شرایط اقتصادی سیاسی می‌تواند هزینه‌ها را تا سه برابر متفاوت محاسبه کند. مطالعه‌ای دیگر در چین (۲۰۲۵) چارچوب ارزیابی سریع امنیت خطوط لوله پس از زلزله را ارائه داد که با ترکیب داده‌های میدان SCADA و UAV در بستر GIS، ریسک‌های زمین‌شناختی را تحلیل و مدل‌سازی نمود. این نوع تلفیق داده‌ها می‌تواند به مدیریت موانع طبیعی و شرایط ناهموار مسیر کمک کند. به علاوه، مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند TOPSIS و مدل‌های فازی در تحلیل مسیر خطوط زیر دریا (subsea) نیز کاربرد یافتند که معیار زیست‌محیطی و اقتصادی را با GIS تلفیق کرده‌اند. (Balogun et al. 2017) همچنین مرور سیستماتیک BIM-GIS برای مدیریت دارایی شبکه خطوط گاز در مقاله Demir و Yomralioglu (Energies 2024) بر اهمیت استانداردسازی داده جغرافیایی و یکپارچگی مدل‌ها تأکید داشت.

به علاوه، مدل‌های تصمیم‌گیری مانند Raster-AHP و TOPSIS نیز در مسیر انتخاب خطوط انتقال مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ Yildirim و همکاران (۲۰۱۹) مدل Raster-AHP را برای مسیریابی خطوط گاز در ترکیه به کار بردند که معیارهای فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در نظر گرفتند (Macharia & Mundia (2022). در پروژه Isiolo-Nakuru (کنیا)، از ترکیب GIS و AHP استفاده کردند تا مسیرهایی پیشنهاد کنند که از مناطق حساس مسکونی و کشاورزی دوری کند و هزینه را کاهش دهد.

در نهایت، از مجموع تحلیل‌ها مشخص می‌شود که علیرغم پیشینه قوی در کاربرد GIS برای تحلیل توپوگرافی و Cost Distance، هنوز مطالعه‌ای با محوریت ترکیب دو مسیر موازی (شیب محوری و کاربری اراضی) و اجرای آن در محیط GIS برای یک مطالعه موردی ایرانی مانند ممسنی-گچساران وجود ندارد. بنابراین، پژوهش حاضر با مدل‌سازی دو مسیر مجزا و مقایسه آن‌ها، خلأ موجود را پر می‌کند و چارچوب تصمیم‌گیری کاربردی را ارائه می‌دهد. پژوهش فعلی با ارائه چارچوب تصمیم‌گیری دوگانه، گامی نو در پر کردن این خلأ و ارائه الگویی کاربردی برای پروژه‌های مشابه برداشته است.

۳- مواد و روش تحقیق

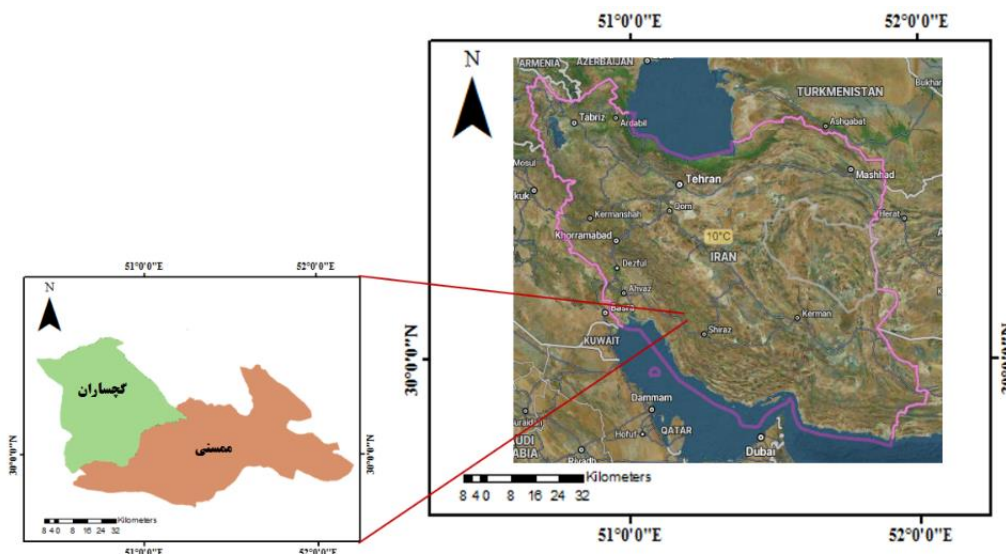
در این تحقیق، به منظور طراحی مسیر بهینه خط لوله انتقال نفت، از روش تحلیلی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. رویکرد کلی پژوهش مبتنی بر مدل Cost Distance و الگوریتم Least Cost Path در محیط نرم‌افزار ArcGIS است. این مدل، توانایی تحلیل و انتخاب مسیر بهینه با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل محیطی، فنی و اقتصادی را فراهم می‌آورد.

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی شامل دو شهرستان ممسنی و گچساران در جنوب غرب ایران است که به عنوان مبدأ و مقصد خط لوله پیشنهادی در این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند. شهرستان ممسنی در شمال غربی استان فارس، در مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع متوسط ۹۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. این شهرستان از شمال با شهرستان رستم، از جنوب با شهرستان‌های کازرون و شیراز، و از غرب با استان کهگیلویه و بویراحمد هم‌مرز است. در مقابل، شهرستان گچساران در استان کهگیلویه و بویراحمد، با مختصات تقریبی ۳۰ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی واقع شده و از شمال به شهرستان چرام، از جنوب به ممسنی، و از غرب به شهرستان بهبهان در استان خوزستان محدود می‌شود. موقعیت جغرافیایی این دو شهرستان، در گذرگاه زاگرس چین‌خورده، دارای تنوع توپوگرافی و حساسیت‌های زمین‌ساختی قابل توجهی است. این ویژگی‌ها، همراه با کاربری‌های متنوع اراضی و مخاطرات



محیطی، طراحی مسیر بهینه خط لوله را نیازمند تحلیل‌های دقیق مکانی و چندمعیاره در محیط GIS می‌سازد. مطابق شکل ۱، موقعیت دقیق جغرافیایی این دو شهرستان و محدوده بین آن‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۱: موقعیت شهرستان‌های ممسنی و گچساران.

۳-۲- داده‌ها و منابع اطلاعاتی

برای انجام این تحقیق، مجموعه‌ای از داده‌های مکانی و توصیفی از منابع معتبر داخلی و بین‌المللی گردآوری و آماده‌سازی شد. لایه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با دقت ۳۰ متر از پایگاه داده جهانی USGS تهیه گردید و به‌عنوان پایه‌ای برای استخراج نقشه شیب و جهت شیب مورد استفاده قرار گرفت. این لایه، نقش کلیدی در تعیین نواحی دارای شیب‌های بحرانی و پرهزینه برای عبور خط لوله ایفا می‌کند. لایه کاربری اراضی از داده‌های سازمان منابع طبیعی کشور استخراج و به‌صورت طبقه‌بندی‌شده بازنمونه‌برداری گردید. این لایه امکان شناسایی مناطق کشاورزی، مسکونی، جنگلی، مرتعی و اراضی بایر را فراهم ساخت تا در فرآیند وزن‌دهی و تحلیل مناسب‌سازی مسیر لحاظ شود. همچنین برای لحاظ کردن مخاطرات طبیعی، لایه‌های گسل‌های زمین‌ساختی از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی کشور و لایه رودخانه‌ها از پایگاه داده ملی منابع آب گردآوری شدند. این لایه‌ها با هدف تعیین مناطق پرخطر و غیرمجاز برای عبور خط لوله در مدل هزینه لحاظ شدند. به‌منظور رعایت الزامات زیست‌محیطی و پرهیز از مناطق حساس اکولوژیکی، نقشه‌های مناطق حفاظت‌شده از سازمان حفاظت محیط زیست دریافت گردید. این مناطق در مدل تحلیل به‌عنوان موانع اکولوژیکی در نظر گرفته شدند و عبور خط لوله از آن‌ها دارای هزینه بسیار بالا در سطح هزینه (Cost Surface) لحاظ گردید. علاوه بر این، نقاط مقصد شامل مراکز پالایشگاهی، ایستگاه‌های پمپاژ و مراکز صنعتی منطقه بر اساس داده‌های میدانی و اطلاعات شرکت‌های بهره‌بردار صنعت نفت گردآوری شد و به‌عنوان مقصد مسیر بهینه تعریف گردیدند. تمامی لایه‌های مکانی به سیستم تصویر UTM منطقه (Zone 39N) (WGS84) منتقل شدند تا دقت تحلیلی و هم‌ترازی داده‌ها تضمین گردد. همچنین، برای استانداردسازی تحلیل، تمامی لایه‌ها به رزولوشن ۳۰ متر بازنمونه‌برداری و به فرمت Raster تبدیل شدند. در مرحله بعد، به هر یک از این لایه‌ها بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و محیطی، وزن عددی مناسب (در مقیاس ۱ تا ۹) اختصاص داده شد تا در ساخت نقشه نهایی سطح هزینه مورد استفاده قرار گیرد.



