

Research Paper



Landslide susceptibility analysis using bivariate and multivariate models in Chalus County



Majid Mohammady¹ , Mojtaba Amiri², Jafar Dastorani³

1- Associate professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran.

majid.mohammady@semnan.ac.ir

2- Associate professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran.

mojtabaamiri@semnan.ac.ir

3- Assistant professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran.

jdastorani@semnan.ac.ir

Keywords

Landslide, Information value, Frequency ratio, Logistic regression, Chalus County, Iran.

Receive: 2025/07/0016

Accepted: 2025/09/17

Published: 2026/06/22

ABSTRACT

Introduction

Erosion and soil loss are common in hilly areas, but their severity will vary depending on the geoenvironmental factors including, Steep sloping, geological characteristics, vegetation and climatic factors making it more vulnerable to erosion. In mountainous regions, mass movements and landslides are regarded as a significant erosional process. Steep slope areas are geological and ecological sensitive and fragile that lead to landslides. The landslides also make the area vulnerable to many other dangers. Because of the geological conditions, soil potential, and lack of sufficient management, Iran is regarded as a high-risk area in terms of landslides. The management of an area relies on the identification and zoning of landslide-prone areas as a crucial element in assessing environmental hazards. Because of the complex processes of landslides and the concepts of factors such as tectonics, hydrology, geology, vegetation cover, precipitation, temperature, and erosion, it is vital to apply accurate methods for investigating slope instability. Although landslide-prone areas have been mapped using a variety of methods worldwide, there is no one approach that has been found to be suitable. A model's performance varies depending on the locale and a model's efficacy varies from region to region. The primary goal of this research is to create a landslide susceptibility map using bivariate statistical models (frequency ratio and information value) and a multivariate model (logistic regression), and selecting the appropriate model for this task in Chalus County.

*Corresponding Author: Majid Mohammady, E-mail: majid.mohammady@semnan.ac.ir

How to cite this article: Mohammady, Majid; Amiri, Mojtaba; Dastorani, Jafar. (2025). Landslide susceptibility analysis using bivariate and multivariate models in Chalus County. *Hydrogeomorphology*, 13 (47): 22 – 40.

DOI: [10.22034/hyd.2025.68198.1802](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.68198.1802)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Methodology

The first step in this research is to prepare distribution map of the landslides and determine their location on the map. This was done using Google Earth imagery and field surveys. The maps of conditioning factors were prepared from different sources and entered into the GIS environment. Digital elevation model (DEM) was created using a digitized topographic map with a scale of 1:25,000. The maps of elevation, slope degree, slope aspect, profile curvature, and plan curvature were prepared using the DEM map. A drainage network map was created using topographic map. The buffer technique in the ArcGIS software was used to determine the distance from streams. The distance from the faults and road maps were calculated in the ArcGIS software. The land use map of the area was created using LANDSAT images. Average annual rainfall map was developed using rainfall data from meteorological stations. A lithology map with a scale of 1:100,000 was prepared using the geological map from the Geological Survey of Iran in the GIS environment. Frequency ratio, information value, and logistic regression were used to create landslide susceptibility map. 50 landslides were employed to map the landslide susceptibility during the modeling process, and 26 landslides were used to verify the model. The ROC curve and the area under the curve were used to assess the accuracy of the models. The value of AUC is in the range of 0 and 1, and the precision increases with the increase of the AUC value.

Results and Discussion

The results showed that the highest weight of the frequency ratio and information value is related to the elevation class of 500 to 2000 meters, slope degree of 40 to 63, south aspect, convex and concave slopes, profile curvature less than 1, rainfall less than 600mm, forests and rangelands, distance more than 5000 meters from faults, distance less than 400 meters from streams, distance less than 1000 meters from roads, marl, green schist and amphibolite. After running frequency ratio, information value, and logistic regression, the computed values were entered into the GIS, and the landslide susceptibility was mapped. Using the natural break method, susceptibility maps were divided into low, moderate, high, and very high susceptibility categories. ROC and AUC were used to investigate the accuracy of the susceptibility maps. The AUC for frequency ratio, information value, and logistic regression were 0.705, 0.721, and 0.811. The area of the susceptibility classes were calculated for susceptibility map created using regression logistic. Results show that approximately 44 % of the study area is at high and very high susceptibility to landslides. The calculated area indicates that the region is highly susceptible to landslides, and paying attention to this phenomenon is very necessary. Identifying the classes of high and very high susceptibility help select higher-priority regions to concentrate on landslide management and control initiatives.

Conclusions

Among various natural hazards, one of the most destructive natural disasters, landslides cause enormous losses in ecology, property, and human lives. Because of geologic, climatic and topographic conditions, the Chalus county is constantly facing this phenomenon. Hence, an accurate map of landslide susceptibility is essential for natural resource managers, policymakers, and land use planners to develop and apply applicable mitigation measures. The primary goal of this research was to create a landslide susceptibility map using frequency ratio, information value and logistic regression models, and selecting an appropriate model for this task in Chalus county. Accuracy assessment of the models showed accuracies of 0.705, 0.721, and 0.811 for frequency ratio, information value, and logistic regression, respectively, indicating that the logistic regression model is more accurate. The calculated area of high and very high susceptible classes indicates that the region is highly susceptible to landslides, and paying attention to this phenomenon is very necessary.



تحلیل حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های دو و چندمتغیره در شهرستان چالوس



مجید محمدی^{۱*}، مجتبی امیری^۲، جعفر دستورانی^۳

۱- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. majid.mohammady@semnan.ac.ir
 ۲- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. mojtabaamiri@semnan.ac.ir
 ۳- استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. jdastorani@semnan.ac.ir

چکیده

در نواحی کوهستانی، حرکت توده‌ای و زمین‌لغزش به عنوان یک فرآیند فرسایشی مهم در نظر گرفته می‌شوند. مناطق شیب‌دار به لحاظ زمین‌شناسی و بوم‌شناسی حساس و شکننده هستند که منجر به وقوع زمین‌لغزش می‌شود. زمین‌لغزش‌ها این منطقه را در برابر بسیاری از خطرات دیگر نیز آسیب‌پذیر می‌کند. هدف اصلی این تحقیق تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره (نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات) و یک مدل چندمتغیره (رگرسیون لجستیک) و انتخاب مدل مناسب برای این کار در شهرستان چالوس است. اولین گام در این پژوهش تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و تعیین محل آن‌ها روی نقشه است. این کار با استفاده از تصاویر گوگل ارث و پیمایش زمینی انجام شد. نقشه‌های مربوط به عوامل موثر از منابع مختلف تهیه و وارد محیط GIS شد. مدل‌های نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات و رگرسیون لجستیک برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش استفاده شدند. منحنی ROC و سطح زیر این منحنی برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شدند. مساحت زیر منحنی برای نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات و رگرسیون لجستیک به ترتیب ۰/۷۰۵، ۰/۷۲۱ و ۰/۸۱۱ به دست آمد. مساحت طبقه‌های حساسیت‌پذیری برای نقشه حساسیت‌پذیری تهیه شده با استفاده از رگرسیون محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهند که تقریباً ۴۴٪ از منطقه مطالعه در معرض حساسیت زیاد و خیلی زیاد زمین‌لغزش قرار دارد. مساحت محاسبه‌شده نشان می‌دهد که این منطقه به شدت مستعد زمین‌لغزش بوده و توجه به این پدیده بسیار ضروری است.

کلیدواژه‌ها

زمین‌لغزش، ارزش اطلاعات، نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک، شهرستان چالوس، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

*نویسنده مسئول: مجید محمدی
 ارجاع به این مقاله: محمدی، مجید؛ امیری مجتبی؛ دستورانی، جعفر. (۱۴۰۵). تحلیل حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های دو و چندمتغیره در شهرستان چالوس. هیدروژئومورفولوژی، ۱۳ (۴۷): ۲۲ - ۴۰.

