



Optimal Routing of the Gorgan-Mashhad Railway Based on Ecological and Socio-Economic Criteria

Mahdie Taghipour-Sabzevar¹ , Abdul Rasoul Salman Mahini² , Seyed Hamed Mirkarimi³ ,
Hamidreza Kamyab⁴

1. Department of Environment, Faculty of Fisheries And Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences And Natural Resources, Gorgan, Iran

Email: mahdietaghipour@gmail.com

2. (Corresponding Author) Department of Environment, Faculty of Fisheries and Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Email: rassoulmahiny@gmail.com

3. Department of Environment, Faculty of Fisheries and Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Email: seyedhamedmirkarimi@gmail.com

4. Department of Environment, Faculty of Fisheries and Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Email: kamyab.hr@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

10 April 2025

Received in revised form:

7 June 2025

Accepted:

4 July 2025

Available online:

18 August 2025

Keywords:

Optimal Routing,
Multi-Criteria Evaluation
(MCE),
Least-Cost Path Algorithm
(LCPA).

ABSTRACT

Today, with the increasing population and the rising costs of developing road networks for personal vehicle use and their negative consequences, expanding public transportation systems such as railways is considered a fundamental solution for large cities. The purpose of this study is to determine the optimal shortest routes based on ecological and socio-economic criteria for the Gorgan–Mashhad railway within Golestan Province and to evaluate the positive and negative impacts of this project to select the route with the least environmental impact. In this research, multi-criteria decision-making techniques and the least-cost path algorithm were used to determine the optimal route for the Gorgan–Mashhad railway. First, influential parameters in route selection were identified, standardized, and weighted. Then, a cumulative cost map was produced in Idrisi software, and optimal routes were determined using the least-cost path algorithm. Finally, the routes were compared and evaluated. The routes obtained using the shortest path algorithm were as follows: Route (1) with 197 km, Route (2) with 177 km, and Route (3) with 164 km. Evaluation results for Route 1 indicate an average minimum distance of 308 meters from rivers, 13,505 meters from protected areas, 2,552 meters from residential areas, 6,176 meters from faults, an average elevation of 259 meters, and an average slope of 8.7%. Therefore, despite being longer, Route 1 causes less environmental damage. In the long term, Route 1 is more cost-effective and safer in terms of environmental costs. The results show that although the routing process is complex, suitable routes designed according to environmental principles can be achieved using GIS, multi-criteria evaluation methods, and the least-cost path algorithm.

Citation: Taghipour-Sabzevar, M., Salman Mahini, A. R., Mirkarimi, S. H., & Kamyab, H. (2025). Optimal Routing of The Gorgan-Mashhad Railway Based on Ecological and Socio-Economic Criteria. *Geographical planning of space quarterly journal*, 15 (2), 117-135.

<http://doi.org/10.30488/gps.2025.490551.3804>



© The Author(s)

Publisher: Golestan University Press

This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Nowadays, with the growing population and the increasing costs of expanding road networks for private vehicle use, along with its negative consequences, the development of public transportation systems such as railways is considered a fundamental solution for large cities. On the other hand, developing transportation systems without proper planning and management can lead to damage to the natural environment. Accordingly, to reduce damage to environmental resources and achieve sustainable development goals, environmental characteristics must be incorporated into projects related to linear infrastructure, such as railway lines. In traditional routing methods, technical and engineering specifications are prioritized, while environmental characteristics receive less attention. Geographic Information Systems (GIS) are among the efficient and effective tools for assisting experts in designing linear infrastructure. One of the most beneficial applications of these tools is determining the least costly and least impactful route to connect two locations, considering environmental characteristics relevant to the subject and location. The project for developing the national railway route in Golestan Province towards the east (Khorasan Razavi Province) has been under consideration for some time. In this process, a route exists in the provincial maps that can be compared with the results of the current study. It is evident that implementing this project holds significant importance and will impact the province's development in environmental, economic, and social aspects.

Methodology

Overall, the methodology of this research is divided into three main steps:

1. Defining the boundaries of the study area and obtaining base maps and data.
2. Identifying the shortest environmentally-friendly proposed routes using land-use maps and other relevant maps for routing between the city of Gorgan and the easternmost point of Golestan Province, utilizing the Idrisi Terrset 2020 software.

3. Evaluating the environmental impacts of the proposed routes and selecting the final route.

Considering the objective of this research, the routing begins at the starting point, which is the Gorgan railway station, and ends at the easternmost point of Golestan Province. Therefore, the boundary of the study area is limited to Golestan Province. In this study, multi-criteria decision-making techniques and the least-cost path algorithm were used to determine the optimal route for the Gorgan-Mashhad railway. First, after library research and reviewing various sources, a list of necessary parameters for railway routing was compiled. Based on the input of the thesis advisory committee, 35 parameters were selected for the Gorgan-Mashhad railway routing. After standardizing and weighting these parameters, a cumulative cost map was generated in the Idrisi software environment. The least-cost path algorithm was then used to identify the optimal routes. Finally, the routes were compared and evaluated.

Results and discussion

In this study, the Weighted Linear Combination (WLC) method and the Least-Cost Path Algorithm (LCPA) were used to integrate the layers. In the first stage, land suitability for constructing this infrastructure was evaluated using appropriate Weighted Linear Combination techniques. Then, the optimal route between Gorgan and Mashhad was determined on the cost or friction surface using the optimal routing method (LCPA). It is important to note that the criteria obtained from Multi-Criteria Evaluation (MCE) must be dimensionless and scale-free. Therefore, in this research, fuzzy logic and Boolean methods were applied to standardize the criteria. Finally, in the Idrisi TerrSet 2020 environment, fuzzy maps, constraints, and weighted criteria were combined using the Weighted Linear Combination method. This process produced a multi-criteria evaluation map, which was then integrated with the regional suitability map to obtain the final assessment.

Subsequently, using the cost or friction map, the cumulative cost map, and the origin and destination points in Idrisi TerrSet 2020, two optimal routes were identified. Additionally, the Planning and Management Organization provided a route based on their preliminary studies. After designing the routes, they were evaluated to select the one that caused the least environmental damage as the optimal route. In fact, selecting the optimal route means choosing the most cost-effective path in terms of environmental and economic considerations.

The final route lengths obtained using the shortest path algorithm are as follows: Route 1 is 197 kilometers, Route 2 is 177 kilometers, and Route 3 is 164 kilometers. Additionally, key criteria for comparing and evaluating the routes were selected based on the review of various studies. These criteria include: average slope, average elevation, average distance from faults, average distance from residential areas, average distance from protected areas, and average distance from rivers.

The evaluation results for Route 1 indicate that the average minimum distance from rivers is 308 meters, the distance from protected areas is 13,505 meters, the average distance from residential areas is 2,552 meters, the distance from faults is 6,176 meters, the average elevation is 259 meters, and the average slope is 8.7%.

Based on the obtained results, although Route 1 is longer than the other routes, it maintains an appropriate buffer from environmentally sensitive factors. From an economic perspective, despite being farther from residential areas compared to other routes, it still offers reasonable accessibility and is not significantly distant from populated areas. Moreover, Route 1 has a lower average elevation and slope percentage, which leads to reduced excavation and embankment costs. Additionally, by maintaining greater distances from faults and protected areas, this route enhances railway safety and helps preserve the ecosystem and wildlife habitats in the region.

Conclusion

A path that takes into account all influencing factors, such as construction costs, safety, and environmental issues, is referred to as a low-cost path. The first step in constructing any new route is selecting an optimal path. Designing the optimal railway route is a complex task that requires extensive data analysis and parameter evaluation, depending on the project's length. The results showed that using GIS, multi-criteria evaluation methods, and LCPA plays a key role in addressing various environmental dimensions.

In this study, influential environmental criteria were identified, and using the capabilities of GIS and LCPA, the optimal routes were determined. The designed routes were compared and evaluated in terms of adherence to distance constraints from relative obstacles, such as rivers, cities, villages, protected areas, and other environmentally sensitive regions. Ultimately, Path 1 was selected as the final route. Although Path 1 was longer, it is likely to cause fewer environmental damages and long-term impacts on the ecosystem and human health in the surrounding areas compared to the other two paths.

Funding

There is no funding support.

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

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



مسیریابی بهینه راه آهن گرگان-مشهد بر پایه معیارهای اکولوژیک و اقتصادی-اجتماعی

مهديه تقی پورسبزواری^۱، عبدالرسول سلمان ماهینی^۲✉، سیدحامد میرکریمی^۳، حمیدرضا کامیاب^۴

- ۱- گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mahdietaghipour@gmail.com
- ۲- نویسنده مسئول، گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rassoulmahiny@gmail.com
- ۳- گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: seyedhamedmirkarimi@gmail.com
- ۴- گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: kamyab.hr@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۳ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷ واژگان کلیدی: مسیریابی بهینه، ارزیابی چندمعیاره (MCE)، الگوریتم کوتاه ترین مسیر (LCPA).	امروزه با توجه به افزایش جمعیت و افزایش هزینه های توسعه شبکه جاده ای برای استفاده از وسایل نقلیه شخصی و پیامدهای منفی آن، توسعه سیستم های حمل و نقل عمومی مانند راه آهن یک راه حل اصولی برای شهرهای بزرگ محسوب می شود. هدف از انجام این تحقیق تعیین کوتاه ترین مسیرهای بهینه بر پایه معیارهای اکولوژیک و اقتصادی - اجتماعی برای راه آهن گرگان - مشهد در محدوده استان گلستان و ارزیابی پیامدهای مثبت و منفی حاصل از اجرای این پروژه برای انتخاب مسیری که کمترین تأثیرات منفی را برای محیط زیست دارد، است. در این پژوهش برای تعیین مسیر بهینه راه آهن گرگان - مشهد از تکنیک های تصمیم گیری چندمعیاره و الگوریتم کم هزینه ترین مسیر استفاده شد. برای این منظور ابتدا پارامترهای تأثیرگذار در تعیین مسیر شناسایی و پس از استانداردسازی و وزن دهی، در محیط نرم افزار Idrisi نقشه هزینه تجمعی تولید و سپس با الگوریتم کم هزینه ترین مسیر، مسیرهای بهینه تعیین شد. در نهایت مقایسه و ارزیابی مسیرها انجام شد. مسیرهای به دست آمده با استفاده از الگوریتم کوتاه ترین مسیر به ترتیب مسیر (۱) ۱۹۷ کیلومتر، مسیر (۲) ۱۷۷ کیلومتر، مسیر (۳) ۱۶۴ کیلومتر است. نتایج ارزیابی مسیر شماره ۱ نشان می دهد که میانگین حداقل فاصله از رودخانه ۳۰۸ متر، فاصله از مناطق تحت حفاظت ۱۳۵۰۵ متر، میانگین فاصله از مناطق مسکونی ۲۵۵۲ متر، فاصله از گسل ۶۱۷۶ متر، میانگین ارتفاع ۲۵۹ متر و میانگین شیب ۸/۷ درصد می باشد. بنابراین با توجه به نتایج ارزیابی مشخص شد مسیر (۱) علی رغم اینکه طولانی تر است ولی تأثیرات منفی کمتری به محیط اطراف وارد می کند؛ بنابراین مسیر شماره ۱ در طولانی مدت از نظر هزینه های محیط زیستی مقرون به صرفه تر و کم خطرتر است. نتایج نشان می دهد با توجه به اینکه فرآیند مسیریابی کاری پیچیده است اما می توان با استفاده از GIS، روش های ارزیابی چندمعیاره و الگوریتم کم هزینه ترین مسیر، مسیرهای مناسبی را که طبق اصول محیط زیستی طراحی شده اند را به دست آورد.