۳-۳- روش تحقیق

فرآیند اجرای تحقیق در قالب یک چارچوب نظام‌مند و گام‌به‌گام در محیط ArcGIS طراحی و پیاده‌سازی گردید. این فرآیند شامل چهار مرحله اصلی است: آماده‌سازی داده‌ها، استانداردسازی و وزن‌دهی لایه‌ها، تولید نقشه سطح هزینه و استخراج مسیر بهینه. هر یک از این مراحل به‌گونه‌ای طراحی شده که در مجموع، به شناسایی اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین مسیر ممکن برای عبور خط لوله منجر شود.

۳-۳-۱- آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها

در ابتدا، تمامی لایه‌های مکانی از جمله مدل ارتفاعی، کاربری اراضی، گسل‌ها، رودخانه‌ها و مناطق حفاظت‌شده به سیستم تصویر یکنواخت (UTM Zone 39N) منتقل شدند. سپس لایه‌های برداری با استفاده از ابزار "Polygon to Raster" و "Polyline to Raster" به فرمت رستری با دقت مکانی ۳۰ متر تبدیل شدند تا در تحلیل‌های رستری قابل استفاده باشند. این مرحله برای ایجاد انسجام مکانی بین داده‌ها و جلوگیری از خطای مکانی در تحلیل مسیر حیاتی بود.

۳-۳-۲- استخراج فاکتورهای تأثیرگذار

در این مرحله، با بهره‌گیری از لایه DEM، نقشه شیب و جهت شیب تولید گردید. سپس تمامی لایه‌های رستری به گونه‌ای طبقه‌بندی شدند که مقادیر آن‌ها نمایانگر میزان هزینه یا محدودیت عبور خط لوله باشد. به عنوان مثال، مناطقی با شیب بالا، در مجاورت گسل‌های فعال یا داخل مناطق حفاظت‌شده، دارای هزینه عبور بالا در نظر گرفته شدند. بالعکس، پهنه‌های مسطح یا اراضی بایر، از هزینه کم‌تری برخوردار بودند.

۳-۳-۳- وزن‌دهی به لایه‌ها و ترکیب آن‌ها

برای ترکیب لایه‌ها، از روش وزن‌دهی خطی (Weighted Overlay) استفاده شد. در این روش، به هر یک از فاکتورهای مکانی بر اساس اهمیت نسبی آن در فرآیند مسیریابی (از منظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی) وزن عددی اختصاص داده شد. سپس این لایه‌ها در محیط Raster Calculator ترکیب شدند و نقشه نهایی سطح هزینه (Cost Surface) تولید گردید. این نقشه به‌عنوان ورودی اصلی مدل تحلیل مسیر بهینه عمل می‌کند.

۳-۳-۴- تحلیل مسیر بهینه

در این مرحله، با استفاده از ابزارهای Cost Distance و Cost Backlink در ArcGIS، مسیر کم‌هزینه از نقطه مبدأ (تأسیسات نفتی در ممسنی) به مقصد (پالایشگاه گچساران) محاسبه شد. مسیر بهینه با ابزار Least Cost Path استخراج گردید که بر مبنای کم‌ترین مجموع هزینه عبور در سطح هزینه طراحی شده است. مسیر نهایی سپس با نقشه‌های توپوگرافی و کاربری اراضی ترکیب شد تا ارزیابی‌های فنی و زیست‌محیطی نهایی بر آن صورت گیرد.

۳-۴- مدل دوم: تحلیل مسیر بر اساس کاربری اراضی

یکی از عوامل مؤثر و راهبردی در انتخاب مسیر خطوط لوله انتقال نفت، الگوی کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه است. عبور خطوط لوله از مناطق حساس نظیر اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی، زیستگاه‌های طبیعی و مناطق حفاظت‌شده، علاوه بر افزایش هزینه اجرایی، با ریسک‌های اجتماعی و زیست‌محیطی بالایی همراه است. از این‌رو، در این مدل، کاربری اراضی به‌عنوان عامل اصلی در تعریف نقشه هزینه و هدایت مسیر در نظر گرفته شد.



۳-۴-۱- آماده سازی لایه کاربری اراضی

لایه کاربری اراضی منطقه از پایگاه داده سازمان منابع طبیعی و همچنین داده های مکمل ماهواره ای (Sentinel-2) تهیه گردید و پس از اصلاحات توپوژئومتریک، به شش طبقه عمده تقسیم شد: ۱) اراضی کشاورزی، ۲) مناطق مسکونی، ۳) جنگل ها، ۴) مراتع، ۵) اراضی بایر و صخره ای، و ۶) مناطق حفاظت شده. هر یک از این طبقات بر اساس درجه حساسیت یا اولویت عبور خط لوله، در مقیاس عددی ۱ تا ۹ وزن دهی شدند؛ به گونه ای که عبور از مناطق بایر کم هزینه ترین و عبور از مناطق حفاظت شده پرهزینه ترین گزینه محسوب گردید.

۳-۴-۲- ساخت نقشه سطح هزینه کاربری

با استفاده از ابزار Reclassify در محیط ArcGIS، لایه کاربری اراضی به یک نقشه رستری هزینه (Cost Raster) تبدیل گردید. در این نقشه، پیکسل هایی که نشان دهنده کاربری های دارای محدودیت (مانند مناطق مسکونی یا جنگلی) بودند، مقادیر عددی بالاتری دریافت کردند. در مقابل، مناطق بایر یا کم ارزش از نظر اکولوژیکی، دارای مقدار هزینه پایین در ماتریس هزینه شدند. در این مدل، تنها یک لایه (کاربری اراضی) به عنوان ورودی تحلیل استفاده شد تا تأثیر انحصاری این عامل در تعیین مسیر مشخص گردد.

۳-۴-۳- استخراج مسیر بهینه با تمرکز بر کاربری

پس از ساخت نقشه هزینه، ابزارهای Cost Distance و Least Cost Path برای تعیین کوتاه ترین مسیر از مبدأ (تأسیسات ممسنی) به مقصد (پالایشگاه گچساران) به کار گرفته شدند. نتیجه نهایی نشان داد که مسیر انتخاب شده در این مدل، تمایل بیشتری به عبور از مناطق بایر و مرتعی دارد و از مناطق مسکونی، کشاورزی و حفاظت شده تا حد زیادی فاصله می گیرد. این مسیر گرچه از نظر طول مسیر اندکی بیشتر از مدل ترکیبی بود، اما هزینه زیست محیطی و اجتماعی کمتری را متوجه پروژه می سازد.

۳-۴-۴- ارزیابی و مقایسه

مقایسه مسیر حاصل از این مدل با مدل ترکیبی (شامل شیب، گسل، رودخانه و کاربری) نشان داد که تأثیر کاربری اراضی به تنهایی می تواند در تعیین نقاط بحرانی و قابل قبول عبور خط لوله بسیار مؤثر باشد. این مدل به ویژه در فازهای اولیه طراحی مسیر یا در مناطقی با تراکم انسانی بالا و حساسیت محیطی شدید، قابلیت استفاده مستقل را دارد.

۳-۵- نرم افزارها و ابزارهای مورد استفاده

در این پژوهش، از مجموعه ای از نرم افزارهای تخصصی برای تحلیل مکانی و پردازش داده ها استفاده شد. نرم افزار ArcGIS Desktop نسخه ۱۰.۸ شرکت Esri به عنوان محیط اصلی تحلیل مکانی مورد استفاده قرار گرفت و ابزارهای موجود در جعبه ابزار Spatial Analyst، از جمله ابزارهای Cost Distance، Cost Backlink و Least Cost Path برای اجرای الگوریتم مسیر بهینه و ابزارهای Weighted Overlay و Reclassify برای ساخت سطح هزینه، نقش کلیدی در تحلیل ها ایفا کردند. جهت بررسی میدانی اولیه و اعتبارسنجی بصری موقعیت های پیشنهادی مسیر خط لوله، از تصاویر ماهواره ای با دقت بالای Google Earth Pro استفاده شد. همچنین، به منظور پیش پردازش داده های رقومی ارتفاعی (DEM) و استخراج نقشه های شیب و جهت شیب منطقه، نرم افزار Global Mapper نسخه ۲۳ به عنوان ابزار مکمل به کار گرفته شد. برای مدیریت داده های عددی، وزن دهی معیارها، ساخت ماتریس تصمیم گیری و تنظیم ورودی های مورد نیاز تحلیل چندمعیاره نیز از Excel 2019 (Microsoft Office) استفاده گردید.

۳-۵-۱- روش جمع آوری اطلاعات

فرآیند جمع آوری اطلاعات در این پژوهش با بهره گیری از رویکردی ترکیبی، متکی بر داده های مکانی و توصیفی از منابع معتبر و نرم افزارهای تخصصی انجام گرفت. سه منبع اصلی شامل ArcGIS، AutoCAD و Google Earth به عنوان بسترهای اصلی گردآوری و ارزیابی اطلاعات مکانی مورد استفاده قرار گرفتند.



