



## The Evaluation of Landslide Sensitivity using Frequency Ratio and Fuzzy Logic Models (Case Study: Khorramabad-Arak Freeway)

Siamak Baharvand<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Associate Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, Khorramabad Branch, Khorramabad, Iran*Received: 15 March 2022**Revised: 29 April 2022**Accepted: 8 May 2022*

### Abstract

Landslide risk zoning plays a significant role in the development of safe and sustainable infrastructure, urbanization, land use, and environmental planning. Identifying and determining sensitive and landslide-prone areas not only prevents damages but also provides a basis for the implementation of slope stabilization plans. Landslide risk zoning is done through different methods including statistical, expert evaluation and definitive methods. Choosing appropriate zoning method depends on the type of analysis, study area, experts' skills and knowledge, and the type of geological and geomorphic parameters affecting landslide risk. The main goal of this study were preparing a landslide distribution map, identifying the factors affecting landslides, and zoning its danger in Khorramabad-Arak Freeway (Khorramabad to Boroujerd). Using satellite images and field studies as well as frequency ratio (FR) model, a landslide distribution map was prepared, and the factors influencing landslides including slope, lithology, slope direction, elevation classes, land use, rainfall, distance from fault factors and the network of waterways were analyzed. Fuzzy gamma (0.9) was used for zoning the landslide risk. The landslide hazard map was divided into very low (18.55%), low (30.67%), medium (26.51%), high (18.15%) and very high category (6.12%) and finally validated by ROC curve. The results of ROC curve analysis for Fuzzy GAMMA showed that the landslide sensitivity map in the study area has excellent predictive power with area under the curve of AUC=0.94. Therefore, it is suggested to apply the obtained results for freeway security and regional planning.

**Keywords:** Landslide, Zoning, Khorramabad-Arak Freeway, ROC Curve, Fuzzy Gamma

---

\*. E-mail: sbbaharvand53@gmail.com

Tel: + 98 9163672294

**How to cite this Article:** Siamak B. (2022). Evaluation of landslide sensitivity using frequency ratio and fuzzy logic models (Case study: Khorramabad-Arak freeway). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(1), 103-116.

DOI:10.22067/geoeh.2022.75264.1201



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

## Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 1 - Number 45, Spring 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75264.1201>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شماره چهل و پنجم، بهار ۱۴۰۲، صص ۱۱۶-۱۰۳

مطالعه موردی

ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و منطق فازی

(مطالعه موردی: آزادراه خرم‌آباد-اراک)

سیامک بهاروند<sup>۱</sup>- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۹ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۲/۱۸

### چکیده

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش نقش مهمی در توسعه زیرساخت‌های ایمن و قابل دوام، شهرنشینی، کاربری زمین و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی ایفا می‌کند. شناسایی و تعیین مناطق حساس و مستعد لغزش می‌تواند ضمن جلوگیری از بروز آسیب‌ها، زمینه را برای اجرای طرح‌های پایدارسازی دامنه‌ها فراهم سازد. هدف اصلی این مطالعه تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها، شناسایی عوامل مؤثر بر لغزش و پهنه‌بندی خطر آن در آزادراه خرم‌آباد-اراک (قطعه خرم‌آباد تا بروجرد) است. بدین منظور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مطالعات میدانی نقشه پراکنش لغزش‌ها تهیه و با استفاده از مدل نسبت فراوانی (FR) عوامل مؤثر بر لغزش شامل شیب، لیتولوژی، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، کاربری زمین، بارندگی و فاصله از عوامل گسل و شبکه آبراه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این مطالعه به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش از روش منطق فازی (گامای ۰/۹) استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده نقشه خطر زمین لغزش حاصل به پنج طبقه، مناطق خطر بسیار کم (۱۸/۵۵٪)، کم (۳۰/۶۷٪)، متوسط (۲۶/۵۱٪)، زیاد (۱۸/۱۵٪) و بسیار زیاد (۶/۱۲٪) تقسیم‌بندی و در نهایت با استفاده از منحنی Receiver Operating Characteristic (ROC) اعتبارسنجی شد. نتایج تحلیل منحنی ROC برای روش گامای فازی نشان

Email: [sbbaharvand53@gmail.com](mailto:sbbaharvand53@gmail.com)

۱ نویسنده مسئول ۰۹۱۶۳۶۷۲۲۹۴

نحوه ارجاع به این مقاله:

بهاروند، سیامک؛ ۱۴۰۲. ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و منطق فازی (مطالعه موردی: آزادراه

خرم‌آباد-اراک). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۱). صص ۱۱۶-۱۰۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75264.1201>

داد که نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده در منطقه مورد مطالعه با سطح زیر منحنی  $AUC=0/94$  دارای قدرت پیش‌بینی عالی است.

کلیدواژه‌ها: زمین لغزش، پهنه‌بندی، آزادراه خرم‌آباد-اراک، منحنی ROC، گامای فازی

#### ۱- مقدمه

زمین لغزش به‌عنوان یکی از معضلات جهانی پیش روی انسان، دارای اهمیت خاصی است، با توجه به اینکه زمین لغزش‌ها نسبت به سایر بلایای طبیعی مدیریت‌پذیرترند؛ لذا شناخت این پدیده در جهت جلوگیری از خسارات ناشی از آن از اهمیت زیادی برخوردار است (رمضانی و ابراهیمی، ۱۳۸۸). بررسی پدیده ناپایداری دامنه‌ای به کمک تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، از یک سو به منظور شناسایی مناطق دارای قابلیت لغزش در محدوده فعالیت بشری و از سوی دیگر برای شناسایی مکان‌های امن برای توسعه و زیستگاه‌های جدید و یا سایر کاربری‌های آتی انسان نظیر جاده‌ها حائز اهمیت بوده و در مقیاس‌های مختلف مورد توجه برنامه‌ریزان قرار دارد (برا و همکاران، ۲۰۱۹).

