



Designing the East-West Energy Transfer Corridor: A case study the Mehraran-Shiraz Pipeline

Seyyed Abbas Ahmadi ¹ , Morteza Shalbafzadeh ², Seyyed Abbas Rajaei ³ ,
Mohammad Vaez ⁴, Bahram Barzegar ⁵

1. (Corresponding Author) Department of Political Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: abbas_ahmadi@ut.ac.ir

2. Senior Expert in Technology, National Iranian Oil Engineering and Construction Company (NIOEC), Tehran, Iran

Email: shalbaf1943@gmail.com

3. Department of Human Geography and Planning, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: sarajaei@ut.ac.ir

4. Senior Expert in Technology, National Iranian Oil Engineering and Construction Company (NIOEC), Tehran, Iran

Email: m.vaez@ymail.com

5. Senior Expert in Technology, National Iranian Oil Engineering and Construction Company (NIOEC), Tehran, Iran

Email: bahrambarzegar@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

29 December 2025

Received in revised form:

7 March 2026

Accepted:

31 March 2026

Available online:

13 May 2026

Keywords:

Corridor,
Optimal Path,
Geographic Information
System,
Path Cost,
Mehraran-Shiraz.

ABSTRACT

Large energy transfer projects, whether at the national or international level, hold significant importance due to their environmental impacts. In this context, attention to routes known as energy corridors, which can provide a platform for the transfer of multiple energy sources with minimal environmental effects, can play a crucial role in reducing environmental impacts. This study focuses on designing an east-west energy transfer corridor in Iran using Least Cost Path Analysis to achieve a multifunctional energy transfer corridor. The research employs GIS technology and Least Cost Path Analysis to identify the most efficient and cost-effective routes for energy transfer, considering geographical and environmental factors. The results indicate that the proposed routes significantly reduce costs while minimizing environmental impacts. These effects, by decreasing the need for land acquisition, contribute to a reduction of up to 30% in acquisition costs and up to 15% in total project costs, thereby enhancing the overall efficiency of energy distribution. The use of Least Cost Path Analysis in designing energy transfer corridors can lead to more sustainable energy solutions in Iran, effectively addressing both economic and environmental concerns.

Citation: Ahmadi, S. A., Shalbafzadeh, M., Rajaei, S. A., Vaez, M., & Barzegar, B. (2026). Designing the East-West Energy Transfer Corridor: A case study the Mehraran-Shiraz Pipeline. *Geographical planning of space quarterly journal*, 16 (1), 131-150.

<http://doi.org/10.30488/gps.2025.517565.3841>



© The Author(s)

Publisher: Golestan University Press

Extended Abstract

Introduction

Optimizing pipeline routes is a crucial component in the development of energy infrastructures, especially in light of the increasing global energy demand and environmental considerations. As countries strive to balance economic growth with ecological sustainability, the need for efficient and effective methods for determining pipeline routes has become more. Energy corridors are vital infrastructures that facilitate the efficient and sustainable transport of energy resources, including oil, natural gas, and electricity, from production sites to consumption centers. Strategic planning and optimization of these corridors are essential to ensure energy security, minimize environmental impacts, and reduce economic costs. With the rising global demand for energy and the transition towards renewable energy sources, the importance of optimal routing of pipelines has become more pronounced.

Methodology

This study employs the Least Cost Path Analysis (LCPA) method, which utilizes Geographic Information Systems (GIS) to identify optimal routes. The research process includes several key stages: data collection, cost surface generation, path analysis, and validation of results. In the initial stage, relevant spatial data, including topography, land use, environmental constraints, and socio-economic factors, are collected. Then, a cost surface is generated that reflects the costs associated with traversing different land uses. This surface is created by assigning weights to various factors based on their impact on construction and operational costs. In the next stage, algorithms such as Dijkstra or A* are used to determine the least-cost path. Finally, validation and sensitivity analysis are conducted to assess the robustness of the identified paths against changes in data and input assumptions.

Results and Discussion

The results indicate that the optimal routes identified using LCPA significantly reduce construction costs and minimize

environmental impacts. This analysis also addresses the challenges faced in pipeline design, including geographical constraints and environmental concerns. For instance, poorly designed routes can lead to increased construction costs, environmental degradation, and conflicts with local communities. Therefore, adopting advanced optimization techniques like LCPA is crucial for ensuring the efficient and sustainable routing of vital pipelines.

Numerous challenges confront planners in designing pipelines. These challenges include traversing diverse terrains, avoiding ecologically sensitive areas, and complying with legal and political restrictions. Key challenges can be considered as foundational elements in any design. For example, pipeline routes must cross various landscapes, including mountains, rivers, and urban areas, which can significantly impact feasibility and

Conclusion

This research demonstrates that the application of LCPA in the design of energy corridors can lead to more sustainable energy solutions and effectively address economic and environmental concerns. Given the existing challenges in pipeline design, there is an urgent need for systematic, data-driven approaches to optimize pipeline routing. Additionally, the need to consider security protocols, especially in political and security contexts, can complicate the routing of pipelines and increase costs.

Ultimately, this study examines methods, case studies, results, and implications of using LCPA to determine energy corridors. By analyzing the integration of various factors and specific project outcomes, this discussion aims to highlight the effectiveness of LCPA in promoting the development of sustainable energy infrastructures. Adopting a multifaceted approach to corridor routing that prioritizes not only economic considerations but also environmental sustainability and social acceptance is emphasized.

The MCDA-LCP analysis is highly effective in geographic data analysis as it can store geographic data and analyze them more efficiently and conveniently than

paper. All spatial criteria are combined and analyzed to produce a cost surface for the entire study area. LCP rapidly and continuously examines a set of data across a wide area to determine the least-cost path. Based on the two cost levels in this study, the least-cost routing tool performs better than existing ROWs.

Given the importance of integrating various functions within a corridor, this study explores how to enhance the resilience of energy systems and reduce vulnerabilities to disruptions. Moreover, by limiting the spatial impacts of energy and transportation networks, it helps reduce land degradation and habitat fragmentation.

Pipeline design is accompanied by multiple challenges. On one hand, planners must address the lowest economic costs, while on the other hand, they must consider the lowest environmental and ecological costs. These challenges include traversing diverse terrains, avoiding ecologically sensitive areas, and complying with legal and political restrictions. For instance, steep slopes, unstable soils, and earthquake-prone areas create additional hazards that must be mitigated through careful path selection.

Additionally, environmental and ecological concerns are primary considerations in the planned designs. Energy corridors often traverse protected areas, wildlife habitats, and water bodies, raising concerns about biodiversity loss and ecosystem disruption. Environmental impact assessments (EIA) are mandatory in most jurisdictions, requiring pipeline planners to minimize ecological harm.

In conclusion, this research clearly demonstrates that the use of LCPA in the design of energy corridors can lead to more sustainable energy solutions and effectively address economic and environmental concerns. Given the challenges in pipeline design, there is an urgent need for systematic, data-driven approaches to optimize pipeline routing. This approach can contribute to cost reduction and improved efficiency in energy projects, ultimately aiding in the achievement of sustainable development goals in this sector.

Funding

The cost required to implement this project has been provided by the Research and Technology Department of the National Iranian Oil Engineering and Construction Company.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank all those who helped us in conducting this research, especially the Research and Technology Department of the National Iranian Oil Engineering and Construction Company for providing the necessary funds, as well as the esteemed reviewers who were effective in improving the quality of the article.



طراحی کریدور شرق به غرب انتقال انرژی مطالعه موردی: خط لوله مهر آران - شیراز

سید عباس احمدی^۱ ✉، مرتضی شالباف زاده^۲، سید عباس رجائی^۳ , محمد واعظ^۴، بهرام برزگر^۵

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای سیاسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: abbas_ahmadi@ut.ac.ir

۲- شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت، تهران، ایران. رایانامه: shalbaf1943@gmail.com

۳- گروه جغرافیای انسانی و برنامه‌ریزی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sarajaei@ut.ac.ir

۴- شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت، تهران، ایران. رایانامه: m.vaez@ymail.com

۵- شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت، تهران، ایران. رایانامه: bahrambarzegar@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
پروژه‌های کلان انتقال انرژی، چه در سطح ملی و چه در عرصه بین‌المللی، به دلیل پیامدهای زیست‌محیطی گسترده، از اهمیت راهبردی برخوردارند. در این میان، طراحی و بهره‌برداری از مسیرهایی تحت عنوان «کریدورهای انرژی» که بتوانند با کمترین آسیب به محیط‌زیست، امکان انتقال هم‌زمان انواع حامل‌های انرژی مانند برق، گاز و نفت را فراهم کنند، نقش بسزایی در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ایفا می‌کند. این کریدورها، در صورت برنامه‌ریزی دقیق و پایدار، می‌توانند به عنوان زیرساختی هوشمند در خدمت توسعه پایدار و امنیت انرژی منطقه‌ای و جهانی قرار گیرند. این مطالعه به طراحی کریدور انتقال انرژی شرق به غرب در ایران با استفاده از تحلیل کوتاه‌ترین مسیر (Least Cost Path Analysis) به منظور دستیابی به کریدور چندمنظوره انتقال انرژی می‌پردازد. این پژوهش از فناوری GIS و تحلیل کوتاه‌ترین مسیر برای شناسایی کارآمدترین و کم‌هزینه‌ترین مسیرها برای انتقال انرژی استفاده می‌کند و عوامل جغرافیایی و زیست‌محیطی را در نظر می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مسیرهای پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهند؛ درحالی‌که تأثیرات زیست‌محیطی را نیز به حداقل می‌رسانند. این اثرات از آنجاکه نیازمندی به تملک زمین را کاهش می‌دهند، تا ۳۰ درصد در هزینه‌های تملک و تا ۱۵ درصد در کل هزینه‌های پروژه کمک‌کننده هستند و در نتیجه کارایی کلی توزیع انرژی را افزایش می‌دهند. استفاده از تحلیل کوتاه‌ترین مسیر در طراحی کریدورهای انتقال انرژی می‌تواند به راه‌حل‌های پایدارتر انرژی در ایران منجر شود و به‌طور مؤثری به نگرانی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی پاسخ دهد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۶
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۱
	تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳
	واژگان کلیدی: کریدور، مسیر بهینه، سیستم اطلاعات جغرافیایی، هزینه مسیر، مهرآران- شیراز.