در گام نخست، نرم‌افزار ArcGIS به‌عنوان ابزار اصلی تحلیل مکانی، برای دریافت و پردازش داده‌های رقومی از جمله مدل ارتفاعی (DEM)، نقشه شیب، جهت شیب و کاربری اراضی به‌کار گرفته شد. این اطلاعات پایه‌ای، نقش کلیدی در ارزیابی وضعیت توپوگرافی منطقه، شناسایی موانع طبیعی و تشخیص پهنه‌های مطلوب عبور خط لوله ایفا کردند. همچنین داده‌های فنی و نقشه‌های مهندسی با فرمت CAD که از سازمان‌های مسئول یا طراحی‌های اولیه استخراج شده بودند، در محیط AutoCAD بررسی و ویرایش شدند. این داده‌ها سپس به محیط GIS منتقل گردیدند تا در کنار سایر لایه‌های مکانی مورد استفاده قرار گیرند. تلفیق دقیق بین داده‌های CAD و GIS، به افزایش دقت طراحی مسیر و هماهنگی بین نقشه‌های اجرایی و تحلیلی کمک شایانی نمود.

علاوه بر این، تصاویر سه‌بعدی و موقعیت‌محور Google Earth Pro برای اعتبارسنجی بصری مسیر، بررسی شرایط عینی منطقه، وضعیت مناطق مسکونی، پوشش گیاهی و کاربری فعلی زمین مورد استفاده قرار گرفتند. این تصاویر در تحلیل میدانی مجازی و شناسایی موانع موجود در طول مسیر اهمیت ویژه‌ای داشتند. از دیگر منابع اطلاعاتی مهم، می‌توان به فایل‌های کاربری اراضی و نقشه‌های شیب اشاره کرد که از پایگاه‌های ملی مانند سازمان منابع طبیعی، سازمان زمین‌شناسی کشور و پایگاه داده جهانی USGS تهیه شده‌اند. این داده‌ها اطلاعات جامعی از وضعیت کاربری زمین (مانند اراضی کشاورزی، جنگلی، مناطق حفاظت‌شده، بایر و شهری) و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک منطقه ارائه دادند و در مرحله ساخت نقشه هزینه و انتخاب مسیر بهینه مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. در مجموع، با تلفیق داده‌های مکانی دقیق و به‌روز از منابع چندگانه و در قالب یکپارچه‌سازی آن‌ها در محیط ArcGIS، مبنای قابل اعتمادی برای تحلیل مسیر خط لوله فراهم گردید؛ به‌گونه‌ای که امکان طراحی بهینه با در نظر گرفتن جنبه‌های فنی، محیطی و اقتصادی مسیر میسر شد.

۳-۵-۲- روش‌های تجزیه و تحلیل

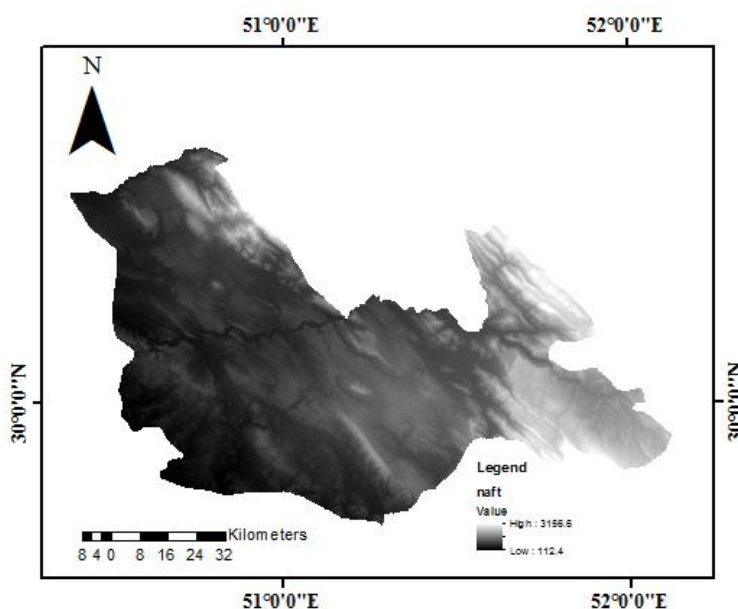
فرآیند تجزیه و تحلیل داده‌ها در این پژوهش بر پایه رویکردی مکانی-چندمعیاره انجام گرفت که در آن داده‌های مختلف محیطی، فنی و اقتصادی به‌صورت یکپارچه تلفیق و تحلیل شدند. هدف از این تحلیل‌ها، شناسایی مسیر بهینه‌ای برای عبور خط لوله نفت با کمترین هزینه، کمترین مداخله در محیط‌زیست، و بیشترین کارایی اجرایی بود. در نخستین مرحله، با استفاده از ابزارهای موجود در جعبه‌ابزار Spatial Analyst در محیط ArcGIS، تحلیل نقشه‌های شیب و ارتفاع صورت گرفت. داده‌های ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر، پس از بازنمونه‌برداری و هم‌ترازسازی فضایی، برای استخراج نقشه‌های شیب و جهت شیب مورد استفاده قرار گرفتند. این تحلیل‌ها نقش کلیدی در شناسایی نواحی با شیب تند و غیرقابل عبور داشتند و از طریق آن‌ها نقشه‌های Cost Surface اولیه تهیه شد. در مرحله بعد، تحلیل کاربری اراضی انجام گردید. این لایه اطلاعاتی با استفاده از ابزار Reclassify، به طبقات دارای هزینه نسبی متفاوت تبدیل شد. کاربری‌هایی نظیر مناطق بایر و غیرقابل کشت، هزینه عبور کمتری داشتند؛ در حالی که مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی و مناطق حفاظت‌شده با امتیازهای بالاتر، به‌عنوان عوامل محدودکننده تلقی شدند. سپس نقشه‌های شیب و کاربری اراضی به‌صورت وزنی با هم ترکیب شدند. برای این منظور از ابزار Weighted Overlay استفاده شد که امکان تلفیق لایه‌های مختلف با وزن‌های تعریف‌شده بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها را فراهم می‌آورد. وزن‌دهی معیارها بر پایه نظر کارشناسی، مطالعات پیشین، و اهداف پروژه انجام شد. در گام بعدی، نقشه نهایی سطح هزینه (Cost Raster) ساخته شد و سپس با ابزارهای Cost Distance و Cost Backlink، مسیر تجمعی کم‌هزینه بین نقطه مبدأ و مقصد تعیین گردید. نهایتاً با استفاده از ابزار Least Cost Path مسیر بهینه عبور خط لوله استخراج شد. از سوی دیگر، در بخش‌هایی از تحلیل، هزینه‌های اجرایی شامل عملیات خاک‌برداری، موانع طبیعی، عبور از گسل‌ها، و هزینه‌های زیست‌محیطی نیز بر پایه مدل‌های هزینه نسبی در نظر گرفته شد. داده‌های مختلف همچون توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، منابع آبی و زیرساخت‌های انسانی به‌صورت هم‌زمان در تحلیل لحاظ شدند تا تصمیم‌گیری چندوجهی برای مسیر بهینه ممکن شود. در نهایت، تلفیق کلیه این اطلاعات در محیط GIS منجر به ساخت یک مدل تصمیم‌یار مکانی شد که قادر است مسیرهایی را پیشنهاد دهد که ضمن بهینه‌سازی از نظر فنی و اقتصادی، کمترین تأثیر را بر محیط طبیعی و سکونتگاه‌های انسانی داشته باشند.



۴- طراحی مسیر خطلوله با توجه به شیب منطقه

۴-۱- بررسی نقشه DEM منطقه

در طراحی خطوط انتقال نفت، تحلیل شیب زمین نقش کلیدی در شناسایی مسیرهای بهینه دارد. در این پژوهش برای ارزیابی توپوگرافی محدوده مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) استفاده شد. فایل DEM به کاررفته، دارای دقت مکانی ۳۰ متر بوده و از پایگاه داده جهانی USGS دریافت و به سیستم مختصات UTM (Zone 39N) ژئورفرنس گردید. مدل DEM نمایشی سه بعدی از ارتفاعات سطح زمین را فراهم می کند که در آن، هر پیکسل نمایانگر ارتفاع یک نقطه خاص از زمین است. این مدل، مبنای استخراج نقشه های شیب و جهت شیب بوده و امکان تحلیل های دقیق توپوگرافی را در محیط ArcGIS فراهم ساخته است. با استفاده از ابزار Slope در جعبه ابزار Spatial Analyst، نقشه شیب منطقه تولید شد که میزان درصد شیب در کل منطقه مطالعاتی را نشان می دهد. همچنین ابزار Aspect جهت شیب زمین را استخراج کرد تا بتوان مناطق مستعد رانش، فرسایش یا دشوارگذر را شناسایی نمود. نتایج به دست آمده نشان داد که در بخش های شمالی و شمال شرقی منطقه، شیب های بالا (بیش از ۳۰ درصد) وجود دارد که به عنوان مناطق پرهزینه و پرخطر در طراحی مسیر تلقی شدند. در مقابل، نواحی جنوب غربی منطقه دارای شیب ملایم تری بوده و به عنوان گزینه های مطلوب تر برای عبور خط لوله انتخاب شدند. این تحلیل، در مرحله ساخت نقشه هزینه و مسیربایی بهینه، نقش اساسی ایفا کرد. در شکل ۲، نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است که نشانگر توزیع ارتفاعات در بازه ۷۰۰ تا ۲۴۰۰ متر از سطح دریاست. این توزیع ناهمواری، اهمیت به کارگیری داده های ارتفاعی در تصمیم سازی فضایی برای طراحی زیرساخت هایی مانند خطوط لوله را به خوبی آشکار می سازد.



