



Road Safety Assessment with Emphasis on Environmental Parameters: Dehghan to Sanandaj Route

Pooya Zareei¹ , Masoumeh Moghbel² 

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

Email: pooya.zareei@ut.ac.ir

2. Department of Natural Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: moghbel@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

Article History:

Received:

26 November 2024

Received in revised form:

26 February 2025

Accepted:

7 April 2025

Available online:

12 May 2025

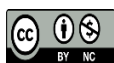
Keywords:

Environmental hazards,
road safety,
Analytic Hierarchy Process
(AHP),
Dehghan–Sanandaj
corridor.

ABSTRACT

The Dehghan–Sanandaj corridor is one of the key transportation routes connecting Dehghan County to Sanandaj and serves as a primary access road from Sanandaj to Tehran. Various natural factors influence road-related hazards, including precipitation, slope, elevation, mass movements, freezing, and others. Due to its passage through mountainous areas with steep gradients and diverse environmental and climatic conditions, this route is prone to hazards such as flooding, landslides, and avalanches. This study aims to identify and map the hazard-prone zones along this corridor by considering regional characteristics. To this end, key environmental criteria affecting road safety—including elevation, slope, slope aspect, land use, precipitation, and freezing—were first prepared and standardized. In the next step, the relative importance (weight) of each criterion was determined through expert opinion using pairwise comparisons within the Analytic Hierarchy Process (AHP), analyzed with the Expert Choice software. Finally, a road safety risk assessment map was developed. The zoning results revealed that the vulnerability levels along the studied route are distributed as follows: 56.43% in the very low-risk class, 2.17% in low-risk, 5.41% in moderate-risk, 10.74% in high-risk, and 25.23% in the very high-risk class. Moreover, results indicate that the low-risk zones predominantly occur in areas with 0–10% slope, covering approximately 76% of the route. In contrast, zones with very high risk are mainly located at elevations above 2000 meters, featuring mountain passes and steep slopes, with 21.3% and 3% falling into high and very high elevation classes respectively—collectively accounting for about 1% of the total route area.

Citation: Zareei, P., & Moghbel, M. (2025). Road Safety Assessment with Emphasis on Environmental Parameters: Dehghan to Sanandaj Route. *Journal of Geography and Spatial Development*, 2 (1), 17-37.
<http://doi.org/10.22098/gsd.2025.17065.1082>



© The Author (s)

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

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

Extensive Abstract

Introduction

Currently, the functioning and progress of modern society heavily relies on road networks. Road networks are one of the vital networks whose damage can cause excess pressure on other networks, especially in emergency situations. Also, road transport networks, as the most widespread and accessible form of freight and passenger movement, are exposed to a wide range of natural and man-made hazards. Extreme weather conditions or natural disasters can significantly disrupt the transport network. Natural hazards such as floods, landslides, earthquakes and tsunamis have significant impacts on the ability of transport systems to provide safe, efficient and accessible transport. Many road hazards are associated with various climatic, hydrological, geomorphological, etc. factors. In this regard, the geographic information system, with its capabilities of linking spatial and descriptive environmental characteristics, is a suitable tool for assessing road hazards with an environmental approach. any road hazards are associated with various factors, including climatic, hydrological, geomorphological, and other environmental elements. In this context, Geographic Information Systems (GIS), with their capability to integrate spatial and descriptive environmental characteristics, serve as an effective tool for assessing road hazards through an environmentally oriented approach. Accordingly, this study aims to utilize Geographic Information Systems (GIS) and the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to identify and evaluate the contributing factors to road hazards along the Dehgolan to Sanandaj route.

Methodology

In this study, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method based on climatic variables was used to assess road safety on the Dehgolan-Sanandaj axis. In this regard, influential criteria including climatic data, land use, and physiographic characteristics were used to investigate the safety of the Dehgolan-Sanandaj axis. In this regard, six influential factors including slope, slope

direction, digital elevation model, land cover, precipitation, and frost were selected. Each of the above criteria was extracted in the ArcGIS 10.8.2 software environment and standardized according to their nature. In the following, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was used to obtain the importance of each of these factors (criteria) in relation to road hazard risk.

Results and discussion

The study of the importance of the criteria shows that the slope factor has the greatest effect on the occurrence of road environmental hazards compared to other factors. Also, the land use criterion has the least effect on the occurrence of road hazards. The results show that most of the studied axis is in the low slope and very low risk class, which generally includes agricultural vegetation lands. According to Table (5), about 57 percent of the axis surface has very low risk, about 2 percent of the axis surface has low risk, and about 5 percent of the axis surface has medium risk. Along the Dehgolan to Sanandaj axis, the presence of a high-slope pass in the study area has caused about 10 percent of the axis surface to be in the high risk class and 25 percent of the axis surface to be in the very high risk class.

Conclusion

The occurrence of various environmental hazards, including floods, landslides, avalanches, etc., in interprovincial and urban road communications leaves significant human and financial losses. In order to reduce losses and increase the safety factor, it is necessary to predict, examine and analyze hazardous areas using various parameters. In this regard, using climatic, topographic and land cover criteria, environmental hazard zoning was carried out to assess the safety of the Dehgolan-Sanandaj axis. Based on the results obtained from zoning in the studied axis, the risk level of this axis was extracted and identified as 56.43% in the very low risk class, 17.2% in the low risk class, 41.5% in the medium risk class, 74.10% in the high risk class and 23.25% in the very high risk class. The results also show that

the low risk class is mostly in the 0 to 10% slope class, which covers 76% of the axis. But the very high risk areas at an altitude above 2000 meters, which have passes and steep slopes, are 21 and 3 percent in the high and very high altitude classes, which cover about 1 percent of the axis area.

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.



ارزیابی ایمنی جاده‌ای با تأکید بر پارامترهای محیطی: مسیر دهگلان به سنندج

پویا زارعی^۱ ✉، معصومه مقبل^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: pooya.zareei@ut.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: moghbel@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲ واژگان کلیدی: مخاطرات محیطی، ایمنی جاده، تحلیل سلسله مراتبی، محور دهگلان - سنندج.	محور دهگلان به سنندج یکی از مواصلات مهم ارتباطی بین شهرستان دهگلان و سنندج و یکی از جاده‌های اصلی ارتباطی سنندج به تهران می‌باشد. عوامل طبیعی مختلفی در رخداد مخاطرات جاده‌ای تأثیر دارند که می‌توان به بارش، شیب، ارتفاع، حرکات دامنه‌ای، یخبندان و ... اشاره کرد. محور دهگلان به سنندج به دلیل عبور از مناطق کوهستانی، پرشیب، دامنه‌های با شرایط طبیعی و اقلیمی متفاوت، پتانسیل وقوع مخاطراتی همچون سیل، زمین‌لغزش، بهمن را دارد. پژوهش حاضر با در نظر گرفتن خصوصیات منطقه در صدد شناسایی و پهنه‌بندی مناطق حساس این محور می‌باشد. در این راستا ابتدا معیارهای محیطی مؤثر بر ایمنی جاده اعم از ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، بارش و یخبندان آماده و استانداردسازی شدند. در مرحله بعد وزن هر یک از معیارها با نظر کارشناسان خبره و با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی به‌صورت زوجی مقایسه و در نرم‌افزار Expert Choice موردبررسی قرار گرفت. در نهایت اقدام به تهیه نقشه ارزیابی ایمنی جاده‌ای گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پهنه‌بندی در محور مورد مطالعه، میزان خطرپذیری این محور به ترتیب ۵۶/۴۳ درصد در کلاس خطر بسیار کم، ۲/۱۷ درصد در خطر کم، ۵/۴۱ درصد در خطر متوسط، ۱۰/۷۴ درصد در کلاس خطر زیاد و ۲۵/۲۳ درصد در کلاس خطر بسیار زیاد استخراج و شناسایی شدند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که کلاس خطر کم بیشتر در کلاس شیب ۰ تا ۱۰ درصد قرار دارد که ۷۶ درصد از محور را در بر گرفته است. اما پهنه‌های با خطر خیلی زیاد در ارتفاع بالای ۲۰۰۰ متر که دارای گردنه‌ها و شیب تند می‌باشد ۲۱ و ۳ درصد در کلاس ارتفاعی زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند که حدود ۱ درصد سطح محور را در بر می‌گیرد.

استناد: زارعی، پویا و مقبل، معصومه. (۱۴۰۴). ارزیابی ایمنی جاده‌ای با تأکید بر پارامترهای محیطی: مسیر دهگلان به سنندج. *مجله جغرافیا و توسعه فضایی*، ۲(۱)، ۳۷-۱۷.