استناد: احمدی، سید عباس؛ شالباف زاده، مرتضی؛ رجائی، سید عباس؛ واعظ، محمد و برزگر، بهرام. (۱۴۰۵). طراحی کریدور شرق به غرب انتقال انرژی مطالعه موردی: خط لوله مهرآران - شیراز. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۶ (۱)، ۱۳۱-۱۵۰.

<http://doi.org/10.30488/gps.2025.517565.3841>



مقدمه

بهینه‌سازی مسیرهای لوله یکی از اجزای حیاتی در توسعه زیرساخت‌های انرژی به ویژه در زمینه افزایش تقاضای جهانی انرژی و ملاحظات زیست‌محیطی است. با تلاش کشورها برای ایجاد تعادل بین رشد اقتصادی و پایداری اکولوژیکی، نیاز به روش‌های کارآمد و مؤثر برای تعیین مسیرهای لوله‌کشی بیش از پیش احساس می‌شود.

کریدورهای انرژی زیرساخت‌های حیاتی هستند که حمل‌ونقل کارآمد و پایدار منابع انرژی، از جمله نفت، گاز طبیعی و برق را از محل‌های تولید به مراکز مصرف تسهیل می‌کنند (IEA, 2022). برنامه‌ریزی استراتژیک و بهینه‌سازی این کریدورها برای اطمینان از امنیت انرژی، به حداقل رساندن تأثیرات زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌های اقتصادی ضروری است (بانک جهانی، ۲۰۲۱). با افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و انتقال به سوی منابع انرژی تجدیدپذیر، نیاز به مسیریابی بهینه خطوط لوله بیش از هر زمان دیگری اهمیت یافته است (IEA, 2023).

خطوط لوله انتقال، ستون فقرات شبکه‌های توزیع انرژی را تشکیل می‌دهند و مسیریابی آن‌ها شامل فرآیندهای تصمیم‌گیری پیچیده‌ای است که باید عوامل متعددی از جمله محدودیت‌های جغرافیایی، حساسیت‌های زیست‌محیطی، تأثیرات اجتماعی-اقتصادی و الزامات قانونی را در نظر بگیرد (Van Dijk et al., 2019). مسیریابی با طراحی‌های ضعیف می‌توانند منجر به افزایش هزینه‌های ساخت، تخریب محیط‌زیست و تضاد با جوامع محلی شوند (Zhang et al., 2020). بنابراین، اتخاذ تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته مانند روش تحلیل مسیر کم‌هزینه^۱ (LCPA) برای اطمینان از مسیریابی کارآمد و پایدار خطوط لوله حیاتی است.

کریدورهای چندمنظوره به عنوان اجزای حیاتی در تحول سیستم‌های انرژی در حال ظهور هستند. این کریدورها زیرساخت‌های مختلفی مانند اسکله‌ها، بنادر، حمل‌ونقل، ارتباطات از راه دور و انتقال انرژی را در یک چارچوب واحد و یکپارچه ادغام می‌کنند (نورعلی و احمدی، ۱۴۰۰: ۱۱۰). این رویکرد نه تنها کارایی را افزایش می‌دهد، بلکه با بهینه‌سازی استفاده از زمین و کاهش نیاز به زیرساخت‌های جداگانه، تأثیرات زیست‌محیطی را نیز به حداقل می‌رساند (California Energy Commission, 2020). اهمیت ادغام عملکردهای مختلف در یک کریدور، هزینه‌های عملیاتی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و اجازه می‌دهد تا منابع و نگهداری زیرساخت‌ها به اشتراک گذاشته شوند (Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2020). همچنین با محدود کردن اثرات فضایی شبکه‌های انرژی و حمل‌ونقل، به کاهش تخریب زمین و تجزیه زیستگاه‌ها کمک می‌کنند (Sovacool, 2014). از طرفی می‌توان بیان داشت این کریدورها با ارائه مسیرهای متنوع برای توزیع انرژی، تاب‌آوری سیستم‌های انرژی را بهبود بخشیده و آسیب‌پذیری در برابر اختلالات را کاهش می‌دهند (Geels & Schot, 2007). با توجه به اهمیت روزافزون بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، این کریدورها با حمایت از این موضوع، مسیریابی برای ادغام انرژی‌های خورشیدی، بادی و سایر منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه‌های موجود ایجاد می‌کنند (North Sea Wind Power Hub, 2021). کریدورهای چندمنظوره که نفت و گاز را به‌طور هم‌زمان حمل می‌کنند، در بخش انرژی به‌طور فزاینده‌ای قابل‌توجه هستند. این کریدورها زیرساخت‌ها را بهینه می‌کنند، کارایی را افزایش می‌دهند و اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند (North Sea Wind Power Hub, 2021).

مطالعه‌ای توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) از LCPA برای بهینه‌سازی مسیرهای خطوط لوله گاز طبیعی در چین استفاده کرد و هزینه‌های ساخت را ۱۵٪ کاهش داد؛ درحالی‌که اختلالات زیست‌محیطی را به حداقل رساند. کومار و

۱. LCPA مخفف Least Cost Path Analysis است و در این نوشتار برای خلاصه‌نویسی در بکار رفته است و معادل روش تحلیل مسیر کم‌هزینه می‌باشد

سیلوا (۲۰۲۰) از LCPA برای خطوط انتقال برق فراسرزمینی در جنوب آسیا استفاده کردند و کاربرد آن را در حل تعارضات مسیریابی ژئوپلیتیکی مورد تأکید قرار دادند. گورسوفسکی و همکاران LCPA (2012) را با یادگیری ماشین ادغام کردند تا انتخاب مسیر را برای خطوط لوله نفت در مناطق حساس اکولوژیکی بهبود بخشند. همچنین شواهد تجربی در بهره‌گیری از این سیستم در پروژه‌های خط لوله در کشورها وجود دارد که نتایج آن می‌تواند به صورت مفیدی در پروژه‌های مشابه به کار گرفته شود. این تجربیات عبارت‌اند از:

خط لوله یامال-اروپا: خط لوله یامال-اروپا یک خط لوله بزرگ گاز طبیعی است که از روسیه از طریق بلاروس و لهستان به آلمان می‌رود. درحالی‌که در درجه اول یک کریدور حمل‌ونقل گاز است، برای حمل‌ونقل نفت نیز طراحی شده است. این راهرو چندمنظوره، سیستم‌های نظارت و پادمان‌های محیطی را ادغام می‌کند و عملکرد ایمن و کارآمد را تضمین می‌کند (Yamal-Europe Pipeline, 2020).

پروژه خط لوله ترانس صحرا: هدف این خط لوله پیشنهادی انتقال گاز طبیعی از نیجر به الجزایر و در نهایت به اروپا است. این طراحی شامل مقرراتی برای حمل‌ونقل نفت است که آن را به یک راهرو چندمنظوره تبدیل می‌کند. این پروژه به دنبال افزایش امنیت انرژی و تنوع بخشیدن به منابع انرژی برای اروپا و درعین‌حال ترویج توسعه منطقه‌ای است (African Development Bank, 2019).

کریدور گاز جنوبی: این کریدور شامل یک سری خطوط لوله مانند خط لوله گاز طبیعی ترانس آناتولی (TANAP) و خط لوله ترانس آدریاتیک (TAP) است که گاز طبیعی را از آذربایجان به اروپا منتقل می‌کند. درحالی‌که عمدتاً بر گاز متمرکز است، ملاحظات برای حمل‌ونقل نفت در توسعه کلی زیرساخت وجود دارد و آن را به یک کریدور چندمنظوره تبدیل می‌کند (Southern Gas Corridor, 2021).

خط لوله نورد استریم ۲: خط لوله نورد استریم ۲ مشابه خط لوله قبلی خود برای انتقال گاز طبیعی از روسیه به اروپا طراحی شده است. با این حال، با قابلیت ادغام حمل‌ونقل نفت در آینده ساخته شده است و آن را به یک کریدور چندمنظوره تبدیل می‌کند. این طراحی باعث انعطاف‌پذیری در حمل‌ونقل انرژی در میان تقاضاهای در حال تغییر بازار می‌شود (Nord Stream 2 AG, 2020). درحالی‌که نمونه‌های مشخصی از کریدورهایی که به صراحت برای انتقال نفت و گاز به‌طور هم‌زمان طراحی شده‌اند، محدود هستند، چندین پروژه موجود و پیشنهادی دارای قابلیت مدیریت هر دو نوع انرژی هستند. این کریدورهای چندمنظوره باعث افزایش کارایی عملیاتی، حمایت از امنیت انرژی و ارتقای توسعه پایدار در بخش انرژی می‌شود. تحلیل مسیر کمترین هزینه (LCPA) یک تکنیک اساسی در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) است که برای بهینه‌سازی مسیر خطوط لوله نفت استفاده می‌شود. این روش نه تنها به دنبال کاهش هزینه‌های مالی مرتبط با ساخت خطوط لوله است، بلکه عوامل مختلف زیست‌محیطی و جغرافیایی را که می‌توانند بر قابلیت اجرا و پایداری پروژه‌های خطوط لوله تأثیر بگذارند، در نظر می‌گیرد. اهمیت LCPA در توانایی آن برای ارائه یک رویکرد سیستماتیک به تصمیم‌گیری در تخصیص منابع نهفته است؛ به ویژه در زمینه نگرانی‌های فزاینده زیست‌محیطی و فشارهای قانونی. با افزایش تقاضای جهانی برای انرژی، نیاز به مسیریابی کارآمد و مسئولانه زیست‌محیطی خطوط لوله به یک امر ضروری تبدیل شده است (Zhang et al., 2020). اهمیت LCPA در مسیرهای لوله‌کشی با چندین مطالعه موردی که اثربخشی آن را در زمینه‌های جغرافیایی و اجتماعی-اقتصادی مختلف نشان می‌دهد، تأکید می‌شود. به‌عنوان مثال، مطالعات نشان داده‌اند که LCPA می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌های ساخت‌وساز را کاهش داده و درعین‌حال تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند. گارسیا و مارتینز (۲۰۲۱) از LCPA در مسیریابی لوله‌های نفتی ساحلی استفاده کردند و نقش آن را در تعادل بین قابلیت اقتصادی و حفظ اکولوژیکی مورد تأکید قرار دادند. به‌طور مشابه،