استناد: تقی پورسبزواری، مهديه؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ میرکریمی، سیدحامد و کامیاب، حمیدرضا. (۱۴۰۴). مسیریابی بهینه راه آهن گرگان-مشهد بر پایه معیارهای اکولوژیک و اقتصادی-اجتماعی. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۵ (۲)، ۱۱۷-۱۳۵.

<http://doi.org/10.30488/gps.2025.490551.3804>



مقدمه

شبکه حمل و نقل به دلیل یکی از بخش‌های مهم برای توسعه و حتی تأثیرگذار بر فعالیتهای دیگر و ایجاد زمینه رشد و شکوفایی و همچنین به علت گستردگی و موقعیت کشور، پراکندگی شهرها و فواصل طولانی بین آنها، توسعه شبکه حمل و نقل امری ضروری است که باید به آن توجه شود. همچنین این امر باعث افزایش فعالیت و تحرک می‌شود که برای رشد اقتصادی جامعه و کشور به عنوان عامل مؤثر و ضروری است (Kamboj & Hasanabadi et al., 2018: 11; Kumari, 2017).

در میان شبکه حمل و نقل، راه آهن به علت ویژگی‌های خاص از جمله ایمنی بالا، مصرف برق کمتر، مقرون به صرفه بودن، محافظت از محیط زیست از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و سرعت بخشیدن به صنعتی شدن از طریق حمل و نقل، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Yildirim & Bediroglu, 2019).

از طرفی توسعه سیستم حمل و نقل بدون برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح باعث آسیب رساندن به محیط طبیعی و تکه تکه شدن زیستگاه‌ها می‌شود؛ بنابراین بهتر است تمام مراحل طراحی و ساخت شبکه حمل و نقل به روشی انجام شود که با ارزش‌های محیط‌زیستی و مدیریت پایدار سازگار باشد (Alimohammadi et al., 2021: 1, Mahini & Abedian, 2014: 517). به طور کلی اساسی‌ترین پارامتر در مسیریابی پیدا کردن کوتاه‌ترین راه است. زیرا کوتاه شدن مسیر باعث کاهش تعداد تجهیزات و هزینه‌های عملیاتی مانند نقشه برداری، زمین‌شناسی و مکانیک می‌شود، ولی گاهی به دلیل وجود عوارض مختلف در طول مسیر و همچنین رعایت اصول فنی و ایمنی ما مجبور به انتخاب مسیرهای طولانی‌تر می‌شویم؛ بنابراین هدف ما یافتن کوتاه‌ترین مسیر بهینه است که با موارد فنی و اقتصادی سازگار بوده و کم‌ترین آسیب و تغییر شکل را به محیط زیست وارد کند (Mirabdollahi & Mirabdollahi, 2015: 191). بر همین اساس، بهترین روش برای کاهش خسارت‌های اقتصادی و اکولوژیک، در نظر گرفتن معیارهای محیط‌زیستی در فاز صفر مطالعاتی یا مسیریابی اولیه و جلوگیری از عبور مسیر از مناطق حساس اکولوژیک است، که برای دستیابی به این هدف، باید مقدار زیادی از اطلاعات تجزیه و تحلیل شود (میترا امامی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۷). با توجه به پیچیده بودن موضوع، استفاده از روش‌های نوین مسیریابی مانند سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) می‌تواند نقش بسیار مهمی در فرآیند مسیریابی داشته باشد، زیرا در این روش‌ها علاوه بر توجه به مسائل فنی و اقتصادی به مسائل محیط‌زیستی هم توجه می‌شود (Gyabeng, 2020: 572). به طور کلی یکی از سودمندترین کاربردهای GIS، به دست آوردن کم‌هزینه‌ترین یا کم‌اثرترین مسیر برای اتصال دو مکان است (امامی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۷). Yu و همکاران (۲۰۰۳، ۳۶۱)، بیان کردند روش تحلیل کم‌هزینه‌ترین مسیر (LCPA) به کمک GIS روشی مفید برای کاهش خطرات محیط‌زیستی در طرح‌ریزی سیمای خطی به حساب می‌آید (امامی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۷). همچنین در شناسایی کم‌هزینه‌ترین یا ارزان‌ترین مسیر از یک مکان به مکان دیگر بر روی لایه سطح هزینه یا سطح اصطکاک روش LCPA نقش بسزایی دارد. داگلاس^۲ و همکاران (۱۹۹۴: ۳۷)، بیان کردند روش LCPA را می‌توان با تهیه یک سطح هزینه تجمعی که در آن بهترین مسیر از نقطه مبدأ به نقطه مقصد شناسایی می‌شود، انجام داد (Bagli et al., 2011: 234).

در همین راستا محققان زیادی در تلاش برای حل مسئله مسیریابی با رعایت تمام استانداردهای لازم هستند، که به بررسی تعدادی از آنها پرداخته شده است.

حسن‌لو و همکاران در سال ۱۳۹۹ پژوهشی با هدف تعیین مسیر بهینه خطوط لوله انتقال آب انجام داده‌اند که در این

1. Geographic Information System

2. Douglas

پژوهش ملاحظات فنی و مهندسی، اقتصادی و محیط‌زیستی در فرآیند مسیریابی اعمال شده است. در این پژوهش ابتدا پارامترهای مؤثر در مسیریابی تعیین شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم مسیر کم‌هزینه (LCPA^۱) مسیر بهینه تعیین شد. در نهایت دو مسیر به دست آمده در نرم‌افزار ArcGIS و Idrisi مقایسه شده و نتایج نشان داد بیشترین هزینه مربوط به یکی از مسیرها، مربوط به تقاطع بیشتر با رودخانه و جاده و عبور از نواحی غیرمجاز و کاربری‌های مختلف و در نهایت افزایش طول مسیر لوله است. داورپناه و وحیدنیا سال ۱۳۹۹ پژوهشی با هدف تعیین مسیر بهینه خطوط انتقال آب ارداک - مشهد انجام داده‌اند. در این پژوهش از روش‌های پردازش مکانی، تصمیم‌گیری چندمعیاره و الگوریتم مسیر کم‌هزینه برای انتخاب مسیر بهینه استفاده شده است. با توجه به نتایج مقایسه مسیرهای پیشنهادی به روش سنتی توسط مشاور و مسیر پیشنهادی با الگوریتم کم‌ترین هزینه در محیط GIS، مشخص شد دقت این مطالعات بستگی به دقت اطلاعات استخراج شده از GIS دارد و بدون استفاده از این روش‌ها انجام این مطالعات کار بسیار دشواری است و حتی دقت بسیار پایین و غیرقابل قبولی دارد. علی‌محمدی و همکاران در سال ۱۴۰۰ پژوهشی انجام داده‌اند که طبق نتایج این پژوهش برای کاهش اثرات منفی در پروژه‌های راه‌سازی و توسعه اجتماعی-اقتصادی فرآیند مسیریابی باید تمام پارامترهای محیط‌زیستی در آن اعمال شود. در این پژوهش ابتدا تمامی پارامترهای محیط‌زیستی شناسایی شدند، در نهایت با استفاده از الگوریتم مسیر کم‌هزینه در نرم‌افزار Idrisi مسیریابی بهینه انجام شد. مقایسه مسیر طراحی شده و مسیر فعلی نشان می‌دهد که در مسیر طراحی شده حریم تمامی پارامترهای مؤثر محیط‌زیستی کاملاً رعایت شده و این مسیر از لحاظ محیط‌زیستی به مراتب بهتر از مسیر فعلی است. در نتیجه پیشنهاد می‌شود در فرآیند مسیریابی ابتدا تمامی پارامترهای مؤثر شناسایی شود سپس با رعایت کردن قوانین و اصول محیط‌زیستی و با استفاده از GIS مسیریابی انجام. در مطالعه ساری و سان^۲ در سال ۲۰۱۷ مسیرهای بزرگراه جدید برای شهر قونیه با رویکردهای اقتصادی، محیط‌زیستی و ترکیبی بررسی شده است. در این پژوهش پارامتر هزینه و سطوح مربوطه با توجه به الزامات ساخت بزرگراه تولید شده و سپس با الگوریتم کم‌هزینه‌ترین مسیر (LCPA) سه مسیر مختلف به دست آمد. در نهایت این سه مسیر از نظر پارامترهای محیط‌زیستی و هزینه مقایسه شدند. ناگومی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ پژوهشی به منظور تعیین مسیر بهینه راه‌آهن با استفاده از سنجش‌ازدور و مدل‌سازی GIS برای راه‌آهن انجام داده‌اند. مسیرهای بهینه به کمک GIS و بر اساس محیطی، مهندسی و ترکیبی از عوامل مهندسی و محیطی استخراج و مقایسه شده، در نهایت به کمک تصمیم‌گیری چند معیاره بهترین مسیر انتخاب شد. سامر^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای برای انتخاب مسیر بهینه انجام داده‌اند. این تحقیق موفق شد ثابت کند که امکان تعیین مسیر بزرگراه روستایی بین دو شهر با استفاده از GIS و تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDA^۵) وجود دارد محل مطالعه در منطقه‌ای بین شهرهای رمادی و هیت در استان الانبار، در غرب عراق، که از ازدحام و حوادث ترافیکی رنج می‌برند انتخاب شد. هدف این تحقیق ادغام مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP^۶) و یک مدل چندمعیاره فضایی برای یافتن مسیر بهینه در منطقه مورد مطالعه است. در این مطالعه دو مسیر جایگزین پیشنهاد شد و با مسیر فعلی مقایسه شد تا بهترین مسیر پیدا شود. داور پناه و وحیدی نیا در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای برای مسیریابی خطوط انتقال آب بین شهر مشهد و ارداک انجام داده‌اند. برای این منظور ابتدا پارامترهای مؤثر در تعیین مسیر شامل شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، مناطق مسکونی، آبراه‌ها،