<http://doi.org/10.22098/gsd.2025.17065.1082>

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان



مقدمه

شبکه‌های حمل‌ونقل یکی از ارکان اساسی توسعه و پشتیبانی کشورها هستند (Toma-Danila et al., 2020). در پی افزایش سریع شهرنشینی و تغییرات آب و هوایی، مخاطرات مختلف که سبب آسیب به زیرساخت‌های جاده‌ای شود نیز افزایش یافته است (Zhu et al., 2021). در حال حاضر، عملکرد و پیشرفت جامعه مدرن به شدت متکی به شبکه‌های جاده‌ای است. شبکه‌های جاده‌ای یکی از شبکه‌های حیاتی است که آسیب به آن می‌تواند باعث فشار مازاد بر شبکه‌های دیگر به‌ویژه در مواقع اضطراری شود. همچنین شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای به‌عنوان گسترده‌ترین و در دسترس‌ترین نوع جابجایی بار و مسافر، در معرض پهنه گسترده‌ای از مخاطرات طبیعی و انسانی قرار دارد. تنوع و گستردگی آسیب‌ها ناشی از موقعیت جغرافیایی کشور از یک‌سو و فرسودگی زیرساخت‌های حمل‌ونقلی از سوی دیگر، موجب افزایش روزافزون هزینه‌های ناشی از مخاطرات در شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای و آسیب‌های جبران‌ناپذیر بر اقتصاد کشور گردیده است (قاسمی، ۱۳۹۳). شرایط آب و هوایی شدید یا بلایای طبیعی می‌تواند شبکه حمل‌ونقل را به‌طور قابل‌توجهی مختل کند. خطرات طبیعی مانند سیل، رانش زمین، زلزله و سونامی تأثیرات قابل‌توجهی بر توانایی سیستم‌های حمل‌ونقل برای ارائه یک حمل‌ونقل ایمن، کارآمد و در دسترس دارند (Hassan et al., 2022). همان‌طور که توسعه راه‌های ارتباطی برای رونق اقتصادی شهرها و کشورها ضروری است، ایجاد و گسترش این راه‌ها بدون برنامه‌ریزی و مطالعات علمی، اغلب منجر به برهم خوردن تعادل طبیعی محیط‌زیست و در نتیجه، بروز پیامدهای زیان‌بار جانی و مالی برای انسان‌ها شده است (اسفندیاری، ۱۳۸۶). در همین ارتباط شبکه حمل‌ونقل زمینی ایران یکی از پرحادثه‌ترین شبکه‌های حمل‌ونقل جهان است که تلفات انسانی و خسارات مادی آن هزینه‌های سنگینی را در بعد ملی بر پیکره جامعه تحمیل می‌کند (فلاح‌تبار، ۱۳۷۹). به همین دلیل، مطالعات مختلفی در زمینه ارزیابی ایمنی جاده انجام شده است؛ که از آن می‌توان به مطالعه تاسنت و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد که به‌منظور تحلیل خطرات طبیعی شبکه‌های جاده‌ای از رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره بر اساس عوامل اقتصادی، اجتماعی یا انسانی و استفاده نمود. داود و همکاران (۲۰۱۲) اثرات خطر سیل را با استفاده GIS بر شبکه جاده‌ای مکه بررسی کردند. به‌کارگیری این رویکرد پیشنهادی نشان می‌دهد که ۲۱ درصد از شبکه جاده‌ای شهر مکه در معرض خطر سیل کم، ۲۹ درصد در کلاس خطر متوسط و ۵۰ درصد جاده‌ها در معرض اثرات شدید سیل قرار دارند. کلر و آتر (۲۰۱۴) به بررسی زمانی و مکانی اثرگذاری مخاطرات طبیعی حاصل از بارش‌های شدید سال ۲۰۱۳ بر زیرساخت جاده‌ها پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی بین میزان بارندگی در مناطق مختلف با تعداد تصادفات و وقوع مخاطرات محیطی اعم از سیل و زمین‌لغزش وجود دارد. به‌طوری‌که با افزایش روزهای بارندگی تعداد تصادفات جاده‌ای بیشتر شده و در طی ۵ روز به تعداد ۴۳ حادثه می‌رسد. میس و همکاران (۲۰۱۶) اثرات اقتصادی زمین‌لغزش و سیل را بر روی شبکه جاده‌ای در کشور تایلند بررسی کردند. نتایج نشان داد که هزینه‌های مستقیم رخداد زمین‌لغزش در چند ناحیه به ترتیب ۴۰۰ تا ۱۷۰۰ و ۱۸۰ تا ۱۴۰۰ هزار پوند بوده است درحالی‌که هزینه مستقیم وقوع سیل ۳۲۰۰ هزار پوند می‌باشد. همچنین اثرات غیرمستقیم باعث افزایش بار ترافیکی می‌شود. دانیلا و همکاران (۲۰۲۰) پیامدهای آسیب‌پذیری شبکه حمل‌ونقل بخارست کشور رومانی را با استفاده از داده‌های Open Street Map به همراه یک ماژول نسبتاً خودکار بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مرکز شهر نه‌تنها به دلیل فروریختن ساختمان‌ها، بلکه به دلیل عدم دسترسی به این مکان‌ها توسط آمبولانس‌ها و آتش‌نشان‌ها، به‌طور قابل‌توجهی آسیب‌پذیرتر خواهند بود. ژو و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به تحلیل ریسک شبکه‌های جاده‌ای با در نظر گرفتن حساسیت زمین‌لغزش و آسیب‌پذیری در چندین شهرستان کشور چین پرداختند. نتایج نشان داد که حدود ۶۶/۳۹ درصد از سطح شهرستان‌ها در کلاس حساسیت کم زمین‌لغزش بوده، حدود ۷۸/۶ درصد از شهرستان‌های

یونگشان، سونگشی و ماکو در کلاس حساسیت متوسط و حدود ۵۶/۵۳ درصد از سطح شمال شرقی شهرستان لیبو و بخشی از شهرستان سونگ شو را در برمی‌گیرد. همچنین نتایج نشان داد که برای مناطق کم‌خطر خسارت جاده‌ای کم است. اما برای مناطق با خطر متوسط که عمدتاً رانش زمین می‌باشد خطر نیز متوسط می‌باشد. ژو و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی ریسک بلایای طبیعی جاده‌ها با استفاده از روش‌های فازی و شبکه عصبی پرداختند. محققین از عوامل دما، رطوبت نسبی، بارندگی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، پوشش گیاهی، سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی و تراکم جاده استفاده کردند. نقشه ارزیابی خطر بلایای طبیعی را در سه کلاس خطر متوسط و زیاد طبقه‌بندی کردند. نتایج نشان داد جاده‌های شهرستان لینگچوان عمدتاً در سطح خطر متوسط و کم قرار دارند و بخش‌های جاده‌ای کم‌خطر عمدتاً در شهر جیویا، شهر سانجی، شهر لینگتیان و شهر هایانگ توزیع شده‌اند. بخش‌های جاده‌ای خطرناک در جنوب غربی شهرستان لینگچوان، شمال شرقی شهر دینجیانگ و بخش مرکزی شهر داکسو یافت می‌شوند. با قدم و همکاران (۱۳۸۴) که در پژوهشی به ارزیابی ایمنی جاده‌ای مسیر سنندج - مریوان با استفاده از داده‌های محیطی و مکانی پرداختند. در این پژوهش محققین از معیارهای اقلیمی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی استفاده کردند. بعد از انطباق لایه‌های فوق نقشه مخاطرات محیطی محور سنندج - مریوان استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد که ۶۵ درصد از سطح محور در کلاس خطر بسیار زیاد، ۲۵ درصد در کلاس خطر زیاد و ۱۰ درصد در کلاس خطر متوسط قرار گرفته‌اند. برنا و همکاران (۱۳۸۵) به ارزیابی سوانح و ایمنی حمل‌ونقل جاده‌ای در محور کرج چالوس با رویکرد مخاطرات اقلیمی پرداختند. نتایج نشان داد که در محور ذکرشده بیشترین احتمال خطر در ریزش باران از ۹۵ تا ۱۴۵ کیلومتر، پدیده یخبندان از ۳۵ تا ۸۵ کیلومتر، پدیده ریزش برف از ۴۵ تا ۸۵ کیلومتر، پدیده مه از ۹۶ تا ۱۳۰ کیلومتر و پدیده سقوط بهمن از ۵۶ تا ۷۰ کیلومتر شناسایی شدند. گلمرادی و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی ایمنی جاده‌ای با رویکرد مخاطرات محیطی محور خلخال - پونل پرداختند. محققین بیان نمودند که زمین‌لغزش، ریزش سنگ و ریزش بهمن محور مورد مطالعه را تهدید می‌کند. نتایج پهنه‌بندی نشان داد که بیشتر مناطق، با خطر بسیار زیاد در نزدیکی جاده و مناطق مرتفع قرار گرفته‌اند. همچنین بین معیارهای انسانی و طبیعی مورد بررسی عامل شیب و عامل جاده‌سازی بیشترین تأثیر را در رخداد حرکات دامنه‌ای دارد. علیان و کلانتری (۱۴۰۱) در پژوهشی توزیع مکانی تصادفات جاده‌ای و عوامل مؤثر بر آن را در محور کرج - کندوان بررسی و تحلیل نمودند. محققین ابتدا تصادفات رخ داده را جمع‌آوری، سپس نسبت به مسیر در سطح کیلومتر مشخص نمودند در ادامه نقشه‌های عوامل مؤثر از جمله شیب جاده، درجه انحناء، نقاط تقاطع، درصد تراکم، اقلیم، و کاربری اطراف منطقه مورد مطالعه را استخراج و استانداردسازی نمودند و در نهایت نقشه پهنه‌بندی با استفاده از ترکیب لایه‌ها و ایجاد شد. نتایج مطالعه نشان داد که مهم‌ترین عامل مؤثر در وقوع تصادف با توجه به تحلیل انجام‌شده، متغیر انحناء و متغیرهای تقاطع، اقلیم، تراکم و شیب در اولویت‌های بعدی قرار دارند. بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات ارزشمندی در زمینه به‌کارگیری داده‌های مکانی و روش‌های تصمیم‌گیری در داخل و خارج کشور در زمینه ارزیابی مخاطرات جاده‌ای انجام شده است اما مطالعات کمتری به تعیین پهنه‌های خطر جاده‌ای در داخل کشور پرداختند. این در حالی است که بیشتر محوره‌های جاده‌ای کشور به دلیل قرار گرفتن در مناطق کوهستانی و شیب‌های زیاد و بعضاً مناطق صعب‌العبور در معرض رخداد مخاطرات محیطی قرار دارند. لذا شناسایی و معرفی این مناطق در پیشگیری از وقوع مخاطره جاده‌ای و کاهش صدمات ضروری می‌باشد. به‌طوری‌که بسیاری از مخاطرات جاده‌ای با عوامل مختلف اقلیمی، هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و غیره در ارتباط هستند. در این راستا سیستم اطلاعات جغرافیایی با برخورداری از قابلیت‌های ارتباط دهی خصوصیات مکانی و توصیفی محیط به‌عنوان ابزاری مناسب جهت ارزیابی مخاطرات جاده‌ای با رویکرد محیطی می‌باشد. به همین دلیل این پژوهش در صدد است تا با استفاده از سیستم

اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله مراتبی به شناخت و ارزیابی عوامل مؤثر در رخداد مخاطرات جاده‌ای محور دهگلان به سندج بپردازد.

مبانی نظری

ایمنی جاده‌ای یکی از موضوعات کلیدی در حوزه حمل‌ونقل و ترافیک است که عوامل مختلفی از جمله شرایط اقلیمی، ویژگی‌های هندسی راه، کیفیت زیرساخت‌ها و رفتار رانندگان بر آن تأثیر می‌گذارند. در میان این عوامل، شرایط محیطی، به‌ویژه عناصر اقلیمی و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی جاده، نقشی اساسی در میزان تصادفات ایفا می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که شرایط جوی همچون بارش باران، برف، یخبندان، باد شدید و مه می‌توانند احتمال وقوع تصادفات را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند (Andrey et al., 2003). کاهش دید رانندگان، افزایش لغزندگی سطح جاده و کاهش کنترل وسیله نقلیه از جمله اثرات این شرایط بر ایمنی جاده‌ای است. پژوهش‌ها تأیید کرده‌اند که در روزهای بارانی، به دلیل کاهش اصطکاک بین تایر خودرو و سطح جاده، خطر وقوع تصادف تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد (Quddus et al., 2010). همچنین، در شرایط مه‌آلود که میدان دید رانندگان کاهش پیدا می‌کند، واکنش آن‌ها به موانع و تغییرات مسیر کندتر شده و احتمال تصادف بیشتر می‌شود (Brijs et al., 2008).