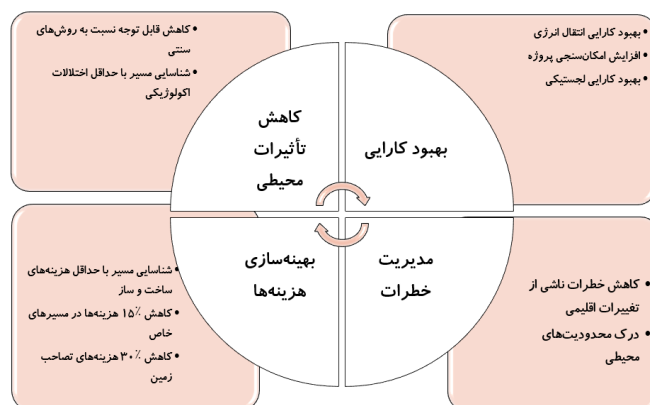
لی و کیم (۲۰۲۱) ادغام عوامل اجتماعی-اقتصادی را در مسیریابی لوله‌های شهری به نمایش گذاشتند و اهمیت مشارکت جامعه را در فرآیند برنامه‌ریزی مورد تأکید قرار دادند.

علاوه بر این، کاربرد LCPA محدود به لوله‌های سوخت فسیلی نیست. با گذار جهان به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر، LCPA به‌طور مؤثری در بهینه‌سازی مسیرهای خطوط انتقال انرژی خورشیدی و دیگر پروژه‌های زیرساخت انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است. میلر و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که چگونه LCPA می‌تواند قابلیت اجرای پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر را با در نظر گرفتن داده‌های زمان واقعی و الگوریتم‌های پیشرفته افزایش دهد و در نهایت منجر به شبکه‌های توزیع انرژی کارآمدتر شود.

تحلیل مسیر کمترین هزینه (LCPA) به عنوان ابزاری قدرتمند در این زمینه ظاهر می‌شود که به برنامه‌ریزان و مهندسان امکان می‌دهد تا مسیرهای بهینه‌ای را شناسایی کنند که هزینه‌ها را به حداقل رسانده و در عین حال عوامل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی را در نظر بگیرند.

کاربرد LCPA در بخش‌های مختلفی فراتر از نفت و گاز، از جمله ارتباطات و حمل‌ونقل، بسیار مؤثر بوده و توانایی و کارایی آن را در تصمیم‌گیری‌های فضایی نشان می‌دهد. محققان به‌طور فزاینده‌ای بر روی بهبود روش‌های LCPA برای گنجاندن تجزیه و تحلیل‌های پیشرفته داده‌ها و تکنیک‌های یادگیری ماشین تمرکز کرده‌اند که می‌توانند دقت پیش‌بینی و کارایی عملیاتی را افزایش دهند (Smith & Johnson, 2019). این تحول در روش‌شناسی برای هم‌راستایی با روندهای کلی تحول دیجیتال در صنعت انرژی ضروری است.

این مقاله قصد دارد به بررسی روش‌ها، مطالعات موردی، نتایج و پیامدهای استفاده از LCPA برای تعیین کریدور انرژی بپردازد. با بررسی ادغام عوامل مختلف و نتایج پروژه‌های خاص سعی دارد، این بحث را درباره اثربخشی LCPA در ترویج توسعه زیرساخت‌های انرژی پایدار ارائه دهد. زیرا اتخاذ رویکردی چندوجهی در مسیریابی کریدوری که نه تنها به ملاحظات اقتصادی بلکه به پایداری زیست‌محیطی و پذیرش اجتماعی نیز اولویت می‌دهد، مورد تأکید قرار است.



شکل ۱. نتایج استفاده از روش مسیر با کمترین هزینه

مبانی نظری

چالش‌های متعددی در طراحی خطوط لوله پیش روی برنامه ریزان قرار دارد که از یک‌طرف باید به کمترین هزینه اقتصادی و از طرفی دیگر به کمترین هزینه محیطی و زیست‌محیطی بپردازند. از این رو می‌توان این چالش‌ها را در مسیریابی خطوط لوله انتقال شامل عبور از زمین‌های متنوع، اجتناب از مناطق حساس اکولوژیکی و رعایت

محدودیت‌های قانونی و سیاسی دانست (Fthenakis & Kim, 2011). برخی از چالش‌های کلیدی مانند محدودیت‌های جغرافیایی و توپوگرافیکی را می‌توان به عنوان پایه‌های اصلی در هر طراحی به شمار آورد. به عبارتی؛ مسیرهای لوله باید از مناظر مختلفی عبور کنند، از جمله کوه‌ها، رودخانه‌ها و مناطق شهری که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر قابلیت ساخت و هزینه‌ها تأثیر بگذارد (Jenkins et al., 2018). شیب‌های تند، خاک‌های ناپایدار و مناطق زلزله‌خیز خطرات اضافی ایجاد می‌کنند که باید از طریق انتخاب دقیق مسیر کاهش یابند (Kaiser & Liu, 2014). از طرفی نگرانی‌های زیست‌محیطی و اکولوژیکی نیز به عنوان اصلی‌ترین محور در طراحی‌های مدنظر قرار می‌گیرد. زیرا کریدورهای انرژی اغلب از مناطق حفاظت‌شده، زیستگاه‌های حیات وحش و آب‌ها عبور می‌کنند که نگرانی‌هایی درباره از دست رفتن تنوع زیستی و اختلال در اکوسیستم ایجاد می‌کند (Allan et al., 2013). ارزیابی‌های تأثیر زیست‌محیطی (EIA) در اکثر حوزه‌های قضایی الزامی است و از برنامه‌ریزان خطوط لوله می‌خواهد تا آسیب‌های اکولوژیکی را به حداقل برسانند (CEQ, 2020).

از منظر اجتماعی در رابطه با استفاده از زمین خصوصاً در مناطقی که عبور این کریدورها از اراضی تحت تملک می‌گذرد، می‌تواند تضادهای اجتماعی-اقتصادی و استفاده از زمین را به دنبال داشته باشد. پروژه‌های خطوط لوله اغلب با مخالفت جوامع محلی به دلیل اختلافات در تصاحب زمین، خطرات احتمالی و نابرابری‌های ادراک‌شده در تقسیم منافع مواجه می‌شوند (Sovacool, 2014). بنابراین درگیر کردن ذینفعان و گنجاندن دغدغه‌های آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های مسیریابی برای موفقیت پروژه ضروری است (O'Faircheallaigh, 2017).

در نهایت ملاحظات امنیتی، قانونی و سیاسی از جمله عوامل پنهانی است که در این فرایند اثرگذار می‌باشد. خطوط لوله فراسرزمینی نیاز به توافقات بین‌المللی و رعایت چارچوب‌های قانونی متعدد دارند که می‌تواند پروژه‌ها را به تأخیر بیندازد و هزینه‌ها را افزایش دهد (Victor et al., 2006). بی‌ثباتی سیاسی در مناطق ترانزیتی، مسیریابی خطوط لوله را پیچیده‌تر می‌کند (Balmaceda, 2018). با توجه به این چالش‌ها، نیاز فوری به رویکردهای سیستماتیک و مبتنی بر داده برای بهینه‌سازی مسیریابی خطوط لوله درحالی‌که عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را متوازن می‌کند، وجود دارد. همچنین نیازمندی به ملحوظ داشتن پروتکل‌های امنیتی خصوصاً در پیوست‌های امنیتی و سیاسی می‌تواند مسیر خطوط لوله را با انحراف در اجرا و هزینه‌های بالا مواجه سازد.

امروزه با گسترش سیستم اطلاعات جغرافیایی و بهره‌گیری این دانش از سیستم‌های پشتیبان تصمیم و به صورت گسترده‌تر از هوش مصنوعی؛ سبب شده است تا طراحی‌ها بر اساس روش‌های مکانی موردبررسی قرارگرفته و هزینه‌های پروژه‌ها کاهش یابد. از رایج‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش تحلیل LCPA، که ریشه در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تحلیل‌های فضایی دارد و چارچوبی قوی برای شناسایی مسیرهای بهینه خطوط لوله با حداقل کردن هزینه‌های تجمعی مرتبط با ساخت، تأثیرات زیست‌محیطی و خطرات اجتماعی-سیاسی فراهم می‌کند (Adriaensen et al., 2003). اشاره کرد.

LCPA یک تکنیک مبتنی بر GIS است که کارآمدترین مسیر را بین دو نقطه محاسبه می‌کند و به متغیرهای فضایی مختلف، مانند شیب زمین، استفاده از زمین و نزدیکی به مناطق حفاظت‌شده، ارزش‌های هزینه اختصاص می‌دهد (Eastman, 2012). این روش شامل:

- ❖ توسعه سطح هزینه: اختصاص وزن به عوامل جغرافیایی و زیست‌محیطی مختلف.
- ❖ تحلیل هزینه-فاصله: محاسبه هزینه‌های سفر تجمعی از یک مبدأ به یک مقصد.
- ❖ شناسایی مسیر کم‌هزینه: استخراج مسیر بهینه با کمترین هزینه تجمعی. (Tomlin, 2013)

- ❖ از طرفی مهم‌ترین مزایای LCPA برای مسیریابی خطوط لوله را می‌توان در موارد زیر دانست:
- ❖ تصمیم‌گیری چندمعیاری MCDM : LCPA معیارهای مختلفی از جمله عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را به یک تابع هزینه واحد ادغام می‌کند (Malczewski, 2006).
- ❖ بهینه‌سازی فضایی: از داده‌های جغرافیایی با دقت بالا برای تولید گزینه‌های دقیق مسیریابی استفاده می‌کند (Longley et al., 2015).
- ❖ کاهش ریسک: با اجتناب از مناطق پرخطر، LCPA احتمال تأخیر در پروژه و افزایش هزینه‌ها را کاهش می‌دهد (Keshkamat et al., 2009).