شکل ۲: نقشه DEM محدوده مورد مطالعه

بر اساس نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد مطالعه، نواحی با رنگ های روشن تر نمایانگر ارتفاعات بالا و زمین های مرتفع هستند که عمدتاً در بخش های شرقی شهرستان نورآباد ممسنی و شمال شرقی شهرستان گچساران واقع شده اند. در مقابل، نواحی با رنگ های تیره تر بیانگر ارتفاعات پایین تر بوده و بخش های مرکزی بین دو شهرستان را شامل می شوند؛ این مناطق به لحاظ توپوگرافی، مناسب تر برای عبور خطوط لوله به شمار می روند. افزون بر این، رگه های باریکی که به صورت خطوط کشیده و نامنظم در نقشه ظاهر شده اند، در حقیقت بیانگر دره ها و مسیرهای طبیعی جریان آب یا بستر رودخانه ها هستند. شناسایی این عناصر توپوگرافیک برای پرهیز از مسیرهای با خطر بالا یا هزینه های اجرایی زیاد در طراحی خط لوله، اهمیت ویژه ای دارد.

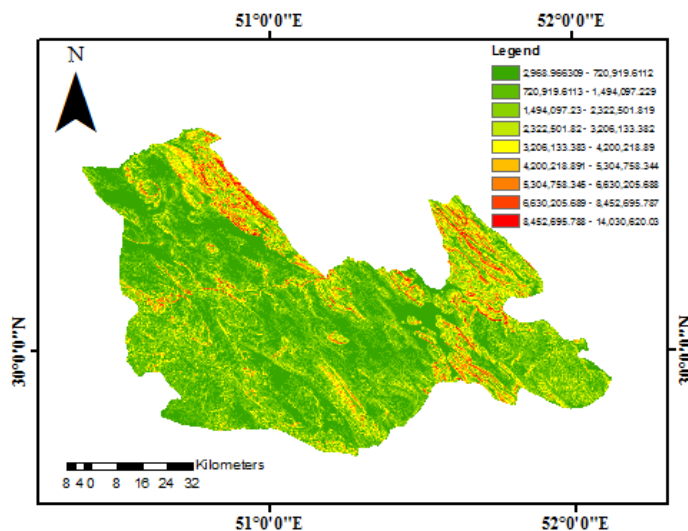


۴-۲- بررسی نقشه شیب (Slope)

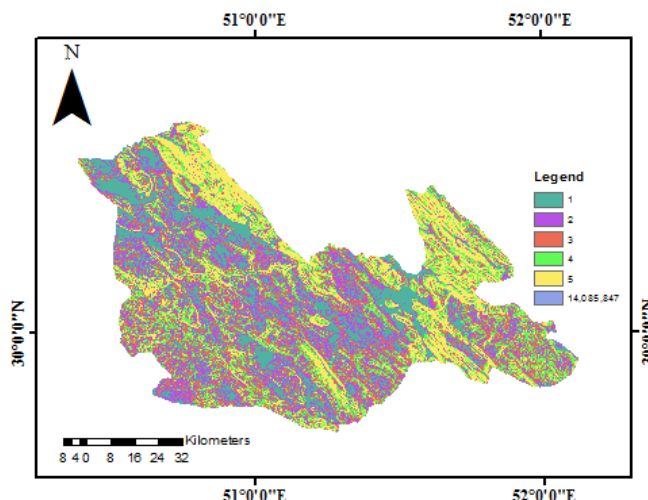
نقشه شیب منطقه (Slope) که بر پایه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) تهیه شده است، یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی ناهمواری‌های سطح زمین محسوب می‌شود. این نقشه میزان تغییرات ارتفاعی زمین را به صورت درصدی در هر سلول نمایش داده و امکان تحلیل دقیق شرایط توپوگرافی منطقه را برای طراحی مسیر خط لوله فراهم می‌سازد.

مطابق شکل ۳، در نقشه شیب منطقه، نواحی با رنگ‌های قرمز نمایانگر شیب‌های تند و زمین‌های کوهستانی هستند، در حالی که رنگ‌های سبز نشان‌دهنده زمین‌های مسطح‌تر با شیب کمتر می‌باشند. تحلیل نقشه نشان می‌دهد که نواحی شمال شرقی شهرستان گچساران که محل استقرار واحد پتروشیمی است، دارای شیب زیاد و توپوگرافی کوهستانی می‌باشد. همچنین بخش‌هایی از شمال شرقی شهرستان ممسنی نیز در زمره مناطق کوهستانی با شیب بالا قرار دارند. در مقابل، بخش‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه که بین دو شهرستان نورآباد ممسنی و گچساران واقع شده‌اند، دارای شیب ملایم‌تری هستند و از نظر توپوگرافی به صورت دشت‌ها و تپه‌ماهورها طبقه‌بندی می‌شوند. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند تا این ناحیه به‌عنوان گزینه‌ای مناسب‌تر برای عبور خط لوله مورد توجه قرار گیرد. برای بهره‌گیری تحلیلی از نقشه شیب در فرآیند مسیریابی، نقشه اولیه Slope به نقشه طبقه‌بندی شده Reclass Slope تبدیل شد. در این فرآیند، بر اساس الگوی استاندارد طبقه‌بندی شیب، محدوده‌های مختلف به سه کلاس تقسیم گردیدند:

- شیب ۰ تا ۳ درصد: مناطق دشت و هموار،
 - شیب ۳ تا ۷ درصد: نواحی تپه‌ماهور،
 - شیب بیش از ۷ درصد: مناطق کوهستانی و دارای ناهمواری زیاد.
- این طبقه‌بندی که در شکل ۴ نمایش داده شده است، نقش محوری در ساخت نقشه هزینه و تعیین مسیرهای کم‌هزینه و فنی ایفا می‌کند. مناطق دارای شیب زیاد به‌عنوان نواحی پرهزینه و پرخطر، و مناطق هموار به‌عنوان گزینه‌های بهینه برای طراحی مسیر خط لوله تلقی شدند.



شکل ۳: نقشه Slope



شکل ۴: نقشه Reclash Slope

برای طراحی بهینه مسیر خطلوله، تحلیل شیب زمین یکی از گام‌های کلیدی در فرآیند ارزیابی توپوگرافی و هزینه‌های اجرایی پروژه محسوب می‌شود. با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاع، نقشه شیب منطقه تولید و سپس به منظور ساده‌سازی فرآیند تحلیل و طراحی مسیر، این نقشه به طبقات مجزا بازطبقه‌بندی شد. در این طبقه‌بندی، نواحی بر اساس درصد شیب به سه گروه اصلی شامل دشت‌ها، تپه‌ماهورها و نواحی کوهستانی تقسیم شدند. این تقسیم‌بندی با هدف تعیین میزان اولویت‌پذیری هر طبقه برای عبور خطلوله صورت گرفت، به گونه‌ای که دشت‌ها به دلیل سهولت اجرا و هزینه پایین دارای اولویت بالا و نواحی کوهستانی به علت شیب زیاد و مخاطرات اجرایی در اولویت پایین‌تری قرار گرفتند. جدول ۱ طبقه‌بندی مذکور را به همراه محدوده درصد شیب و اولویت طراحی مسیر نشان می‌دهد.

جدول ۱. طبقه‌بندی شیب زمین (Reclash Slope) جهت طراحی مسیر خطلوله

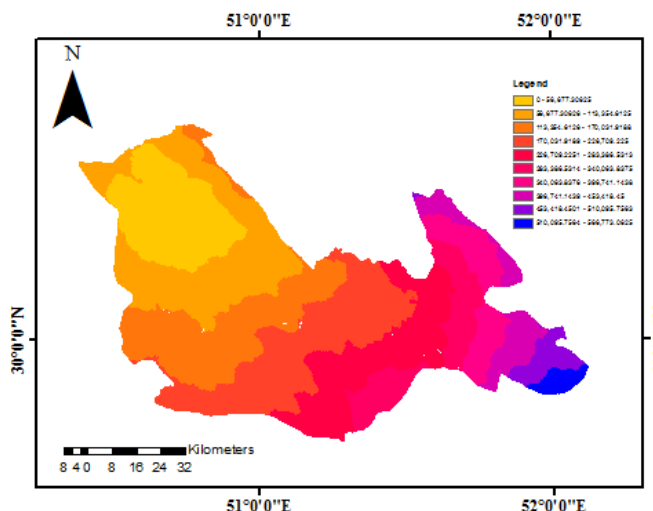
توضیحات	اولویت طراحی مسیر	نوع توپوگرافی (طبقه شیب)	محدوده درصد شیب	شماره طبقه
مناطق مسطح و مناسب برای عبور خطلوله با هزینه کم و اجرای آسان	بسیار بالا	دشت	۰ تا ۳٪	۱
نیازمند تحلیل هزینه-فایده؛ امکان عبور در صورت اجبار	متوسط	تپه‌ماهور	۳ تا ۷٪	۲
مناطق پرهزینه و دارای ریسک اجرایی بالا؛ پرهیز از عبور مسیر	پایین	کوهستان	بیش از ۷٪	۳

۳-۴- بررسی و تحلیل هزینه مسیر (Cost Distance)

برای طراحی بهینه و اقتصادی مسیر خطلوله، پس از طبقه‌بندی شیب منطقه در قالب نقشه Reclash Slope، تحلیل هزینه مسیر یا Cost Distance در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام گرفت. این تحلیل نقش محوری در تعیین مسیرهایی دارد که عبور از آن‌ها مستلزم حداقل هزینه اجرایی، فنی و زیست‌محیطی باشد. تحلیل Cost Distance با استفاده از ابزارهای موجود در جعبه‌ابزار Spatial Analyst انجام شد. در این روش، با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی شده شیب و سایر عوامل مؤثر بر هزینه، یک سطح پیوسته از هزینه‌های نسبی حرکت (Cost Surface) در منطقه مورد مطالعه تولید گردید. این سطح هزینه، هر پیکسل از منطقه را بر اساس دشواری عبور، مخاطرات طبیعی، و هزینه‌های عملیاتی رتبه‌بندی می‌کند. در شکل ۵، نقشه Cost Distance منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. مطابق رنگ‌بندی این نقشه، نواحی با رنگ‌های روشن نشان‌دهنده مناطق با هزینه پایین و مطلوب برای عبور خطلوله هستند، در حالی که رنگ‌های تیره معرف مناطقی با هزینه بالا و شرایط نامطلوب از نظر اجرایی می‌باشند. این اختلاف هزینه ناشی از عواملی نظیر شیب تند، ناهمواری شدید، عبور از مناطق مسکونی یا حفاظت‌شده، و دشواری‌های دسترسی است.