مدل‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش ارائه شده است که کارایی هرکدام از آنها در مناطق مختلف متفاوت است. در این تحقیق به منظور تهیه نقشه پهنه‌های خطر زمین لغزش در آزادراه خرم‌آباد-اراک از عملگر گامای فازی استفاده شده است. منطق فازی ابزاری دقیق و توانمند در مدل‌سازی پدیده‌های ژئومورفیک به‌ویژه حرکات توده‌ای است؛ زیرا بیشتر پدیده‌های ژئومورفیک غیرخطی و پیچیده هستند و در وقوع آن‌ها چندین متغیر با درجه شدت‌های متفاوت دخالت دارند. ضمناً برخی از این پدیده‌ها مانند لغزش‌ها را نمی‌توان از طریق سری‌های زمانی منطقه‌بندی کرد و مدل‌های ریاضی برای آن‌ها ناکافی است؛ اما سیستم‌های فازی ابزاری مفید برای مدل‌سازی لغزش‌ها و سایر پدیده‌های دینامیکی محسوب می‌شوند. تئوری فازی اولین بار توسط پروفیسور لطفی زاده مطرح شد و برای توسعه استدلال تقریبی به کار گرفته شد (تاناکا، ۱۹۹۶). در سال‌های اخیر این روش کاربرد زیادی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش داشته که در این زمینه می‌توان به مطالعاتی در ایران و سایر نقاط جهان اشاره کرد که بر روی این روش تأکید داشته‌اند؛ از جمله: پورقاسمی و همکاران (۱۳۸۸) ارزیابی خطر زمین لغزش در بخشی از حوضه آبخیز هراز با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره فازی، دسترنج و همکاران (۱۴۰۰) ارزیابی پهنه‌های حساس به وقوع زمین لغزش در رشته‌کوه بینالود؛ زالی و شاهدی (۱۴۰۰) ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از رویکرد منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز نکارود؛ بوی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲) پیش‌بینی خطر

1 Bera

2 Tanaka

3 Bui

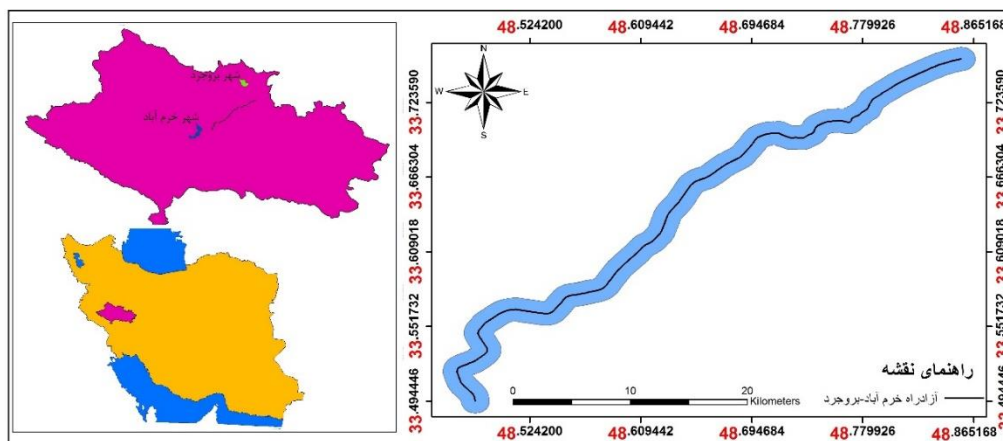
زمین لغزش در استان هوابین ویتنام با استفاده از تئوری فازی؛ آنبالاگان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵) استفاده از نسبت فراوانی و منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش دره لاجونگ واقع در منطقه سیکیم هیمالیا؛ کومار<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱) بررسی خطر زمین لغزش در منطقه اوتارکاشی هندوستان و سور<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۱) پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در کریدور جاده‌ای کالسی-چاکراتا واقع در هندوستان، اشاره کرد.

راه‌ها به‌عنوان یکی از ساختارهای زیربنایی، نقش بسیار مهمی در توسعه اقتصاد ملی دارد. باید توجه داشت که انتخاب مسیرهای نامناسب برای احداث جاده می‌تواند اثرهای منفی محیطی گسترده‌ای را به دنبال داشته باشد. بدین دلیل، جاده‌های پیشنهادی باید با رعایت ویژگی‌های محیطی منطقه طراحی و اجرا شوند. لذا این تحقیق به بررسی و ارزیابی خطر زمین لغزش در مسیر آزادراه خرم‌آباد-اراک (قطعه خرم‌آباد-بروجرد) با استفاده از عملگر گامای فازی و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌پردازد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