1. Least Cost Path Algorithm

2. Sari & Sen

3. Ngunyi

4. Sameer

5. Multi-Criteria Decision Analysis

6. Analytical Hierarchy Process (AHP)

جاده‌ها، گسل‌ها و مناطق تحت حفاظت تعیین و پس از انجام فرآیندهای وزن دهی در روش‌های AHP، TOPSIS و منطق فازی، روی هم قرار گرفتند، و در نهایت با استفاده از الگوریتم کمترین هزینه در GIS مسیر نهایی تعیین شد. در آخر، مقایسه‌ای بین روش سنتی ارائه‌شده توسط مشاور و مسیر پیشنهادی با الگوریتم کمترین هزینه انجام شد. مسیرهای به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم کمترین هزینه بر اساس AND، GAMA، AHP و TOPSIS به ترتیب برابر است با: مسیر (۱) ۴۴/۷۹۸ کیلومتر، مسیر (۲) ۴۶/۷۵۵ کیلومتر، مسیر (۳) ۴۵/۷۳۱ کیلومتر و مسیر (۴) ۴۵/۵۳۱ کیلومتر بود و مسیرهای توصیه‌شده مشاور به ترتیب، مسیر ۱ دارای طول ۷۲/۳۰۶، مسیر ۲ دارای طول ۶۳/۱۰۸ و مسیر سوم ۴۸/۶۹۰ است. در نهایت مسیر به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم کم‌هزینه‌ترین به‌عنوان بهترین مسیر انتخاب شد. Lin و همکاران در سال ۲۰۲۳ مطالعه‌ای برای مسیریابی خطوط انتقال برق انجام داده‌اند. این مطالعه با هدف ایجاد نقشه مسیر مناسب خطوط انتقال برق با استفاده از تحلیل مسیر کمترین هزینه (LCPA) انجام شده است. مسائل زیست‌محیطی از جمله آلودگی الکترومغناطیسی، تکه‌تکه شدن زیستگاه، پاک‌سازی جنگل، و مشاهده دکل‌ها و خطوط برق، و آلودگی الکترومغناطیسی تنها مواردی هستند که ممکن است در مراحل برنامه‌ریزی و ساخت‌وساز مطرح شوند. اهداف این مطالعه پیشنهاد مسیر انتقال جدید مبتنی بر LCPA است که تا حد امکان کمترین آسیب را به محیط اطراف وارد کند و معیارهای موردنظر را برآورده کند. نتیجه پژوهش نشان می‌دهد که مسیر به‌دست‌آمده بیشتر از بخش‌های مسطح با کمترین آسیب عبور کرده است و تنها قسمت کمی از آن از بخش‌های حساس عبور کرده است، زیرا هیچ راه دیگری برای اجتناب از آن وجود ندارد. استرالکا^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۴ مطالعه‌ای با هدف مسیریابی شبکه‌های گرمایی در کشورهای اروپایی انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد ابزارهای ArcGIS Pro مانند تحلیل مسیر کمترین هزینه (LCPA) و نزدیک‌ترین تسهیلات (CF) به ما امکان می‌دهند کوتاه‌ترین و «ارزان‌ترین» راه را بین منبع گرما و مصرف‌کنندگان گرما در مناطق مورد تجزیه و تحلیل، پیدا کنیم. هم‌چنین روش‌های پیشنهادی مبتنی بر LCPA و CF به طراحی مناسب‌ترین و کارآمدترین شبکه‌های DH در مناطق مورد تجزیه و تحلیل کمک می‌کند.

روش‌های مورد استفاده در پژوهش‌های اشاره‌شده توانایی زیادی در تجزیه و تحلیل و پردازش اطلاعات جهت تصمیم‌گیری برای انتخاب مسیر دارند، زیرا می‌توانند بیشتر پارامترهای لازم برای انتخاب مسیر بهینه را مورد بررسی قرار دهند.

پروژه توسعه مسیر راه‌آهن سراسری در استان گلستان به سمت شرق (استان خراسان رضوی) مدتی است در دستور کار قرار گرفته است. بدیهی است انجام این پروژه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و توسعه در استان را از لحاظ محیط‌زیستی و اقتصادی-اجتماعی تحت تأثیر قرار خواهد داد، از طرفی بی‌توجهی به مسائل محیط‌زیستی در انجام این پروژه می‌تواند در درازمدت موجب تخریب اکوسیستم و تبعات بعدی همچون وقوع سیل، فرسایش خاک، تخریب چشم‌انداز و منابع طبیعی و نظیر آن شود. بنابراین هدف این پژوهش استفاده از روش‌های نوین یادشده با در نظر گرفتن پارامترهای لازم برای پیشنهاد مسیری است که از لحاظ محیط‌زیستی و اقتصادی - اجتماعی کمتر آسیب را بر محیط پیرامون خود داشته باشد. همچنین، ارزیابی اثرات مسیرهای پیشنهادی و انتخاب مسیر بهینه از اهداف این پژوهش هستند. به‌طور کلی با توجه به مطالب یادشده می‌توان گفت الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی برای تعیین مسیر بهینه در شبکه‌های خطی پیشنهادشده است اما با توجه به این که تحلیل فضایی و ارزیابی چندمعیاره نیاز به فرمت رستری دارد، در این تحقیق از نرم‌افزار IDRISI برای فرآیند مسیریابی استفاده گردید و بررسی منابع نشان داد که تاکنون هیچ پژوهشی در زمینه

مسیرهای پیشنهادی راه آهن گرگان - مشهد به روش مورد استفاده در این پژوهش صورت گرفته است؛ بنابراین نتایج این پژوهش می تواند نقش مهمی در تصمیم گیری مسئولان دست اندرکار توسعه مسیر ریلی مورد نظر ایفاء کند.

≠ کوتاه ترین مسیرهای محیط زیستی ممکن خط راه آهن گرگان - مشهد در محدوده استان گلستان بر اساس معیارهای اکولوژیک و اقتصادی - اجتماعی کدام هستند؟

≠ از میان کوتاه ترین مسیرهای بهینه یافت شده در پاسخ به سؤال بالا، کدام یک کمترین اثرات منفی را دارند؟

مسیر پیشنهادی موجود در نقشه های استاندارد در مقایسه با کوتاه ترین مسیرهای به دست آمده از مورد بالا از نظر اثرات توسعه چه شرایطی دارد؟

روش پژوهش

در این تحقیق پس از شناسایی و تعیین معیارهای محیط زیستی تأثیرگذار بر مسیریابی خطوط راه آهن در استان گلستان و جمع آوری نقشه های مورد نیاز، با به کارگیری الگوریتم کم هزینه ترین مسیر (LCPA) در نرم افزار IDRISI و به کمک روش MCE، مسیر پیشنهادی برای راه آهن گرگان- مشهد در محدوده مطالعاتی مورد نظر در استان گلستان مشخص شده است. سپس مسیر پیشنهادی حاصل از این روش با مسیر پیشنهادی سازمان مدیریت و برنامه ریزی مقایسه شد و در نهایت مسیر بهینه تعیین شد.

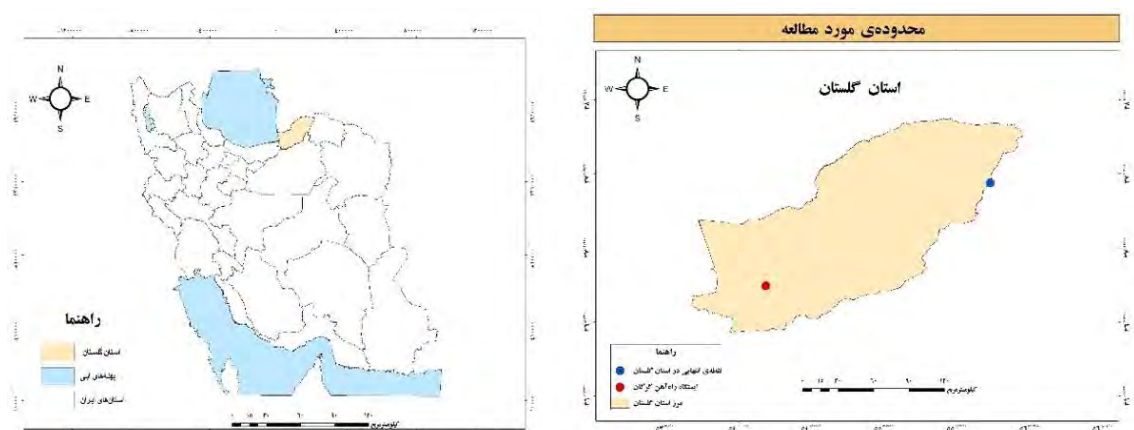
پارامترهای تأثیرگذار

۱. تراکم پوشش گیاهی ۲. زمین شناسی ۳. ژئومورفولوژی ۴. بافت خاک ۵. گروه های هیدرولوژیک خاک ۶. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک ۷. درصد رس خاک ۸. درصد شن خاک ۹. هدایت الکتریکی خاک ۱۰. حاصلخیزی خاک ۱۱. عمق خاک ۱۲. نفوذپذیری خاک ۱۳. دما ۱۴. بارندگی ۱۵. فاصله تا آبراهه و خطوط انتقال آب و سایر منابع ۱۶. فاصله تا سد ۱۸. عمق آب زیرزمینی ۱۹. فاصله از تالاب ۲۰. ارتفاع ۲۱. شیب ۲۲. فاصله تا مناطق مسکونی ۲۳. فاصله تا جاده اصلی ۲۴. فاصله تا جاده فرعی ۲۵. فاصله تا راه آهن ۲۶. فاصله تا معدن ۲۷. فاصله تا مناطق صنعتی ۲۸. کاربری اراضی ۲۹. فاصله از مرگداری ۳۰. کیفیت بصری ۳۱. احتمال زلزله ۳۲. آلودگی خاک و هیدروکربن ها ۳۳. حساسیت به لغزش ۳۴. تنوع زیستی ۳۵. فاصله از مناطق تحت حفاظت ۳۶. فاصله از میراث فرهنگی ۳۷. فاصله از میراث تاریخی.