روش پژوهش

در این مقاله از روش کمترین هزینه مسیر (Least Cost Path Analysis) که به اختصار در اینجا LCPA خوانده می‌شود، بهره گرفته شده است. LCPA از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی و شناسایی مسیرهای بهینه استفاده می‌کند. این فرآیند شامل چندین مرحله کلیدی است: جمع‌آوری داده‌ها: جمع‌آوری داده‌های مکانی مرتبط از جمله توپوگرافی، کاربری زمین، محدودیت‌های محیطی و عوامل اجتماعی-اقتصادی.

تولید سطح هزینه: ایجاد سطح هزینه‌ای که هزینه‌های مربوط به عبور از زمین‌ها و کاربری‌های مختلف را منعکس می‌کند. این سطح با تخصیص وزن به عوامل مختلف بر اساس تأثیر آن‌ها بر هزینه‌های ساخت‌وساز و عملیاتی ایجاد می‌شود. باید توجه داشت در اینجا منظور از سطح هزینه، هزینه‌های صرفاً اقتصادی و مالی نیست زیرا کم‌هزینه‌ترین مسیر در این نوع پروژه‌ها به مسیرهایی با کمترین شیب برمی‌گردد. مسیرهایی که کمترین عملیات خاک‌برداری و به‌کارگیری تجهیزات را شامل شود. با این حال عواملی در این بخش اثرگذار هستند که به تغییر مسیر منجر می‌شوند و نمی‌توان فقط عامل شیب را در نظر گرفت. برخی از این محدودیت‌ها هزینه‌هایی مضاعف تا حدود ۳۰ درصد بیشتر از هزینه پیش‌بینی شده را بر پروژه‌ها تحمیل می‌کنند که شناسایی دقیق آن‌ها به کاهش هزینه‌ها کمک خواهد کرد.

در این بررسی چهار مسیر بر اساس چهار دیدگاه به‌دست‌آمده است. مسیر اول صرفاً بر اساس شیب، مسیر دوم بر اساس تمامی لایه‌ها بدون در نظر گرفتن وزن، مسیر سوم مسیر بر اساس اهمیت و وزن و مسیر چهارم در نظر گرفتن یک مسیر میانی.

تجزیه و تحلیل مسیر: استفاده از الگوریتم‌هایی مانند Dijkstra's یا A* برای تعیین مسیر کمترین هزینه در سطح هزینه تولیدشده.

الگوریتم دایکسترا یک روش معروف برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر از یک گره مبدأ (source) به تمام گره‌های دیگر در یک گراف جهت‌دار یا بدون جهت با وزن‌های غیر منفی است. در اینجا، هدف یافتن مسیری با کمترین هزینه از گره s (مبدأ) به گره t (مقصد) است.

مدل ریاضی ارائه شده

مدل ریاضی در تصویر، مسئله را به صورت یک برنامه خطی (Linear Programming) فرموله کرده است:

تابع هدف: معادله ۱

کمینه کردن مجموع وزن‌های یال‌های انتخاب شده در مسیر:

$$W_{total} = \min_{ij \in A} \sum w_{ij} x_{ij}$$

متغیرهای تصمیم x_{ij} نشان می‌دهند آیا یال (i,j) جزو مسیر است ($x_{ij}=1$) یا خیر ($x_{ij}=0$).

محدودیت‌های ساختاری:

خروج از مبدأ (معادله ۲):

$$\sum x_{sj} - \sum x_{js} = 1$$

یعنی دقیقاً یک یال از گره s خارج می‌شود.

ورود به مقصد (معادله ۳):

$$\sum x_{tj} - \sum x_{jt} = -1$$

یعنی دقیقاً یک یال به گره t وارد می‌شود.

تعادل در گره‌های میانی (معادله ۴):

$$\sum x_{ij} - \sum x_{ji} = 0 \quad \forall i \in V \setminus \{s, t\}$$

یعنی تعداد یال‌های ورودی و خروجی در هر گره میانی باید برابر باشد (تشکیل مسیر پیوسته).

غیر منفی بودن (معادله ۵):

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in$$

رابطه با الگوریتم دایکسترا

• این مدل ریاضی یک فرمولاسیون برنامه‌ریزی خطی برای مسئله کوتاه‌ترین مسیر است. الگوریتم دایکسترا یک روش کارا برای حل همین مسئله است، اما بدون استفاده از برنامه‌ریزی خطی.

• دایکسترا به صورت حریصانه (Greedy) گره با کمترین فاصله از مبدأ را انتخاب می‌کند و فاصله همسایه‌هایش را به‌روزرسانی می‌نماید.

• ویژگی یکپارچگی (Integrality) در مدل بالا تضمین می‌کند که جواب بهینه x_{ij} فقط مقادیر ۰ یا ۱ دارد (یعنی یک مسیر واضح بدون چرخه).

مراحل الگوریتم دایکسترا

(۱) مقداردهی اولیه:

❖ فاصله گره مبدأ s را صفر و فاصله سایر گره‌ها را بی‌نهایت قرار دهید.

❖ یک صف اولویت دار (Min-Heap) برای گره‌های بررسی نشده ایجاد کنید.

(۲) تکرار:

❖ گره u با کمترین فاصله موقت را از صف خارج کنید.

❖ برای هر همسایه v از u :

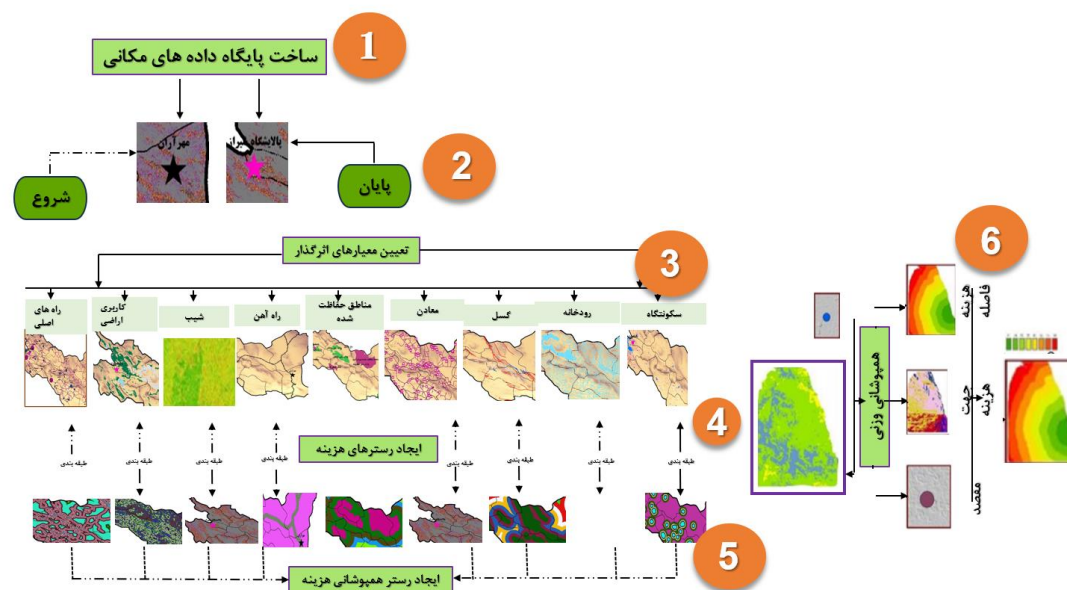
❖ اگر فاصله v از طریق u کمتر از فاصله فعلی‌اش شد، آن را به‌روز کنید.

❖ گره uu را به عنوان پردازش شده علامت بزنید.

(۳) توقف:

❖ وقتی گره مقصد t از صف خارج شد، فاصله نهایی آن، هزینه کمترین مسیر است (Dijkstra, 1959)

گام‌های انجام‌شده در تحقیق زیر نشان داده شده است:



شکل ۲. فرایند انجام تحقیق

مهم‌ترین بخش از ایجاد یک مدل کمترین هزینه ایجاد پایگاهی مناسب از متغیرهای اثرگذار بر روند پروژه است. این معیارها را می‌توان به دو دسته متغیرهای رایج و متغیرهای اختصاصی طبقه‌بندی کرد. در این بررسی از روش دلفی و از طریق جمع‌بندی تجربیات موجود در بخش اجرایی این پروژه‌ها در صنعت نفت (جلسات با کارشناسان و مجریان خطوط لوله بخش فنی و مهندسی نفت) بهره برده شده و نتایج حاصل با ناظران و مجریان این خطوط لوله به اشتراک گذاشته شده است. به عبارتی ضرایب موردنظر بیشتر بر اساس واقعیت‌های موجود در اجرای پروژه‌ها حاصل شده است تا نتایج به صورت کاربردی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