رایانامه: majid.mohammady@semnan.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.68198.1802



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

در سال‌های اخیر رشد جمعیت و توسعه شهرنشینی در مناطق ناپایدار و خطرناک منجر به افزایش بلایای طبیعی در کشورهای مختلف گردیده است. فرسایش و هدررفت خاک معمولاً در مناطق شیب‌دار اتفاق می‌افتد اما شدت وقوع آن به عامل‌های محیط‌زیستی از قبیل میزان شیب، خصوصیات زمین‌شناسی، وضعیت پوشش گیاهی و عوامل اقلیمی بستگی دارد که باعث افزایش آسیب‌پذیری یک منطقه به فرسایش می‌شود. اهمیت زمین‌لغزش زمانی که به سکونت‌گاه‌های انسانی و زیرساخت‌ها نزدیک باشد بسیار زیاد است (آقایاری و همکاران، ۱۴۰۳، ۴). زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی بوده که خسارات جانی و مالی زیادی را به همراه داشته و میزان خسارات سالانه آن در کل دنیا بسیار بالاست (اسماره^۱، ۲۰۲۳). در نواحی کوهستانی، حرکت توده‌ای و زمین‌لغزش به عنوان یک فرآیند فرسایشی مهم در نظر گرفته شده و همواره مورد توجه است. مناطق شیب‌دار به لحاظ زمین‌شناسی و بوم‌شناسی حساس و شکننده بوده وقوع زمین‌لغزش این منطقه را در برابر بسیاری از خطرات آسیب‌پذیرتر می‌کند. مردمی که در مناطق کوهستانی زندگی می‌کنند به زیرساخت‌های پایدارتر نیاز دارند که آن‌ها را در معرض خطر کمتری قرار دهد (رای^۲ و همکاران، ۲۰۲۴: ۴). این پدیده همه ساله در اکثر استانهای کشور موجب خسارت‌های اقتصادی به راه‌ها، خطوط آهن، خطوط انتقال نیرو و ارتباطات، کانال‌های آبیاری و آبرسانی، تأسیسات معدنی، تأسیسات استخراج و پالایش نفت و گاز، شبکه شریان‌های حیاتی داخل شهرها، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی، سدها و دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی، جنگل‌ها و مراتع و منابع طبیعی، مزارع و مناطق مسکونی و روستاها گشته و یا آنها را مورد تهدید قرار می‌دهد. به طور متوسط هر سال از ژانویه ۲۰۰۴ تا دسامبر ۲۰۱۶ حدود ۴۰۰ زمین‌لغزش مرگبار در سطح جهانی رخ می‌دهد. که منجر به ۵۵۹۹۷ مرگ در سراسر جهان شده است (فرو^۳ و پتلی^۴، ۲۰۱۸: ۲۱۶۴). زمین‌لغزش‌ها ۵/۰۸ درصد از بلایای زیست‌محیطی رخ داده در جهان را تشکیل می‌دهند. حدود ۵۳/۸۸ درصد از تمام زمین‌لغزش‌های جهان در آسیا رخ می‌دهند (چودوری^۵ و همکاران، ۲۰۲۴: ۳). به دلیل شرایط زمین‌شناسی، پتانسیل خاک و کمبود مدیریت کافی، ایران به عنوان یک منطقه با خطر بالای زمین‌لغزش شناخته می‌شود. بر اساس گزارش‌ها در ایران، ۱۸۷ نفر در حوادث زمین‌لغزش جان خود را از دست دادند و بسیاری از زیرساخت‌ها مانند ۲۵۲/۶۷ کیلومتر جاده‌های اصلی، ۶ کیلومتر راه‌آهن، ۳ کیلومتر جاده‌های جنگلی و ۴۶ کیلومتر جاده‌های روستایی بین سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۷ آسیب دیدند. زیان‌های حرکات توده‌ای، به ویژه زمین‌لغزش تا سال ۲۰۰۷، به مبلغ ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال محاسبه شد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲). با توجه به اهمیت این پدیده می‌توان گفت مدیریت یک منطقه به شدت به شناسایی، دسته‌بندی و منطقه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش متکی است، که عناصر حیاتی در ارزیابی تهدیدات زیست‌محیطی هستند (ساکار^۶ و همکاران، ۱۹۹۵). نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش ابزاری بسیار مفید است زیرا احتمال وقوع زمین‌لغزش‌ها در یک مکان مشخص را بر اساس شرایط تأثیرگذار خارجی نمایش می‌دهند. در واقع نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با شبیه‌سازی احتمال زمین‌لغزش نشان می‌دهد که کجا زمین‌لغزش احتمال شروع و توسعه در آینده را دارد و بدین ترتیب منابع بیشتری برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش فراهم می‌کند (لیو^۷ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۶). به دلیل فرآیندهای پیچیده زمین‌لغزش و مفاهیم عوامل تأثیرگذار بر آن مانند تکتونیک، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، بارش، دما و فرسایش، ضروری است که روش‌های دقیقی برای بررسی ناپایداری شیب در مناطق مختلف استفاده شود (فاطمی عقدا و همکاران، ۲۰۱۸: ۹۱۹). می‌توان گفت ساخت روش‌های سریع و دقیق ارزیابی زمین‌لغزش یک ابزار ضروری برای کاهش خطرات برای ذی‌نفعان و مقامات بوده است (گیو^۸ و همکاران، ۲۰۲۳). تاکنون نقشه مناطق مستعد زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مختلف در سطح جهانی تهیه شده‌اند ولی هیچ روشی که در تمام مناطق بهترین عملکرد نسبت به سایر مدل‌ها داشته باشد معرفی نشده است. عملکرد یک مدل بسته به محل و موجودیت داده‌ها متفاوت بوده و کارایی یک مدل از منطقه‌ای به منطقه دیگر تغییر می‌کند. به عنوان مثال در یک منطقه ممکن است به دلیل کم بودن داده‌ها یک روش ساده دو متغیره و در محلی دیگر با وجود داده‌های کافی و دقیق یک مدل پیچیده‌تر

7 Liu

8 Guo

4 Petley

5 Chowdhury

6 Sakar

1 Asmare

2 Rai

3 Froude

دقت بیشتری ارائه دهد. برای یک منطقه مطالعاتی خاص، نرخ خطاهای چندین مدل مقایسه می‌شوند تا این محدودیت را برطرف کنند و مدل بهینه برای منطقه مورد مطالعه مشخص، مدلی است که بالاترین دقت را داشته باشد (چودوری و همکاران، ۲۰۲۴: ۴). برخی از مدل‌های مورد استفاده در بررسی حساسیت و خطر زمین‌لغزش عبارت از شاخص انترپوی (ووبالم^۱ و همکاران، ۲۰۲۲)، نسبت فراوانی (بیش^۲ و همکاران، ۲۰۲۴؛ یوواراج^۳ و دولوی^۴، ۲۰۲۳؛ اسماره، ۲۰۲۳)، وزن رویداد (السبحان^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۲)، ارزش اطلاعات (وانگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۴؛ السبحان و همکاران، ۲۰۲۲)، رگرسیون لجیستیک (چودوری و همکاران، ۲۰۲۴؛ لومباردو^۷ و مارتین^۸، ۲۰۱۸؛ اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۴۰۳)، تحلیل سلسله مراتبی (علی و همکاران، ۲۰۱۹) و تکنیک‌های داده‌کاوی (چودوری و همکاران، ۲۰۲۴؛ گیو و همکاران، ۲۰۲۳) است. در این تحقیق شهرستان چالوس به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. وجود این خطر طبیعی مهم، قیمت بالای زمین در این منطقه، تراکم جمعیت و تغییرات کاربری زیاد از دلایل اصلی انتخاب شهرستان چالوس برای این مطالعه بود. تهیه نقشه مناطق حساس به زمین‌لغزش برای برنامه‌ریزی مناسب استفاده از زمین و کاهش خطرات ناشی از زمین‌لغزش (مانند تلفات انسانی و آسیب به زیرساخت‌ها، شبکه‌های جاده‌ای و زمین‌های کشاورزی) بسیار مهم است. هدف اصلی این تحقیق تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره (نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات) و یک مدل چندمتغیره (رگرسیون لجستیک) و انتخاب مدل مناسب برای این کار در شهرستان چالوس است. دلیل استفاده از این مدل‌ها و مقایسه آنها مکانیسم متفاوت آنها، سادگی و همچنین تایید دقت آنها در بسیاری از مطالعات دیگر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان چالوس با مساحتی برابر ۱۱۰۷ کیلومتر مربع بین عرض‌های $۳۶^{\circ} ۱۰'$ تا $۳۶^{\circ} ۴۰'$ شمالی و طول‌های ۵۱° تا $۵۱^{\circ} ۳۰'$ شرقی در غرب استان مازندران واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع منطقه از ۳۰- تا ۴۱۶۰ متر از سطح دریا متغیر بوده به طوری که از بخش کوهستانی با توپوگرافی پیچیده در قسمت جنوبی شهرستان شروع و به بخش مسطح و ساحلی در قسمت شمالی ختم می‌شود. بارش در منطقه نیز بسیار متنوع بوده و از حدود ۵۰۰ شروع شده و در برخی مناطق به بالای ۱۰۰۰ میلی‌متر نیز می‌رسد. شهرهای چالوس و مرزن‌آباد در این شهرستان واقع شده است. کاربری اراضی منطقه شامل زمین‌های کشاورزی، مرتع، جنگل، مسکونی و پهنه آب است.