در این پژوهش نقشه شیب از لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه سلول ۳۰ متر و نقشه های مناطق مسکونی، رودخانه ها، راه آهن، راه های اصلی و فرعی از لایه کاربری اراضی با اندازه سلول ۳۰ متر استخراج شدند و مابقی نقشه ها از طرح آمایش استان گلستان (۱۳۹۲) جمع آوری شدند.

محدوده مورد مطالعه

با توجه به هدف این پژوهش که انتخاب مسیر راه آهن از گرگان به سمت شرق (استان خراسان رضوی) است، نقطه مبدأ ایستگاه راه آهن گرگان و نقطه مقصد شرق استان گلستان در نظر گرفته شده است. بنابراین محدوده مطالعاتی این پژوهش استان گلستان است. مساحت این استان معادل ۲۰۴۳۸ کیلومتر مربع است و شامل ۱/۳ درصد از مساحت کل کشور است (فرجی و صحنه، ۱۳۹۹: ۲۵۳). موقعیت جغرافیایی این استان بین ۳۶/۵ تا ۳۸/۱۳ درجه عرض شمالی و ۵۳/۸۵ تا ۵۶/۳۷ درجه طول شرقی واقع شده است (قلی پور و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

یافته‌ها

استانداردسازی معیارها

با توجه به این که معیارهای به دست آمده برای استفاده در ارزیابی چندمعیاره (MCE^1) باید بدون مقیاس و بدون بعد شوند، بنابراین لازم است استانداردسازی شوند (سلیمان ماهینی و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۱). در این پژوهش فرآیند استانداردسازی معیارها بر اساس دو منطق فازی و بولین صورت گرفته است.

استانداردسازی بر اساس منطق فازی در مقیاس بین ۰ تا ۲۵۵ و برای نقشه‌های فاکتور استفاده می‌شود. برای انجام منطق فازی چهار نوع تابع عضویت وجود دارد که عبارت‌اند از: توابع S شکل ۲، توابع J شکل ۳، خطی ۴ و تعریف شده توسط کاربر ۵. نوع منحنی‌های توابع فازی به شکل یکنواخت افزایشی، یکنواخت کاهش و مقارن است که باید حداقل ۴ نقطه a، b، c، d را برای فازی کردن لایه‌ها روی نمودار تعیین کرد (Eastman, 2006: 126).

مقادیر آستانه و نوع تابع عضویت برای استانداردسازی معیارهای پیوسته در جدول ۱ آورده شده است که توابع عضویت برای استانداردسازی معیارهای پیوسته به صورت خطی است (خطی کاهنده، خطی افزایشی، مقارن) و جداول ۲ تا ۷ استانداردسازی معیارهای گسسته با تابع عضویت تعریف شده توسط کاربر (User Defined) است. همچنین استانداردسازی نقشه‌های محدودیت بر اساس منطق بولین در مقیاس ۰ و ۱ و با اپراتور AND انجام شده است تا به مناطقی که از نظر معیارهای محیط‌زیستی و شرایط اقتصادی صلاحیت لازم برای ساخت راه‌آهن ندارند ارزش صفر داده شود و به طور کامل حذف شوند (علی محمدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱).

جدول ۸ نقشه‌هایی که دارای محدودیت هستند و از این طریق استاندارد شده‌اند را نشان می‌دهد. در این تحقیق مقادیر آستانه معیارها با مرور منابع داخلی و خارجی و نظر استاد راهنما و مشاور به دست آمد.

1. Multi-criteria evaluation
2. Sigmoidal
3. J- Shape
4. Linear
5. User define

جدول ۱. استانداردسازی معیارهای پیوسته بر اساس منطق فازی

فاکتور	شکل تابع	نوع تابع	نقاط کنترلی			
			a	b	c	d
شیب	خطی	کاهنده	۰	۰	۰	۱۲
ارتفاع	خطی	کاهنده	۰	۰	۰	۲۰۰۰
فاصله از رودخانه	خطی	افزاینده	۰	۴۲۶۱۸	۴۲۶۱۸	۴۲۶۱۸
فاصله از سطح آب زیرزمینی	خطی	افزاینده	۰/۱	۴۹	۴۹	۴۹
فاصله از مناطق حفاظت شده	خطی	افزاینده	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
فاصله از شهر	خطی	متقارن	۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۴۶۵۸/۴۴
فاصله از گسل	خطی	افزاینده	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰۰
فاصله از راه	خطی	کاهنده	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۲۲۲۳/۸۸
فاصله از راه آهن	خطی	کاهنده	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۶۱۳۳۷/۲۷
فاصله از تأسیسات	خطی	کاهنده	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۳۳۵۲۵/۸۰
تراکم پوشش درختی	خطی	افزاینده	-۰/۲۸	-۰/۳۵	-۰/۳۵	-۰/۳۵
فاصله از مرغداری	خطی	افزاینده	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
دما	خطی	متقارن	۰	۱۵	۱۸	۱۸/۷۲
ظرفیت تبادل کاتیونی خاک	خطی	افزاینده	۱	۵۹/۳۸	۵۹/۳۸	۵۹/۳۸
درصد رس خاک	خطی	متقارن	۴	۴۰	۵۰	۶۶/۹۹
هدایت الکتریکی خاک	خطی	افزاینده	۱۵	۲۴۶/۵۶	۲۴۶/۵۶	۲۴۶/۵۶
درصد شن خاک	خطی	متقارن	۵	۳۰	۵۰	۸۱/۹۲
عمق خاک	خطی	کاهنده	۰	۲۵۵	۲۵۵	۲۵۵
آلودگی خاک	خطی	کاهنده	۱	۲۵۵	۲۵۵	۲۵۵
فاصله از تالاب	خطی	افزاینده	۲۰۰	۱۶۱۸۶۵	۱۶۱۸۶۵	۱۶۱۸۶۵
فاصله از اماکن تاریخی	خطی	افزاینده	۳۰۰	۴۶۰۷۷/۹۲	۴۶۰۷۷/۹۲	۴۶۰۷۷/۹۲
فاصله از معادن	خطی	افزاینده	۵۰۰	۵۴۹۴۴/۳۰	۵۴۹۴۴/۳۰	۵۴۹۴۴/۳۰
فاصله از سد	خطی	افزاینده	۵۰۰	۴۹۸۷۱/۲۵	۴۹۸۷۱/۲۵	۴۹۸۷۱/۲۵
کیفیت بصری	خطی	افزاینده	۰	۲۵۵	۲۵۵	۲۵۵
بارندگی	خطی	کاهنده	۱۰۷	۱۰۷	۱۰۷	۸۳۶/۸۹
فاصله از اماکن فرهنگی	خطی	افزاینده	۰	۲۵۳	۲۵۳	۲۵۳

جدول ۲. استانداردسازی معیار ژئومورفولوژی بر اساس منطق فازی و تابع User Defined

معیار	نام طبقه	امتیاز
ژئومورفولوژی	کوهستان	۰/۱
	تپه ماهور	۰/۵
	مخروط افکنه	۰/۲
	کوهپایه	۰/۶
	اراضی پست	۰/۷
	فلات	۱
	دشت سیلابی	۰/۲
	سایر	۰/۳

جدول ۳. استانداردسازی معیارهای گسسته بر اساس منطق فازی و تابع User Defined

معیار	نام طبقه	امتیاز	معیار	نام طبقه	امتیاز
گروه های هیدرولوژیک خاک	A	۱	حاصلخیزی خاک	فقیر	۱
	B	۰/۷		متوسط	۰/۵
	C	۰/۵		غنی	۰
	D	۰/۳		-	-

جدول ۴. استانداردسازی معیار بافت خاک بر اساس منطق فازی و تابع User Defined

معیار	نام طبقه	امتیاز
بافت خاک	رسی	۰/۳
	رسی لومی	۰/۶
	رسی لومی - سیلتی رسی لومی	۰/۷
	رسی - رسی لومی، لومی سیلتی	۰/۵
	سازند خوش ییلاق	۰/۴
	لومی	۱
	سنگ آهک - شیل - مارن	۰/۲
	تالاب	۰
	بستر رودخانه	۰
	آبرفت رودخانه‌ای جدید	۰/۲
	سنگلاخی	۰
	ماسه‌های دریایی	۰/۲
	سیلتی - لومی	۰/۸
	سیلتی - رسی	۰/۶
	سیلتی - رسی - لومی	۰/۹
	باقی‌مانده تپه‌های لسی و جلگه‌های مرتفع	۰/۳

جدول ۵. استانداردسازی معیار زمین‌شناسی بر اساس منطق فازی و تابع User Defined

معیار	نام طبقه	امتیاز
زمین‌شناسی	مارن	۰/۲
	تبادل لس و آبرفت	۰
	تناوب مارن قرمز به قهوه‌ای، ماسه‌سنگ به سیلت‌سنگ با ترکیب میکروکنگلومرا (سازند قرمز بالایی)	۰/۸
	بازالت، اسپیلیت و آندزیت	۱
	سنگ آهک	۰/۷
	سنگ آهک دولومیتی	۰/۴
	توف سبز، شیل و سنگ‌های آتش‌فشانی	۰/۶
	پادگانه یا تراس‌های آبرفتی	۰/۱
	لس	۰
	سنگ آهک بستر متوسط تا ضخیم، سنگ آهک مارنی و ماسه‌سنگ	۰/۳
	مارن زرد کم‌رنگ تا صورتی، سنگ آهک آرژیلی با بستر نازک تا متوسط و ماسه‌سنگ قرمز	۰/۲
	کنگلومرا چند ژنتیکی (سازند فاجان)	۰/۷
	تخته‌سنگ و شیست	۰/۴
	سنگ آهک مارنی با بستر نازک، ماسه‌سنگ، مارن و سنگ آهک، سنگ آهک اولیتی	۰/۷
	ماسه‌سنگ کوارتزی سفید تا خاکستری، ماسه‌سنگ قرمز و شیل سیلتی	۰/۹
	دولومیت با لایه ضخیم زرد تا قرمز کم‌رنگ و سنگ آهک دولومیتی	۰/۵

جدول ۶. استانداردسازی معیار گسسته کاربری اراضی بر اساس منطق فازی و تابع User Defined

معیار	نام طبقه	امتیاز
کاربری اراضی	جنگل‌های انبوه	۰
	جنگل‌های نیمه متراکم	۰
	مرتفع و بوته‌زارها	۰/۵
	مراتع کم تراکم	۰/۵
	درختان و باغات	۰/۲
	پوشش گیاهی تالاب	۰
	حوضچه‌های آب	۰