آزادراه خرم‌آباد-اراک به طول ۱۳۴ کیلومتر یکی از پروژه‌های مهم اقتصادی است که در سال‌های اخیر در حال اجرا است. طول مسیر آزادراه از چهار قطعه تشکیل شده است که قطعه ۳ و ۴ آن با طول ۵۲ کیلومتر از خرم‌آباد به سمت بروجرد امتداد دارد و در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آزادراه خرم‌آباد-بروجرد

- 1 Anbalagan
- 2 Kumar
- 3 Sur

## ۲-۲- روش کار

فعالیت‌های انسانی در حین ساخت بزرگراه، شیب‌های طبیعی را مختل کرده و آن‌ها را در برابر خرابی‌ها آسیب‌پذیرتر می‌کند؛ بنابراین، ارزیابی خطر زمین‌لغزش در امتداد بزرگراه‌ها برای برنامه‌ریزی و هدایت صحیح زیرساخت‌های راه ضروری است (سینگ و کومار<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸؛ پانچال و شریواستاوا<sup>۲</sup>، ۲۰۲۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با توجه به رویکردهای مختلف انجام می‌شود. چنین رویکردهایی می‌تواند به سه روش اصلی شامل روش‌های آماری، روش‌های ارزیابی کارشناسی و روش‌های قطعی تقسیم شوند (دی و لی<sup>۳</sup>، ۲۰۰۱؛ ون‌وستن<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۳؛ دو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). انتخاب روش پهنه‌بندی مناسب به نوع تحلیل، منطقه مورد مطالعه، مهارت و تخصص کارشناسان و نوع پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومورفیک مؤثر در خطر زمین‌لغزش بستگی دارد (فال<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). فرآیند پهنه‌بندی در محیط (GIS) شامل پیش‌عملیات و عملیات متعددی است. نخست باید معیارها و محدودیت‌های مورد نظر به صورت لایه‌های نقشه، انتخاب و آماده‌سازی شده و سپس در محیط این نرم‌افزار پردازش گردند. در این مطالعه برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از ۸ عامل استفاده شده است. این عوامل شامل لایه‌های شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، بارندگی، کاربری اراضی، فاصله از گسل و آبراهه می‌باشند. به منظور تهیه لایه‌های اطلاعاتی از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خرم‌آباد، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI، آمار بارندگی ایستگاه‌های خرم‌آباد و بروجرد، نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه و مطالعات میدانی استفاده شده است.

## ۲-۲-۱- بررسی عوامل مؤثر بر لغزش با استفاده از نسبت فراوانی

نسبت فراوانی یک تکنیک کمی برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های مکانی است (چن<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۶؛ دینگ<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). این روش ارتباط کمی میان رخداد زمین‌لغزش‌ها و متغیرهای مختلف تأثیرگذار در آن را مشخص می‌نماید. در تعیین نرخ نسبت فراوانی، نسبت رخداد لغزش در هر کلاس از فاکتورهای تأثیرگذار نسبت به کل لغزش‌ها به دست آمده و نسبت به سطح هر کلاس به کل مساحت منطقه نیز محاسبه می‌گردد. در نهایت با تقسیم نرخ رخداد لغزش‌ها در هر کلاس بر نرخ مساحت هر کلاس نسبت به کل منطقه مورد مطالعه، نسبت فراوانی کلاس‌های هر فاکتور محاسبه می‌گردد. مراحل محاسبه نسبت فراوانی برای هر کلاس از فاکتورهای مؤثر در لغزش در رابطه ۱ بیان شده است (موندال و میتی<sup>۹</sup>، ۲۰۱۳). در این

1 Singh and Kumar

2 Panchal and Shrivastava

3 Dai and Lee

4 Van Westen

5 Du

6 Fall

7 Chen

8 Ding

9 Mondal and Maiti

رابطه اگر نسبت فراوانی بزرگتر از یک باشد همبستگی عامل مؤثر بر لغزش بسیار زیاد و اگر این مقدار کمتر از یک باشد این همبستگی کمتر است (آکگان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۷).

$$Fr = \frac{A/B}{C/D} = \frac{E}{F} \quad (1)$$

که در آن Fr: نسبت فراوانی، A: تعداد پیکسل های لغزش یافته در هر کلاس، B: مجموع پیکسل های لغزشی کل حوزه، C: تعداد پیکسل های هر زیر کلاس از فاکتورهای مؤثر در لغزش، D: تعداد کل پیکسل های یک منطقه است. E: درصد رخداد لغزش در هر زیر کلاس از فاکتورهای مؤثر و F: درصد نسبی مساحت هر زیر کلاس از کل مساحت است.

### ۲-۲-۲- پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از گامای فازی

**استانداردسازی:** با تعیین مجموعه ای از معیارها برای ارزیابی گزینه های تصمیم گیری، لازم است که هر معیار به صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده های GIS ذخیره شود. در اندازه گیری صفات، دامنه متنوعی از مقیاس ها مورد استفاده قرار می گیرد. بر همین اساس لازم است، ارزش های موجود در لایه های مختلف نقشه به واحدهای قابل مقایسه و در تناسب با هم تبدیل شوند. با انجام این کار نقشه های استاندارد و قابل مقایسه خواهیم داشت. یکی از روش های استانداردسازی، روش فازی است. عملیات فازی سازی، ورودی ها را گرفته و توسط توابع عضویت مربوطه، یک درجه مناسب به هر یک نسبت می دهد. یکی از اساسی ترین مباحث در تئوری فازی بحث تابع عضویت و چگونگی تعریف آن است. اساس اختلاف روش های فازی با روش های دیگر، در تعریف تابع عضویت است (تاناکا، ۱۹۹۶). تابع عضویت را می توان به صورت درجه تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیر مجموعه های آن تعریف کرد و به شکل  $\mu_C(X)$  نمایش داده می شود. برای به دست آوردن تابع عضویت هیچ الگوریتم مشخصی وجود ندارد بلکه تجربه، نوآوری و حتی اعمال نظر شخصی در شکل گیری و تعریف تابع عضویت می تواند مؤثر باشد. در این تحقیق با استفاده از توابع عضویت User defined نقشه های هر یک از عوامل مؤثر بر لغزش به نقشه های فازی تبدیل شده اند.