⁷ Lombardo

⁸ Martin

⁴ Dolui

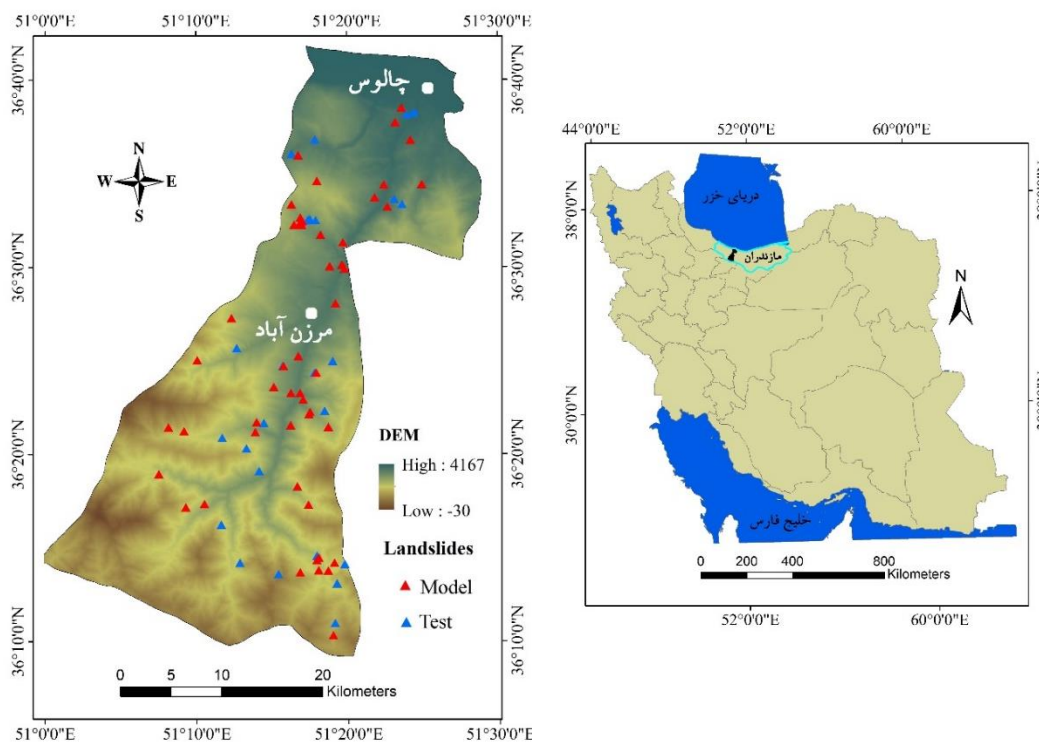
⁵ Alsabhan

⁶ Wang

¹ Wubalem

² Bisht

³ Yuvaraj



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در مازندران و ایران

Figure (1): Location of the study area in Mazandaran and Iran

تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها

نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها از سازمان منابع طبیعی تهیه شده و با استفاده از تصاویر گول ارث و همچنین پیمایش زمینی در منطقه مورد مطالعه تکمیل شد. با توجه به اینکه پراکنش زمین لغزش‌ها نقش زیادی در تهیه نقشه حساسیت دارد این مرحله یکی از مهم‌ترین اقدامات در این پژوهش است. به این منظور با کمک ساکنان محلی و همراهی آنها پیمایش زمینی انجام شد تا کلیه زمین لغزش‌های رخ داده (۷۶ زمین لغزش) در منطقه ثبت شود. موقعیت زمین لغزش‌ها با استفاده از GPS ثبت شده و در نهایت نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها تهیه شد. زمین لغزش‌های ثبت شده به دو گروه تقسیم شدند، به طوریکه حدود ۷۰ درصد آنها برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد برای ارزیابی دقت مدل‌ها در نظر گرفته شد (محمدی و همکاران، ۲۰۱۲). شکل ۲ نمونه‌ای از زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه را نشان می‌دهد.