جدول ۱. معیارها و شاخص‌های پژوهش

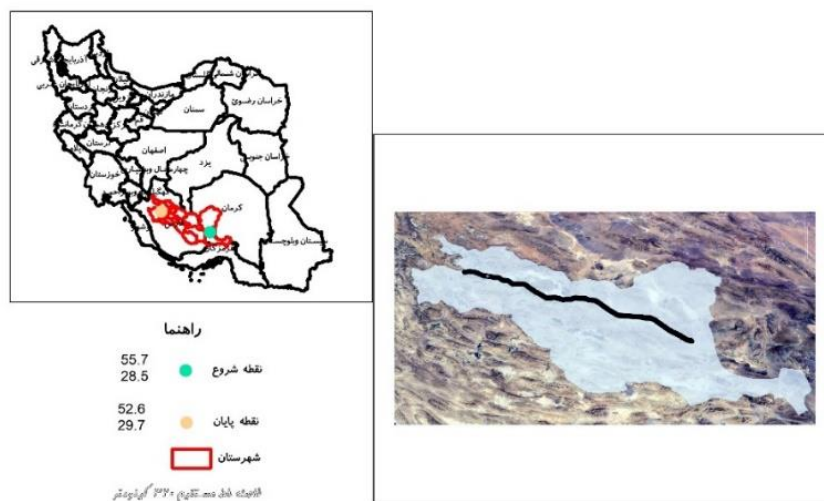
معیار	W	مطلوبیت بالا	مطلوبیت مجاز	متوسط مطلوبیت	حداقل مطلوبیت	غیرمجاز
شیب	۲۰	< از ۱۵٪	۱۵ تا ۲۲	-	-	بیشتر از ۲۲ درصد
فاصله از جاده	۱۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	۲۰۰ تا ۳۰۰	۳۰۰ تا ۴۰۰	بیشتر از ۵۰۰	داخل حریم راه
فاصله از مناطق حفاظت‌شده	۱۰	خارج از حریم ۲ کیلومتری	بیشترین فاصله	فاصله متوسط	فاصله کم	داخل حریم ^۱ (۵۰ متر)
فاصله از شهرک صنعتی	۵	> از ۱۰۰۰ متر	۵۰۰ تا ۱۰۰۰	۲۵۰ تا ۵۰۰ متر	کمتر از ۲۵۰ متر	داخل شهرک (مرز خدماتی شهرک)
فاصله از آثار باستانی	۵	> از ۳۰۰ متر	۲۰۰ تا ۳۰۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر	کمتر از ۱۰۰۰ متر	داخل محوطه (۵۰۰ متر)
فاصله از معادن	۳	> از ۱۰۰۰ متر	۵۰۰ تا ۱۰۰۰	۵۰۰ تا ۳۰۰	کمتر از ۳۰۰	داخل معادن (۱۰۰ متر)
فاصله از روستا	۵	> از ۵۰۰ متر	۵۰۰ تا ۳۰۰	۱۰۰ تا ۳۰۰ متر	کمتر از ۱۰۰ متر	داخل روستا (مرز خدماتی روستا)
فاصله از شهر	۵	خارج از حریم	-	-	-	داخل حریم (حریم شهر)
فاصله از خطوط انتقال	۵	> از ۱۰۰ متر	۱۰۰ تا ۹۰ متر	۸۰ تا ۹۰ متر	۶۰ تا ۸۰ متر	کمتر از ۶۰ متر

۱. منظور از داخل حریم در دسته‌بندی غیرمجاز به این صورت است که برای معیارها در ابتدا یک حریم ممنوعه ترسیم‌شده و مطلوبیت بالا تا حداقل مطلوبیت بعد از مقدار حریم غیرمجاز محاسبه‌شده. مقادیر حریم غیرمجاز در داخل پراکنش به متر ذکرشده است. برای مثال حریم ۵۰ متر راه به این صورت است که ابتدا برای راه یک حریم ۵۰ متری در نظر گرفته‌شده و محاسبه مطلوبیت بعد از ۵۰ متر حریم محاسبه‌شده است

نیرو						
گسل	۵	داخل منطقه بی خطر	داخل منطقه خطر متوسط	داخل منطقه خطر بالا	داخل منطقه خطر خیلی بالا	مناطق خطر بالا و خیلی بالا
فاصله از خطوط راه آهن	۵	> از ۲۰۰ متر	۱۰۰ تا ۲۰۰ متر	۵۰ تا ۱۰۰ متر	کمتر از ۵۰	داخل حریم (۱۰۰ متر)
فاصله رودخانه یا مسیل	۵	> از ۵۰۰ متر	۳۰۰ تا ۵۰۰	۱۰۰ تا ۳۰۰	کمتر از ۱۰۰	داخل حریم (۲۵۰ متر)
فاصله از باغات و کشاورزی	۵	> از ۲۰۰۰ متر	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر	۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر	داخل حریم ۵۰۰	داخل حریم (۱۰۰ متر)
فاصله از دریاچه	۵	> از ۲۰۰۰ متر	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر	۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر	داخل حریم ۵۰۰	داخل حریم (۵۰۰ متر)
قنات	۵	بیشتر از ۱۰۰۰ متر	۵۰۰ تا ۱۰۰۰	کمتر از ۵۰۰	داخل حریم	حریم (۱۰۰ متر)
گورستان و امامزاده منفصل	۲	بیشتر ۵۰۰ متر	۳۰۰ تا ۵۰۰	۱۰۰ تا ۳۰۰	کمتر از ۱۰۰	حریم (۱۰۰ متر)

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در این مقاله مربوط به کریدور انرژی شرق به غرب ایران است که نقطه شروع آن در تلمبه خانه مهرآران واقع در استان هرمزگان و نقطه پایان مربوط به پالایشگاه شیراز می باشد. همچنین در این مسیر یک مقصد میانی برای شهر فسا در نظر گرفته شده است. نقشه (۲) ویژگی های جغرافیایی محدوده مورد بررسی را نشان می دهد. منطقه مطالعه برای تحلیل مسیر کم هزینه بر اساس ارتباط آن با مسیریابی خط لوله نفت انتخاب شد. ویژگی های جغرافیایی، محدودیت های زیست محیطی و عوامل اجتماعی-اقتصادی منطقه مورد توجه قرار گرفتند.



شکل ۳. نقشه منطقه مورد مطالعه

یافته ها

روی هم گذاری لایه ها و استخراج سناریوهای محتمل

در این بررسی هدف دستیابی به سناریوهایی است که بتوان بر اساس آن در آینده بر اساس اهداف پروژه تصمیمات صحیح اتخاذ نمود. کریدور انرژی با تعریفی که در این پروژه ارائه شد، یعنی خط انتقالی که با در نظر گرفتن پروژه های آتی انتقال در کشور پیش بینی های لازم از نظر زیست محیطی صورت گرفته تا بتوان با تحصیل زمین به میزان لازم از

هزینه‌های مطالعاتی و انتقال تا مقدار قابل توجهی کاست. در این بررسی با تدوین مراحل زیر و تهیه یک پایگاه داده‌های مکانی به بررسی محدوده مورد مطالعه پرداخته شد. در این پایگاه داده‌های مکانی شامل لایه‌های متعددی که بر اساس تجربیات موجود در سطح شرکت وجود داشت مورد استفاده قرار گرفت و سعی شد تا با دقت در لایه‌های ورودی نقاط ضعف تا حد امکان کاهش یابد. بدون شک بررسی میدانی و انطباق داده‌های به دست آمده و صحت‌سنجی آن که طی بازدید میدانی صورت گرفت، توانست کمک شایان توجهی در رفع برخی مشکلات داشته باشد.

در این بررسی گام‌های زیر در دستیابی به نتایج برداشته شد:

۱- بررسی ادبیات پژوهش و استخراج تجربیات مرتبط

۲- استخراج معیارها و شاخص‌ها

۳- تشکیل پایگاه داده‌های مکانی از منابع مختلف سازمانی

۴- اجرای تحلیل کمترین هزینه از طریق ایجاد رسترهای فاصله و شیب

۵- وزن دهی معیارها و شاخص‌ها و ورود آن به مدل

۶- استخراج مسیرها محتمل بر اساس سناریوهای تدوین شده

بر اساس گام‌های تدوین شده در این پژوهش اصول زیر در نظر گرفته شده است تا بتوان کمترین هزینه هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر هزینه مدنظر قرار گیرد.

مراحل انجام همپوشانی در سیستم اطلاعات جغرافیایی

پس از آنکه لایه‌ها متناسب با کاربرد آن‌ها در مدل، از وکتور به رستر تبدیل شدند؛ لایه‌ها بر اساس وزن‌های تعیین شده در قسمت روش تحقیق به لایه‌ها وارد شدند. در شکل زیر این ورود اطلاعات به بخش Overlay سیستم نشان داده شده است. همه این لایه‌ها از ۱ تا ۹ طبقه‌بندی شده‌اند. ۱ به معنای بالاترین اهمیت و ۹ کمترین اهمیت در نظر گرفته شده است. از این رو همه لایه‌ها هم جهت می‌باشند. در این میان برخی لایه‌ها مانند شیب و مناطق حفاظت شده به دو صورت وارد مدل می‌شوند. در سناریوی اول همه طبقات شیب در نظر گرفته می‌شود تا بتواند از همه پیکسل‌های موجود عبور کند. در سناریوی دوم فقط به پیکسل‌هایی که کمتر از ۲۲ درصد شیب دارند اجازه داده می‌شود در رستر هزینه شرکت کنند. برای مناطقی که اختلاف ارتفاعی زیاد نیست، این مدل می‌تواند بسیار کارایی داشته باشد. اما در مورد این منطقه به دلیل تغییرات شدید شیب؛ مدل پیوسته‌ای از عوارض ایجاد نمی‌کند. از این رو می‌بایست در منطقه پیکسل‌ها مورد بررسی قرار گرفته و بر این اساس پیکسل‌هایی که با مناطق ممنوعه تداخل دارد بهینه گردد.