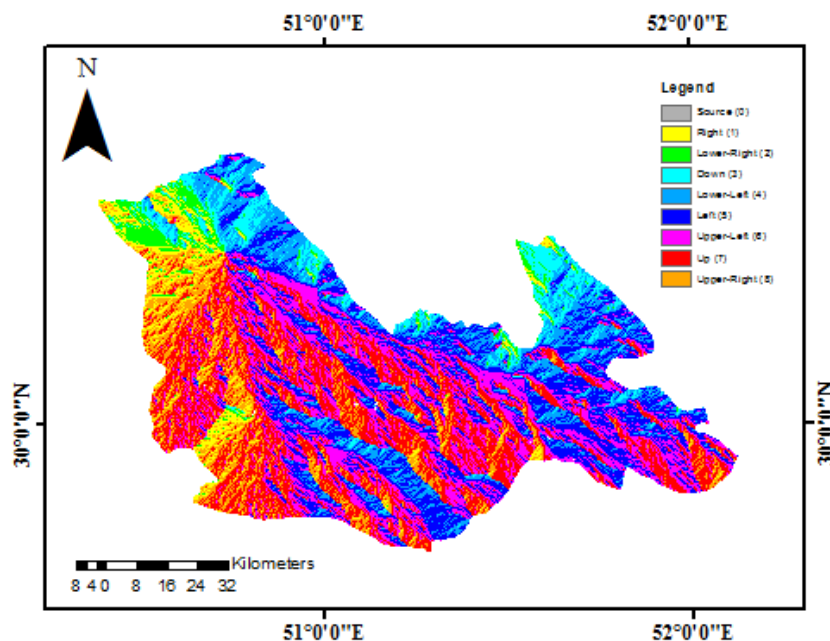
با استفاده از این نقشه، امکان شناسایی مسیرهایی فراهم می‌شود که با کمترین هزینه و ریسک ممکن، خط لوله را از مبدأ به مقصد هدایت کنند. در نهایت، این تحلیل پایه‌ای برای اجرای ابزار Least-Cost Path فراهم می‌کند که مسیر نهایی بهینه را با توجه به مجموع هزینه‌های فضایی موجود استخراج می‌نماید.



شکل ۵: نقشه Cost Distance

۴-۴- تحلیل نقشه جهت‌یابی (Direction Map)

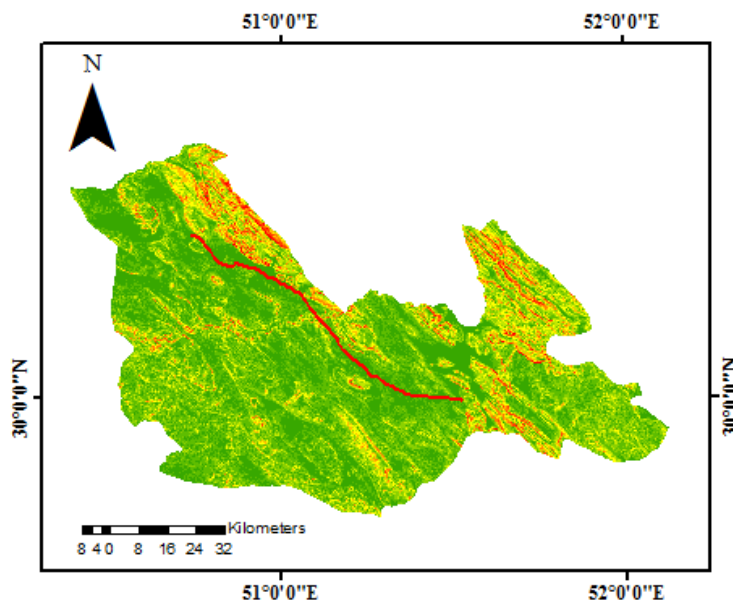
نقشه جهت‌یابی (Direction Map) یکی از خروجی‌های کلیدی در فرآیند تحلیل مسیر بهینه در محیط GIS محسوب می‌شود. این نقشه، که با استفاده از ابزار Cost Backlink تولید می‌شود، به صورت سلول به سلول نشان می‌دهد که مسیر بهینه خط لوله در هر نقطه باید به چه سمتی (شمال، جنوب، شرق، غرب یا جهات بینابینی) حرکت کند تا در نهایت به نقطه مقصد با کمترین هزینه برسد. مطابق شکل ۶، رنگ‌بندی موجود در نقشه جهت‌یابی نمایانگر جهت حرکت بهینه از هر سلول است. هر رنگ در این نقشه معرف یک جهت جغرافیایی مشخص (مانند شمال غربی، شرق، جنوب شرقی و ...) بوده و در راهنمای نقشه این جهات به صورت کامل تفسیر و کدگذاری شده‌اند. این اطلاعات به طراحان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا مسیر دقیق عبور خط لوله را از نقطه مبدأ تا مقصد با دقت بالا و هماهنگ با موانع توپوگرافی و هزینه‌ای موجود ترسیم کنند. نقشه جهت‌یابی، به‌ویژه در ترکیب با نقشه Cost Distance، به عنوان پایه‌ای برای اجرای الگوریتم Least Cost Path عمل کرده و امکان استخراج مسیر نهایی با حداقل هزینه و حداکثر بهره‌وری مکانی را فراهم می‌آورد.



شکل ۶- راهنمای نقشه جهت یابی

۴-۵- استخراج مسیر نهایی بهینه (Least-Cost Path)

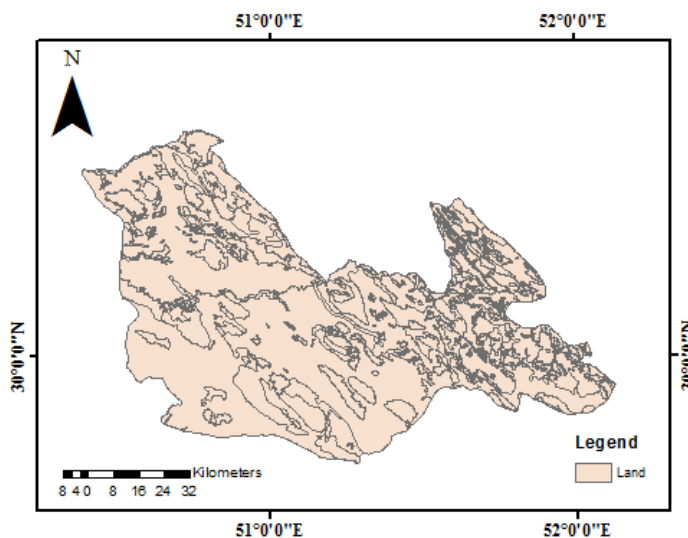
بر پایه تحلیل‌های انجام شده بر روی نقشه‌های DEM، شیب (Slope) و نقشه هزینه (Cost Distance)، مسیر نهایی طراحی شده برای خط لوله در محیط ArcGIS با استفاده از ابزار Least-Cost Path استخراج گردید. مسیر بهینه حاصل شده در شکل ۷ بر روی نقشه شیب منطقه ترسیم شده است. همان‌طور که در این نقشه مشاهده می‌شود، مسیر طراحی شده عمدتاً از نواحی با شیب کم عبور کرده و از مناطق کوهستانی با شیب تند دوری کرده است. این مناطق، در طبقه‌بندی شیب به‌عنوان دشت و تپه‌ماهور شناخته می‌شوند و به‌دلیل دسترسی آسان‌تر، ریسک کمتر و هزینه‌های اجرایی پایین‌تر، به‌عنوان گزینه‌های اولویت‌دار در فرآیند مسیریابی شناخته شده‌اند. در مقابل، مناطق کوهستانی در شمال شرق منطقه با شیب بالا و توپوگرافی پیچیده، به‌علت هزینه بالای اجرای پروژه و دشواری‌های فنی، در تحلیل نرم‌افزار ArcGIS به‌عنوان نواحی پرهزینه و کم‌مطلوب شناسایی شده و در مسیر نهایی لحاظ نگردیده‌اند. استفاده هم‌زمان از تحلیل شیب و هزینه در این مرحله، به انتخاب مسیری انجامیده است که از نظر فنی قابل اجرا، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و از نظر مکانی منطبق با واقعیت‌های توپوگرافیک منطقه باشد. این مسیر پایه‌ای برای تحلیل‌های نهایی اجرایی و تصمیم‌سازی در مراحل بعدی پروژه خواهد بود.