شکل (۲): نمونه‌ای از زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه

Figure (2): Samples of landslides of the study area

عوامل موثر بر ایجاد زمین لغزش

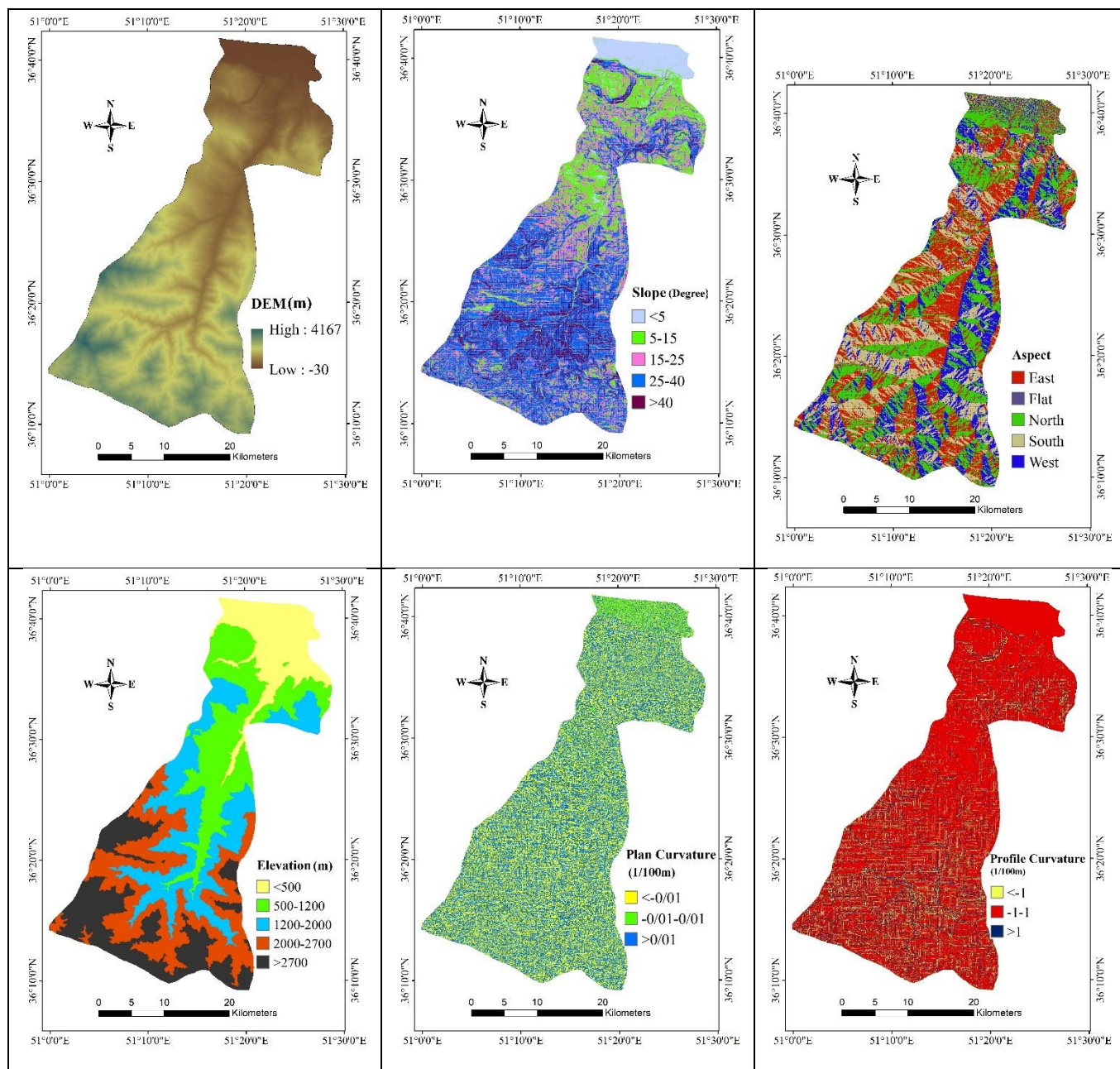
واضح است که ترکیب عوامل زمین‌شناسی (واحدهای لیتولوژیکی و گسل‌ها)، مورفولوژیکی (درجه شیب، جهت، و انحناها)، و عوامل کاربری زمین در مطالعات مربوط به زمین لغزش به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند (لیما^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). یازده عامل موجود به عنوان عوامل موثر برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش در این مطالعه انتخاب شدند. این عوامل بر اساس مرور منابع و همچنین موجودیت داده‌ها انتخاب شد. به عنوان مثال ممکن است عاملی در برخی مطالعات زمین لغزش استفاده شده باشد ولی برای بسیاری از مناطق ایران این عامل در دسترس نباشد. عوامل انتخاب شده در این پژوهش در بسیاری از مطالعات مرتبط با زمین لغزش استفاده شده و تاثیر آنها بر این پدیده تایید شده است. نقشه توپوگرافی از سازمان نقشه‌برداری کشور در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه و نقاط و خطوط ارتفاعی از آن استخراج شد. نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب، جهت شیب، انحناء سطح، انحناء نیمرخ و طبقات ارتفاع از ترکیب نقشه‌های نقاط ارتفاعی و خطوط تراز و با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS10.3 و SAGA-GIS تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تهیه و رقومی شد. به دلیل تنوع بالای سازندهای زمین‌شناسی، سازندهای مشابه در یک گروه قرار گرفتند. جدول ۱ سازندهای موجود در هر گروه و خصوصیات سنگ‌شناسی آنها را نشان می‌دهد. بعد از استخراج نقشه گسل از نقشه زمین‌شناسی نقشه فاصله از گسل نیز تهیه شد. نقشه شبکه آبراهه‌ها و جاده‌ها نیز از نقشه توپوگرافی استخراج و نقشه فاصله از این عوارض تهیه شد. کاربری اراضی منطقه نیز از روی تصاویر ماهواره‌ای و روش نظارت شده حداکثر احتمال و همچنین گوگل ارث تهیه شد. برای تهیه نقشه بارش داده‌های مربوط به ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی با استفاده از روش IDW میانابایی گردید. برای طبقه‌بندی نقشه‌های تهیه شده از روش شکست طبیعی منحنی پراکنش پیکسل‌ها استفاده شد. در این منحنی میزان پراکنش پیکسل‌های نقشه در هر دامنه از وزن مربوط به نقشه بررسی شده و بر اساس آن مرز مربوط به هر طبقه مشخص می‌شود (سحا و همکاران، ۲۰۲۳).