سد	۰
آبی‌پروری	۰
رودخانه	۰
زمین‌های نمکی	۱
مناطق بایر	۱
کشاورزی آبی	۰/۲
کشاورزی دیم	۰/۶
مناطق انسان‌ساخت	۰
مناطق صنعتی	۰
راه‌های اصلی	۰
راه‌های فرعی	۰
راه آهن	۰

جدول ۷. استانداردسازی معیارهای گسسته بر اساس منطق فازی و تابع User Defined

معیار	نام طبقه	امتیاز	معیار	نام طبقه	امتیاز
لغزش خیلی کم	۱	تنوع زیستی کم	۱		
لغزش متوسط	۰/۵	تنوع زیستی متوسط	۰/۳		
لغزش زیاد	۰	تنوع زیستی زیاد	۰		

جدول ۸. استانداردسازی نقشه‌های محدودیت بر اساس منطق بولین

معیار محدودیت	ارزش صفر	ارزش یک
شیب (درصد)	۵۰ درصد به بالا	۵۰ درصد به بالا
ارتفاع (متر)	۰ - ۲۲۰۰	۲۲۰۰ متر به بالا
فاصله از رودخانه (متر)	۰ - ۹۰	۹۰ متر به بالا
فاصله از مناطق حفاظت‌شده (متر)	۰ - ۳۰۰	۳۰۰ متر به بالا
فاصله از شهر (متر)	۰ - ۱۰۰۰	۱۰۰۰ متر به بالا
فاصله از گسل (متر)	۰ - ۳۰۰	۳۰۰ متر به بالا
فاصله از راه اصلی (متر)	۰ - ۳۰۰	۳۰۰ متر به بالا
فاصله از تأسیسات (متر)	۰ - ۱۰۰	۱۰۰ متر به بالا
فاصله از مرغداری (متر)	۰ - ۱۰۰	۱۰۰ متر به بالا
فاصله از تالاب (متر)	۰ - ۲۰۰	۲۰۰ متر به بالا
محدوده زمین لغزش	۰ - ۲۳۵	۲۳۵ به بالا
تراکم پوشش گیاهی	۰ - ۰/۳۵	۰/۳۵ به بالا
فاصله از معدن (متر)	۰ - ۵۰۰	۵۰۰ متر به بالا
فاصله از سد (متر)	۰ - ۵۰۰	۵۰۰ متر به بالا
حیات‌وحش (تنوع زیستی)	۰ - ۲۲۵	۲۲۵ به بالا
کاربری اراضی	جنگل‌های انبوه، جنگل‌های نیمه متراکم، پوشش گیاهی تالاب، حوضچه‌های آب، سد، مناطق انسان‌ساخت، مناطق صنعتی	باقی مناطق موجود در نقشه

وزن دهی به معیاره

با توجه به این که اهمیت و ارزش هریک از معیارها در تعیین مسیر یکسان نیست بنابراین لازم است پس از استانداردسازی معیارهای ارزیابی، به هر کدام از آن‌ها وزنی تعلق بگیرد و ارزش نسبی هر یک از آن‌ها نسبت به هدف تحقیق موردنظر تعیین شود (داورپناه و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۹). برای وزن دهی معیارها در این پژوهش از روش مقایسه

زوجی (AHP) استفاده شده است. در این روش به دلیل این که معیارها دویه دو باهم مقایسه می شوند نسبت به سایر روش های وزن دهی، تئوری قوی، دقت بالا و سهولت زیادی دارد (رستمی و همکاران، ۱۳۹۴: ۵).
رتبه بندی معیارها در این روش بدین صوت است که ارزش معیارها نسبت به یکدیگر در یک مقیاس ۹ نقطه ای پیوسته مطابق جدول (۹) ارائه شده است. در ایجاد وزن، یک فرد یا گروه دویه دو معیارها را باهم مقایسه می کنند و رتبه بندی را در یک ماتریس مقایسه زوجی یا ماتریس نسبت وارد می کند (Mahini and Abedian, 2014: 517).

جدول ۹. مقیاس میزان اهمیت معیارها برای مقایسه زوجی

تعریف	اهمیت برابر	اهمیت متوسط	اهمیت قوی	اهمیت بسیار قوی	اهمیت فوق العاده	اهمیت بینابین
شدت اهمیت	۱	۳	۵	۷	۹	۲,۴,۶,۸

پس از وارد کردن ماتریس مقایسه زوجی، وزن معیارها را به دست آوردیم همراه با یک نسبت سازگاری (CR). نسبت سازگاری به این معنا است که رتبه بندی های ماتریس به طور تصادفی انتخاب شده است، و این نسبت باید کمتر از ۰/۱ باشد تا مورد قبول باشد، در این صورت رتبه بندی پذیرفته می شود و وزن های به دست آمده جمع آوری می شود. در این تحقیق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در محیط نرم افزار IDRISI انجام شده است و با توجه به اینکه نسبت سازگاری برای وزن دهی فاکتورها در این پژوهش کمتر از ۰/۱ بوده است، بنابراین نیاز به بازنگری مجدد نیست. با توجه به جدول ۱۰ بیشترین ضریب وزنی به منابع آب و بعد از آن کاربری و شکل زمین همچون شیب و ارتفاع اختصاص یافت.

جدول ۱۰. وزن دهی به معیارها

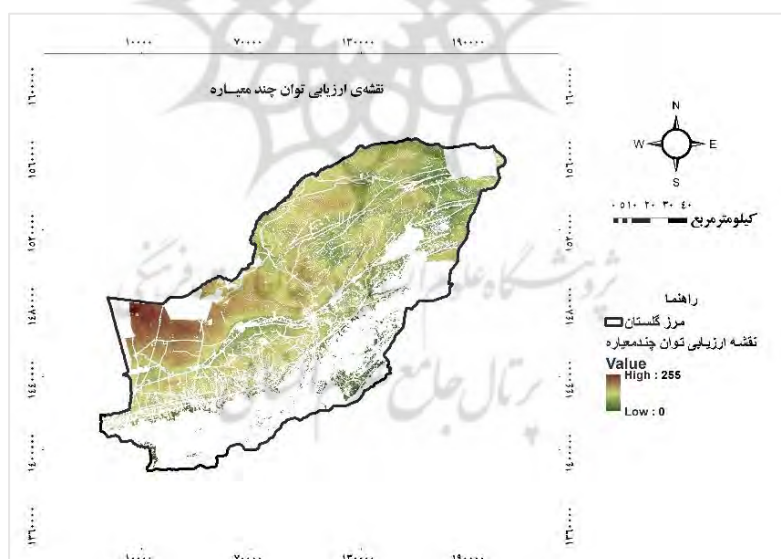
شماره	نام لایه فاکتور	وزن لایه در ادغام اول	لایه نهایی	وزن لایه در ادغام نهایی
۱	تراکم پوشش گیاهی	۰/۲	مرتج و پوشش گیاهی	۰/۰۱
۲	زمین شناسی	۰/۵	زمین شناسی	۰/۱۲
۳	ژئومورفولوژی	۰/۵		
۴	بافت خاک	۰/۱۵		
۵	گروه هیدرولوژیک خاک	۰/۰۸		
۶	ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۰۲	خاک	۰/۱۲
۷	درصد رس	۰/۰۵		
۸	درصد شن	۰/۰۶		
۹	هدایت الکتریکی	۰/۱		
۱۰	حاصلخیزی	۰/۱۴	هواشناسی	۰/۰۸
۱۱	عمق خاک	۰/۲۵		
۱۲	نفوذپذیری خاک	۰/۱۵		
۱۳	دما	۰/۵		
۱۴	بارندگی	۰/۵	منابع آب	۰/۲۵
۱۵	فاصله تا آبراهه و خطوط انتقال آب و سایر منابع	۰/۳۳		
۱۶	فاصله تا سد	۰/۲۳		
۱۷	عمق آب زیرزمینی (عمیق)	۰/۱۸		
۱۸	فاصله از تالاب	۰/۲۳	کاربری و شکل زمین	۰/۲
۱۹	ارتفاع	۰/۱۲		
۲۰	شیب	۰/۲۵		
۲۱	فاصله تا مناطق مسکونی	۰/۱		
۲۲	فاصله تا جاده اصلی	۰/۰۸		

۰/۰۵	فاصله تا جاده فرعی	۲۳
۰/۰۳	فاصله تا راه آهن	۲۴
۰/۰۸	فاصله تا معادن	۲۵
۰/۰۸	فاصله تا مناطق صنعتی	۲۶
۰/۱۵	کاربری اراضی	۲۷
۰/۰۱	فاصله از مرغداری	۲۸
۰/۰۵	کیفیت بصری	۲۹
۰/۳	احتمال زلزله	۳۰
۰/۱	آلودگی خاک و هیدروکربنها	۳۱
۰/۲	حساسیت به لغزش و رانش	۳۲
۰/۲	تنوع زیستی	۳۳
۰/۲	فاصله از مناطق تحت حفاظت	۳۴

مخاطرات طبیعی و انسانی ۰/۱۲

تلفیق معیارها به روش ارزیابی چندمعیاره

پس از این که نقشه های معیار (فاکتور، محدودیت ها) ایجاد شد و وزن های مربوط به هر لایه اختصاص یافت، در مرحله بعد لازم است نقشه ها با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی (WLC) جمع شوند. روش ترکیب خطی وزنی از MCE به عنوان روش تجميع در این مرحله از تحقیق انتخاب شده است. بعد از وزن دهی به معیارها، در محیط Idrisi نقشه های فازی، محدودیت و وزن معیارها به روش ترکیب خطی وزن دار باهم ترکیب شدند، در نهایت نقشه ارزیابی توان چند معیاره منطقه که نشان دهنده معیار مناسب بودن کل است را به دست می آوریم. این نقشه از ۰ (کمترین تناسب) تا ۲۵۵ (مناسب ترین) متغیر است. از این لایه برای ساخت نقشه اصطکاک در فرآیند مسیریابی بهینه استفاده می شود.