یکی از مهم‌ترین عناصر اقلیمی که بر ایمنی جاده‌ها تأثیر دارد، یخبندان و کاهش دما است. در مناطق سردسیر، تشکیل یخ بر سطح جاده، ضریب اصطکاک را به‌شدت کاهش داده و موجب لغزش وسایل نقلیه می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که در دماهای پایین، به‌ویژه هنگام صبح، به دلیل باقی ماندن یخ بر روی سطح جاده، نرخ تصادفات افزایش می‌یابد (Buddhavarapu et al., 2013). علاوه بر این، وزش بادهای شدید، به‌خصوص در مناطق باز و کوهستانی، می‌تواند کنترل وسیله نقلیه را دشوار ساخته و باعث انحراف از مسیر شود. این مسئله به‌ویژه برای خودروهای سنگین مانند کامیون‌ها و اتوبوس‌ها خطرناک است، زیرا نیروی باد بر روی بدنه آن‌ها اثر بیشتری دارد و می‌تواند باعث واژگونی شود (Andrey et al., 2003).

در کنار شرایط اقلیمی، ویژگی‌های هندسی جاده نیز در افزایش یا کاهش خطر تصادفات تأثیر دارد. طراحی نامناسب مسیر، شیب‌های تند، پیچ‌های خطرناک، عرض کم جاده و عدم کیفیت سطح راه از جمله عواملی هستند که می‌توانند احتمال بروز حوادث را افزایش دهند. مسیرهای کوهستانی، که معمولاً دارای پیچ‌های تند و شیب‌های زیاد هستند، در شرایط بارندگی و یخبندان مستعد وقوع تصادفات جدی می‌باشند (Kashani & Shariat-Mohaymany, 2012). بررسی‌ها نشان داده‌اند که در چنین مسیرهایی، احتمال خروج خودروها از جاده و تصادفات ناشی از واژگونی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مسیرهای صاف و هموار است (Quddus et al., 2010). همچنین، کیفیت سطح جاده، از جمله میزان زبری و مقاومت آسفالت، تأثیر مستقیمی بر اصطکاک تایرها دارد. جاده‌هایی که سطح صاف و فاقد زبری کافی دارند، به‌ویژه در شرایط بارانی، مستعد ایجاد لغزش و تصادفات هستند (Brijs et al., 2008).

از دیگر عوامل مهم در ایمنی جاده‌ای، وضعیت شانه‌های راه و حریم اطراف جاده است. در مسیرهایی که شانه‌های استاندارد و فضای کافی برای خروج اضطراری خودروها وجود ندارد، خطر برخورد وسایل نقلیه با موانع کنار جاده افزایش می‌یابد. همچنین، پوشش گیاهی در حاشیه جاده‌ها می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر ایمنی داشته باشد. از یک‌سو، درختان و بوته‌های انبوه می‌توانند میدان دید رانندگان را محدود کنند و از سوی دیگر، در تصادفات منجر به خروج از مسیر، ممکن است مانعی برای کاهش شدت برخورد وسایل نقلیه با زمین‌های ناهموار باشند (Buddhavarapu et al., 2013). مطالعات انجام‌شده در جاده‌های جنگلی نشان داده‌اند که وجود درختان نزدیک به حریم جاده، اگرچه در برخی موارد

موجب کاهش شدت تصادف شده است، اما در شرایط خاصی می‌تواند خطر برخورد مستقیم وسایل نقلیه را افزایش دهد (Zareie et al., 2023).

افزون بر این، نوع کاربری اراضی اطراف جاده‌ها نیز می‌تواند بر میزان تصادفات تأثیرگذار باشد. جاده‌هایی که از مناطق شهری یا صنعتی عبور می‌کنند، معمولاً با تردد بالاتر وسایل نقلیه و افزایش ورود و خروج خودروها مواجه هستند که احتمال وقوع تصادفات را افزایش می‌دهد. در مقابل، مسیرهای روستایی و جاده‌های عبوری از مناطق کشاورزی و جنگلی اگرچه تردد کمتری دارند، اما احتمال برخورد با حیوانات وحشی یا موانع طبیعی در آن‌ها بیشتر است (Kashani & Shariat-Mohaymany, 2012). از این‌رو، در برنامه‌ریزی‌های ایمنی جاده‌ای، توجه به نوع پوشش زمین و تأثیر آن بر تردد وسایل نقلیه ضروری است.

با پیشرفت فناوری‌های مدرن، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌سازی تصادفات، امکان تحلیل دقیق‌تر تأثیرات محیطی بر ایمنی جاده‌ها را فراهم کرده است. تحلیل داده‌های مکانی می‌تواند به شناسایی نقاط حادثه‌خیز و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش تصادفات کمک کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از فناوری‌های هوشمند، مانند سنسورهای تشخیص شرایط جوی و سیستم‌های هشداردهنده بلادرنگ، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود ایمنی رانندگی داشته باشد (Zareie et al., 2023). این سامانه‌ها با ارائه اطلاعات به موقع در مورد شرایط جاده و وضعیت آب‌وهوا، به رانندگان کمک می‌کنند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کنند و خطرات احتمالی را کاهش دهند.

در مجموع، بررسی تأثیر پارامترهای محیطی بر ایمنی جاده‌ای نشان می‌دهد که این عوامل تأثیر قابل‌توجهی بر وقوع تصادفات دارند و مدیریت صحیح آن‌ها می‌تواند منجر به کاهش حوادث شود. شرایط اقلیمی نامساعد همچون بارش، یخبندان، مه و بادهای شدید، همراه با ویژگی‌های نامناسب هندسی راه، خطرات جدی برای رانندگان ایجاد می‌کنند. با این حال، استفاده از فناوری‌های نوین و اجرای برنامه‌های مدیریتی مبتنی بر تحلیل داده‌های محیطی، می‌تواند راهکارهای مؤثری برای افزایش ایمنی جاده‌ها فراهم کند. از این‌رو، در برنامه‌ریزی‌های حمل‌ونقل و مدیریت راه‌ها، توجه به عناصر اقلیمی و ویژگی‌های فیزیکی جاده، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است.

روش پژوهش

در این پژوهش جهت ارزیابی ایمنی جاده‌ای در محور دهگلان به سنندج از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد. در این راستا جهت بررسی ایمنی محور دهگلان به سنندج از معیارهای اقلیمی، کاربری اراضی و خصوصیات فیزیوگرافی استفاده شد و شش عامل از جمله شیب، جهت شیب، مدل رقومی ارتفاع، پوشش زمین، بارش و یخبندان موردبررسی قرار گرفت. هر کدام از معیارهای فوق در محیط ArcGIS 10.8.2 استخراج و استانداردسازی شد. برای به دست آوردن میزان تأثیر هر یک از این عوامل (معیارها) در رابطه با مخاطره خطر جاده‌ای از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد.

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، که اولین بار توسط توماس ساعتی در سال ۱۹۸۰ معرفی شد، ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش با شناسایی و اولویت‌بندی عناصر کلیدی تصمیم‌گیری، شامل اهداف، معیارها و گزینه‌های احتمالی، آغاز می‌شود. ساختار سلسله مراتبی به این دلیل اهمیت دارد که امکان دسته‌بندی و خلاصه کردن این عناصر در سطوح مختلف را فراهم می‌کند.

فرآیند AHP بر سه اصل اساسی استوار است: (۱) ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی، (۲) مقایسه و ارزیابی معیارها و زیرمعیارها به صورت جفتی، و (۳) ترکیب اولویت‌ها برای رسیدن به نتیجه نهایی. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

ایجاد ساختار سلسله مراتبی

اولین گام، ترسیم یک مدل گرافیکی از مسئله است که در آن هدف اصلی، معیارهای مرتبط برای دستیابی به هدف و گزینه‌های مورد نظر به وضوح نمایش داده می‌شوند. در این مرحله، سطوح مختلف تصمیم‌گیری به صورت سلسله مراتبی و گرافیکی سازمان‌دهی می‌شوند. در این پژوهش، هدف اصلی پهنه‌بندی خطر جاده‌ای با تأکید بر داده‌های اقلیمی است. معیارهای اصلی و زیرمعیارها در سطح دوم قرار می‌گیرند. شکل ۱ ساختار سلسله مراتبی معیارهای مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار سلسله مراتبی معیارهای پهنه‌بندی خطر محور دهگلان به سندج

مقایسه زوجی

در این پژوهش، از روش AHP برای وزن دهی به معیارها استفاده شده است. ورودی این روش، ماتریس مقایسه زوجی است که اهمیت نسبی هر معیار را نسبت به سایر معیارها نشان می‌دهد. برای تعیین وزن هر معیار، آن‌ها به صورت جفتی مقایسه و امتیازبندی می‌شوند. در این مقایسه، از مقیاس ۱ تا ۹ استفاده می‌شود، به طوری که امتیاز بالاتر نشان‌دهنده اهمیت بیشتر معیار سطر نسبت به معیار ستونی است. جدول ۱ مقیاس ۹ کمیتی ساعتی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقیاس ۹ کمیتی ساعتی برای مقایسه دو دویی گزینه‌ها

میزان اهمیت	تعریف
۱	اهمیت برابر
۲	اهمیت برابر تا متوسط
۳	اهمیت متوسط
۴	اهمیت متوسط تا قوی
۵	اهمیت قوی
۶	اهمیت قوی تا بسیار قوی
۷	اهمیت بسیار قوی
۸	اهمیت بسیار قوی تا فوق العاده قوی
۹	اهمیت فوق العاده قوی

در این مرحله، بردار اهمیت داخلی محاسبه می‌شود که وزن نسبی هر معیار را نشان می‌دهد. این بردار از طریق رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$AW = \lambda_{Max} W$$

رابطه (۱)

که در آن:

- ماتریس مقایسه زوجی معیارها است.
 - بردار ویژه (وزن معیارها) است.
 - بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس است.
- در این پژوهش، از جدول ۲ برای مقایسه زوجی و تعیین وزن معیارها در پهنه‌بندی خطر جاده استفاده شده است.