شکل ۷. مسیر خطلوله با توجه به شیب منطقه و بحث هزینه

۴-۶- بررسی نقشه کاربری اراضی

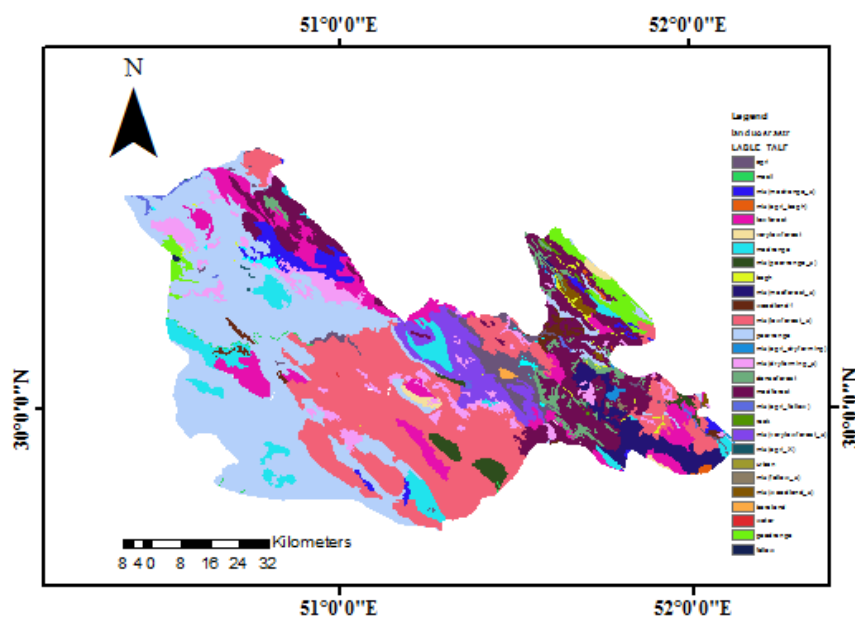
با وجود آنکه طراحی اولیه مسیر خطلوله بر اساس داده‌های توپوگرافی و تحلیل شیب منطقه (DEM و Slope) انجام شد، اما بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که این مسیر اولیه از مناطقی عبور می‌کند که از نظر اجرایی، زیست‌محیطی و اجتماعی دارای محدودیت‌های جدی هستند. در مسیر اولیه، بخش‌هایی از مسیر از نواحی مسکونی، اراضی کشاورزی، باغات، جنگل‌ها، روستاها و حتی مناطق حساس مانند مرداب‌ها عبور می‌کرد که این موارد می‌توانند هزینه‌های اجرایی پروژه را افزایش داده و ریسک‌های اجتماعی و محیط‌زیستی قابل توجهی ایجاد کنند. به همین دلیل، در مرحله بعدی، از نقشه کاربری اراضی (Land Use Map) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین لایه‌های اطلاعاتی در طراحی مسیر بهینه استفاده شد. این نقشه به شناسایی دقیق نوع بهره‌برداری از زمین در منطقه مورد مطالعه کمک می‌کند و امکان اجتناب از عبور مسیر خطلوله از مناطق دارای محدودیت یا حساسیت را فراهم می‌سازد. شکل ۸ نقشه کاربری اراضی منطقه را نمایش می‌دهد که شامل دسته‌بندی‌هایی نظیر اراضی کشاورزی، جنگل‌ها، مناطق مسکونی، منابع آبی، بایر، و زیرساخت‌های انسانی است. استفاده از این لایه اطلاعاتی، امکان اصلاح مسیر خطلوله را به گونه‌ای فراهم کرده که ضمن رعایت اصول فنی، کمترین تداخل را با کاربری‌های حساس و پرهزینه داشته باشد. این اصلاحات در طراحی، نقش قابل توجهی در کاهش پیامدهای اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی اجرای پروژه ایفا می‌کند.



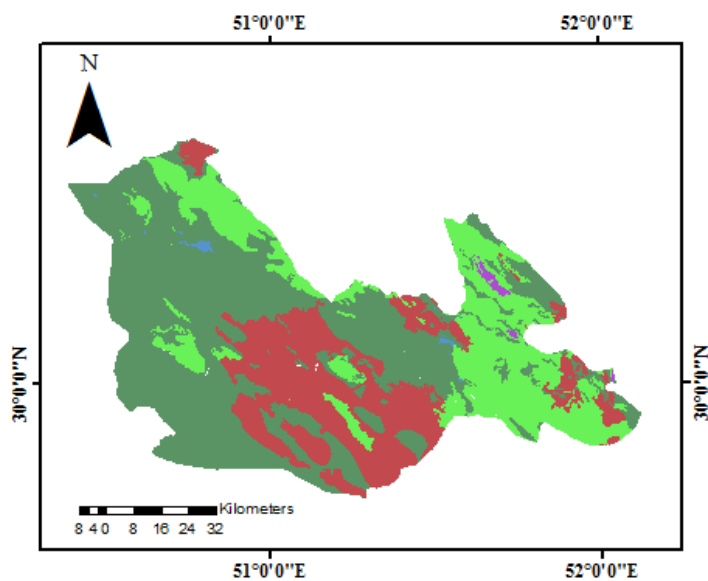
شکل ۸: نقشه کاربری اراضی

۴-۷- طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری کاربری اراضی برای طراحی مسیر

در فرآیند طراحی مسیر بهینه خطلوله، استفاده از داده‌های کاربری اراضی نقش اساسی دارد. به‌منظور تحلیل مؤثر این داده‌ها در محیط GIS، نقشه کاربری اراضی ابتدا به فرمت Raster تبدیل گردید. این تبدیل، امکان وزن‌دهی، طبقه‌بندی و تحلیل سریع لایه اطلاعاتی را فراهم می‌سازد و یکی از مراحل کلیدی در اعمال مدل‌های تصمیم‌گیری مکانی محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نقشه کاربری اراضی شامل طیف متنوعی از رنگ‌ها است که هر رنگ نمایانگر نوع خاصی از کاربری زمین مانند مناطق مسکونی، اراضی زراعی، جنگل‌ها، منابع آبی، مناطق بایر و ... می‌باشد. در مجموع، ۲۸ نوع کاربری مختلف در منطقه بین پتروشیمی ممسنی و گچساران شناسایی شد که نشان‌دهنده پیچیدگی و تنوع زیستی-کاربری منطقه مورد مطالعه است. به‌منظور تسهیل تحلیل و تصمیم‌گیری در طراحی مسیر، این ۲۸ نوع کاربری بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، در قالب پنج طبقه اصلی با اولویت متفاوت بازطبقه‌بندی شدند. شکل ۱۰ خروجی این فرایند را به‌صورت نقشه Reclass کاربری اراضی نمایش می‌دهد. در این نقشه، مسیر پیشنهادی با توجه به وزن و اولویت هر نوع کاربری هدایت می‌شود؛ به‌گونه‌ای که از مناطق دارای حساسیت بالا یا هزینه زیاد برای اجرا اجتناب گردد. به عبارت دیگر، این نقشه Reclass به‌عنوان معیار اصلی در مسیریابی مورد استفاده قرار گرفت و نشان می‌دهد که خطلوله باید از چه مناطق عبور کرده یا از آن‌ها پرهیز نماید. اولویت‌بندی کاربری‌ها که در جدول شماره ۲ ارائه شده، مبنای تصمیم‌گیری برای طراحی مسیر بهینه در گام‌های بعدی تحلیل GIS قرار گرفته است.