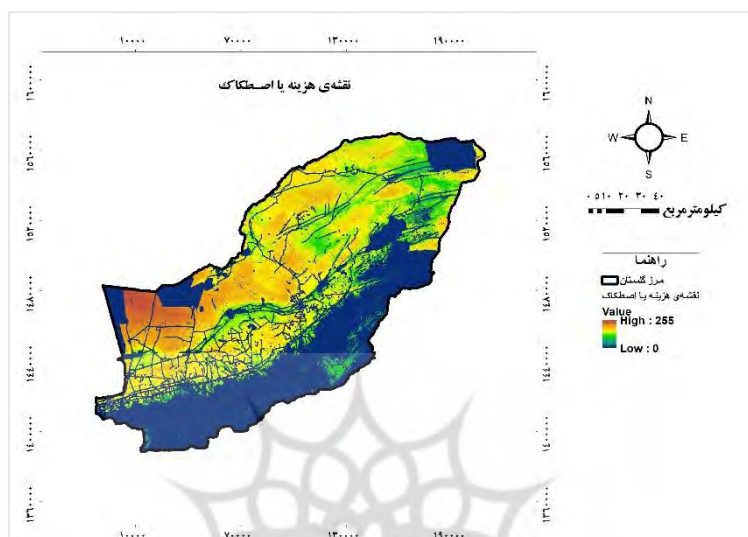
شکل ۲. نقشه ارزیابی توان چند معیاره

مسیریابی بهینه با استفاده از الگوریتم کوتاه ترین مسیر (LCPA)

تکنیک مدل LCPA یک روش مقرون به صرفه در GIS است که مسیرهای کم هزینه را برای خط لوله، جاده و سایر پروژه های مشابه ارائه می دهد (Gyabeng, 2020: 572).

سطح هزینه یا اصطکاک

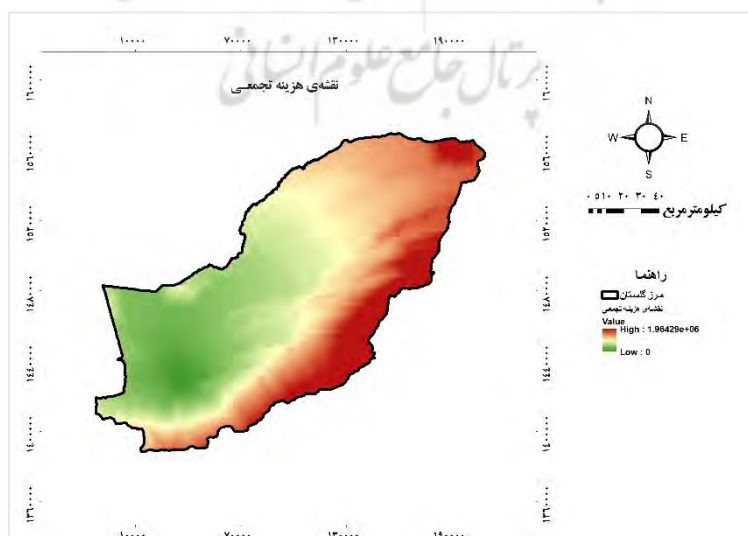
نقشه‌ی اصطکاک، نقشه‌ای در بازه ۰ تا ۲۵۵ است با یک سطح شطرنجی که در آن هر سول میزان مقاومت، هزینه، زمان، مسافت، مقدار ریسک را نشان می‌دهد، ولی مهم‌ترین عامل مقدار مقاومت است که ارزش هر سول را مشخص می‌کند، بنابراین با توجه به این نقشه هرچه عدد بزرگ‌تر می‌شود نشان‌دهنده اصطکاک بیشتر آن منطقه برای عبور مسیر راه‌آهن است (Collischonn & Pilar, 2000: 397, Mahini & Abedian, 2014: 517).



شکل ۳. نقشه هزینه یا اصطکاک

نقشه هزینه تجمعی

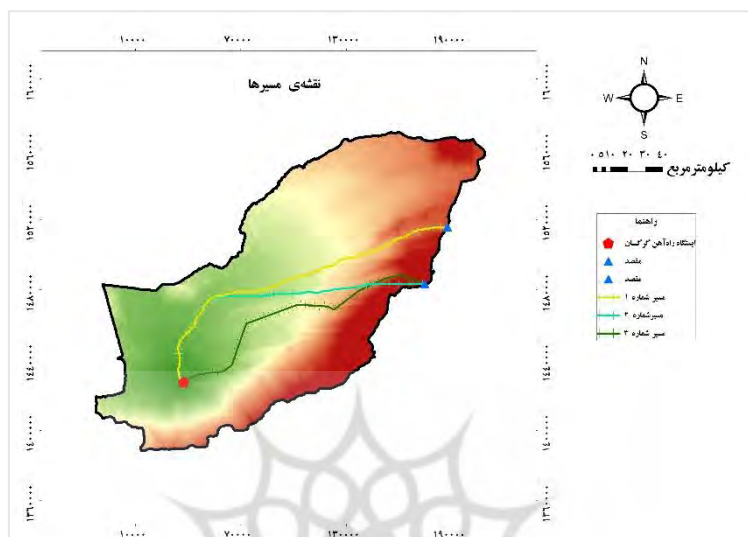
نقشه‌ی هزینه تجمعی را به کمک نقطه مبدأ و نقشه اصطکاک به دست آوردیم که این فرآیند با استفاده از دستور Cost در نرم‌افزار IDRISI انجام شده است. در این نقشه هرچه مقدار عدد هر پیکسل بیشتر می‌شود آن پیکسل تناسب کمتری برای عبور راه‌آهن را دارد به دلیل این که هر پیکسل مجموع هزینه بین نقطه مبدأ و پیکسل موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقشه هزینه تجمعی

به دست آوردن مسیر بهینه

نقشه هزینه تجمعی که در بخش قبل به دست آوردیم اساس این مرحله برای به دست آوردن مسیر بهینه است. در نهایت دو مسیر بهینه (مسیر شماره ۱ و ۲) با استفاده از نقشه هزینه تجمعی و دستور Pathway در نرم افزار IDRISI به دست آمد؛ علاوه بر این سازمان مدیریت و برنامه ریزی راهی را که در مطالعات اولیه خود به دست آورده بودند در اختیار ما قرار دادند (مسیر شماره ۳). در آخر ارزیابی این سه مسیر انجام شد تا مسیر بهینه از بین آن ها انتخاب شود.



شکل ۵. نقشه مسیرها

پس از طراحی مسیر، ارزیابی روی آن ها صورت گرفت تا مسیری که کمترین آسیب را به محیط زیست اطراف وارد می کند به عنوان مسیر بهینه انتخاب شود. در واقع انتخاب مسیر بهینه به معنای انتخاب کم هزینه ترین مسیر از نظر محیط زیست و اقتصادی است. ارزیابی سه مسیر پیشنهادی بر اساس اطلاعات آماری حاصل از نتایج تابع Extract در نرم افزار IDRISI برای فاکتورهای موجود در جدول ۱۱ انجام شد. با توجه به نتایج جدول، مسیر شماره ۱ حاصل از روش LCPA که در شکل (۶) آورده شده است، حریم مناسب را با عوامل محیط زیستی حساس رعایت کرده است. از نظر ارزش های اقتصادی از جمله نزدیک بودن به مناطق مسکونی، با وجود این که نسبت به سایر مسیرها فاصله بیشتری دارد اما باز هم دسترسی به آن سخت نیست و نسبت به سایر مسیرها فاصله زیادی با مناطق مسکونی ندارد. علاوه بر این مسیر شماره ۱ میانگین ارتفاع و درصد شیب کمتری دارد بنابراین کاهش هزینه های خاک برداری و خاک ریزی را به دنبال دارد. همچنین با حفظ فاصله بیش تر نسبت به گسل و مناطق تحت حفاظت باعث افزایش ایمنی در طراحی راه آهن و حفظ اکوسیستم و زیستگاه حیات وحش منطقه می شود.

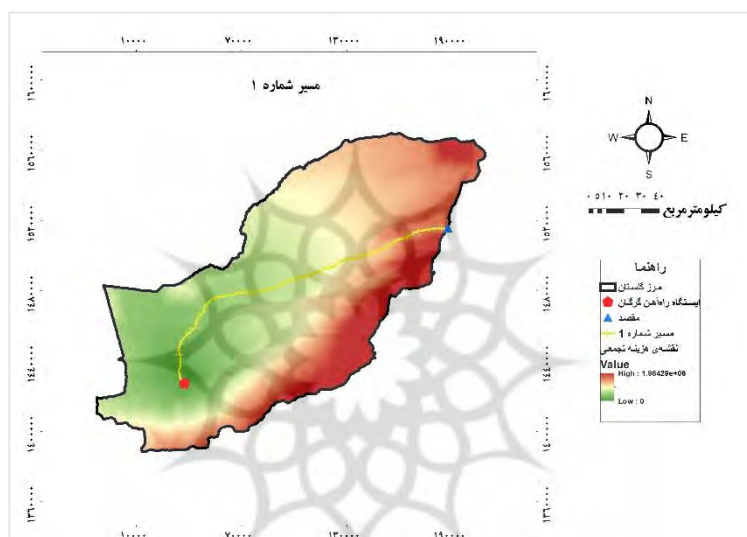
جدول ۱۱. مقایسه میزان رعایت مسیرهای طراحی شده از معیارهای محیط زیستی

مشخصه شماره مسیر	میانگین شیب (درصد)	میانگین ارتفاع (متر)	میانگین فاصله از گسل (متر)	میانگین فاصله از مناطق مسکونی (متر)	فاصله از مناطق تحت حفاظت (متر)	فاصله از رودخانه (متر)
مسیر شماره ۱	۸/۷	۲۵۹	۶۱۷۶	۲۵۵۲	۱۳۵۰۵	۳۰۸۵
مسیر شماره ۲	۹	۲۷۱	۶۲۲۰	۲۳۶۱	۱۲۵۴۳	۳۶۵۶
مسیر شماره ۳	۱۳	۲۸۹	۴۰۳۴	۸۲۴	۱۳۰۴۹	۱۲۹۹

اندازه‌گیری طول مسیرهای پیشنهادی در محیط GIS انجام شد. طبق جدول ۱۲ مسیر شماره ۱ (شکل ۶)، اگرچه طولانی‌تر است، اما احتمالاً آسیب‌های محیط‌زیستی و اثرات بلندمدت کمتری نسبت به دو مسیر دیگر بر سلامت اکوسیستم و انسان‌هایی که در مجاورت آن هستند وارد می‌کند؛ بنابراین نتیجه می‌گیریم که مسیر پیشنهادی (مسیر شماره ۱) در بلندمدت مقرون‌به‌صرفه‌تر است.