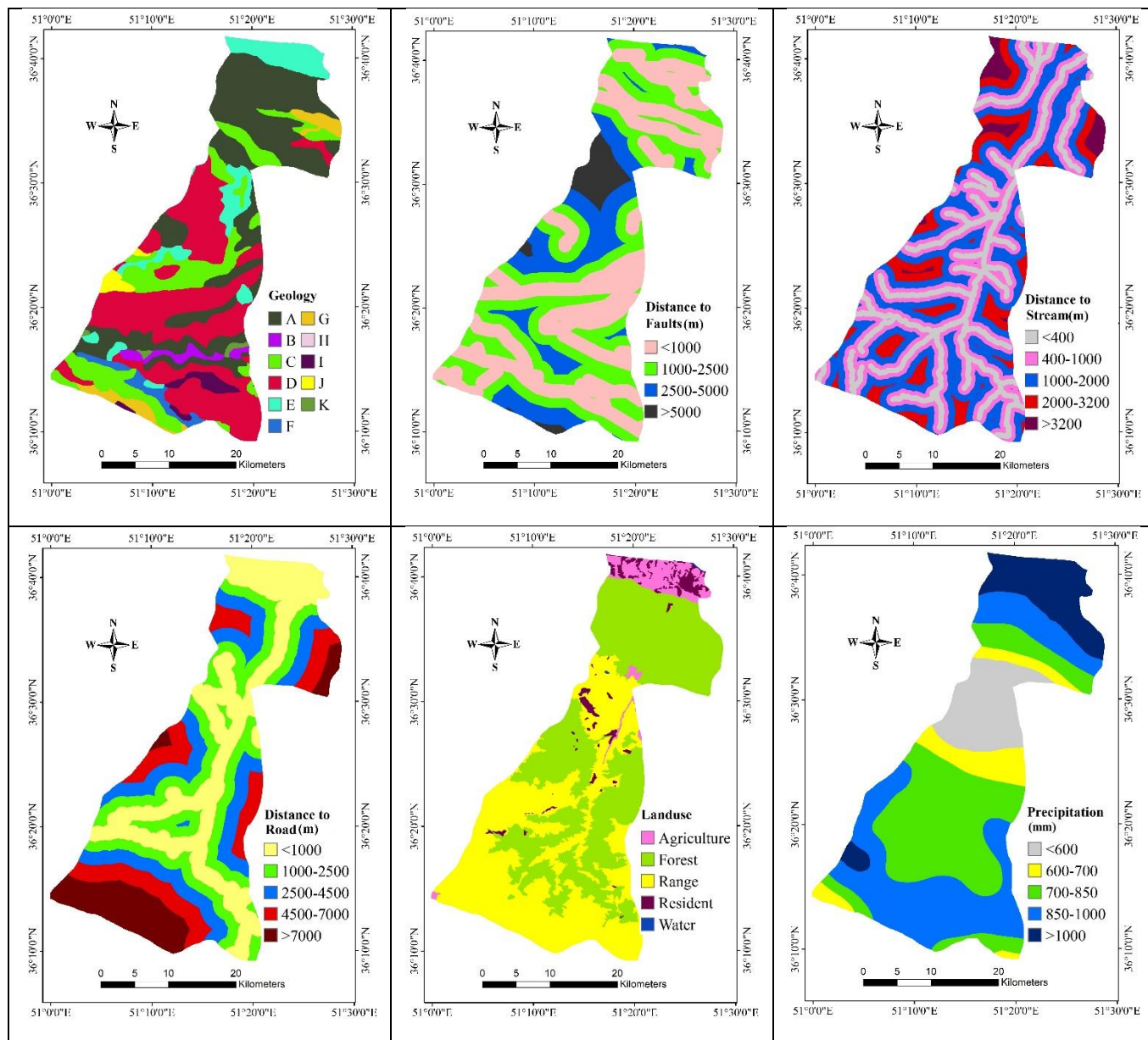
جدول (۱): زمین‌شناسی شهرستان چالوس

Table (1): Geology of Chalus County

گروه	سازندها	خصوصیات سنگ‌شناسی
A	Pc-، Ktzt1، K2l2، Cm، Cb، TRe و Pr، Pel، Cs	تناوب دولومیت، سنگ آهک و شیل، سنگ آهک فسیلی خاکستری تیره تا سیاه، سنگ آهک ضخیم لایه‌ای تا توده‌ای، سنگ آهک اوریتولین‌دار سفید تا صورتی، واحد دولومیت و سنگ آهک ضخیم، سنگ آهک خاکستری تیره با لایه بندی متوسط تا توده ای،
B	Cl	ماسه‌سنگ و سیلت‌ستون دانه متوسط قرمز تیره
C	Kbvt، Ebv، Eavt، Ea.bv، TRa.bv و PZ2bvt، PZ2bv	آتشفشانی آندزیتی و بازالتی، توف آتشفشانی آندزیتی، سنگ‌های آتشفشانی بازالتی، توف آتشفشانی بازالتی، آتشفشان‌های تریاس، آندزیتی و بازالتی
D	Pd، pCk، Jk، Eksh، Ek، TRJs	توف سبز و شیل توفی با لایه بندی خوب، شیل سبز-سیاه با میان‌لایه‌هایی از توف، کنگلومرا، ماسه سنگ و شیل به همراه لایه‌های زغال سنگ، شیل‌های ورقه‌ای خاکستری با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ کوارتزیتی، ماسه‌سنگ و شیل قرمز با سنگ آهک ماسه‌ای، شیل و ماسه سنگ خاکستری تیره،
E	Qft2 و Qft1	رسوبات کوهپایه‌ای و تراس دره‌ای با سطح بالا، رسوبات کوهپایه‌ای سطح پایین
F	Eky	گچ
G	Mm.s.l و K2m.l	مارن، شیل و سنگ آهک آواری، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ آهک ماسه‌ای و مقدار کمی کنگلومرا،
H	Sea	پهنه آب
I	Odi	دیوریت
J	pCmt2 و pCmt1	سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با درجه متوسط، سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با درجه پایین
K	pC-C	سنگ‌های تفکیک نشده پروتروزوئیک پسین - کامبرین پیشین

¹ Lima





شکل (۳): نقشه‌های عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش در شهرستان چالوس
 Figure (3): Conditioning factors Maps of landslide occurrence in the Chalus County

تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش

به‌منظور تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش از مدل‌های نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات و رگرسیون لجیستیک استفاده شد که در ادامه توضیحات هر مدل آمده است. ذکر این نکته ضروری است که ابتدا اقدام به جداسازی داده‌ها به دو دسته مدل‌سازی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) شد، به طوری‌که ۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها به صورت تصادفی برای ارزیابی مدل‌ها انتخاب شده و از نقشه مورد استفاده برای مدل‌سازی حذف شدند.

مدل نسبت فراوانی

مهم‌ترین مزیت این مدل دقت قابل قبول این مدل با وجود سادگی انجام آن است که در بسیاری از پژوهش‌ها به آن اشاره شده است (لیائو^۱ و کارین^۲، ۲۰۰۹؛ ساحانا^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). نسبت فراوانی یک مدل آماری بوده که به خوبی ارتباط متغیر وابسته و متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر) را نشان می‌دهد. طبق رابطه ۱ می‌توان وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر را حساب کرد.

$$FR = \frac{Ac/Acf}{Pc/Pcf} = \frac{Cp}{CFp} \quad (1)$$

که در آن: Ac تعداد زمین لغزش‌های رخ داده در یک طبقه، Acf تعداد کل زمین لغزش‌های منطقه، Pc مساحت طبقه مورد نظر و Pcf مساحت کل منطقه است (امپونسا^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). در مرحله بعد پس از محاسبه وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر طبق رابطه ۱، وزن‌ها در طبقات مختلف نقشه‌ها وارد می‌شود. در نهایت همه نقشه‌های وزنی در محیط GIS روی هم گذاری شده و پس از جمع وزن کل نقشه‌ها وزن نهایی در هر پیکسل از نقشه محاسبه می‌شود (محمدی و همکاران، ۲۰۱۲).

مدل ارزش اطلاعات

در تهیه نقشه خطر زمین لغزش، مدل ارزش اطلاعات برای توصیف کمی با استفاده از زمین لغزش‌های موجود و تراکم زمین لغزش در هر طبقه از عوامل مؤثر استفاده می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴). در این روش وزن یک طبقه عامل مؤثر با استفاده از لگاریتم تراکم زمین لغزش‌ها به عنوان درصدی از کل زمین لغزش‌ها در منطقه محاسبه می‌شود. رابطه کلی این روش به صورت زیر تعریف می‌شود (بین^۵، ۲۰۰۴):

$$I = \sum_{i=1}^n Wi = \sum_{i=1}^n \ln \frac{P(\frac{y}{xi})}{P(y)} \quad (2)$$

در این رابطه I وزن ارزش اطلاعات مربوط به هر پیکسل در منطقه، Wi وزن مربوط به هر طبقه از عوامل مؤثر، P(y) احتمال وقوع زمین لغزش و P(y/Xi) احتمال وقوع زمین لغزش در یک طبقه است. برای محاسبه P(y) تعداد زمین لغزش‌های منطقه بر مساحت کل منطقه تقسیم می‌شود. برای محاسبه P(y/Xi) نیز تعداد زمین لغزش‌های هر طبقه از عوامل مؤثر بر مساحت آن طبقه تقسیم می‌شود. وزن بالای صفر بیانگر ارتباط مثبت یک عامل با وقوع زمین لغزش و وزن کمتر از صفر بیانگر ارتباط منفی با وقوع زمین لغزش است (دکل^۶ و سینک^۷، ۲۰۲۵). در نهایت نقشه‌های وزنی مربوط به همه عوامل با هم جمع شده و نقشه نهایی حساسیت پذیری زمین لغزش به دست می‌آید.

مدل رگرسیون لجیستیک

رگرسیون لجیستیک یک مدل آماری چندمتغیره است که بهترین منحنی را برای توصیف همبستگی بین متغیر وابسته، مانند فراوانی زمین لغزش‌ها و ترکیبی از متغیرهای مستقل پیدا می‌کند (ایالو^۸ و یاماگیشی^۹، ۲۰۰۵: ۲۲). برای استفاده از رگرسیون لجیستیک مناطق لغزشی با وزن یک به مفهوم وجود و تعدادی نقطه با وزن صفر به معنی عدم وجود زمین لغزش به صورت تصادفی در کل منطقه در نظر گرفته شد. از ترکیب نقاط فوق نقشه‌ای به دست می‌آید که وزن ۱ در آن بیانگر وجود زمین لغزش و وزن صفر بیانگر عدم وجود زمین لغزش است. در مرحله بعد وزن مربوط به هر یک از نقاط با وزن صفر و یک را از تمامی نقشه‌های عوامل مؤثر استخراج و به نرم‌افزار SPSS منتقل شده و طبق رابطه ۳ وزن مربوط به عوامل مختلف محاسبه شد.

(3)

⁹ Yamagishi⁵ Yin¹ Liao⁶ Dhakal² Carin⁷ Singh³ Sahana⁸ Ayalew⁴ Amponsah

$$\text{Log}\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

که در آن P_i احتمال یک سلول برای وقوع زمین لغزش و X ها، عوامل موثر هستند (چانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). برای هر نقشه وزنی به دست می‌آید که وزن‌های به دست آمده در نقشه‌ها ضرب شده و با جمع وزنی نقشه‌ها، نقشه نهایی حساسیت زمین لغزش به دست آمد. لازم به ذکر است در این روش نقشه‌ها طبقه‌بندی نمی‌شوند و وزن هر فاکتور در نقشه اصلی قبل از طبقه‌بندی ضرب می‌شود.

ارزیابی دقت نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش

در این تحقیق ۵۰ زمین لغزش برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش در طول فرآیند مدل‌سازی استفاده و ۲۶ زمین لغزش برای اعتبارسنجی مدل به کار رفتند. به منظور ارزیابی نقشه‌های تهیه شده، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد (نفسلیوگلو^۲ و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۱۱). سطح زیر منحنی ROC، بیان‌گر مقدار پیش‌بینی سامانه از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (رخداد زمین لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم رخداد زمین لغزش) آن است. طبقه‌بندی میزان سطح زیرمنحنی به صورت عالی (۱-۰/۹)، خیلی خوب (۰/۸-۰/۹)، خوب (۰/۷-۰/۸)، متوسط (۰/۶-۰/۷) و ضعیف (۰/۵-۰/۶) است (راسید^۳ و همکاران، ۲۰۱۶: ۵).

نتایج و بحث

محاسبه تراکم زمین لغزش‌ها

با استفاده از تراکم لغزش‌ها و طبق روابط ۱ و ۲ وزن مربوط به هر طبقه با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات محاسبه شد (جدول ۲).