**عملگر گاما فازی:** این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبر فازی و حاصل جمع جبری فازی به صورت رابطه ۲

تعریف می شود.

$$\mu_{\text{Combination}} = (\text{Fuzzy A lg. Sum})0^y * (\text{Fuzzy A lg. Product})0^{1-y} \quad (2)$$

که در آن  $y$  پارامتر انتخاب شده در محدوده (۰ و ۱) است. وقتی  $y$  برابر ۱ باشد ترکیب همان جمع جبری فازی خواهد بود و وقتی  $y=0$  باشد ترکیب اصلی برابر با حاصل ضرب جبری فازی است. انتخاب صحیح و آگاهانه  $y$  بین صفر و یک مقادیری را در خروجی به وجود می‌آورد که نشان‌دهنده سازگاری قابل‌انعطاف میان گرایش‌های کاهش و افزایشی دو عملگر جمع و ضرب فازی می‌باشند. عملگر گاما نسبت به سایر عملگرهای فازی کاربرد بیشتری دارد و زمانی استفاده می‌شود که اثر برخی شواهد کاهش و اثر برخی افزایشی باشد. به همین دلیل در این تحقیق از عملگر گاما  $0/9$  به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شده است.

### ۲-۲-۳- ارزیابی روش گامای فازی

نمودار مشخصه عملکرد (منحنی ROC<sup>1</sup>) یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه‌ی خصوصیات، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند. سطح زیر منحنی (AUC)، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین‌لغزش) و عدم رخداد آن است. مقدار آن بین  $0/5$  تا ۱ تغییر می‌کند و بیشترین دقت، مربوط به مدلی است که مقدار AUC آن برابر ۱ باشد. همبستگی کیفی-کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت (۱-۰/۹، عالی؛  $0/1-0/9$ ، خیلی خوب؛  $0/7-0/8$ ، خوب؛  $0/6-0/7$ ، متوسط و  $0/5-0/6$ ، ضعیف) بیان می‌شود (ایسیناکار<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵).

### ۳- نتایج و بحث

برای مدیریت خطر زمین‌لغزش که هدف آن کاهش زیان‌ها و خطرات ناشی از پدیده زمین‌لغزش است، بلید برنامه‌های کاهش خطر تنظیم شود. یکی از اقدامات بسیار مهم در این زمینه، تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش است. بدین منظور ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، لغزش‌های اتفاق افتاده و مناطق مشکوک به لغزش در سطح منطقه شناسایی و برای تکمیل اطلاعات و ثبت لغزش‌های جدید، بازدید میدانی انجام گرفت که در منطقه مورد مطالعه ۱۳ نقطه لغزشی شناسایی شده است (شکل ۴). بررسی زمین‌لغزش‌های مشاهده شده در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد این لغزش‌ها به طور عموم شامل خزش و لغزش در اثر برش‌های کنار جاده‌ای هستند (شکل ۲).

1 Receiver Operating Characteristic

2 Yesilnacar





شکل ۲- تصاویری از وقوع زمین لغزش در حین و بعد از عملیات ساخت آزادراه

حرکت توده‌ای پدیده یا فرایندی مرکب و چند عامله است که وقوع آن از چند فرآیند متفاوت حاصل می‌شود. در این تحقیق برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه ۸ عامل مورد بررسی قرار گرفته و نقشه آن‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده است (شکل ۳). به منظور استفاده از این لایه‌های اطلاعاتی ابتدا با استفاده از نسبت فراوانی هر یک از عوامل مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است (جدول ۱). بررسی نتایج به دست آمده از وزن‌دهی هر یک از عوامل مؤثر بر لغزش به شرح زیر است:

بررسی شیب‌های منطقه نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت نسبت به لغزش در کلاس ۱۵-۳۰ قرار دارد. این امر حاکی از آن است که در شیب پایین به دلیل کاهش نیروی ثقل و در شیب‌های بالا به دلیل تضعیف فرآیند خاک‌زایی به تبع آن عدم وجود مواد مستعد برای وقوع لغزش بر روی دامنه‌ها، احتمال آن کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج به دست آمده از لیتولوژی منطقه نشان می‌دهد که واحد آهک مارن‌دار از بیشترین حساسیت در مقابل لغزش برخوردار است. علت این امر را می‌توان جنس این واحد و حساسیت آن در برابر زمین لغزش دانست.