جدول ۲. ماتریس مقایسه زوجی معیارهای محیطی و اقلیمی

نام	ارتفاع	شیب	جهت شیب	یخبندان	بارش	کاربری اراضی
ارتفاع	۱	۲	۱	۴	۲	۴
شیب		۱	۲	۶	۶	۶
جهت شیب			۱	۲	۲	۶
یخبندان				۱	۱	۵
بارش					۱	۲
کاربری اراضی						۱

محاسبه نرخ سازگاری (CR)

یکی از مزایای مهم AHP، امکان محاسبه نرخ سازگاری (CR) است که میزان سازگاری مقایسه‌های انجام‌شده را نشان می‌دهد. اگر CR کمتر از ۰٫۱ باشد، مقایسه‌ها قابل قبول هستند. در غیر این صورت، باید ماتریس مقایسه زوجی اصلاح شود CR. از طریق روابط ۲، ۳ و ۴ محاسبه می‌شود.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲) λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه و N تعداد معیارها، W بردار ویژه (ضریب اهمیت) و بزرگ‌ترین مقدار ویژه عددی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\lambda_{max} = \frac{\text{وزن معیار} / \text{سطر ماتریس ارزش‌گذاری} \times \text{ستون وزن‌ها}}{\quad} \quad \text{رابطه (۳)}$$

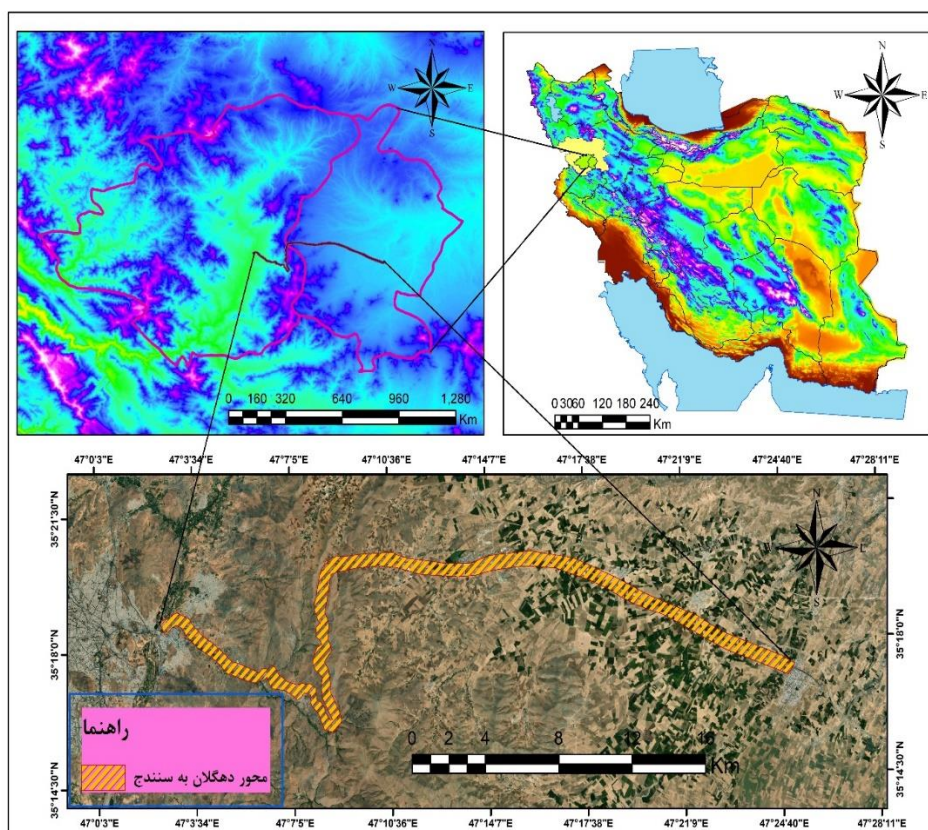
λ_{max} باید به تعداد معیارها و برای همه آن‌ها محاسبه شده و سپس از مجموع آن‌ها در رابطه (۲)، CR حاصل می‌گردد. شاخص دیگر موردنیاز شاخص تصادفی (RI) است که متناسب با تعداد معیارها به دست می‌آید و نهایتاً نرخ سازگاری از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (کرم، ۱۳۸۷).

$$CR = CI / RI \quad \text{رابطه (۴)}$$

مقدار نرخ سازگاری در ماتریس پهنه‌بندی ارزیابی خطر محور دهگلان به سنندج ۰٫۰۴ به دست آمد.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق منطقه‌ای در حدفاصل بین شهرستان دهگلان و سنندج می‌باشد. محور مورد مطالعه از نظر شرایط توپوگرافی از جمله نواحی کوهستانی کردستان می‌باشد. مسیر جاده‌ای دهگلان به سنندج در مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 21' 00''$ تا $37^{\circ} 15' 00''$ شمالی و در عرض شرقی و $47^{\circ} 25' 00''$ طول شرقی و در عرض شمالی $35^{\circ} 21' 00''$ قرار گرفته است (ثروتی و همکاران، ۱۳۸۷). موقعیت جغرافیایی محور مورد مطالعه در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲. نقشه موقعیت جغرافیایی محور مورد مطالعه

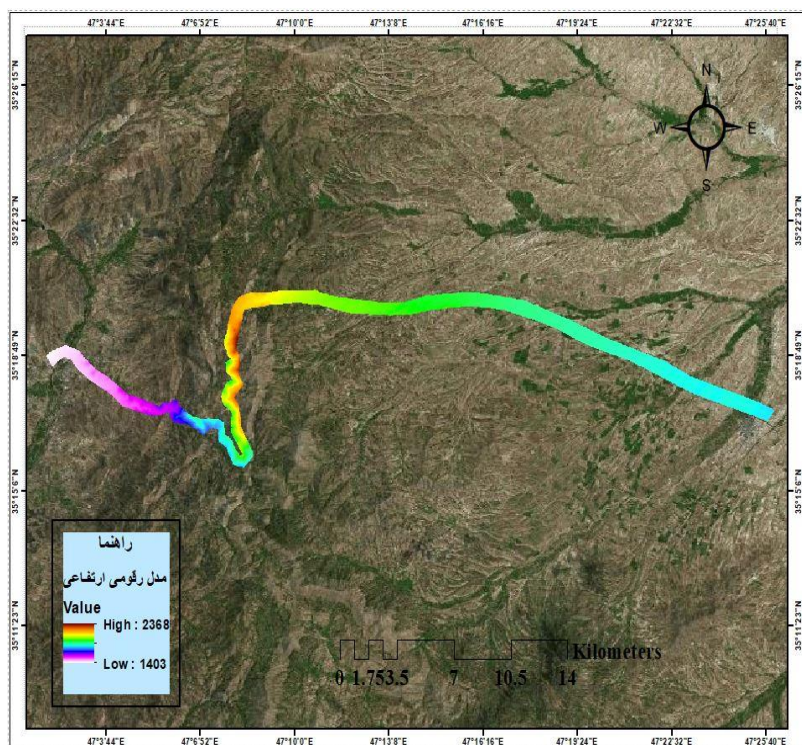
یافته‌ها

خصوصیات توپوگرافی

خصوصیات توپوگرافی اعم از شیب، جهت شیب و ارتفاع یکی از عوامل مؤثر در رخداد مخاطرات محیطی در ایران و جهان می‌باشد. با توجه اهمیت و تأثیرگذاری عوامل ذکر شده، در این پژوهش معیارهای ذکر شده استفاده گردید.

ارتفاع

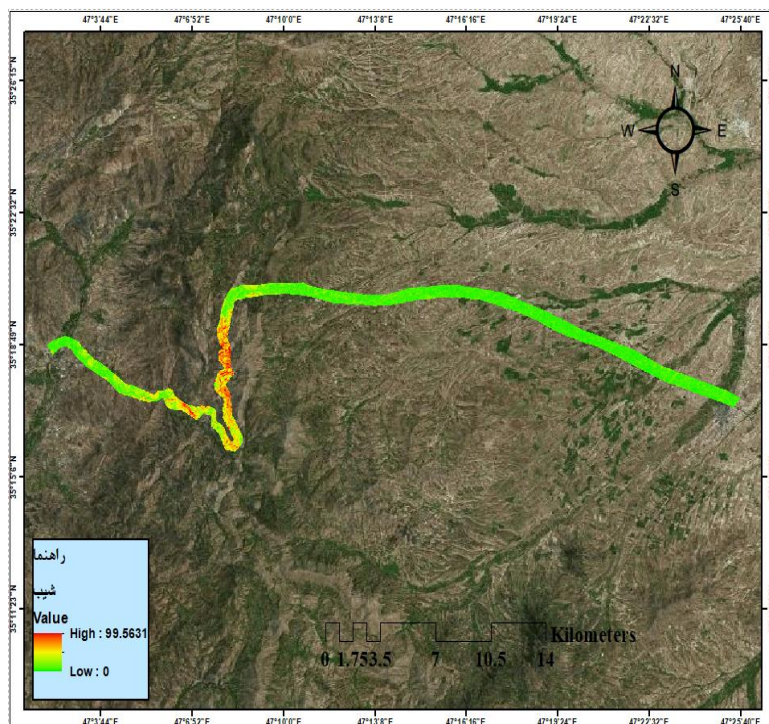
ارتفاع به صورت مستقیم و غیرمستقیم نقش مؤثری در رخداد مخاطرات جاده‌ای دارد. در این پژوهش ابتدا بعد از تعیین مرز محور دهگلان به سنندج، با مراجعه به سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا نسبت به دریافت DEM سی متری (30M) شاتل راداری SRTM اقدام شد. در ادامه محور مورد مطالعه با استفاده از دستور Extract by Mask در محیط نرم‌افزار برش زده شد. حداقل و حداکثر ارتفاع در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۴۰۳ و ۲۳۶۸ متر می‌باشد. نقشه مدل رقومی ارتفاع در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳. نقشه مدل رقومی ارتفاعی

معیار شیب

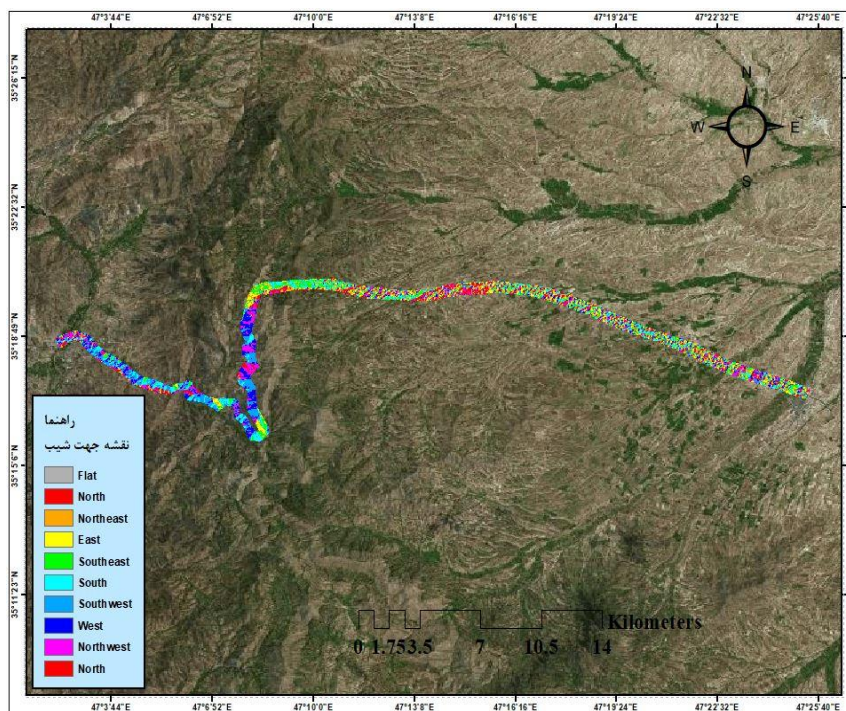
در این پژوهش نقشه شیب نیز از Dem شاتل راداری با دقت ۳۰ متری دریافت شده و به واحد درصد در محیط ArcMap استخراج شد.