جدول (۲): تراکم زمین لغزش‌ها در طبقات مختلف عوامل موثر

Table (2): Landslide density in conditioning factors classes

عامل	طبقه	تعداد زمین لغزش‌ها در یک طبقه	مساحت طبقه (Km ²)	نسبت فراوانی	ارزش اطلاعات
ارتفاع	کمتر از ۵۰۰	۸	۱۵۰/۹۸	۱/۱۷۳۹	۰/۱۶۰
	۵۰۰-۱۲۰۰	۱۸	۲۳۷/۴۰	۱/۹۸/۶۷	۰/۵۱۹
	۱۲۰۰-۲۰۰۰	۱۸	۲۵۳/۷۶	۰/۵۷۱۵	۰/۴۵۲
	۲۰۰۰-۲۷۰۰	۶	۲۵۹/۷۹	۰/۵۱۱۷	۰/۶۷۰
	بیشتر از ۲۷۰۰	۰	۲۰۵/۸۱	۰	۱/۱/۴۳۹
شیب	کمتر از ۵	۰	۸۱/۰۸	۰	۱۰/۵۰۸
	۵-۱۵	۹	۱۸۸/۹۷	۱/۰۵۵۱	۰/۰۵۴
	۱۵-۲۵	۱۸	۲۹۴/۱۲	۱/۳۵۵۸	۰/۳۰۴
	۲۵-۴۰	۱۵	۴۲۹/۷۷	۰/۷۷۳۳	۰/۲۵۷

³ Rasyid

² Nefeslioglu

¹ Chang

-۰/۴۴۳	۱/۵۵۷۶	۱۱۳/۷۹	۸	۴۰-۶۳	
-۶/۳۰۷	-۰/۰۰۱۸	۱/۲۱	۰	مسطح	
-۰/۲۰۹	-۰/۸۱۱۱	۳۲۷/۷۸	۱۲	شمال	
-۰/۰۱۶	-۰/۹۸۴۴	۳۱۵/۰۹	۱۴	شرق	جهت شیب
-۰/۱۵۷	۱/۱۶۹۵	۲۴۶/۲۶	۱۳	جنوب	
-۰/۱۱۴	۱/۱۲۱۱	۲۱۷/۳۸	۱۱	غرب	
-۰/۱۳۳	۱/۱۴۲۸	۵۲۳/۴۴	۲۷	کمتر از ۰/۰۱	
-۰/۸۲۲	-۰/۴۳۹۴	۵۰/۴۲	۱	۰/۰۱ تا ۰/۰۱	انحناء سطح
-۰/۰۹۱	-۰/۹۱۳۰	۵۳۳/۸۷	۲۲	بیشتر از ۰/۰۱	
-۰/۰۲۰	۱/۰۱۹۹	۱۳۰/۳۳	۶	کمتر از ۰/۱	
-۰/۰۴۹	۱/۰۵۰۱	۸۴۳/۹۳	۴۰	۰/۱ تا ۰/۱	انحناء نیمرخ
-۰/۴۱۰	-۰/۶۴۴۰	۱۳۳/۴۷	۴	بیشتر از ۰/۱	
-۰/۶۵۴	۱/۹۲۲۴	۱۳۸/۲۹	۱۲	کمتر از ۶۰۰	
-۰/۰۸۶	-۰/۹۱۳۷	۹۶/۶۱	۴	۶۰۰-۷۰۰	
-۰/۳۱۹	۱/۳۷۶۲	۳۸۶/۳۷	۲۴	۷۰۰-۸۵۰	بارش
-۰/۸۰۹	-۰/۴۴۵۳	۳۴۸/۲۹	۷	۸۵۰-۱۰۰۰	
-۰/۷۳۲	-۰/۴۸۱۰	۱۳۸/۱۷	۳	بیشتر از ۱۰۰۰	
-۱۰/۰۳۸	۰	۵۰/۶۸	۰	کشاورزی	
-۰/۱۵۰	۱/۱۶۲۳	۵۳۳/۷۱	۲۸	جنگل	
-۰/۰۰۷	-۰/۹۹۳۲	۴۹۰/۷۴	۲۲	مرتع	کاربری اراضی
-۹/۵۸	-۰/۰۰۰۱	۳۲/۰۷	۰	مسکونی	
-۵/۴۷۲	-۰/۰۰۴۲	۰/۵۳	۰	پهنه آب	
-۰/۲۹۴	-۰/۷۴۵۵	۴۷۵/۵۱	۱۶	کمتر از ۱۰۰۰	
-۰/۰۲۶	۱/۰۲۶۷	۳۸۸/۴۱	۱۸	۱۰۰۰-۲۵۰۰	
-۰/۰۵۶	-۰/۹۴۵۴	۱۸۷/۴۸	۸	۲۵۰۰-۵۰۰۰	فاصله از گسل
۱/۱۴۶	۳/۱۴۶۱	۵۶/۳۳	۸	بیشتر از ۵۰۰	
-۰/۷۵	۲/۱۱۷۰	۳۴۵/۳۶	۳۳	کمتر از ۱۰۰۰	
-۰/۲۴۲	-۰/۷۸۴۷	۲۵۴/۱۱	۹	۱۰۰۰-۲۵۰۰	فاصله از جاده

-۰/۶۵	۰/۵۲۲۱	۲۱۲/۱۸	۵	۲۵۰۰-۴۵۰۰	
-۰/۹۰۲	۰/۴۰۵۵	۱۶۳/۸۴	۳	۴۵۰۰-۷۰۰۰	
-۱۰/۹۹۷	۰	۱۳۲/۲۵	۰	بیشتر از ۷۰۰۰	
۰/۶۳۲	۱/۸۸۲۱	۲۳۵/۴۳	۲۰	کمتر از ۴۰۰	
۰/۱۷۸	۱/۱۹۵۱	۳۱۵/۱۳	۱۷	۴۰۰-۱۰۰۰	
-۰/۴۳۱	۰/۶۴۹۷	۳۷۵/۱۲	۱۱	۱۰۰۰-۲۰۰۰	فاصله از آبراهه
-۱/۸۷۲	۰/۱۵۳۸	۱۴۴/۰۱	۱	۲۰۰۰-۳۲۰۰	
-۰/۵۴۱	۰/۵۸۲۳	۳۸/۰۵	۱	بیشتر از ۳۲۰۰	
۰/۱۴۴	۱/۱۵۵۳	۳۴۵/۱۸	۱۸	A	
-۹/۱۳۹	۰/۰۰۰۱	۲۰/۶۴	۰	B	
۰/۲۳۸	۱/۲۶۸۶	۱۷۴/۶۴	۱۰	C	
-۰/۱۰۴	۰/۹۰۱۰	۳۶۸/۸۴	۱۵	D	
۰/۰۸	۱/۰۸۳۶	۱۰۲/۲۳	۵	E	
-۹/۲۸۳	۰/۰۰۰۱	۲۳/۸۳	۰	F	زمین‌شناسی
-۹/۶۱۶	۰/۰۰۰۱	۳۳/۲۴	۰	G	
-۴/۱۸۱	۰/۰۱۵۳	۰/۱۵	۰	H	
۰/۱۶۰	۱/۰۶۶۷	۲۰/۷۷	۱	I	
۰/۵۱۹	۱/۷۸۱۱	۱۲/۴۳	۱	J	
۰/۴۵۲	۰/۰۰۰۴	۵/۷۸	۰	K	

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود بیشتر زمین‌لغزش‌ها در ارتفاع ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر رخ داده و ارتفاع کمتر و بیشتر از این مقدار خطر کمتری از نظر وقوع زمین‌لغزش داشته است. با افزایش ارتفاع میزان بارش افزایش یافته و توقع می‌رود میزان زمین‌لغزش‌ها نیز افزایش یابد. ولی از یک ارتفاع به بعد از میزان زمین‌لغزش‌ها کاسته می‌شود. در ارتفاعات بالا بارش معمولاً به صورت برف بوده و غالب بودن پدیده یخبندان در بخش بزرگی از سال باعث کندی پدیده خاکزایی می‌شود. معمولاً یخبندان و ذوب مکرر و هم‌چنین وجود پوشش گیاهی موجب خاکزایی می‌شود ولی در ارتفاعات خیلی زیاد که بسیاری از اوقات یخبندان بوده و پوشش گیاهی نیز ضعیف‌تر است پدیده خاکزایی کمتر اتفاق می‌افتد. وجود یخبندان در ارتفاعات خیلی زیاد و در نتیجه کم بودن میزان نفوذ آب کافی برای اشباع سازندها به دلیل یخ‌زدگی سطح خاک و همچنین کاهش دخالت‌های انسانی در طبیعت در ارتفاعات بالا از دلایل کاهش زمین‌لغزش در این ارتفاعات است. به طور کلی ارتفاع عامل مهمی در وقوع زمین‌لغزش بوده و در مطالعات مختلفی از جمله مطالعات چن^۱ و لی^۲ (۲۰۲۰)، هونگ^۳ (۲۰۲۳) و گیو و همکاران (۲۰۲۳) نیز به اهمیت آن در وقوع زمین‌لغزش اشاره شده است. مطالعات مربوط به شیب