نتایج به دست آمده از بررسی پراکندگی لغزش‌ها نسبت به فاصله از آبراهه نشان داد که بیشترین حساسیت نسبت به لغزش، در فواصل نزدیک به شبکه آبراهه‌ها قرار دارد که علت آن کاهش تنش مؤثر و مقاومت برشی شیب‌ها به دلیل نفوذ آب آبراهه‌ها در رسوبات اطراف است.



نتایج به دست آمده از بررسی طبقات فاصله از گسل نشان داد که بیشترین حساسیت در فواصل ۹۰۰-۶۰۰ متر وجود دارد و در فواصل نزدیک به گسل حساسیت به صفر می‌رسد که نتایج دور از انتظار بود. بررسی ارتباط بین طبقات ارتفاعی و نقشه پراکنش لغزش‌ها نشان می‌دهد بیشترین حساسیت به لغزش در طبقات متوسط وجود دارد و در ارتفاعات بالاتر به علت کمبود شرایط مناسب برای پدیده خاک‌سازی لغزش‌های کمتری رخ داده است.

نتایج حاصل از کاربری اراضی نشان داد که بیشترین حساسیت به لغزش در واحد اراضی زراعی آبی وجود دارد که این امر را می‌توان کاهش مقاومت برشی مصالح در اثر جذب آب نسبت داد. بررسی نتایج به دست آمده از عامل بارش دور از انتظار بود و بیشترین حساسیت در کلاس‌های با بارندگی پایین واقع شده بود.

بررسی جهات جغرافیایی نسبت به پراکنندگی لغزش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش در طبقات شمالی وجود دارد. علت این امر را می‌توان به رطوبت بالا در این جهات نسبت داد.

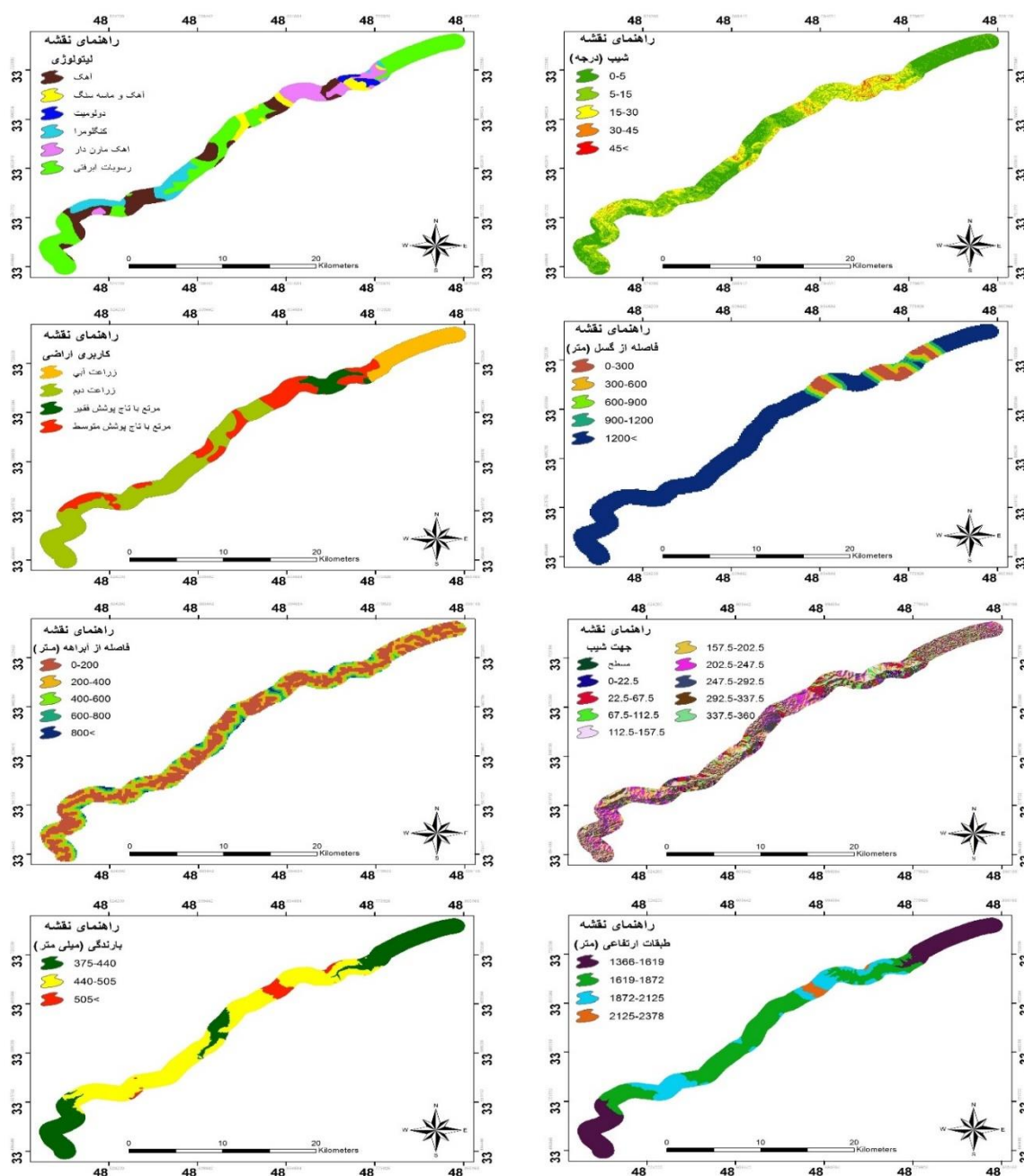
جدول ۱- تحلیل عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی

معیار	کلاس	E	F	FR	نرمال‌سازی
شیب (درجه)	۵-۰	۵/۰۰	۳۸/۶۸	۰/۱۳	۰/۰۷
	۱۵-۵	۵۷/۵۰	۳۵/۷۱	۱/۶۱	۰/۹۳
	۳۰-۱۵	۳۷/۵۰	۲۱/۵۸	۱/۷۴	۱
	۴۵-۳۰	۰	۳/۸۰	۰	۰
	۴۵<	۰	۰/۲۳	۰	۰
لیتولوژی	آهک	۱۸/۴۲	۲۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۱۹
	آهک و ماسه‌سنگ	۰	۶/۴۵	۰	۰
	دولومیت	۰	۲/۲۵	۰	۰
	کنگلمرا	۰	۱۰/۹۹	۰	۰
	آهک مارن‌دار	۶۰/۵۳	۱۲/۷۳	۴/۷۵	۱
	رسوبات آبرفتی	۲۱/۰۵	۴۶/۶۶	۰/۴۵	۰/۰۹
فاصله از آبراهه (متر)	۲۰۰-۰	۳۰/۰۰	۱۹/۴۶	۱/۵۴	۰/۸۲
	۴۰۰-۲۰۰	۶۲/۵۰	۳۳/۴۰	۱/۸۷	۱
	۶۰۰-۴۰۰	۷/۵۰	۱۷/۰۳	۰/۴۴	۰/۲۴
	۸۰۰-۶۰۰	۰	۷/۹۵	۰	۰
	۸۰۰<	۰	۲۲/۱۶	۰	۰
فاصله از گسل (متر)	۳۰۰-۰	۰	۸/۸۶	۰	۰
	۶۰۰-۳۰۰	۵/۲۶	۳/۸۴	۱/۳۷	۰/۱۱

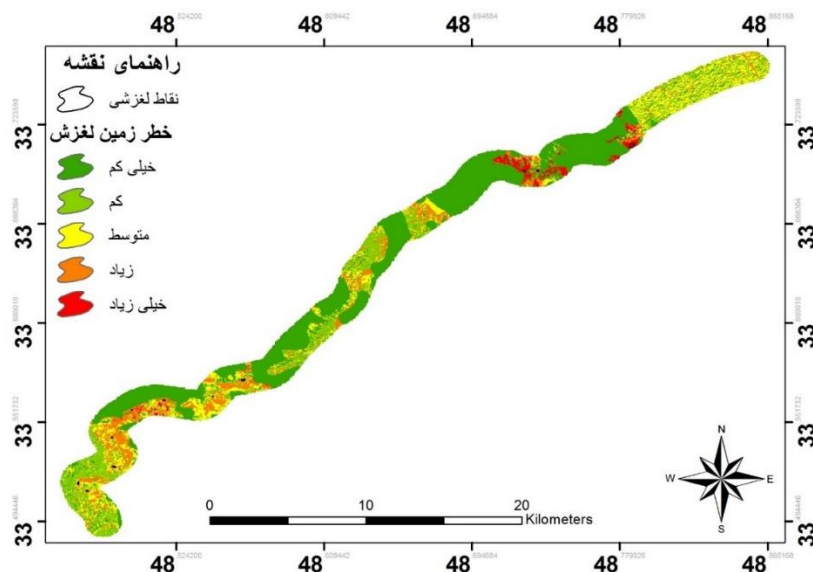
معیار	کلاس	E	F	FR	نرمال سازی
	۹۰۰-۶۰۰	۴۷/۳۷	۳/۸۰	۱۲/۴۶	۱
	۱۲۰۰-۹۰۰	۲/۶۳	۴/۱۳	۰/۶۴	۰/۰۵
	۱۲۰۰<	۴۴/۷۴	۷۹/۳۷	۰/۵۶	۰/۰۵
طبقات ارتفاعی (متر)	۱۶۱۹-۱۳۶۶	۲۵/۰۰	۳۳/۱۱	۰/۷۶	۰/۵۱
	۱۸۷۲-۱۶۱۹	۶۷/۵۰	۴۵/۷۹	۱/۴۷	۱
	۲۱۲۵-۱۸۷۲	۷/۵۰	۱۸/۶۰	۰/۴۰	۰/۲۷
	۲۳۷۸-۲۱۲۵	۰	۲/۵۰	۰	۰
کاربری اراضی	زراعت آبی	۵۵/۵۶	۱۷/۸۵	۳/۱۱	۱
	زراعت دیم	۳۶/۱۱	۴۸/۸۲	۰/۷۴	۰/۲۴
	مرتع با تاج پوشش فقیر	۸/۳۳	۷/۳۴	۱/۱۳	۰/۳۶
	مرتع با تاج پوشش متوسط	۰	۲۵/۹۸	۰	۰
بارش (میلی متر)	۴۴۰-۳۷۵	۷۰/۰۰	۴۲/۵۹	۱/۶۴	۱
	۵۰۵-۴۴۰	۳۰/۰۰	۵۲/۹۰	۰/۵۷	۰/۳۵
	۵۰۵<	۰	۴/۵۱	۰	۰
جهت شیب	مسطح	۲/۵۰	۱/۴۴	۱/۷۴	۰/۵۰
	۲۲-۰/۵	۷/۵۰	۵/۲۳	۱/۴۳	۰/۴۲
	۲۲/۶۷-۵/۵	۱۷/۵۰	۱۳/۰۳	۱/۳۴	۰/۳۹
	۶۷/۱۱۲-۵/۵	۲/۵۰	۹/۹۰	۰/۲۵	۰/۰۷
	۱۱۲/۱۵۷-۵/۵	۰	۱۱/۵۰	۰	۰
	۱۵۷/۲۰۲-۵/۵	۷/۵۰	۱۴/۵۶	۰/۵۲	۰/۱۵
	۲۰۲/۲۴۷-۵/۵	۲۲/۵۰	۱۵/۵۹	۱/۴۴	۰/۴۲
	۲۴۷/۲۹۲-۵/۵	۷/۵۰	۱۱/۷۰	۰/۶۴	۰/۱۹
	۲۹۲/۳۳۷-۵/۵	۱۵/۰۰	۱۱/۹۸	۱/۲۵	۰/۳۶
	۳۳۷/۳۶۰-۵	۱۷/۵۰	۵/۰۷	۳/۴۵	۱