جدول ۱۲. مقایسه مسیرهای پیشنهادی از نظر طول مسیر

مسیرهای پیشنهادی	طول مسیر (برحسب کیلومتر)
مسیر پیشنهادی روش LCPA (۱)	۱۹۷
مسیر پیشنهادی روش LCPA (۲)	۱۷۷
مسیر پیشنهادی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی (۳)	۱۶۴



شکل ۶. مسیر شماره ۱

بحث

همان‌طور که توضیح داده شد، در این پژوهش از تکنیک LCPA برای فرآیند مسیریابی استفاده شده است. به‌طور کلی امروزه LCPA به‌عنوان یک تکنیک مدل‌سازی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه در یافتن کم‌هزینه‌ترین مسیر برای جاده، خطوط ریلی، خطوط انتقال آب، خطوط برق و گاز شناخته شده است (Chandio et al., 2012). همان‌گونه که اشاره شد یکی از نقاط قوت و برجسته این روش طرح‌ریزی برای انواع گوناگونی از زیرساخت‌های خطی برای مناطق گوناگون است؛ بنابراین این روش به‌راحتی می‌تواند با اضافه شدن داده‌هایی با دقت بیشتر بسط داده شود (امامی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۷). این روش در مطالعه Strzalka و همکاران (۲۰۲۴)، با دخالت دادن معیارهای محیط‌زیستی در فرآیند مسیریابی موجب تولید مسیر بهینه برای شبکه‌های گرمایش منطقه‌ای شده است و آن‌ها معتقدند اگرچه روش‌های مبتنی بر GIS نتایج قابل‌اعتمادی ارائه می‌دهند، ولی هنوز پتانسیل زیادی برای بهینه‌سازی این تکنیک‌ها و روش‌ها وجود دارد. به‌طور خلاصه LCPA که در این پژوهش ارائه شد یک روش ساده و درعین‌حال کارآمد برای تولید شبکه‌های گرمایشی کاربرد دارد. (Strzalka et al., 2024). همچنین Hu و Li (۲۰۲۳)، Lin و همکاران (۲۰۲۳) معتقدند روش LCPA می‌تواند

تصمیم‌گیری آگاهانه را در برنامه‌ریزی و طراحی زیرساخت‌های حمل‌ونقل و سایر پروژه‌های مسیریابی تسهیل کند (Hu & Li, 2023: 1, Lin et al., 2023).

معیارهای گوناگون در این پژوهش باید برای تولید مسیر پیشنهادی مقایسه و وزن دهی شود، که وزن هر فاکتور اهمیت نسبی هر فاکتور را نشان می‌دهد. وزن‌های حاصل از روش مقایسه زوجی که در جدول ۱۰ آورده شده است، منابع آب مانند رودخانه‌ها و تالاب و پس از آن شکل و کاربری اراضی مانند شیب و ارتفاع بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص داده‌اند. به دلیل بروز خطر و نیاز به حفاری و خاک‌ریزی و همچنین آسیب‌پذیری دامنه‌ها نسبت به فرسایش، عامل شیب بر هزینه‌های ساخت‌وساز اثر فزاینده‌ای دارد و از اهمیت زیادی برخوردار است (Sari and Şen, 2022: 27). نتایج مطالعات دیگری که در این زمینه انجام شده است بررسی شد، اما نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها در برخی موارد به دلیل هدف مطالعاتی، داده‌های مورد استفاده و یا منطقه مطالعاتی آن‌ها متفاوت است. با توجه به این موضوع Larbi و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهش‌های خود منابع آبی را عاملی مهم در نظر گرفته‌اند که بیشترین وزن به آن تعلق دارد و شیب به‌عنوان معیار مهم دوم در نظر گرفته شده است (Larbi et al., 2018: 50). Asenso-Gyambibi و همکاران (۲۰۲۲)، در تحقیق خود شیب را عامل مهم اول در نظر گرفتند و معیار مهم دوم در پژوهش آن‌ها منابع آب بود (Asenso-Gyambibi et al., 2022: 449). همچنین سلمان‌ماهینی و همکاران (۱۳۹۴) و Sari و Sen (۲۰۱۷) در پژوهش‌های خود شیب را معیار مهم اول و بعد از آن مناطق تحت حفاظت را به دلیل اهمیت آن‌ها از نظر بقای اکوسیستم و زیستگاه بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری معیار مهم دوم در نظر گرفته‌اند (سلمان‌ماهینی و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۱، sari and sen, 2017: 1).

طبق جدول ۸ در این پژوهش به‌منظور طراحی مسیر، حریم محیط‌زیستی معیارهای مهم و حساس رعایت شده و به دنبال آن اثرات نامطلوب محیط‌زیستی کاهش یافته است. نتایج پژوهش نصیری هنده خاله و گنجی (۱۳۹۸) با پژوهش حاضر مبنی بر رعایت حریم محیط‌زیستی معیارهای مهم منطبق است، زیرا آن‌ها در پژوهش خود بیان کردند محدودیت‌ها و مخصوصاً پراکندگی آن‌ها در طراحی مسیر نقش مهم و حتی اصلی‌ترین نقش راه دارند و محدوده مسیر بر اساس این عوامل محدودکننده و کوتاه‌ترین فاصله مشخص می‌شود (نصیری هنده خاله و گنجی، ۱۳۹۸: ۶۵). هم‌چنین گل‌سفیدی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیق خود برای تعیین مسیر بهینه به عواملی مانند فاصله از خطوط گسل، رودخانه، دسترسی به مراکز انسان‌ساخت و شکل زمین توجه بیشتری شده و حریم مشخصی برای آن‌ها تعیین شده است (Malekpour Golsefidi et al., 2016: 255). علاوه بر این سلمان‌ماهینی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهش خود معتقدند جاده طراحی‌شده از همه مناطق حساس دوری می‌کند و از موانعی مانند رودخانه‌ها و نواحی شهری و روستایی به مقدار کمتری عبور می‌کند. بنابراین هزینه کل لایه به‌دست آمده به دلیل رعایت حریم معیارها و کاهش اثرات نامطلوب محیط‌زیستی کمتر می‌شود (سلمان‌ماهینی و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۱). هم‌چنین Hu و Li (۲۰۲۳) و Lin و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش خود برای مسیریابی معیارها را شناسایی و پس از آن حریم آن‌ها را مشخص کردند، و تا حد امکان تلاش کردند از مکان‌های حساس که ممکن است خطرناک و آسیب‌هایی به دنبال داشته باشد عبور نکنند.

همان‌طور که گفته شد انتخاب مسیر بهینه یک نوع تصمیم‌گیری چند معیاره است و هدف ما در این تحقیق انتخاب کم‌هزینه‌ترین مسیر از نظر محیط‌زیست و اقتصاد است. نتایج پژوهش سلیمان و همکاران (۲۰۱۵) و Januadi و Nabila (۲۰۲۰) نشان‌دهنده این مطلب است که تلفیق روش ارزیابی چندمعیاره و الگوریتم کم‌هزینه‌ترین مسیر، یک روش کارآمد و مؤثر برای مسیریابی است؛ بنابراین به دلیل اهمیت زیاد محیط‌زیست و اثراتی که مسیرها به محیط‌زیست اطراف وارد می‌کنند، پیشنهاد می‌شود عوامل محیط‌زیستی رعایت شود تا آثار نامطلوب محیط‌زیستی و هزینه‌های اقتصادی کاهش و

ایمنی افزایش یابد (Januadi & Nabila, 2020, Suleiman et al., 2015: 9621).

نتیجه گیری

فرآیند انتخاب و طراحی مسیر از مشکلات رایج در مهندسی حمل و نقل هستند. مشکل اصلی پیدا کردن مقرون به صرفه ترین مسیر میان دو نقطه مبدأ و مقصد است که علاوه بر رعایت کردن اصول محیط زیستی باید به مسائل اقتصادی و اجتماعی هم در این راه توجه شود. بنابراین بسیار مهم است که تمام مراحل طراحی و ساخت مسیرها به روشی انجام شود که با ارزش های محیط زیستی و مدیریت پایدار سازگار باشد تا آسیبی به محیط اطراف وارد نشود. به طور کلی مسیری که در آن همه عوامل تأثیرگذار مانند هزینه احداث، تأمین ایمنی و مسائل محیط زیستی رعایت شود را مسیر کم هزینه می گویند. برای احداث هرگونه مسیر جدید، اولین قدم انتخاب یک مسیر بهینه است. طراحی مسیر بهینه راه آهن کاری پیچیده است و بسته به طول پروژه نیاز به تجزیه و تحلیل مقدار بسیار زیادی از داده ها و پارامترها را دارد. نتایج نشان دادند برای مسیریابی استفاده از GIS، روش های ارزیابی چندمعیاره و LCPA نقش مهمی در به کارگیری ابعاد مختلف محیط زیستی دارند.

بر همین اساس در این پژوهش ابتدا پارامترهای محیط زیستی تأثیرگذار در فرآیند مسیریابی شناسایی شدند و در نهایت با استفاده از الگوریتم کم هزینه ترین مسیر (LCPA) در نرم افزار IDRISI دو مسیر بهینه طراحی شد که در شکل ۵ آورده شده است (مسیر شماره ۱، مسیر شماره ۲). مسیرهای طراحی شده از نظر میزان رعایت فاصله از موانع نسبی مانند فاصله از رودخانه، فاصله از شهر و روستا، فاصله از مناطق تحت حفاظت و به طور کلی تمام مناطق حساس محیط زیستی مقایسه و ارزیابی شدند. با توجه به نتایج ارزیابی به دست آمده در جدول ۱۱ برای دو مسیر طراحی شده و مسیر پیشنهادی سازمان مدیریت و برنامه ریزی، نتیجه گرفتیم مسیر شماره ۱ (شکل ۶) نسبت به دو مسیر دیگر در بلندمدت کمترین خطر و آسیب را برای محیط اطراف خود دارد و مسیر پیشنهادی توسط سازمان مدیریت و برنامه ریزی علی رغم کوتاه تر بودن نسبت به دو مسیر دیگر ولی با توجه به نتایج ارزیابی دارای اثرات منفی بیشتر و پرخطرتری برای محیط اطراف خود دارد زیرا نسبت به دو مسیر دیگر فاصله کمتری با حریم عوامل محیط زیستی حساس رعایت کرده است؛ بنابراین مسیر شماره (۱) اگرچه طولانی تر بود، اما احتمالاً آسیب های محیط زیستی و اثرات بلندمدت کمتری نسبت به دو مسیر دیگر بر سلامت اکوسیستم و انسان هایی که در مجاورت آن هستند وارد می کند؛ بنابراین نتیجه می گیریم که مسیر پیشنهادی (مسیر شماره ۱) در بلندمدت مقرون به صرفه تر است. در آخر پیشنهاد می شود که دولت و برنامه ریزان در بخش راه سازی از ابزار LCPA برای انتخاب مسیر بهینه استفاده کنند تا هزینه های اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی به حداقل برسد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی ندارد.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمامی بخش ها و مراحل پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می نمایند.