شکل ۴. نقشه شیب

نقشه جهت شیب

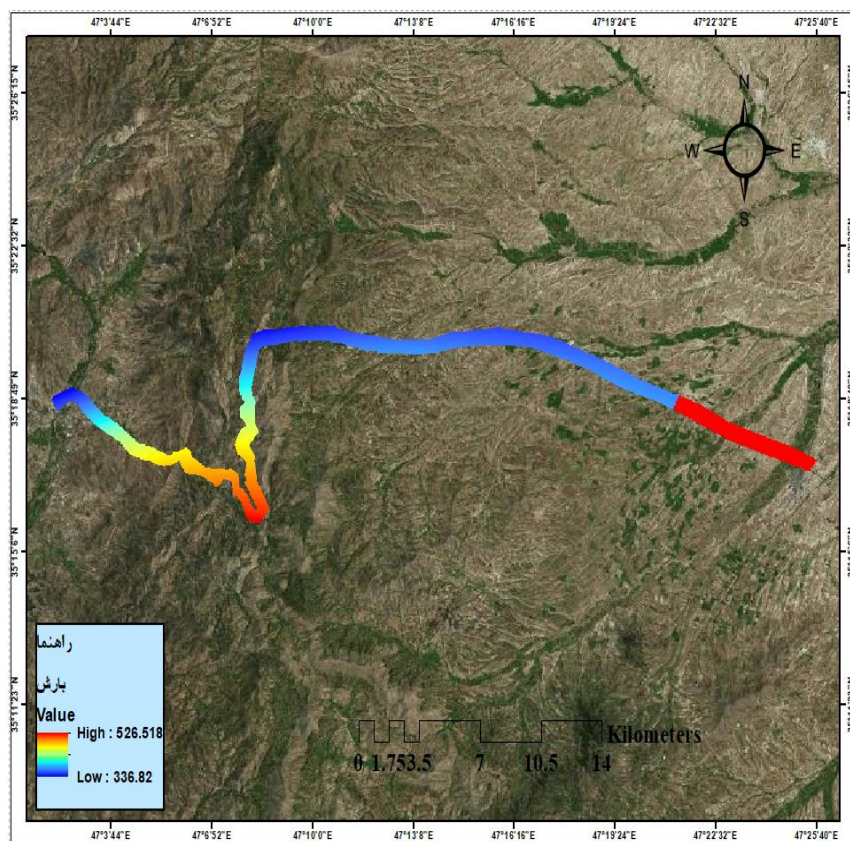
نقشه جهت شیب با استفاده از ابزار Aspect در Spatial Analysis استخراج شد. نقشه جهت شیب این محور در ۹ کلاس (هموار، شمال، شمال شرق، جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب، غرب و شمال غرب) دسته‌بندی شد شکل (۵).



شکل ۵. نقشه جهت شیب

نقشه بارش

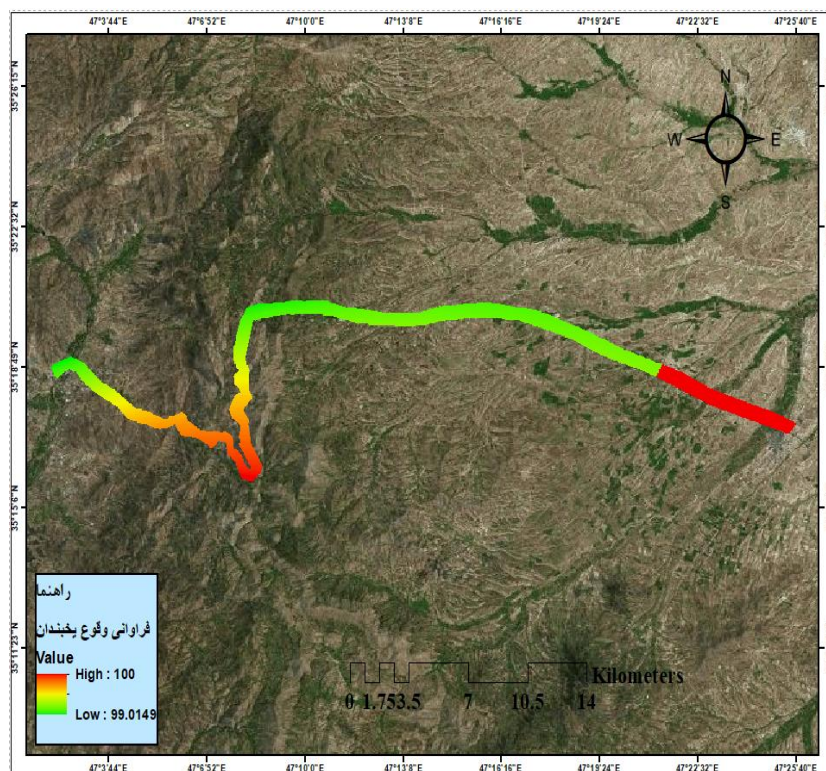
عامل بارش در مناطق مستعد خطر باعث ایجاد خطرات زیرساختی می‌شود. این امر به‌ویژه برای زمین‌لغزش‌هایی که شامل طیف وسیعی از فرآیندهای ژئومورفیک هستند و به‌شدت به مکان‌های خاص وابسته هستند صدق می‌کند (Dikau & Glade, 2002). جهت استخراج نقشه بارش، آمار بارندگی ایستگاه‌های استان کردستان استفاده شد. بدین منظور فایل اکسل مقادیر بارش به همراه طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها آماده‌سازی شد سپس با استفاده از درون‌یابی به روش IDW، نقشه بارش بر اساس مرز محور دهگلان به سندج آماده شد. مقادیر حداقل و حداکثر بارش به ترتیب ۳۳۶ و ۵۲۸ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۶. نقشه بارش

نقشه فراوانی وقوع یخبندان

جهت استخراج این عامل نیز، از آمار ده‌ساله دمای ایستگاه‌های استان کردستان استفاده شد. بدین منظور فایل اکسل تعداد روزهایی که مقادیر دمای حداقل صفر و زیر صفر به همراه طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها آماده‌سازی شد. سپس با استفاده از روش IDW درونیابی شد.



شکل ۷. نقشه فراوانی یخبندان

بعد از آماده‌سازی معیارهای مؤثر در وقوع خطر در محور دهگلان به سنج، جهت پهنه‌بندی نیاز است اثرگذاری هر کدام از معیارها ارزیابی شود. امروزه روش‌های متنوعی برای وزن دهی ارائه شده است. که در این پژوهش از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP^۱) استفاده شد است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یک روش ریاضی جهت تعیین اهمیت و تقدم معیارها در فرآیند تحلیل و ارزیابی است. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، به‌ویژه برای تصمیم‌گیری با معیارهای جداگانه مناسب می‌باشد. به‌صورت کلی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی روشی است که برای رتبه‌بندی مجموعه‌ای از گزینه‌ها یا برای انتخاب بهترین از یک مجموعه گزینه به کار می‌رود و با مقایسه زوجی‌ها امکان بررسی سناریوهایی مختلف را فراهم می‌کند (Saati et al., 1980).

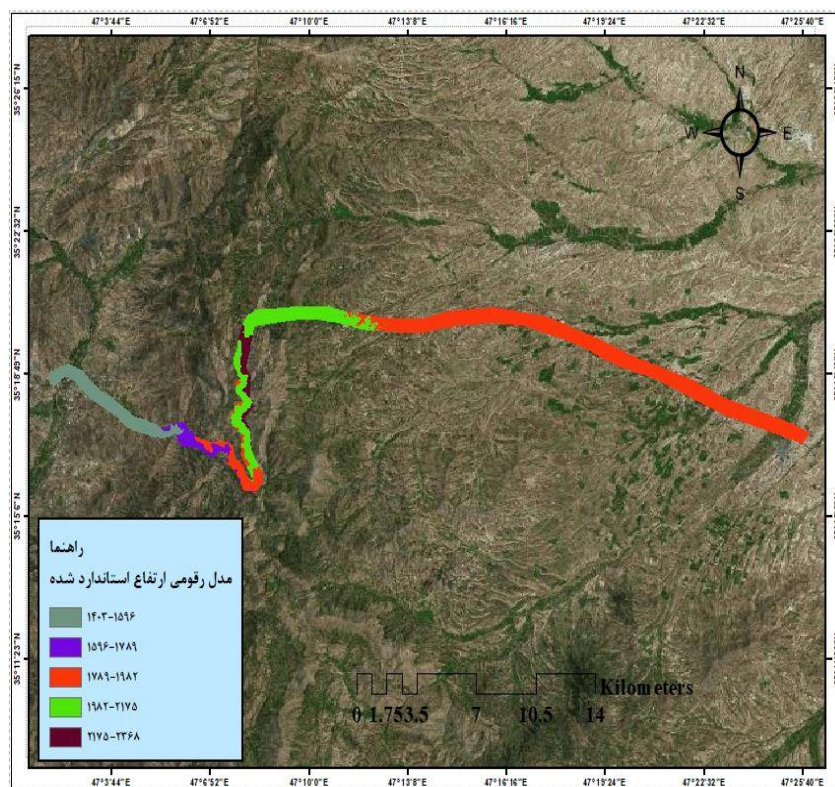
در این پژوهش جهت ارزیابی ایمنی جاده‌ای از معیارهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، بارش و وقوع فراوانی یخبندان استفاده شد. به‌منظور بررسی میزان اهمیت و تأثیرگذاری معیارها از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که عامل شیب نسبت به سایر عامل‌ها بیشترین اثر را در وقوع مخاطره محیطی جاده‌ای دارد. همچنین معیار کاربری اراضی کمترین اثر را در وقوع مخاطرات جاده‌ای دارد. شکل (۸) وزن معیارهای مؤثر در ارزیابی خطر جاده‌ای محور دهگلان به سنج را نشان می‌دهد:

1. Analytical Hierarchy Process



شکل ۸. وزن معیارهای مؤثر در ارزیابی خطر جاده‌ای

با توجه به اینکه هر کدام از معیارها تأثیر متفاوتی در وقوع خطر جاده‌ای داشتند، میزان تأثیرگذاری درونی خود معیارها نیز متفاوت می‌باشد در همین راستا نسبت به استانداردسازی هر کدام از معیارها در محیط GIS اقدام شد. بعد از تهیه نقشه مدل رقومی ارتفاع، نسبت به استانداردسازی آن در ۵ طبقه اقدام شد. شکل (۹) و جدول (۳) نقشه ارتفاع و درصد ارتفاع طبقه‌بندی شده را نشان می‌دهد.