به منظور پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از عملگر گامای فازی، نسبت فراوانی نقاط لغزشی در هر یک از کلاس های عوامل مؤثر بر لغزش محاسبه شده است (جدول ۱). بر اساس نسبت های فراوانی به دست آمده و استفاده از تابع عضویت User defined در محیط نرم افزار ArcMap، نقشه های عوامل مختلف به نقشه های فازی تبدیل گردیده و با استفاده از عملگر گامای فازی ۰/۹ نقشه های فازی تمام عوامل هم پوشانی داده شده اند و نقشه خطر لغزش تهیه و به پنج کلاس خطر بسیار کم (۱/۷۵۵٪)، کم (۳۰/۶۷٪)، متوسط (۲۶/۵۱٪)، زیاد (۱/۷۱۵٪) و بسیار زیاد (۶/۱۲٪) طبقه بندی شده است (شکل ۴).

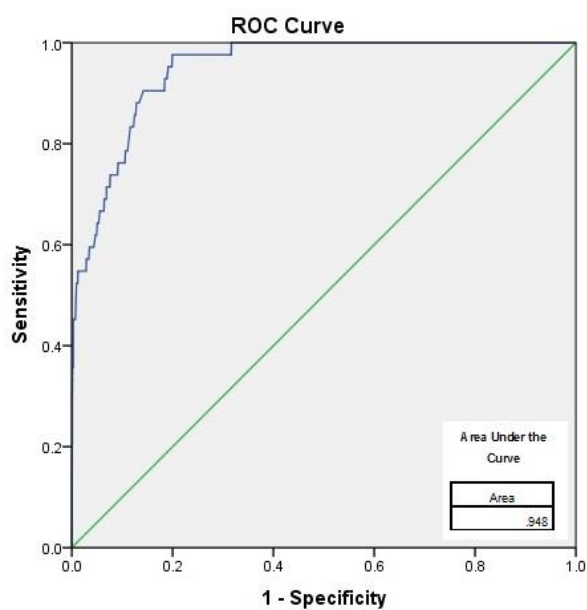
ارزیابی نتایج به دست آمده با استفاده از منحنی ROC نشان از دقت عالی روش استفاده شده در پهنه‌بندی خطر لغزش‌های محدودده مورد مطالعه را دارد (AUC=۰/۹۴۸) (شکل ۵). در این مطالعه ترسیم منحنی ROC برای ارزیابی نتایج به دست آمده در محیط نرم‌افزار SPSS انجام شده است.



شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های محدودده مطالعاتی



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده آزادراه خرم‌آباد-بروجرد



شکل ۵- ارزیابی روش عملگر گامای فازی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش‌های آزادراه خرم‌آباد-بروجرد

#### ۴- نتیجه‌گیری

محدوده مطالعه شده به دلیل قرارگیری در زون زاگرس چین‌خورده، خصوصیات متنوع زمین‌شناسی نظیر لیتولوژی، زمین‌ساخت و شرایط خاص آب و هوایی مستعد بروز خطرات ناشی از پدیده زمین لغزش است. با توجه

به متفاوت بودن درجه اهمیت عوامل مؤثر در ایجاد زمین لغزش‌ها، شناسایی و وزن‌دهی درست عوامل برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش و جلوگیری از وقوع خطر امری الزامی است. در این پژوهش از روش نسبت فراوانی برای وزن‌دهی عوامل مؤثر در وقوع لغزش‌های منطقه استفاده شده است. نتایج به دست آمده از ارزیابی عوامل مؤثر بر لغزش نشان داد که عوامل بارندگی و فاصله از گسل بیشتر تحت تأثیر سایر عوامل بوده و نقش مستقیمی در رخداد لغزش‌های محدوده مطالعاتی ندارند.

بر اساس نتایج به دست آمده بیش از ۲۴ درصد از مساحت محدوده مورد مطالعه در پهنه‌های خطر متوسط به بالا واقع شده است که حاکی از پرمخاطره بودن منطقه از لحاظ خطر زمین لغزش است. این پهنه‌ها بیشتر منطبق بر آهک‌های مارن‌دار می‌باشند که علت آن را می‌توان رفتار این مصالح در هنگام مرطوب شدن نسبت داد که باعث به وجود آمدن فشار آب بین منفذی شده و با از بین رفتن تنش مؤثر در اسکلت خاک، مصالح مقاومت برشی خود را از دست می‌دهند و به حرکت بر روی سطوح شیب‌دار تمایل پیدا می‌کنند.