³ Hong² Li¹ Chen

نشان داد شیب‌های ۴۰ تا ۶۳ درجه بیش‌ترین وزن خطر زمین‌لغزش را داشته‌اند. شیب‌های ملایم، به خاطر تنش برشی کم‌تر، معمولاً حساسیت کم‌تری به وقوع زمین‌لغزش دارند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۲؛ یلسین^۱ و همکاران، ۲۰۱۱) و با افزایش شیب میزان خطر زمین‌لغزش بیشتر می‌شود. به همین دلیل شیب یک فاکتور کلیدی در مطالعه خطر زمین‌لغزش در نظر گرفته می‌شود (گیو و همکاران، ۲۰۲۳؛ رای و همکاران، ۲۰۲۴؛ شارما^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). شهرستان چالوس دارای اقلیم مرطوب بوده و به دلیل وجود پوشش گیاهی فراوان حتی در شیب‌های زیاد نیز خاک عمیق موجود بوده و شرایط وقوع زمین‌لغزش فراهم است. در بین جهت‌های جغرافیایی، جهت جنوب بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. به طور کلی جهت شیب به دلیل کنترل و ایجاد میکروکلیم در یک منطقه و تاثیر روی دما، میزان بارش، میزان جذب تابش خورشیدی و باد روی فرسایش و زمین‌لغزش موثر است (دای^۳ و همکاران، ۲۰۰۱؛ یوواراج و دولوی، ۲۰۲۳). شیب جنوبی به دلیل دریافت بارش کمتر و تبخیر شدیدتر و در نتیجه پوشش گیاهی ضعیف‌تر بیشتر در معرض وقوع زمین‌لغزش قرار دارد. بررسی ارتباط انحناء سطح و پراکنش زمین‌لغزش‌ها نشان داد طبقه‌های کمتر از ۰/۰۱- و بیشتر از ۰/۰۱ بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. این موضوع نشان می‌دهد شیب‌های محدب و مقعر خطر بیشتری برای وقوع زمین‌لغزش نسبت به شیب‌های یکنواخت دارند. این نتایج با تحقیقات جعفری و همکاران (۲۰۱۴) نیز مطابقت دارد. در بین طبقات انحناء نیمرخ نیز طبقات کمتر از ۱ بیشتر احتمال وقوع زمین‌لغزش را نشان داده است. در منحنی نیمرخ، مقادیر منفی نشان‌دهنده نواحی محدب و مقادیر مثبت نشان‌دهنده نواحی مقعر هستند (فاطمی قدا و همکاران، ۲۰۱۸). در شیب‌های مقعر شرایط برای نفوذ آب بیشتر بوده که منجر به اشباع خاک و وقوع زمین‌لغزش می‌شود. در بین طبقات بارش، طبقه کمتر از ۶۰۰ میلی‌متر بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. مناطقی که بارش کمتری داشته باشد دارای پوشش گیاهی ضعیف‌تر و در نتیجه حساسیت بیشتر نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. همچنین بارش کم در مناطق پایین‌تر بوده که احتمال دخالت انسان در این مناطق بیشتر است. بررسی ارتباط کاربری اراضی و زمین‌لغزش‌ها نشان داد بیشتر زمین‌لغزش‌ها در کاربری جنگل و مرتع اتفاق افتاده است. کاربری جنگل و مرتع معمولاً در شیب‌های زیاد واقع شده‌اند که شرایط برای وقوع زمین‌لغزش فراهم است. در این مناطق هم‌افزایی شیب و کاربری وجود داشته که منجر به وقوع زمین‌لغزش می‌شود. همچنین در این مناطق دخالت‌های انسان تاثیر بیشتری نشان می‌دهد که منجر به تحریک بیشتر زمین‌لغزش‌ها می‌شود. به عنوان مثال ساخت جاده در مناطق با شیب بیشتر، وضعیت توپوگرافی و نیمرخ دامنه را بیشتر تغییر داده و شرایط برای وقوع زمین‌لغزش فراهم می‌شود. به طور کلی گسل‌ها نقش زیادی در وقوع زمین‌لغزش داشته و به همین دلیل در این تحقیق نیز فاصله از گسل به عنوان یک معیار در نظر گرفته شد. بر خلاف انتظار ارتباط زیادی بین گسل‌ها و زمین‌لغزش‌های رخ داده مشاهده نشد. این امر به دلیل غیرفعال بودن گسل‌های منطقه و در نتیجه اثر فاکتورهای دیگر بر وقوع زمین‌لغزش است که نقش گسل‌ها را کم‌رنگ کرده است. در بین طبقات فاصله از جاده، فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متر بیشترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش در منطقه دارد. به طور کلی در مناطق کوهستانی جاده‌سازی از مهم‌ترین عوامل موثر بر ناپایداری دامنه‌ها در نظر گرفته می‌شود (شفیق^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). جاده وضعیت فیزیوگرافی دامنه را تغییر داده و همچنین با افزایش وزن از طریق تردد وسایل نقلیه ناپایداری دامنه را افزایش می‌دهد. جاده‌ها همچنین بر خصوصیات هیدرولوژیک مانند میزان و سرعت رواناب نیز موثر است (محمدی و داودی‌راد، ۲۰۲۴). بررسی تراکم زمین‌لغزش‌ها در اطراف آبراهه‌ها نشان می‌دهد با افزایش فاصله از آبراهه تراکم زمین‌لغزش‌ها نیز کمتر می‌شود. شبکه آبراهه باعث تجمع بیش‌تر رواناب و بویژه رواناب سطحی شده، در نتیجه فرسایش و زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد (بیش و همکاران، ۲۰۲۴). آبراهه‌ها بر اثر فرسایش رودخانه‌ای و سایش دیواره کنار رودخانه باعث به هم خوردن تعادل شیب و در نتیجه ناپایداری دامنه‌های مشرف به رودخانه می‌گردند. در بین سازندهای زمین‌شناسی نیز سنگ‌های متامورفیک، شیست‌های سبز، سنگ آهک، شیل و سنگ‌های بازالتی بیشترین خطر وقوع زمین‌لغزش را از خود نشان داده‌اند. وزن مربوط به این طبقه از سازندهای زمین‌شناسی در مدل نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات به ترتیب ۱/۷۸۱۱ و ۰/۵۱۹ به دست آمد که از سایر طبقات زمین‌شناسی بیشتر است. همان‌طور که بیان شد از سه روش نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات و رگرسیون لجیستیک برای پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در شهرستان چالوس استفاده شد. از