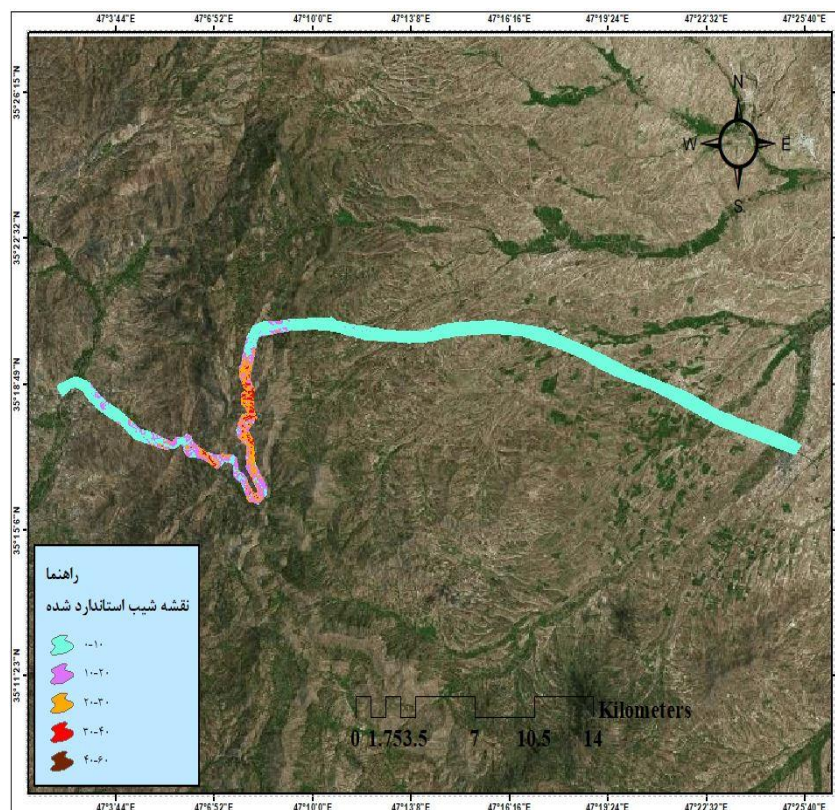


شکل ۹. نقشه مدل رقومی ارتفاعی طبقه‌بندی شده

جدول ۳. درصد ارتفاع طبقه‌بندی شده محور دهگلان به سنندج

نوع	درصد
ارتفاع خیلی کم	۱۳/۶۲
ارتفاع کم	۴/۴۴
ارتفاع متوسط	۵۶/۹۴
ارتفاع زیاد	۲۱/۰۲
ارتفاع خیلی زیاد	۳/۹۴

سپس نقشه شیب محور مورد مطالعه در ۵ کلاس (۰ تا ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۲۰ درصد، ۲۰ تا ۳۰ درصد، ۳۰ تا ۴۰ درصد، ۴۰ تا ۶۰ درصد) دسته بندی شد. شکل (۱۰) و جدول (۴) نقشه شیب و درصد شیب طبقه بندی شده محور دهگلان - سنندج را نشان می دهد.

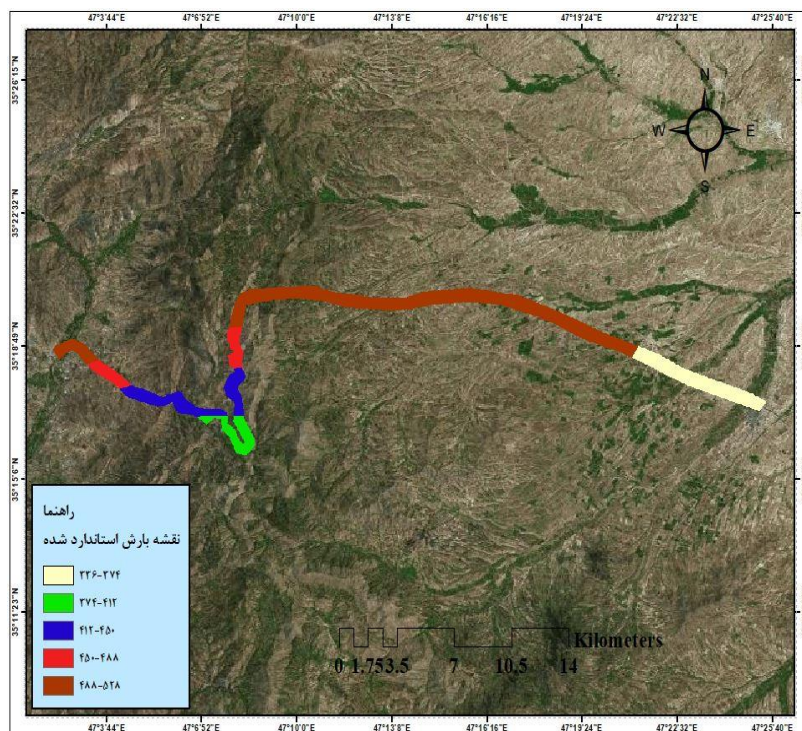


شکل ۱۰. نقشه شیب طبقه بندی شده

جدول ۴. درصد شیب طبقه بندی شده محور دهگلان به سنندج

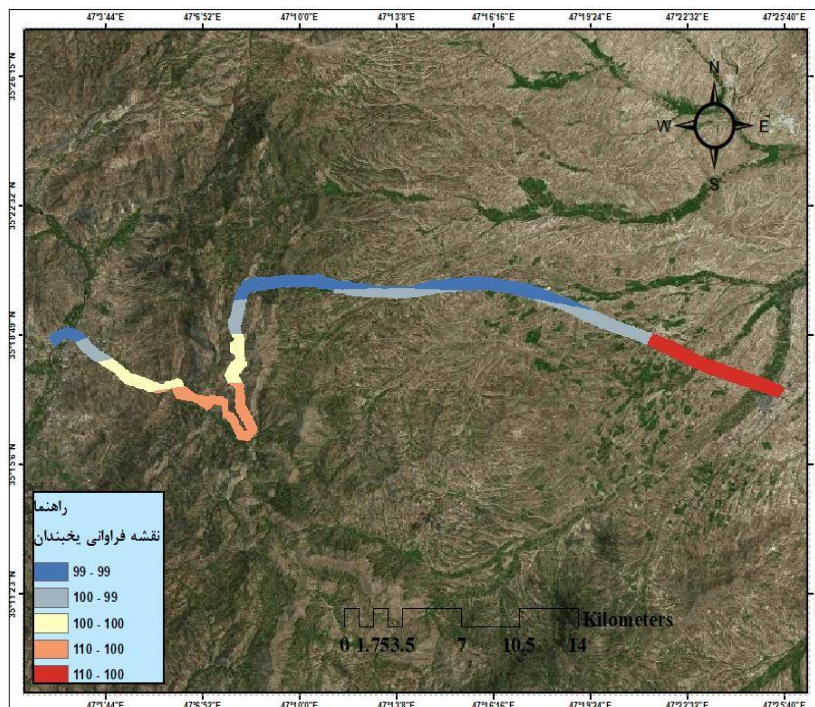
درصد	نوع
۷۶/۵۲	شیب خیلی کم
۱۲/۷۲	شیب کم
۸/۷۴	شیب متوسط
۱/۸۹	شیب زیاد
۰/۱۰	شیب خیلی زیاد

در انتها نقشه بارش در ۵ طبقه دسته بندی شد شکل (۱۱).



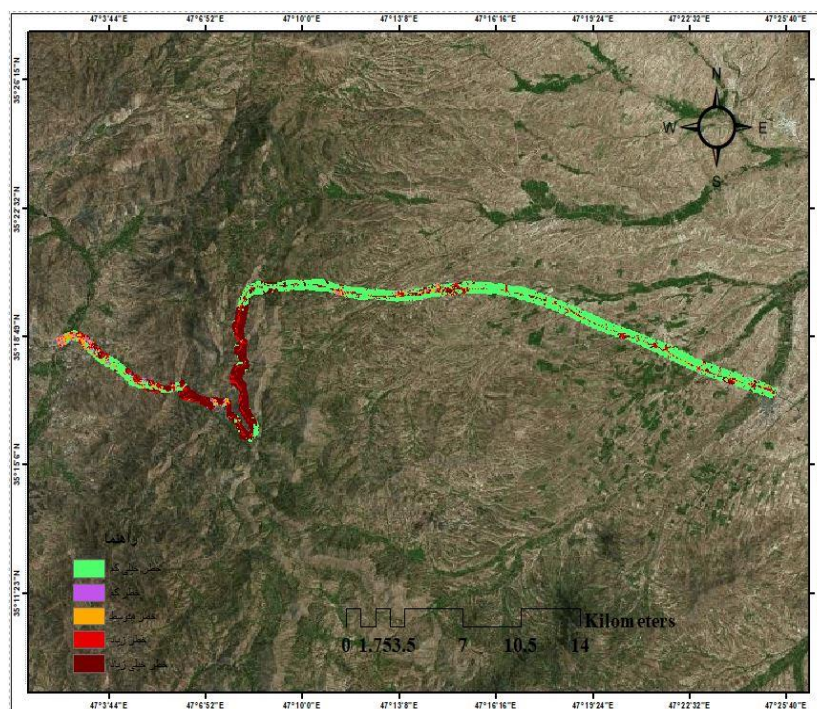
شکل ۱۱. نقشه بارش طبقه‌بندی شده

نقشه وقوع یخبندان بر اساس فراوانی آماری در محور دهگلان به سنندج در ۵ طبقه دسته‌بندی شد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. نقشه فراوانی یخبندان

در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر جاده‌ای در محور دهگلان به سنج با تلفیق معیارها و وزن نهایی هر معیار در محیط Raster Calculator حاصل شد.