نتایج حاصل از ارزیابی مطالعه انجام شده با استفاده از منحنی ROC نشان می‌دهد که روش گامای فازی در شناسایی مناطق خطر زمین لغزش از عملکرد عالی برخوردار است. پس پیشنهاد می‌شود از نتایج به دست آمده در ایمن‌سازی آزادراه و برنامه‌ریزی منطقه‌ای استفاده گردد.

#### کتابنامه

پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ فاطمی عقدا، محمود؛ مهدوی فر، محمدرضا؛ محمدی، مجید؛ ۱۳۸۸. ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره فازی. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. شماره

۸، صص ۵۱-۶۲. <https://www.sid.ir/paper/134813/fa>

دسترنج، علی؛ وکیلی تجربه، فرزانه؛ نور، حمزه؛ ۱۴۰۰. ارزیابی پهنه‌های حساس به وقوع زمین لغزش در رشته‌کوه بینالود. *نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. شماره ۵۳. صص ۱۲-۲۲.

<http://jwmsei.ir/article-1-978-fa.html>

رمضانی، بهمن؛ ابراهیمی، هدی؛ ۱۳۸۸. زمین لغزش و راهکارهای تثبیت آن. *فصلنامه جغرافیایی آمایش محیط*. شماره ۷، صص ۱۲۹-۱۳۹. <https://www.magiran.com/paper/902037>

زالی، مهرباب؛ شاهدی، کاکا؛ ۱۴۰۰. ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از رویکرد منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز نکارود. *نشریه مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. شماره ۱. صص ۶۷-۸۰.

<https://civilica.com/doc/1224970>

Akgun A, Dag S, Bulut F., 2007. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Eng. Geol.*, 54: 1127-1143. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0882-8>  
Anbalagan R, Kumar R, Lakshmanan K, Parida S, Neethu S., 2015. Landslide hazard zonation

- mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach, a case study of Lachung Valley, Sikkim. *Geoenvironmental Disasters*, 2(6): 1-17. DOI:10.1186/s40677-014-0009-y
- Bera A, Mukhopadhyay BP, Das D., 2019. Landslide hazard zonation mapping using multicriteria analysis with the help of GIS techniques: a case study from Eastern Himalayas, Namchi, South Sikkim. *Natural Hazards*, 96(2): 935-959. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03580-w>
- Bui DT, Pradhan B, Lofman O, Revhaug I, Dick O., 2012. Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *CATENA*, 96: 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.001>
- Chen W, Chai H, Sun X, Wang Q, Ding X, Hong H., 2016. A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping. *Arab. J. Geosci.*, 9(3): p. 204. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2150-7>
- Dai FC, Lee CF., 2001. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. *Canadian Geot Journal*, 38(5):911–923. DOI:10.1139/t01-021
- Ding Q, Chen W, Hong H., 2017. Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*, 32(6): 619-639. DOI:10.1080/10106049.2016.1165294
- Du G, Zhang Y, Iqbal J, Yang Z, Yao X., 2017. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China. *Journal of Mountain Sci.*, 14(2):249–268. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4126-9>
- Fall M, Azzam R, Noubactep C., 2006. A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. *Eng Geol*, 82:241–263. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.11.007>
- Kumar P, Mital A, Ray PKC, Chatteraj SL., 2021. Landslide Hazard and Risk Assessment Along NH-108 in Parts of Lesser Himalaya, Uttarkashi, Using Weighted Overlay Method. *Geohazards*, 86: 163-180. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6233-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6233-4_12)
- Mondal S, Maiti R. 2013. Integrating the analytical hierarchy process (AHP) and the frequency ratio (FR) model in landslide susceptibility mapping of Shiv-khola watershed. *Int. J. of Dis. Risk Sci.*, 4(4): 200-212. <https://doi.org/10.1007/s13753-013-0021-y>
- Panchal S, Shrivastava AK., 2021. Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal*, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>.
- Shano L, Raghuvanshi TK, Meten M., 2022. Landslide Hazard Zonation using Logistic Regression Model: The Case of Shafe and Baso Catchments, Gamo Highland, Southern Ethiopia. *Geotech Geol Eng.*, 40, 83–101. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01873-1>
- Singh K. Kumar V., 2018. Hazard assessment of landslide disaster using information value method and analytical hierarchy process in highly tectonic Chamba region in bosom of Himalaya. *J Mountain Sci.*, 15 (4): 808-824. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4634-2>
- Sur U, Singh P, Rai PK., 2021. Landslide probability mapping by considering fuzzy numerical risk factor (FNRF) and landscape change for road corridor of Uttarakhand, India. *Environ Dev Sustain*, 23: 13526–13554. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01226-1>
- Tanaka K., 1996. *An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications*. Springer New York, 148p. <https://link.springer.com/book/9780387948072>
- Van Westen CJ, Rengers N, Soeters R., 2003. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. In: *Natural Hazards*, Vol. 30. Kluwer Academic



Publishers: 330–419. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e>  
Yesilnacar E, Topal T., 2005. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79(3), 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.02.002>