نحوه همپوشانی در سیستم در تصویر زیر نشان داده شده است. برای بهره‌گیری از یک مدل بهینه شده از ARC GIS PRO به عنوان نسخه نهایی منتشر شده از ESRI بهره گرفته شد. پیکسل‌های مورد بررسی در این مطالعه ۱۰۰ در ۱۰۰ متر بوده است تا بر اساس آن نقشه وزن دارد شده از لایه‌های مورد استفاده در این گزارش ایجاد گردد. این لایه‌ها در بخش Overlay وارد و هر لایه پس از تعریف ارزش و اهمیت طبقات از ۱ تا ۹؛ بر اساس یافته‌های گزارش وزن از ۰ تا ۱۰۰ درصد اهمیت دریافت کرد. مجموع امتیاز دریافتی نباید از ۱۰۰ بیشتر باشد. بدون شک لایه‌های دارای اهمیت بالا وزن بیشتری به خود می‌گیرند و اثرگذاری بالاتری در بررسی دارند. این اثرگذاری زمانی که همه لایه‌ها در یک پیکسل حضور دارند، نقش مهمی ایفا می‌کند. تصور کنیم یک پیکسل هم ویژگی شیب و هم دوری از مناطق حفاظتی را دارد و پیکسل‌های پیرامون این خصوصیت را ندارد. بدون شک سیستم این پیکسل را برای مسیر انتخاب خواهد کرد. حال ممکن است این پیکسل انتخابی دارای شرایطی مانند زمین‌های کشاورزی و یا اراضی که نیاز به تحویل دارند باشد. ولی

Geoprocessing

Weighted Overlay

Parameters Environment

Weighted overlay table

Raster	%	Weight	Scale
slope	30		
aspect	5		
roughness	10		
elevation	1	1	
major_fault	5	2	
landuse	5	2	
city_class	5	3	
popd_per	5	4	
	5	4	
	5	5	
	5	6	
	5	7	
	5	8	
	5	9	
	5	10	

Sum of influences: 100

Output raster: Weighted_Overlay

Run

در مرحله بعد با تشکیل رستر هزینه در ابتدا نقطه شروع بر روی رستر وزنی تعیین و سیستم بر اساس ارزش هر پیکسل برای آن هزینه تجمعی را محاسبه می‌کند. بر این اساس مشخص می‌شود در فرایند مورد بررسی هر پیکسل تا چه میزان از هزینه‌های تعریف شده فاصله دارد. نمونه‌ای از رستر هزینه در شکل زیر نشان داده شده است.

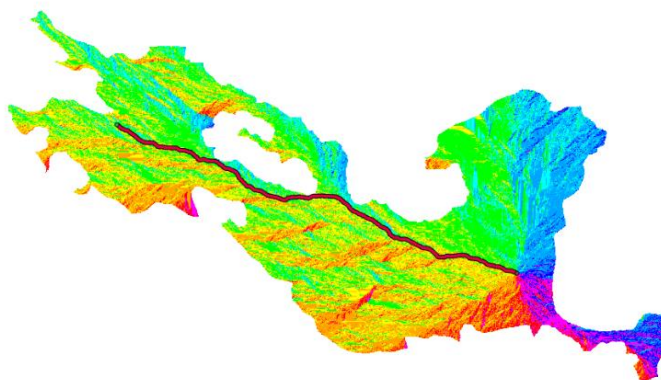
از نقطه شروع، فاصله هر پیکسل مشخص و به مراتب با فاصله گرفتن از نقطه مبدأ این هزینه افزایش می‌یابد.

شکل ۵. رستر افزایش هزینه بر اساس فاصله گرفتن از مبدأ

کوتاه‌ترین مسیر، گسترش تحلیل فاصله وزنی هزینه، کمترین مسیر هزینه را از نقطه شروع تا مقصد محاسبه می‌کند. تجزیه و تحلیل آن لایه‌ای را خروجی می‌دهد که کمترین هزینه مسیر را از یک منطقه خاص به نزدیک‌ترین سلول منبع ثبت می‌کند. به اصطلاح رستر شروع بر اساس فاصله وزنی هزینه در سطح هزینه انباشته تعریف می‌شود.

از نظر مفهومی، عرض کوتاه‌ترین مسیر یک سلول است، یعنی فاصله بین هدف و منبع. واحد همان مختصات رستر هزینه ورودی است. قبل از انجام تحلیل کوتاه‌ترین مسیر، باید رستر فاصله وزنی و رستر پیوند برگشتی را از طریق تحلیل

فاصله وزنی هزینه به دست آوریم. اگر سلولی NoData تعریف شده باشد، در محاسبه وجود نخواهد داشت. اما مقدار سلول ۰ برای رستر ورودی یا برای رستر خروجی هر دو به عنوان یک سلول معقول در نظر گرفته می‌شوند و در محاسبات موجود خواهند بود.



شکل ۶. کوتاه‌ترین مسیر بر اساس کمترین هزینه

مسیر پیشنهادی اول: بررسی مسیر با معیار شیب

در مسیر پیشنهاد اول با توجه به حساسیت مسئله شیب در عملیات تعیین مسیر و هزینه‌های آن، یک مسیر پیشنهادی بر اساس معیار شیب مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به بررسی انجام شده و نظرات کارشناسی سازمان، میزان شیب ۲۲ درصد در نظر گرفته شد. هدف از این بررسی آن است تا کوتاه‌ترین مسیر در ابتدا بر اساس شیب تعیین گردد و در مراحل بعدی با ورود سایر معیارها این مسیر بهینه گردد. بدون شک قرارگیری لایه‌های دارای محدودیت در این مسیر اجازه نخواهند داد تا مسیر انتخابی بر روی فقط یک معیار شیب استوار گردد. با این وجود، اطلاع دقیق از این مسیر می‌تواند در بهینه‌یابی مسیر کمک شایان توجهی داشته باشد.

در اولین بررسی بدون در نظر گرفتن سایر لایه‌ها و اهمیت آن‌ها، در طراحی کریدور شیب‌های کمتر از ۲۲ درصد در مدل وارد و اهمیت ۱۰۰ درصدی برای آن در نظر گرفته شد. مشکلاتی که در طراحی این مسیر وجود دارد، عبارت است از:

- ۱- منطقه به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود که ارتفاعات مرکزی مرز بین این دو بخش است.
- ۲- در شمال و جایی که بدون در نظر گرفتن شهر فسا می‌توان طراحی کریدور را انجام داد، در بخش‌هایی به واسطه مناطق حفاظت شده محدودیت شدید ایجاد می‌شود.
- ۳- نمی‌توان پیکسل‌های دارای شیب بالای ۲۲ درصد را ممنوعیت داد؛ زیرا این محدودیت در شیب‌های بالا در برخی موارد به قطع شدن مسیر می‌انجامد.

رسیدن به مسیری که در آن مسیر شیب به عنوان مهم‌ترین لایه و پرهزینه‌ترین لایه طراحی گردد و پس از سایر لایه‌ها در مدل وارد و بر اساس آن مسیر طراحی شود، بر اساس شیب و مسیر طراحی شده با سایر لایه‌ها بهینه خواهد شد. در تصویر شماره (۸) مسیر اولیه فقط با لایه شیب طراحی شده است. کریدور به دست آمده از نظر رعایت میزان شیب در این مسیر تا ۲۲ درصد در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، این مسیر با پارک ملی بختگان تقاطع دارد. از این رو می‌بایست تعدیل‌هایی در مسیر بر اساس سایر لایه‌ها و هزینه‌ها اعمال گردد. طول این کریدور برابر ۳۶۰ کیلومتر است.



شکل ۷. تصویر سه بعدی منطقه و مسیر مبتنی بر شیب

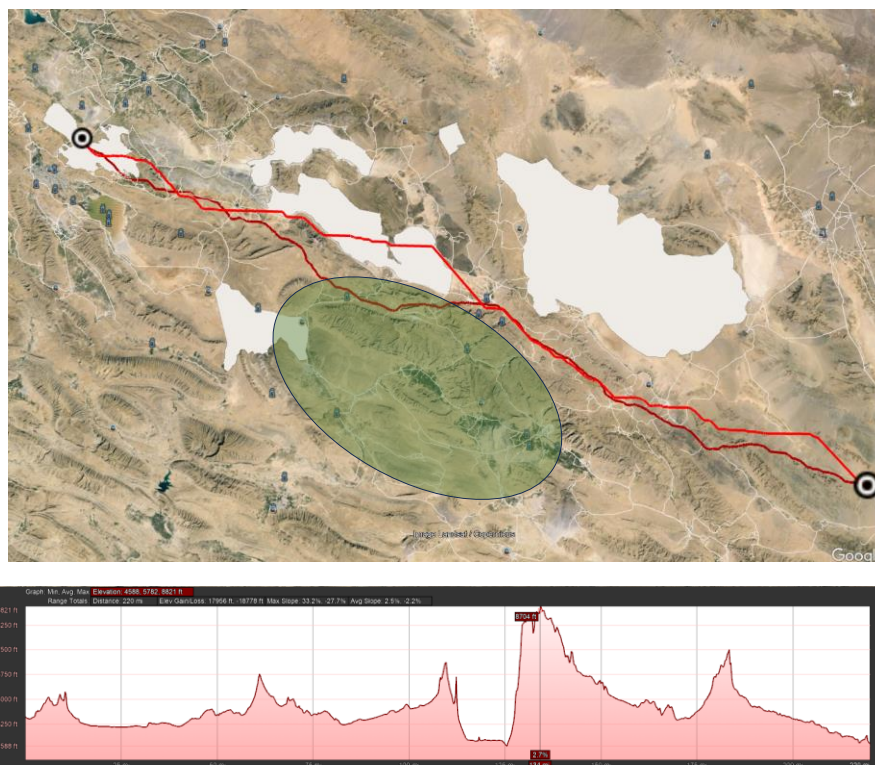


شکل ۸. شمای کلی مسیر کریدور بر اساس درصد شیب در منطقه

گام دوم: ورود همه لایه‌ها با وزن‌های مشخص

بر این اساس در مرحله بعد با ورود سایر لایه‌ها و در نظر گرفتن میزان اهمیت هر یک از لایه‌ها، مسیر به دست آمده با مسیر اول (مسیر با لایه شیب) مقایسه شد و در بخشی از مسیر انطباق و در بخشی دیگر عدم انطباق‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که در شکل (۸) دیدیم مسیر منطبق بر شیب، در نگاه اول به سبب قرارگیری در محدوده منطقه حفاظت شده بختگان؛ نمی‌توانست مسیر مناسبی تلقی گردد. از این رو برای تمامی لایه‌ها بر اساس بررسی‌های انجام شده مقادیر وزنی در نظر گرفته شد و بر این اساس مسیرهای پیشنهادی بر اساس تغییرات در نحوه اعمال لایه‌ها تغییرات جزئی داشته است.