شکل ۱۳. نقشه پهنه‌بندی خطر جاده‌ای در محور دهگلان به سنج

بررسی نتایج نشان می‌دهد که بیشتر محور مورد مطالعه در کلاس شیب‌های کم و خطر خیلی کم قرار گرفته که عموماً اراضی پوشش گیاهی از جنس کشاورزی را در بر گرفته است. بر اساس جدول (۵) حدود ۵۷ درصد از سطح محور دارای خطر خیلی کم، حدود ۲ درصد از سطح محور دارای خطر کم، حدود ۵ درصد از سطح محور نیز دارای خطر متوسط می‌باشد. در طول محور دهگلان به سنج وجود گردنه با شیب زیاد در سطح منطقه مورد مطالعه باعث شده است که حدود ۱۰ درصد سطح محور در کلاس خطر زیاد و ۲۵ درصد از سطح محور مورد مطالعه در کلاس خطر خیلی زیاد قرار بگیرد.

جدول ۵. درصد کلاس‌های نقشه پهنه‌بندی خطر محور دهگلان به سنج

درصد	نوع
۵۶/۴۳	خطر خیلی کم
۲/۱۷	خطر کم
۵/۴۱	خطر متوسط
۱۰/۷۴	خطر زیاد
۲۵/۲۳	خطر خیلی زیاد

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که معیارهای محیطی و اقلیمی، به‌ویژه شیب، جهت شیب، ارتفاع، بارش و وقوع یخبندان، تأثیر قابل توجهی بر ایمنی جاده‌ای در محور دهگلان به سنج دارند. با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

(AHP)، مشخص شد که عامل شیب بیشترین تأثیر را در وقوع خطرات جاده‌ای دارد، درحالی‌که کاربری اراضی کمترین تأثیر را نشان داده است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر برجسته ویژگی‌های توپوگرافی در رخداد مخاطرات جاده‌ای است، که با یافته‌های پژوهشگران دیگری نظیر Dikau و Glade (2002) که بر نقش ارتفاع و شیب در وقوع خطرات جاده‌ای تأکید دارند، همخوانی دارد.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، تأثیر مستقیم و غیرمستقیم ارتفاع بر ایمنی جاده‌ای است. داده‌های ارتفاعی دریافت شده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) نشان می‌دهد که محدوده ارتفاعی منطقه بین ۱۴۰۳ تا ۲۳۶۸ متر متغیر است. این موضوع بر شدت بارش و وقوع یخبندان در محور تأثیرگذار بوده و در نتیجه میزان خطر جاده‌ای را افزایش داده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که در نواحی با ارتفاع بالاتر، احتمال یخبندان و لغزندگی جاده افزایش می‌یابد، که یافته‌های مشابهی در مطالعات (Bowen 1993) نیز گزارش شده است.

از سوی دیگر، نقشه‌های شیب و جهت شیب نشان دادند که مناطقی با شیب‌های تندتر، به‌ویژه در محدوده گردنه‌های مسیر، دارای بیشترین خطر هستند. این یافته مطابق با مطالعات انجام‌شده در زمینه ارتباط بین شیب‌های تند و افزایش احتمال وقوع حوادث جاده‌ای است. (Saaty, 1980) در این پژوهش، شیب‌های بیشتر از ۳۰ درصد به‌عنوان مناطق با ریسک بالای تصادفات شناسایی شدند، که عمدتاً به دلیل کاهش کنترل وسیله نقلیه و افزایش احتمال لغزش در این نواحی است.

همچنین، بررسی تأثیر بارش نشان داد که در مناطق با بارندگی بیشتر، میزان خطر جاده‌ای افزایش می‌یابد. روش درون‌یابی IDW که برای تهیه نقشه بارش استفاده شد، مشخص کرد که بیشترین میزان بارندگی در محدوده مورد مطالعه ۵۲۸ میلی‌متر و کمترین میزان آن ۳۳۶ میلی‌متر است. این مسئله به‌ویژه در مناطق دارای شیب بالا موجب افزایش فرسایش جاده و کاهش اصطکاک سطحی می‌شود، که مطابق با یافته‌های اکرمی مقدم و همکاران (۱۴۰۳) در زمینه تأثیر اقلیم بر زیرساخت‌های جاده‌ای است.

تحلیل نقشه یخبندان نیز نشان داد که وقوع یخبندان‌های مکرر در برخی نواحی، باعث افزایش خطر لغزندگی و کاهش ایمنی رانندگی شده است. این یافته‌ها با مطالعات کرم (۱۳۸۷) در مورد تأثیر یخبندان بر جاده‌ها همخوانی دارد. نتایج حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مقایسه زوجی نشان داد که این معیار به همراه شیب، از جمله عوامل کلیدی در وقوع خطرات جاده‌ای هستند. محاسبات نرخ سازگاری در فرآیند تصمیم‌گیری نشان داد که داده‌های مورد استفاده دارای دقت و اعتبار بالایی هستند ($CR = 0.04$)، که نشان از دقت بالای فرایند تحلیل دارد.

در نهایت، نقشه پهنه‌بندی خطر جاده‌ای که با تلفیق معیارها و استفاده از ابزار Raster Calculator در محیط GIS به دست آمد، نشان داد که ۵۷ درصد از محور مورد مطالعه در محدوده خطر کم قرار دارد، درحالی‌که ۲۵ درصد از مسیر در کلاسه خطر خیلی زیاد قرار گرفته است. این موضوع نشان می‌دهد که برخی از بخش‌های مسیر، به‌ویژه مناطق با شیب تند و وقوع یخبندان، نیازمند تمهیدات ویژه‌ای نظیر ایجاد حفاظ‌های ایمنی، استفاده از مواد ضدیخ و بهبود کیفیت روسازی جاده هستند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود که در مناطق با خطر بالا، تدابیر پیشگیرانه نظیر نصب علائم هشداردهنده، اصلاح شیب‌های خطرناک و بهبود زهکشی جاده‌ها موردتوجه قرار گیرد. همچنین، توسعه سامانه‌های هوشمند پیش‌بینی خطر بر اساس شرایط اقلیمی و محیطی، می‌تواند نقش مهمی در کاهش تصادفات جاده‌ای ایفا کند.

نتیجه گیری

ارزیابی و پهنه‌بندی مخاطرات محیطی جاده‌های کشور جهت شناسایی مناطق مخاطره‌آمیز امری ضروری می‌باشد. رخداد انواع مخاطرات محیطی از جمله سیل، زمین‌لغزش، بهمن و غیره در موصلات جاده‌ای بین استانی و شهری خسارت‌های جانی و مالی قابل‌توجهی به‌جا می‌گذارد. جهت کاهش خسارت‌ها و افزایش ضریب امنیت نیاز است با استفاده از پارامترهای مختلف مناطق خطر آمیز پیش‌بینی، موردبررسی و تحلیل قرار گیرد. در این راستا با بهره‌گیری از معیارهای اقلیمی، توپوگرافی و پوشش اراضی نسبت به پهنه‌بندی مخاطره محیطی جهت ارزیابی ایمنی محور دهگلان به سنجش اقدام شد. نتایج نشان داد که حدود ۵۷ درصد از سطح محور دهگلان به سنجش به دلیل شیب کم، بارش کم و متوسط و ارتفاع کم دارای خطر خیلی کم می‌باشد. در همین راستا نتایج نشان می‌دهد که حدود ۷۶ درصد از سطح محور مورد مطالعه دارای شیب خیلی کم و ۱۳٫۶۲ درصد را نیز ارتفاع خیلی کم در بر گرفته است. نتایج کلاسه دوم نشان می‌دهد که حدود ۲٫۱۷ درصد از سطح محور دهگلان به سنجش دارای خطر کم می‌باشد که در مورد شیب و ارتفاع نیز به ترتیب ۱۲٫۷۲ و ۴٫۴۴ درصد می‌باشد که پهنه‌های کمتری را در بر گرفته‌اند. نتایج بخش کلاسه سوم نقشه پهنه‌بندی خطر جاده‌ای نیز نشان می‌دهد که حدود ۴۱٫۵ درصد از سطح محور دهگلان به سنجش دارای خطر متوسط می‌باشد که در مورد شیب و ارتفاع نیز به ترتیب ۷۴٫۸ و ۹۴٫۵۶ درصد می‌باشد که پهنه‌های کمتری را در بر گرفته‌اند. همچنین نتایج کلاسه چهارم نیز نشان می‌دهد که حدود ۱۰٫۷۴ درصد از سطح محور دهگلان به سنجش دارای خطر زیاد می‌باشد که در مورد شیب و ارتفاع نیز به ترتیب ۱٫۸۹ و ۲۱٫۰۲ درصد می‌باشد که مناطق با ارتفاع زیاد می‌باشد. بررسی نتایج نشان داد که به دلیل وجود گردنه‌های با شیب تند در محور مورد مطالعه حدود ۲۵ درصد از سطح محور در کلاس خطر بالا قرار گرفته است که بررسی بصری مناطق کلاس خطر بالا با تصاویر گوگل ارث و معیارهای مورداستفاده صحت پهنه‌بندی را تأیید می‌کند. واقع شدن در مناطق کوهستانی، پرشیب و تأثیرات متغیرهای اقلیمی از جمله بارش باران، برف، کاهش دید به دلیل مه‌گرفتنی و یخبندان سبب شده است که بخش‌های از این محور ارتباطی در کلاس خطر زیاد قرار بگیرد که همواره گزارش‌های زیادی از وقوع تصادفات متعددی ارائه و ثبت می‌شود که خسارت‌های جانی و مالی زیادی را همراه داشته است. بنابراین با توجه به پرخطر بودن این محدوده لازم است در این مناطق جهت جلوگیری از وقوع تصادفات و کاهش انحراف و واژگونی اعلانات احتیاطی بیشتری نصب شود. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج با قدم و همکاران (۱۳۸۲) مطابقت دارد. محققین به این نتیجه رسیدند که ۶۵ درصد از محور ارتباطی سنجش به مریوان در خطر زیاد قرار گرفته است. قابل ذکر است که هر چند سطح کمتری از این محور در پهنه شیب زیاد و خیلی زیاد (۰٫۱۰) قرار گرفته است اما مقدار عددی شیب در این مناطق بیشتر بوده است که به‌عنوان یک معیار ثابت شناخته می‌شود. همین امر در فصل‌های مختلف سال نقش متفاوتی در وقوع تصادفات جاده‌ای در این محور دارد و بخصوص در فصل زمستان با همراه شدن سایر متغیرها چون بارش برف، یخبندان و مه‌گرفتنی باعث افزایش خطر وقوع تصادفات جاده‌ای می‌شود. بنابراین نقش عوامل توپوگرافیکی در افزایش خطر وقوع تصادفات جاده‌ای بیشتر می‌باشد که در این راستا نتایج حاصل از میزان تأثیر هر کدام از معیارها در شکل (۸) نشان می‌دهد که در این محور متغیر شیب نسبت به سایر متغیرها تأثیر بیشتری در افزایش خطر وقوع تصادفات جاده‌ای دارد همچنین ارتفاع نیز ارزش دوم را در بر گرفته است. بر اساس نتایج حاصل شده از میزان تأثیر معیارها و نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع تصادفات جاده‌ای در محور دهگلان می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع و شیب خطر تصادفات جاده‌ای بیشتر می‌شود و پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد کاملاً منطبق بر افزایش خصوصیات توپوگرافیکی می‌باشد. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج محققین دیگر مطابقت دارد به‌طوری که شهابی و همکاران (۱۳۹۰) نیز در بررسی نقش عوامل اقلیمی بر وقوع تصادفات جاده‌ای به نتایج مشابهی رسیدن، و اثر افزایش