شکل ۹: داده Raster کاربری اراضی



شکل ۱۰: مناطق دارای اولویت جهت طراحی مسیر

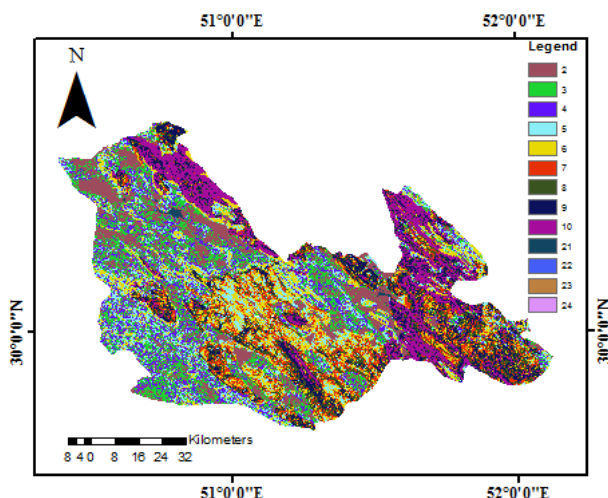


جدول ۲. اولویت‌بندی کاربری‌های اراضی برای طراحی مسیر خط لوله

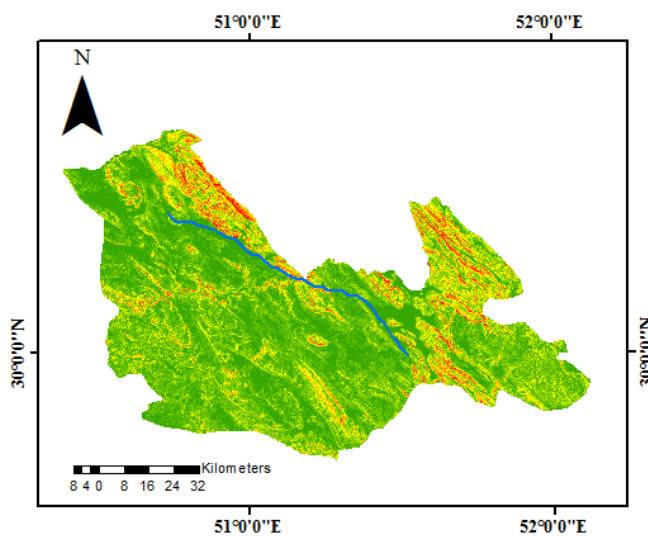
ردیف	نوع کاربری زمین	کد کاربری (Raster)	اولویت در طراحی مسیر	توضیحات
۱	اراضی بایر و باز	۱	بسیار بالا	مناسب‌ترین گزینه برای عبور مسیر به دلیل نبود مانع فیزیکی و هزینه کم
۲	اراضی کشاورزی	۲	متوسط	نیازمند ملاحظات اقتصادی، اما قابل عبور در برخی مناطق
۳	مناطق جنگلی	۳	کم	به دلیل ملاحظات زیست‌محیطی و حفاظتی، پرهیز از عبور توصیه می‌شود
۴	مناطق مسکونی و شهری	۴	بسیار پایین	عبور مسیر ممنوع به دلیل ملاحظات اجتماعی، حقوقی و هزینه‌های بسیار بالا
۵	منابع آبی و مرداب‌ها	۵	ممنوع	عبور مسیر ممکن نیست؛ نیازمند دور زدن کامل به دلیل شرایط اکولوژیکی و فنی

۴-۸- طراحی مسیر نهایی خطلوله

در این پژوهش، با هدف طراحی مسیر بهینه خطلوله انتقال نفت بین پتروشیمی‌های ممسنی و گچساران، دو مسیر مستقل بر مبنای معیارهای مختلف تولید گردید. مسیر نخست با استفاده از نقشه شیب منطقه و تحلیل‌های توپوگرافی و هزینه و مسیر دوم با تمرکز بر لایه کاربری اراضی و اولویت‌های اجرایی مرتبط با نوع زمین تولید شد. مقایسه کمی بین دو مسیر طراحی‌شده نشان داد که طول مسیر حاصل از تحلیل شیب منطقه حدود ۹۵۴۹۵ متر و طول مسیر مبتنی بر تحلیل کاربری اراضی حدود ۸۹۶۴۸ متر بوده است. اختلاف طولی بین این دو مسیر برابر با ۵۸۴۷ متر است که نشان‌دهنده کوتاه‌تر بودن مسیر طراحی‌شده با در نظر گرفتن اولویت‌های کاربری زمین می‌باشد. کاهش طول مسیر در طراحی دوم می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش هزینه‌های اجرایی پروژه، کاهش مدت زمان اجرا، کاهش نیاز به تملک اراضی، و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی داشته باشد. از این‌رو، استفاده از داده‌های کاربری اراضی در طراحی مسیر خطلوله نه تنها کارآمدی اقتصادی بیشتری به همراه دارد، بلکه در بُعد فنی نیز قابلیت‌های بهینه‌تری فراهم می‌سازد. این لایه نهایی، به عنوان خروجی اصلی فرآیند طراحی مسیر خطلوله شناخته می‌شود، زیرا علاوه بر در نظر گرفتن کم‌هزینه‌ترین مسیرهای ممکن با بهره‌گیری از تحلیل *Cost Distance*، از عبور مسیر از مناطق حساس یا پرهزینه مانند مناطق مسکونی، جنگل‌های متراکم، مرداب‌ها و زمین‌های کشاورزی جلوگیری می‌کند. در شکل ۱۱ نقشه نهایی حاصل از تلفیق لایه‌های مختلف مکانی و اقتصادی نمایش داده شده است. همچنین، برای درک بهتر موقعیت توپوگرافیک مسیر طراحی‌شده، مسیر نهایی در شکل ۱۲ بر روی نقشه شیب منطقه ترسیم شده است. این ترکیب اطلاعاتی نشان می‌دهد که مسیر پیشنهادی عمدتاً از نواحی با شیب ملایم و کاربری سازگار عبور کرده و از مناطق پرهزینه و دارای مخاطره اجتناب می‌کند.

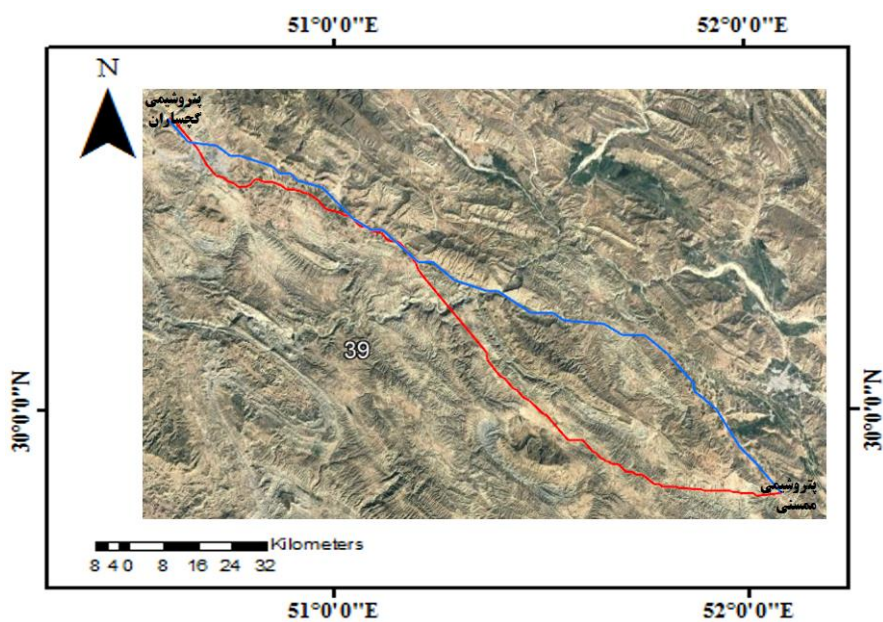


شکل ۱۱: داده Final منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۲: مسیر طراحی شده با توجه به داده Final

در شکل ۱۳، مقایسه گرافیکی دو مسیر طراحی شده نمایش داده شده است؛ مسیر طراحی شده بر اساس داده‌های کاربری اراضی به رنگ آبی و مسیر حاصل از تحلیل شیب منطقه به رنگ قرمز مشخص شده است. این تصویر ماهواره‌ای به‌وضوح تفاوت‌های فضایی دو مسیر و برتری نسبی مسیر پیشنهادی دوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: مسیرهای طراحی شده با داده‌های شیب منطقه و کاربری اراضی

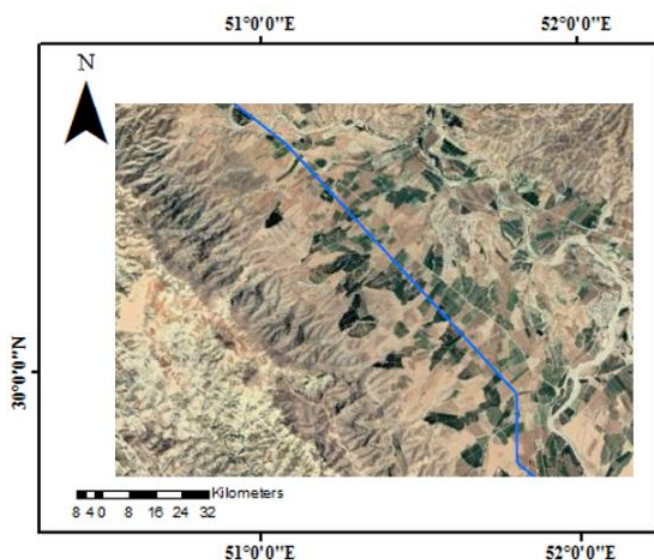


۵. نتایج و تحلیل

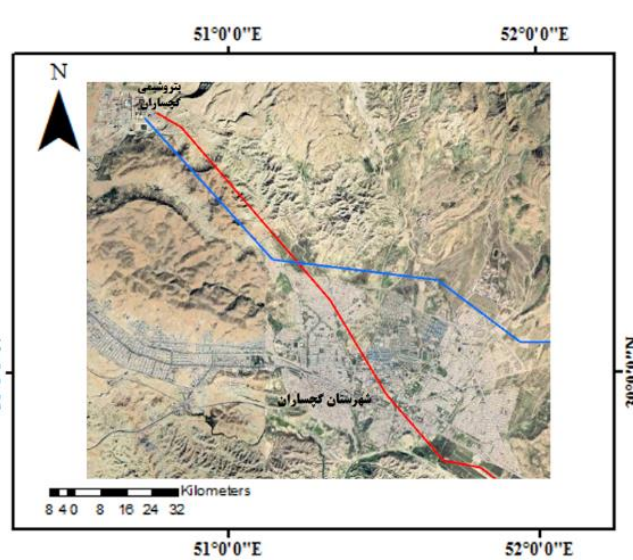
در این تحقیق، دو مسیر مجزا برای انتقال خطلوله نفت بین پتروشیمی ممسنی و پتروشیمی گچساران طراحی شد. مسیر نخست، بر اساس تحلیل توپوگرافی منطقه و نقشه شیب و مسیر دوم، با بهره‌گیری از لایه‌های کاربری اراضی و اولویت‌بندی نوع استفاده از زمین‌ها در محیط GIS تهیه گردید. مقایسه کمی این دو مسیر نشان داد که طول مسیر طراحی شده بر اساس نقشه شیب برابر با ۹۵،۴۹۵ متر و طول مسیر حاصل از طراحی با کاربری اراضی برابر با ۸۹،۶۴۸ متر است. بنابراین، مسیر دوم حدود ۵،۸۴۷ متر کوتاه‌تر از مسیر اول می‌باشد. این اختلاف به معنای کاهش قابل توجهی در هزینه‌های اجرایی پروژه، کاهش زمان ساخت و کاهش ریسک‌های اجرایی در فاز عملیاتی است.