در این مسیر برخی لایه‌ها مانند طبقات بالای ۲۲ درصد شیب در محدوده مناطق حفاظت شده به صورت پیکسل‌های با درجه ممنوعیت در نظر گرفته شده است. به صورتی که این مقادیر در محاسبات وارد نشده است. طول این مسیر ۳۶۳ کیلومتر می‌باشد.



شکل ۹. مسیر دوم پیشنهادی و مقایسه آن با مسیر اول

گام سوم

این مسیر بر این اساس صورت گرفته که هر لایه می‌تواند مقادیر را از ۱ تا ۹ دریافت کند. از این رو طبقاتی که در هر لایه مقدار ۱ دریافت می‌کنند، بالاترین اهمیت و لایه‌هایی که مقدار ۹ دریافت کرده‌اند، کمترین اهمیت را خواهند داشت. این مقادیر بر اساس وزن لایه‌ها اعمال می‌گردد. از این رو در این بررسی لایه راه‌ها نیز اهمیت بیشتری نسبت به سایر لایه‌ها دریافت کرده و سعی شده است مسیر پیشنهادی علاوه بر رعایت محدودیت‌ها تا جای ممکن بر راه‌های موجود در منطقه منطبق گردد. از این رو این لایه در برخی موارد بر جاده‌ها انطباق خود را حفظ کرده است. طول این مسیر برابر با ۳۵۹ کیلومتر می‌باشد.



شکل ۱۰. مسیر پیشنهادی سوم و انطباق آن با مسیرهای اول و دوم

گام چهارم: ایجاد مسیر میانی

این کریدور با اضافه شدن شهر فسا به مسیر ایجاد شده است. همچنین با توجه به لحاظ شدن ممنوعیت شیب بالای ۲۲ درصد، کریدور شکل گرفته نسبت به مسیر قبل وضعیت متفاوتی را طی کرده است. این مسیر در انتها با سه مسیر دیگر همپوشانی می‌یابد که خود نشان‌دهنده وضعیت یکسان این بخش در هر چهار مسیر می‌باشد. این مسیر به سبب آنکه از دو مقصد بهره می‌برد، نمی‌تواند به عنوان یک مسیر کم‌هزینه در نظر گرفته شود؛ زیرا این مسیر حدود ۵۱۱ کیلومتر می‌باشد که حدود ۱۵۰ کیلومتر بیشتر از مسیرهای قبلی است.



شکل ۱۱. مسیر پیشنهادی چهارم و انطباق آن با مسیرهای اول، دوم و سوم

بحث

"تحلیل MCDA-LCP در تحلیل داده‌های جغرافیایی بسیار کارآمد است؛ زیرا می‌تواند داده‌های جغرافیایی را ذخیره کرده و آن‌ها را به‌طور مؤثرتر و راحت‌تر از نقشه‌های کاغذی تحلیل کند (O'Looney, 2000; Wasi & Bender, 2004). در این بررسی در ابتدا روشن شد که منظور از هزینه اشاره به هزینه‌های اقتصادی به شکل مالی و پولی ندارد بلکه منظور کاهش هزینه از طریق کم کردن مسیر، انتخاب مسیر مناسب و از همه مهم‌تر تملک کمتر زمین است. بر اساس سطح هزینه ذکرشده در این مطالعه، ابزار مسیریابی بر اساس کمترین هزینه صحبت از عواملی است که هزینه احداث را تعیین می‌کند، مسیر بهینه بر اساس وزن‌های کارشناسی یا مدلی به دلیل عوامل مختلف، از مزایای بیشتری برخوردار است. مزایای استفاده از این روش در چندین مورد است. اول این که این مسیرها از مناطق شیب‌دار کمتری عبور می‌کنند که باعث می‌شود از نظر هزینه مؤثرتر باشند و دوم این که طول کمتری نسبت به مسیرهای موجود دارند. از آنجاکه مسیر کریدورها از زمین‌های کمتر شیب‌دار عبور می‌کند و از برخی منابع مانند محیط‌زیست و کشاورزی و ... کمتر عبور می‌کند، ایمن و اقتصادی محسوب می‌شود (Ghalibaf et al., 2023). این موارد اولویت‌های اصلی در طراحی مسیر هستند. در توافق با مطالعات قبلی (A. Balogun, Chandio, et al., 2012; A. Balogun, Matori, et al., 2012; A.-L. Balogun et al., n.d.; Volkan Yildirim & Sevet Bediroglu, n.d.; Yildirim et al., 2019, 2019; Yildirim & Bediroglu, 2012)، نتایج مشابهی را نشان می‌دهد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که طبقه‌بندی تصاویر Copernicus SENTINEL-2 درک بهتری از الگوها و ویژگی‌های کاربری زمین و کریدورهای مسیریابی را فراهم می‌کند، حتی اگر برخی از مطالعات قبلی پردازش تصاویر سنجش از دور را در آثار خود لحاظ نکرده باشند (Matori, et al., 2012) بر اساس تصاویر Copernicus SENTINEL-2 که در این مطالعه استفاده شده و همچنین تحلیل‌های GIS، مسیرهای بهینه برای ساخت کریدور از منبع به مقصد مناسب هستند. این نتیجه تأیید می‌کند که نتایج (Volkan Yildirim & Sevet Bediroglu, n.d.; Yildirim et al., 2012; Yildirim, Yomralioglu, 2017; Nisanci, Çolak, et al., 2017). نشان می‌دهد رویکردهای یکپارچه می‌توانند درک بهتری از روند مسیریابی خط لوله را تسهیل کنند.

"مدل یکپارچه در نیجر به‌طور موفقیت‌آمیزی به کار گرفته شده است، هر چند که این مطالعات در اروپا انجام شده‌اند. رتبه‌بندی بالای عوامل محیطی اهمیت حفظ کاربری اراضی (LULC) مناطق مطالعه و کاهش تعداد عبور از رودخانه‌ها و مناطق ساخته شده در این نواحی را تأکید می‌کند. علاوه بر این، حفاظت از محیط‌زیست، موضوع مهمی برای ذینفعان به‌طور کلی است. هرچه یک مسیر نسبت به حق‌العبور موجود کارآمدتر باشد، اثربخشی آن بیشتر می‌شود؛ زیرا از یک سطح هزینه مشخص عبور می‌کند. هدف از این سطح هزینه تأکید بر هزینه ترکیبی تمامی معیارها در هنگام عبور از منبع به مقصد بود. در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی برای نشان دادن خطوط لوله که برای عمر مفید ۳۰-۴۰ سال طراحی شده‌اند، الزامی است. بیشتر از هر عامل دیگری، زمین مشخص می‌کند که کجا می‌توان یک خط لوله را ساخت." از تحلیل‌های فوق مشخص است که برخی معیارها در فرآیند انتخاب مکان برای ساخت این پروژه‌های خط لوله از دیگران بااهمیت‌تر هستند. باوجوداین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب مدل MCDA-LCP-AHP با کاهش احتمال خطرات محیطی و کاهش هزینه کلی پروژه می‌تواند منجر به مزایای محیطی و همچنین اجتماعی-اقتصادی شود. این با برخی از مطالعات قبلی که در آن‌ها صرفه‌جویی هزینه‌ای معادل ۱۵-۲۱٪ با ادغام تکنیک‌های مسیریابی جغرافیایی MCDM- به دست آمد، تناسب دارد (Allen, 2008; Dedemen, 2013).

با قرار دادن مسیرهای بهینه بر روی نقشه سه بعدی منطقه مورد مطالعه، در قسمت مربوط به هر گام قابلیت و مناسب بودن مسیرهای بهینه مدل سازی شده تأیید شد. نتایج تحلیل با آنچه در هر گام ذکر شده است، مطابقت دارد. علاوه بر این، کاستی های ROW موجود را در مکان هایی که از شیب های تند عبور می کند، برجسته می کند. همچنین بررسی های میدانی صورت گرفته نتیجه واقعیت های میدان را تأیید کرده و برای معیارهایی مانند تعداد ارتفاع شدید، عبور از خط القعرها و ... را تأیید کرده است. همچنین بررسی مسائل و چالش های مسیر در بازدید میدانی در جهت اعتبارسنجی مدل انجام شد. در بازدید میدانی صورت گرفته از مخازن موجود در استان های فارس، کرمان و هرمزگان (شیراز، فسا، سیرجان و ...) مواردی که می توان به آن اشاره کرد عبارتند از: ویژگی های منحصر به فرد زمین شناسی محدوده خصوصاً بخش چین خورده زاگرس؛ محدودیت های ناشی از وجود پهنه های بزرگ کشاورزی به هم پیوسته و یا باغات گسترده مانند باغات انجیر؛ گسل های به طول چند صد کیلومتر در محدوده؛ ممنوعیت های شدید زیست محیطی خصوصاً در شمال، جنوب و غرب محدوده؛

نتیجه گیری

هدف این مطالعه تعیین مسیر بهینه کریدور انرژی با استفاده از تحلیل تصمیم گیری چندمعیاره بر مبنای کمترین هزینه مسیر بود. بر اساس نتایج این مطالعه، می توان نتیجه گیری های زیر را استخراج کرد: برای تعیین مسیر بهینه لوله، از Arc GIS و MCDA-LCP استفاده شد. با استفاده از جعبه ابزار فرایند سلسله مراتبی تحلیلی (AHP)، امکان انتخاب مسیر بهینه برای نقشه suitability با بارگذاری وزنی وجود دارد که از معیارهایی نظیر کاربری زمین، شیب، جاده، زمین شناسی و ROW موجود استفاده می کند. با استفاده از ابزار بارگذاری وزنی ArcGIS، نقشه هزینه گسسته از بارگذاری وزنی این معیارها (لایه ها) استخراج شد.