منابع

- امامی، میترا؛ میرکریمی، سیدحامد و سلمان ماهینی، عبدالرسول. (۱۳۹۵). مسیریابی بهینه خطوط لوله انتقال گاز طبیعی به کمک روش LCPA منطقه مورد مطالعه: دهنه زاو استان گلستان. *فصلنامه آمایش جغرافیایی فضا*، ۸ (۲۷)، ۷۷-۱۰۰.
- داورپناه، امین و وحیدنیا، محمدحسن. (۱۳۹۹). تعیین مسیر بهینه خطوط انتقال آب با مقایسه روش های مختلف تصمیم گیری چندمعیاره و الگوریتم مسیر بهینه در رستر (مطالعه موردی: از ارداک به مشهد). *فصلنامه مهندسی منابع آب*، ۱۴ (۵۱)، ۳۹-۵۶. doi: 10.30495/wej.2022.22648.2193
- رستمی، میثم؛ کیامهر، رامین و بیات، رامین. (۱۳۹۴). ارائه روشی دانش پایه جهت وزن دهی درون لایه ای به منظور تعیین مسیر بهینه با استفاده از سامانه های اطلاعات مکانی (GIS) (مطالعه موردی: محور ایلام- حمیل). *فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۲۴ (۹۶)، ۵-۱۹.
- سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ عابدیان، سحر؛ علیزاده، افشین و خراسانی، نعمت الله. (۱۳۹۴). استفاده از الگوریتم کوتاه ترین مسیر در مسیریابی شبکه جاده ای در شهرستان های کردکوی، بندرگز و گلوگاه. *آمایش جغرافیایی فضا*، ۵ (۱۵)، ۸۱-۹۴.
- سلمان ماهینی، عبدالرسول. (۱۳۹۲). شناسایی و توسعه معیارها در ارزیابی توان اکولوژیک کاربری ها در استان گلستان به روش ادغام چند متغیره رایانه ای (MCE). *مطالعات برنامه آمایش استان گلستان*.
- علی محمدی، عارفه؛ ایلدرمی، علیرضا؛ میرسنجری، میرمهرداد و عابدیان، سحر. (۱۴۰۰). مسیریابی بهینه شبکه جاده ای با تأکید بر پارامترهای محیط طبیعی و بهره گیری از الگوریتم کم هزینه ترین مسیر و سامانه اطلاعات جغرافیایی نمونه پژوهش: دلیجان- الیگودرز. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۲ (۲)، ۱-۲۲. doi: 10.22108/gep.2021.126758.1389
- فرجی، امین و صحنه، فریبا. (۱۳۹۹). ارزیابی توان اکولوژیک سرزمین در استان گلستان به منظور توسعه کاربری های کشاورزی با رویکرد آمایش سرزمین. *مجله علمی آمایش سرزمین*، ۱۲ (۲)، ۲۵۳-۲۷۴. doi: 10.22059/jtcp.2020.294811.670053
- قلی پور، مصطفی؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ سعدالدین، امیر و بهره مند، عبدالرضا. (۱۴۰۲). ارائه یک روش نوین آراستن مشارکتی کاربری ها با سامانه پشتیبان تصمیم گیری آمایش سرزمین گلستان. *پژوهش های محیط زیست*، ۱۴ (۲۸)، ۲۵-۴۰. doi: 10.22034/eiap.2024.191700
- نصیری هنده خاله، اسماعیل و گنجی، نسرین. (۱۳۹۸). تعیین مسیر بهینه شبکه راه ها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: مسیر رودسر- قزوین). *پژوهش های جغرافیایی انسانی*، ۵۳ (۱)، ۶۵-۸۴. Doi: 10.22059/jhgr.2019.278135.1007888

References

- Alimohammadi, A., Ildoromi, A., Mirsanjari, M. m., & Abedian, S. (2021). Optimal Routing of Road Network with Emphasis on Natural Environment Parameters According to the Least Cost Pathway Algorithm and GIS (Case Study: Delijan-Aligudarz). *Geography and Environmental Planning*, 32 (2), 1-22. doi: 10.22108/gep.2021.126758.1389 [in persian].
- Asenso-Gyambibi, D., Lamkai, N., Larbi, E., Peprah, M. S., Asamoah, B., & Okantey, P. F. (2022). Optimal Route Selection of the Trans-ECOWAS Line Based on Ghana Railway Development- An Integrated Approach Using Entropy, TOPSIS and Least Cost Path Analysis. *International Journal of Earth Sciences*, 4 (3), 449-465.
- Bagli, S., Geneletti, D., & Orsi, F. (2011). Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3), 234-239. doi: 10.1016/j.eiar.2010.10.003
- Chandio, I.A., Matori, A.N., WanYusof, K.B., & Lawal, D.U. (2012). Routing of road using

- Least-cost path analysis and Multi-criteria decision analysis in an uphill site Development. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15045380>
- Collischonn, W., & Pilar, J.V. (2000). A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. *International Journal of Geographical Information Science*, 14, 397 - 406. <https://doi.org/10.1080/13658810050024304>
- Dvarpanah, A., & Vahidnia, M.H. (2022). Optimal route finding of water transmission lines by comparing different MCDM methods and the least-cost path algorithm in a raster (Case study: from Ardak to Mashhad). *Water Resources Engineering*, 14(51), 39-56.
- Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes guide to GIS and image processing. *Clark University, Worcester*, 328, 126-132.
- Gyabeng, B. (2020). Selection of Optimum Petroleum Pipeline Routes Using A Multi-Criteria Decision Analysis and GIS Least-Cost Path Approach. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 10, 572-579. [doi:10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10270](https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10270)
- Hasanabadi, A., Almodaresi, S. A., & Bloor, A. (2018). Optimal Railway Routing using Spatial-Temporal Analysis in Gis (A Case Study of Bafgh-Yazd, Iran). *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)*, 4, 22-11. <http://dx.doi.org/10.20431/2454-8693.0403002> [in persian].
- Hu, K., & Li, J. (2023). Using Least Cost Path Analysis to Plan a New Bypass Route on Highway 401 to Mitigate Traffic Congestion and Impacts in the City of Toronto, Ontario. *Abstracts of the ICA*, 6, 1-3. [doi:10.5194/ica-abs-6-94-2023](https://doi.org/10.5194/ica-abs-6-94-2023)
- Januadi, M.I., & Nabila, D.N. (2020). Routing the highway development by using SuperMap Least Cost Path Analysis (LCPA) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and its assessment toward spatial planning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 561. [doi:10.1088/1755-1315/561/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/561/1/012019)
- Kamboj, N., & Kumari, E. S. (2017). Environment impact assessment for Highway: A Review. *Article in Current World Environment*, 12(3), 521-533. [doi:10.12944/CWE.12.3.05](https://doi.org/10.12944/CWE.12.3.05)
- Larbi, E. K., Boye, C. B., & Peprah, M. S. (2018). A GIS Approach in Optimal Route Selection in the Mining Communities Using the Analytical Hierarchy Process and the Least Cost Path Analysis, *5th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*, pp. GLM 50-62.
- Lin, S., Mathew, S., & Abdul Rasam, A. R. (2023). Transmission Suitability Route Map Using The Least Cost Path Analysis (Lcpa). *Planning Malaysia*, 21(26). [doi:10.21837/pm.v21i26.1267](https://doi.org/10.21837/pm.v21i26.1267)
- Mahini, A., & Abedian, S. (2014). Routing of road network through least cost pathway algorithm to minimize impacts on environment. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42, 517-527. [doi:10.1007/s12524-013-0351-7](https://doi.org/10.1007/s12524-013-0351-7) [in persian].
- Malekpour Golsefidi, M., Karimipour, F., & Sharifi, M. A. (2016). Proposing a Novel Temporal Rout Finding Model for Marine Navigation with Respect to Depth and Weather Condition of Marine Environment. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 5, 255-268. [in persian]
- Mirabdollahi, S. K., & Mirabdollahi, M. (2015). To determine optimal route of intercity train (Yazd-Ardakan) via fuzzy logic *Geography and Environmental Planning*, 26, 191-202. [doi:10.1001.1.20085362.1394.26.1.14.3](https://doi.org/10.1001.1.20085362.1394.26.1.14.3)
- Ngunyi, J., Mundia, C. N., & Gachari, M. K. (2017). Analysis of standard gauge railway using GIS and remote sensing. *American Journal of Geographic Information System*, 6(2), 54-63 [doi:10.5923/j.ajgis.20170602.02](https://doi.org/10.5923/j.ajgis.20170602.02)
- Qare Hassan Lou, S., Arabi, M., & Qare Hassan Lu, H. (2021). Routing of pipelines in the water transmission systems (from Taleqan Dam to Hashtgerd New City) with Application and Comparison of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Network Methods. *Journal of Water Science & Engineering*, 11, 69-51. [in persian].
- Sameer, Y. M., Abed, A. N., & Sayl, K. N. (2021). Highway route selection using GIS and analytical hierarchy process case study Ramadi Heet rural highway. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973 (1), 012060. [doi:10.1088/1742-6596/1973/1/012060](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012060)
- Sari, F., & Sen, M. (2017). Least cost path algorithm design for highway route selection. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2, 1-8. [doi:10.26833/ijeg.285770](https://doi.org/10.26833/ijeg.285770)

- Sari, F., & Şen, M. (2022). Highway Route Planning via Least Cost Path Algorithm and Multi Criteria Decision Analysis Integration, a Comparison of AHP, TOPSIS and VIKOR. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9, 27-38. doi:10.30897/ijegeo.900200
- Strzalka, A., Malicki, J., Blachowski, J. (2024). Least-Cost-Path and Closest Facility Analysis for Generating District Heating Networks on a Communal Level. *Applied Sciences*, 14, 763. <https://doi.org/10.3390/app14020763>
- Suleiman, S., Agarwal, V., Lal, D., & Sunusi, A. (2015). Optimal route location by least cost path (LCP) analysis using (GIS) a case study. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 4, 9621-9626. doi: 10.30495/wej.2022.22648.2193
- Yildirim, V., & Bediroglu, S. (2019). A geographic information system-based model for economical and eco-friendly high-speed railway route determination using analytic hierarchy process and least-cost-path analysis. *Expert Systems*, 36, e12376. doi:10.1111/exsy.12376