از سوی دیگر، بهره‌گیری از اولویت‌بندی کاربری اراضی امکان طراحی مسیر خطلوله را به گونه‌ای فراهم می‌سازد که تا حد امکان از زمین‌های کشاورزی، مناطق بایر، و نواحی دور از سکونتگاه‌های انسانی عبور کند و در عین حال از مناطق پرخطر نظیر شهرها، روستاها و مناطق مسکونی اجتناب گردد. این رویکرد علاوه بر کاهش ریسک‌های اجتماعی و زیست‌محیطی، به کاهش هزینه‌های تملک اراضی و جلب رضایت عمومی نیز کمک می‌کند. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به وضوح تفاوت عبور دو مسیر طراحی شده از نواحی حساس شهری و زمین‌های کشاورزی در محدوده شهر گچساران نشان داده شده است. مسیر طراحی شده بر اساس داده‌های کاربری اراضی در این نواحی، با دقت بیشتری نواحی پرخطر را دور زده و گزینه‌ای منطقی‌تر برای اجرا ارائه کرده است.

با توجه به مقایسه انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که بهره‌گیری از تحلیل چندمعیاره با تکیه بر داده‌های کاربری اراضی و تحلیل هزینه در محیط GIS، نسبت به تحلیل صرفاً توپوگرافی، نتایج دقیق‌تر، بهینه‌تر و اجرایی‌تری را برای طراحی مسیر خطوط لوله فراهم می‌آورد.



شکل ۱۴: عبور مسیر خطلوله از زمین‌های کشاورزی و بایر



شکل ۱۵: مقایسه عبور مسیرهای خطلوله از شهر گچساران

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش نشان داد که در طراحی مسیر خطوط لوله نفت، بهره‌گیری از تحلیل‌های مکان‌محور در محیط GIS می‌تواند به انتخاب مسیرهای بهینه و کم‌هزینه کمک شایانی نماید. مقایسه دو مسیر طراحی شده در این مطالعه، یکی مبتنی بر نقشه شیب و دیگری بر اساس لایه‌های کاربری اراضی، بیانگر برتری روش دوم از جنبه‌های مختلف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی بود. مسیر حاصل از نقشه شیب به‌طور نسبی دارای طول بیشتری بوده و در برخی نقاط از نواحی شهری و مسکونی عبور کرده است که این امر، هم هزینه‌های اجرا و هم مخاطرات ایمنی پروژه را افزایش می‌دهد. افزون بر آن، طراحی بر اساس داده شیب به‌تنهایی کافی نبوده و نیازمند طبقه‌بندی مجدد براساس آستانه‌های شیب برای دشت، تپه‌ماهور و کوهستان بود تا بتوان تحلیل Cost Distance را به‌درستی اجرا کرد. در مقابل، مسیر طراحی شده با استفاده از نقشه کاربری



اراضی و اعمال اولویت‌بندی منطقی برای انواع کاربری‌ها، ضمن کاهش طول مسیر، از عبور از مناطق حساس مانند سکونت‌گاه‌های انسانی، باغات، جنگل‌های انبوه و مرداب‌ها اجتناب کرده و تا حد امکان از زمین‌های بایر، دیم و کشاورزی کم‌ارزش عبور کرده است. ترکیب این تحلیل با مدل هزینه، منجر به طراحی مسیری شد که از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر، از نظر ایمنی قابل اطمینان‌تر و از نظر زیست‌محیطی دارای کمترین تأثیر منفی می‌باشد.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده تلفیقی از لایه‌های شیب، کاربری اراضی و تحلیل‌های Cost Distance در محیط GIS، راهکار مناسبی برای طراحی مسیرهای بهینه خطوط لوله در مناطق ناهموار و پیچیده جغرافیایی همچون جنوب غرب ایران فراهم می‌سازد. پیشنهاد می‌شود در طرح‌های آینده، داده‌های بیشتری مانند مخاطرات زلزله، داده‌های مالکیت زمین و مناطق حفاظت‌شده نیز به مدل تصمیم‌گیری اضافه گردد تا به دقت و کارآمدی تصمیم‌گیری افزوده شود.

پیشنهادهای:

- ۱- افزایش دقت مدل تصمیم‌گیری: پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، پارامترهای بیشتری نظیر داده‌های زمین‌شناسی، خطرات لرزه‌ای، داده‌های مالکیت زمین، و محدوده‌های منابع طبیعی حفاظت‌شده وارد مدل شوند تا به دقت انتخاب مسیر افزوده شود.
 - ۲- به‌کارگیری تکنولوژی‌های نوین: استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، مدل‌های ارتفاعی دقیق‌تر مانند LiDAR و داده‌های میدانی پهپادها (UAV) می‌تواند صحت و دقت تحلیل‌ها را به‌صورت چشم‌گیری ارتقاء دهد.
 - ۳- تحلیل چندمعیاره پیشرفته: به‌کارگیری مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند ANP، VIKOR و Fuzzy AHP در کنار روش‌های سنتی می‌تواند به ارزیابی جامع‌تری از گزینه‌های مسیر منجر شود.
 - ۴- تحلیل پایداری و ایمنی بلندمدت: بررسی ملاحظات فنی و ایمنی مانند دسترسی به مسیر برای تعمیر و نگهداری، فاصله از مناطق پرجمعیت، و تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی به عنوان شاخص‌های مکمل در طراحی مسیر لحاظ شود.
 - ۵- کاربرد در مقیاس‌های دیگر: الگوریتم و چارچوب به‌کار رفته در این پژوهش قابلیت تعمیم برای پروژه‌های مشابه در دیگر مناطق کشور و حتی پروژه‌های انتقال گاز، آب یا فیبر نوری را نیز دارد.
- در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق تحلیل‌های مکانی با داده‌های واقعی زمینی، یک رویکرد نوین و مؤثر برای طراحی مسیرهای زیرساختی در مناطق ناهموار و پیچیده جغرافیایی محسوب می‌شود.

۷- مراجع

- 1-Balogun, A. L., Matori, A. N., Yusof, K. B. W., Pradhan, B., & Lawal, D. U. (2017). GIS-based modeling for selection of optimal subsea pipeline route. *Ocean Engineering*, 130, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.12.023>
- 2-Chittumuri, Y., Jackson, T., & Tannous, W. (2025). Risk-based routing of petroleum flowlines using GIS and machine learning. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2501.11213>
- 3-Demir, G., & Yomralioglu, T. (2024). A review of BIM-GIS integration for urban utility infrastructure: Focus on gas pipeline asset management. *Energies*, 17(5), 2187. <https://doi.org/10.3390/en17052187>
- 4-Hoover, A., Higgins, M., & Syverson, M. (2019). CostMAP: An open-source GIS tool for energy corridor routing. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104531. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104531>
- 5-Macharia, J. M., & Mundia, C. N. (2022). GIS-based AHP for optimal pipeline routing: A case study of Isiolo–Nakuru corridor, Kenya. *Journal of Geospatial Engineering*, 14(2), 45–58. <https://doi.org/10.1080/xxx>
- 6-Masrakis, N., Psarropoulos, P. N., & Tsompanakis, Y. (2024). Optimal routing of gas pipelines in seismic regions using an efficient GIS-based decision-support tool: A case study in Northern Greece. *Applied Sciences*, 14(23), 10970. <https://doi.org/10.3390/app142310970>



- 7-Mus Project Study. (2022). Automatic pipeline route design using Least-Cost Path and cartographic simplification: A case study in Mus, Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 173. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040173>
- 8-Oilfield Intel. (2025). The impact of GIS layers on cost-effective oil pipeline routing. *Oilfield Intelligence Report*. [No DOI – industry report]
- 9-Weißenburger, M., Schmid, A., & Vogel, J. (2025). Global hydrogen infrastructure planning using GIS-based economic and geographic modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50(12), 5003–5014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.004>
- 10-Yildirim, M., Korkmaz, H., & Ceylan, H. (2019). GIS-based multi-criteria decision analysis for natural gas pipeline route selection: Raster-AHP approach. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(3), 04019010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000397](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000397)
- 11-Zhang, L., Liu, Y., & He, M. (2025). Post-earthquake safety assessment framework for oil pipelines using SCADA-UAV data in GIS environment. *Natural Hazards*, 110, 245–262. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06689-5>