ارتفاع و شیب را بر افزایش وقوع تصادفات جاده‌ای تأیید نمودند. همچنین محققین بیان نمودند که با افزایش ارتفاع و سایر خصوصیات توپوگرافیکی سایر متغیرهای اقلیمی نیز افزایش می‌یابد. این امر در سطح محور مطالعاتی سنندج به دهگلان نیز مشاهده شد که با افزایش ارتفاع و شیب میزان بارش بیشتر می‌شود.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند 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، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- اسفندیاری، فریبا. (۱۳۸۷). نقش اقلیم در ناپایداری دامنه‌های مشرف به جاده ارتباطی سرعین - پیست اسکی آوارس. همایش ملی کاهش اثرات بلایای جوی و اقلیمی مرکز تحقیقات هواشناسی کاربردی استان اردبیل.
- اکرمی مقدم، بهار؛ ایلخانی پور زینالی، رسول و نیک مهر، سامان. (۱۴۰۳). پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در استان کردستان. محیط‌زیست و مهندسی آب، ۱۰(۱)، ۷۹-۹۳.
- باقدم، عثمان؛ فرج زاده اصل، منوچهر و شایان، سیاوش. (۱۳۸۴). ارزیابی ایمنی جاده‌ای با رویکرد مخاطرات محیطی: مسیر سنندج مریوان با استفاده از GIS. مدرس علوم انسانی، ۹(۱) (پیاپی ۳۸) ویژه‌نامه جغرافیا، ۱-۱۶.
- برنا، رضا؛ محمدی، حسین و ثروتی، محمدرضا. (۱۳۸۹). ارزیابی سوانح و ایمنی حمل‌ونقل جاده‌ای با رویکرد مخاطرات اقلیمی در محور کرج - چالوس. جغرافیای سرزمین، ۷(۲۵)، ۵۳-۶۴.
- شهابی، هیمن؛ خورشید دوست، علی محمد و حسینی، میرکامل. (۱۳۹۰). ارزیابی نقش عناصر اقلیمی بر تصادفات جاده‌ای (مطالعه محور سقز) سنندج. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۶(۳)، ۱۹۰-۲۱۲.
- فلاح تبار، نصرت‌الله. (۱۳۷۹). تأثیر برخی عوامل جغرافیایی بر شبکه راه‌های کشور. مجله پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۸، ۷۸-۹۸.
- قاسمی، مهوش. (۱۳۹۳). شناسایی و ارزیابی مخاطرات محیطی محور ارتباطی کرمانشاه به همدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، گرایش مخاطرات محیطی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- کلانتری، علی و علیان، سحر. (۱۴۰۱). تحلیل تصادفات جاده‌ای با تأکید بر خصوصیات محیط و جاده در سیستم اطلاعات مکانی مطالعه موردی: محور کرج - کندوان. پژوهش‌های جغرافیایی/انسانی، ۲(۵۴)، ۵۶۳-۵۸۲.
- کرم، امیر. (۱۳۸۷). کاربرد روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در ارزیابی زمین برای توسعه کالبدی بر پایه عوامل طبیعی (مطالعه موردی: مجموعه شهری شیراز). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۸(۱۱)، ۳۳-۵۴.
- گلمرادی، غلامرضا. (۱۳۹۲). ارزیابی ایمنی جاده‌ای با رویکرد مخاطرات محیطی محور خلخال - پونل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیای طبیعی.

References

- Akrami Moghadam, B., Ilkhani Pour Zinali, R., & Nikmehr, S. (2024). Zoning of flood potential using the analytic hierarchy process (AHP) method in Kurdistan province. *Environment and Water Engineering*, 10(1), 79–93. [in Persian]
- Baghdom, O., Farajzadeh Asl, M., & Shayan, S. (2005). Road safety assessment with an environmental hazards approach: Sanandaj-Marivan route using GIS. *Human Sciences Modares*, 9(1, Special Issue on Geography), 1–16. [in Persian]
- Barna, R., Mohammadi, H., & Servati, M. (2010). Accident and road transportation safety assessment with climatic hazards approach in Karaj-Chalus route. *Geographical Land*, 7(25), 53–64. [in Persian]
- Bowen, W. M. (1993). Environmental decision making: AHP applications. *Environmental Management*, 17(6), 765–771.
- Bowen, William. M., (1993), AHP: Multiple Criteria Evaluation, in Klosterman, R. et al Eds, Spreadsheet Model for urban and Regional Analysis, new Brunswick: *Center for Urban Policy Research*.
- Brijs, T., Karlis, D., Van den Bossche, F., & Wets, G. (2008). A Bayesian model for ranking hazardous road sites. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 171(1), 41–58.
- Buddhavarapu, P., Banerjee, S., & Prozzi, J. A. (2013). Impact of pavement roughness on vehicle free-flow speed. *Journal of Transportation Engineering*, 139(9), 902–910.
- Dawod, G.M., Mirza, M.N. & Al-Ghamdi, K.A. (2012). GIS-based estimation of flood hazard impacts on road network in Makkah city, Saudi Arabia. *Environ Earth Sci* 67: 2205–2215.
- Dikau, R., & Glade, T. (2002). Dangers and risks of mass movements (Gefahren und Risiken von Massenbewegungen). *Geographische Rundschau* 54(1): 38–47.
- Dikau, R., & Glade, T. (2002). Landslide occurrence, evolution, and implications for environmental change in Europe. *Geomorphology*, 15(2), 117–143.
- Esfandiari, F. (2008). *The role of climate in the instability of slopes adjacent to the Sarein-Alvars ski resort road*. National Conference on Reducing the Effects of Meteorological and Climatic Disasters, Applied Meteorology Research Center of Ardabil Province. [in Persian]
- Fallah Tabar, N. (2000). The impact of some geographical factors on the country's road network. *Geographical Research Journal*, 38, 78–98. [in Persian]
- Ghassemi, M. (2014). *Identification and assessment of environmental hazards in the Kermanshah-Hamedan transportation route*. Master's thesis, University of Sistan and Baluchestan. [in Persian]
- Golmoradi, G. (2013). *Road safety assessment with an environmental hazards approach: Khalkhal-Pounel route*. Master's thesis, University of [Institution Name]. [in Persian]
- Hassan, S.A., Amlan, H.A., Alias, N.E., Ab-Kadir, M.A. & Sukor, N.S.A. (2022). Vulnerability of road transportation networks under natural hazards: A bibliometric analysis and review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28(2), 319–343.
- Kalantari, A., & Aliyan, S. (2022). Analysis of road accidents with emphasis on environmental and road characteristics in GIS: Case study of Karaj-Kandovan route. *Human Geography Research*, 2(54), 563–582. [in Persian]
- Karam, A. (2008). Application of analytic hierarchy process (AHP) in land evaluation for physical development based on natural factors (Case study: Shiraz urban complex). *Applied Research in Geographical Sciences*, 8(11), 33–54. [in Persian]
- Kashani, A. T., & Shariat-Mohaymany, A. (2012). Analysis of the traffic injury severity on two-lane, two-way rural roads based on classification tree models. *Safety Science*, 50(5), 1040–1047.
- Keller, S, & Atzl, A. (2014). Mapping Natural Hazard Impacts on Road Infrastructure-The Extreme Precipitation in Baden-Württemberg, Germany, June 2013. *Int J Disaster Risk Sci* 5: 227–241. <https://doi.org/10.1007/s13753-014-0026-1>.

- Li, X., Wu, C., & Zhang, X. (2019). The impact of slope and topographic factors on road accidents: A GIS-based analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 23-33.
- Naseri, H., & Mohammadi, M. (2020). Evaluation of road safety based on environmental parameters using GIS and AHP. *Journal of Transportation Research*, 45(3), 123-135.
- Naseri, H., Rahmani, F., & Ghasemi, A. (2017). The effects of frost occurrence on road safety in mountainous regions. *Cold Regions Science and Technology*, 134, 78-85.
- Quddus, M. A., Wang, C., & Ison, S. G. (2010). Road traffic congestion and crash severity: Econometric analysis using spatial panel data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 337-346.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York, NY: Mc Graw-Hill.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.
- Shahabi, H., Khorshid Doost, A. M., & Hosseini, M. K. (2011). Evaluation of the role of climatic elements on road accidents (Case study: Saqqez-Sanandaj route). *Geographical Research Quarterly*, 26(3), 190-212. [in Persian]
- Tacnet, J-M., Eric, M. & Somsakun, M. (2012). Analysis of importance of road networks exposed to natural hazards. *Conference: AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science, Avignon*.
- Toma-Danila, D., Armas, I., & Tiganescu, A. (2020). Network-risk: an open GIS toolbox for estimating the implications of transportation network damage due to natural hazards, tested for Bucharest, Romania, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20: 1421-1439. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1421>.
- Winter, M-G., Shearer, B., Palmer, D., Peeling, D., Harmer, C., Sharpe, J. (2016). The Economic Impact of Landslides and Floods on the Road Network, *Procedia Engineering*, 143, 1425-1434. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.168>.
- Zare, M., Ahmadi, H., & Gholami, H. (2018). The role of precipitation in road erosion and its impact on road safety. *Environmental Earth Sciences*, 77(8), 305.
- Zareie, S., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S. M. (2023). A GIS-based approach for accident hotspots mapping in mountain roads. *Applied Geomatics*, 15(1), 77-89.
- Zhou, C., Chen, M., Chen, J., Chen, Y., & Chen, W. A. (2024). Multi-Hazard Risk Assessment Model for a Road Network Based on Neural Networks and Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Sustainability*, 16(6), 24-29. <https://doi.org/10.3390/su16062429>.
- Zhou, M., Yuan, M., Yang, G., & Gang, Mei. (2023). Risk analysis of road networks under the influence of landslides by considering landslide susceptibility and road vulnerability: A case study, *Natural Hazards Research*, ISSN 2666-5921. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.013>.
- Zhu, Z.J. & Zhang, Y. (2021). Flood disaster risk assessment based on random forest algorithm. *Neural Comput. Appl.*, 34, 3443-3455.