مسیرهای بهینه نشان دهنده مسیری هستند که کمترین هزینه را برای پروژه کریدور به همراه دارد. نقشه هزینه فاصله و نقشه ارتباط معکوس از نقشه هزینه گسسته با تعیین کمترین مسیر بین نقاط منبع و مقصد تولید شد. این پژوهش یک رویکرد ارزیابی چندمعیاره مبتنی بر GIS را برای تعیین مسیرهای بهینه برای ساخت یک تأسیسات خطی ارائه می دهد. برای ساخت این مسیرها، معیارها جمع آوری و ارزیابی شدند. این کار به منظور تعیین اینکه آیا این معیارها برای عبور از منطقه مورد مطالعه از منبع به مقصد با کمترین هزینه ممکن مناسب هستند یا خیر، انجام می شود. به عنوان نتیجه، مدل های کمترین هزینه مسیر (LCP) که در منطقه مورد مطالعه اعمال شده اند، مناطق ساخته شده، آب های سطحی و شیب های تند می توانند اجتناب شوند و بدین ترتیب هدف این مطالعه در چارچوب معیارهای داده شده محقق می شود. هنگامی که با ROW موجود مقایسه می شود، مسیرهای کم هزینه نشان دهنده کارآمدترین مسیرهایی هستند که راهی بین منابع و مقاصد مستند شده فراهم می کنند.

در این بررسی، مطالعات مشابه به عنوان پیشینه و راهنما برای ترکیب عوامل کلیدی در مسیریابی یک پروژه بزرگ ساخت کریدور به یک سطح هزینه که سپس برای تحلیل مسیر کم هزینه و تعیین مسیر بهینه استفاده شد، به کار رفته است. با اتخاذ یک رویکرد مبتنی بر ادبیات، نتیجه کلی یک مسیر کم هزینه قابل قبول بود که با مقررات اصلی مرتبط با مسیریابی چنین زیرساختی مطابقت داشت. مطالعات دقیق تر توصیه می شود؛ زیرا استفاده از کمترین هزینه مسیر (LCP) در برنامه ریزی مسیر و تحقیقات میدانی قبل از اتخاذ تصمیمات نهایی ضروری است. برای برآورده کردن معیارهای ساخت و ساز دقیق تر، معمولاً بهبودهایی در طراحی مسیر لازم است.

در پایان، اگر الگوریتم MCDA-LCPA بتواند در سیستم برنامه‌ریزی اولیه گنجانده شود، می‌تواند مزایای اقتصادی و صرفه‌جویی در زمان را برای طراحی یک مسیر پایدار ارائه دهد. علاوه بر این، این تکنیک گزینه‌های متعددی را فراهم می‌کند و توانایی مقایسه آن‌ها ابزار ارزشمندی برای طراحان است؛ زیرا می‌تواند بسیاری از مشکلات موقعیتی را حذف کند.

حامی مالی

هزینه موردنیاز اجرای این طرح به وسیله اداره پژوهش و فناوری شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت ایران تأمین شده است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمامی بخش‌ها و مراحل پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

نتایج

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه از اداره پژوهش و فناوری شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت ایران به دلیل تأمین هزینه‌های موردنیاز و نیز داوران محترم که در ارتقای کیفیت مقاله مؤثر بودند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

نورعلی، حسن و احمدی، سیدعباس. (۱۴۰۱). تحلیل نقش ژئوپلیتیکی ایران در کریدورهای بین‌المللی. *پژوهش‌های جغرافیایی انسانی*، ۵۴(۳)، ۱۱۶۱-۱۱۸۷. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2022.331764.1008388>

نورعلی، حسن و احمدی، سیدعباس. (۱۴۰۰). بررسی نقش بنادر در نظریه‌های جغرافیای سیاسی/ژئوپلیتیک و ارائه نظریه قدرت بنادر. *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای سیاسی*، ۵، ۹۰-۱۱۴.

References

- Adriaensen, F., et al. (2003). The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 64(4), 233-247.
- African Development Bank. (2019). *Trans-Saharan Gas Pipeline*. <https://www.afdb.org/en/projects-and-operations/pipeline/trans-saharan-gas-pipeline>
- Allan, J. D., et al. (2013). Joint analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness. *PNAS*, 110(1), 372-377.
- Balmaceda, M. (2018). *The politics of energy dependency: Ukraine, Belarus, and Lithuania between domestic oligarchs and Russian pressure*. University of Toronto Press.
- California Energy Commission. (2019). *Energy-water nexus: A comprehensive approach to resource management*. <https://www.energy.ca.gov/water-nexus>
- CEQ. (2020). *Environmental impact assessment guidelines*. Council on Environmental Quality.
- Chen, L., Zhang, Y., & Wang, X. (2023). Neural networks for predictive routing in least cost path analysis: A case study. *Journal of Transport Geography*, 95, 102-115.
- Coastal Research Institute. (2023). Assessing the environmental impacts of coastal pipeline routing: A case study. *Coastal Management Journal*, 51(3), 200-215. <https://doi.org/10.1080/08920753.2023.1234567>
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva manual*. Clark Labs.
- EIA. (2023). *International energy outlook 2023*. U.S. Energy Information Administration.
- Esri. (2022). *ArcGIS Pro*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- European Commission. (2021). *Hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*.

- Fthenakis, V., & Kim, H. C. (2011). Solar energy lifecycle GHG emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 3261-3270.
- García, J., & Martínez, A. (2021). Ant colony optimization for least cost path analysis in complex landscapes. *Journal of Environmental Management*, 254, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.109118>
- García, J., López, M., & Fernández, R. (2021). Ant colony optimization for least cost path analysis in complex landscapes. *Applied Geography*, 132, 102-117.
- Ghalibaf, M. B., Gholami, M., & Ahmadi, S. A. (2023). Climate change, food system, and food security in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 25(1), 1-17.
- Gorsevski, P. V., et al. (2012). Spatial prediction of landslide hazards using machine learning. *Environmental Modelling & Software*, 35, 1-10.
- IEA. (2022). *World energy investment report*. International Energy Agency.
- Instituto de Energia e Meio Ambiente. (2020). *Transcoastal corridor: A sustainable development initiative*. <https://www.iema.org.br/transcoastal-corridor>
- Johnson, R., Smith, P., & Lee, J. (2021). Community engagement in pipeline routing: Lessons from the Trans Canada Project. *Energy Policy*, 150, 112-120.
- Keshkammat, S. S., et al. (2009). The formulation and evaluation of transport route alternatives using a spatial multi-criteria analysis. *Applied Geography*, 29(4), 561-575.
- Kumar, A., & Silva, J. (2020). Cross-border energy corridors: A GIS-based least-cost path analysis for South Asia. *Energy Policy*, 142, 111523.
- Lee, J., & Kim, H. (2021). Integrating multi-criteria decision analysis with least cost path analysis for sustainable pipeline routing. *Journal of Environmental Management*, 250, 109-123.
- Lee, S., & Kim, H. (2021). Integrating socio-economic factors in GIS-based pipeline routing: A multi-criteria decision approach. *International Journal of Geo-Information*, 10(2), 123-145. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020123>
- Miller, A., Johnson, R., & Smith, T. (2022). The impact of climate change on oil pipeline routing: A review. *Energy Policy*, 156, 112-125.
- Miller, R., Thompson, P., & Johnson, E. (2022). Balancing environmental sustainability and economic viability in pipeline routing: A case study. *Environmental Science & Policy*, 128, 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.001>
- Nguyen, T. H., et al. (2023). Optimizing offshore wind farm cable routing using LCPA. *Renewable Energy*, 205, 567-578.
- Noorali, H., & Ahmadi, A. (2022). Analysis of Iran's geopolitical role in international corridors. *Human Geography Research*, 54(3), 1161-1187. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2022.331764.1008388> [In Persian]
- Noorali, H., & Ahmadi, S. (2021). Investigating the role of ports in theories of political geography / geopolitics and presenting the theory of port power. *Quarterly Journal of Political Geography Research*, 5, 90-114. [In Persian]
- North Sea Wind Power Hub. (2021). *Project overview*. <https://www.northseawindpowerhub.eu/>
- Smith, J., & Johnson, L. (2019). The role of remote sensing in enhancing GIS-based least cost path analysis. *Remote Sensing of Environment*, 225, 181-192. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.011>
- Smith, P., & Johnson, L. (2019). Application of GIS in oil pipeline routing: A review of current practices. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 20(4), 345-360.
- Sovacool, B. K. (2014). *Energy and ethics: Justice and the global energy challenge*. Palgrave Macmillan.
- Tomlin, C. D. (2013). *GIS and cartographic modeling*. ESRI Press.
- TransCanada Corporation. (2016). *TransCanada Pipeline Project: Environmental and socio-economic impact assessment*. <https://www.transcanada.com/pipeline-project-report>
- Wang, Y., Chen, L., & Zhang, J. (2022). Optimizing oil pipeline routing in mountainous regions: A GIS-based approach. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 10(3), 215-230.
- World Bank. (2011). *Infrastructure for sustainable energy development*. The World Bank Group.

- Yamal-Europe Pipeline. (2020). *Overview and impact*. <https://www.yamal-europe.com/>
- Zhang, L., et al. (2018). GIS-based optimization of natural gas pipeline routes in ecologically sensitive regions. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1205-1215.
- Zhang, Y., Liu, T., & Wang, X. (2020). Shortest path algorithms in environmental management: A comparative study. *Computers, Environment and Urban Systems*, 83, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101110>
- Zhang, Y., Wang, X., & Liu, G. (2020). Cost surface modeling for least cost path analysis in GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80, 101-112.