³ Dai
⁴ Shafique

¹ Yalcin
² Sharma

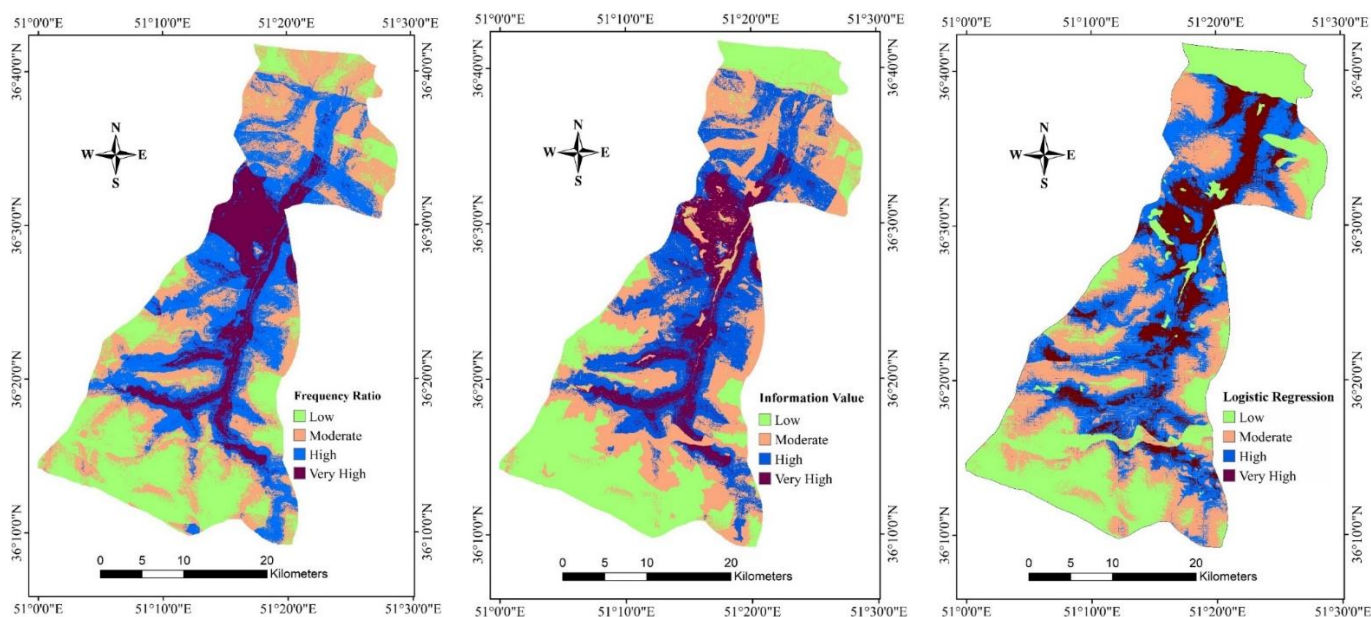
وزن‌های به دست آمده در جدول ۲ و اعمال آنها در طبقات نقشه‌ها و سپس جمع کردن نقشه‌های وزنی نقشه مربوط به نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات تهیه شد. برای رگرسیون لجیستیک نیز از وزن‌های به دست آمده (ضریب B) در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. نقشه‌های تهیه شده با استفاده از روش شکست طبیعی منحنی پراکنش به چهار طبقه تقسیم شدند که نحوه طبقه‌بندی با این روش در بخش عوامل موثر بر ایجاد زمین‌لغزش توضیح داده شد (شکل ۴).

به‌منظور ارزیابی نقشه‌های تهیه شده، از منحنی ROC استفاده شده و سطح زیرمنحنی محاسبه شد. میزان سطح زیرمنحنی برای مدل‌های نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات و رگرسیون لجیستیک به ترتیب ۰/۷۰۵، ۰/۷۲۱ و ۰/۸۱۱ به دست آمد. بر اساس استاندارد مورد استفاده برای دقت مدل‌ها، دو مدل نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات در طبقه خوب و رگرسیون لجیستیک در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. در مدل‌های دو متغیره اولویت و اهمیت عوامل در نظر گرفته نمی‌شود، درحالی‌که در مدل‌های چندمتغیره مانند رگرسیون لجیستیک اهمیت هر یک از عوامل نیز در نظر گرفته می‌شود (زی^۱ و همکاران، ۲۰۲۲: ۸). به همین دلیل در این تحقیق نیز دقت روش رگرسیون لجیستیک بیشتر از مدل‌های دو متغیره است. از دیگر مزایای رگرسیون لجیستیک توانایی آن در استفاده از داده‌های پیوسته و گسسته است (چودوری و همکاران، ۲۰۲۴: ۳). همچنین رگرسیون لجیستیک مدل مناسبی برای بررسی روابط غیرخطی بین زمین‌لغزش‌ها و عوامل موثر است (ژانگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۰۸). دقت مدل‌های نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات نیز در طبقه خوب قرار گرفت. مهم‌ترین مزیت این مدل‌ها سادگی انجام و دقت قابل قبول آنهاست، به طوری‌که در مطالعات مختلفی مورد استفاده گرفته‌اند. به عنوان مثال اسماره (۲۰۲۳) از مدل نسبت فراوانی و AHP برای تحلیل خطر زمین‌لغزش در شمال غربی اتیوپی استفاده نموده و هر دو مدل را برای بررسی حساسیت زمین‌لغزش مناسب معرفی کردند. سینک^۳ و همکاران (۲۰۲۳) مدل نسبت فراوانی را یک مدل مناسب برای پیش‌بینی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در بخشی از هند بیان کردند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) نیز برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش از چند روش مختلف در بخشی از چین استفاده کرده و در نهایت مدل نسبت فراوانی به عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق معرفی شد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که مدل نسبت فراوانی در مطالعه بسیاری از پدیده‌های طبیعی استفاده شده و دقت قابل قبولی را ارائه کرده است که با نتایج این تحقیق نیز مطابقت دارد. مدل ارزش اطلاعات نیز در تحقیقات مختلف استفاده شده و دقت آن مورد تایید قرار گرفته است (چن و همکاران، ۲۰۰۵؛ یلسین، ۲۰۰۸؛ اگبونا^۴ و همکاران، ۲۰۱۱).

محاسبه درصد طبقات حساسیت در مدل رگرسیون لجیستیک نشان می‌دهد مجموع طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد حدود ۴۴ درصد از منطقه را شامل شده که درصد بسیار بالایی است. مشخص کردن طبقه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد به انتخاب مناطق با اولویت بالاتر برای تمرکز بر مدیریت و کنترل زمین‌لغزش کمک می‌کنند. بدون شک برای هرگونه توسعه از قبیل راه‌سازی، معدن، توسعه مناطق کشاورزی و مسکونی باید به پهنه‌های خطر زمین‌لغزش توجه ویژه‌ای شود. توصیه می‌شود تا حد امکان از هرگونه دستکاری در طبیعت بویژه در طبقه با خطر خیلی زیاد زمین‌لغزش جلوگیری شود تا موجب تحریک این مناطق، افزایش وقوع زمین‌لغزش و ایجاد خسارت به زیرساخت‌ها و مناطق مسکونی نشود.

³ Singh
⁴ Ogbonna

¹ XI
² Zhang



شکل (۴): نقشه‌های حساسیت زمین لغزش در شهرستان چالوس
 Figure (4): Landslide susceptibility maps in the Chalus County

نتیجه‌گیری

در میان خطرات طبیعی مختلف، یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، زمین لغزش است که خسارات زیادی به اکولوژی، اموال و جان انسان‌ها وارد می‌کند. بسیاری از مناطق ایران نیز مستعد این پدیده بوده و هر ساله شاهد وقوع زمین لغزش است. شهرستان چالوس یکی از این مناطق است که به دلیل شرایط زمین‌شناسی، اقلیمی و توپوگرافی، به طور مداوم با این پدیده مواجه است. هدف اصلی این تحقیق نیز تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات و رگرسیون لجستیک و انتخاب مدل مناسب برای این کار در شهرستان چالوس بود. بررسی پراکنش زمین لغزش در طبقات مختلف عوامل موثر نشان داد که طبقه ارتفاعی ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، شیب‌های ۴۰ تا ۶۳ درجه، جهت شیب جنوبی، شیب‌های محدب و مقعر، انحناء نیم‌رخ کمتر از ۱، بارش کمتر از ۶۰۰ میلی‌متر، کاربری جنگل و مرتع، فاصله بیشتر از ۵۰۰۰ متر تا گسل‌ها، فاصله کمتر از ۴۰۰ متر تا آبراهه‌ها، فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متر تا جاده‌ها و سازندهای مارن، شیست سبز و آمفیبولیت بیشترین حساسیت به وقوع زمین لغزش را دارند. ارزیابی دقت میزان دقت مدل‌های نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات و رگرسیون لجستیک بیانگر دقت بیشتر مدل رگرسیون لجستیک با دقت ۰/۸۱۱ در این منطقه است. روش رگرسیون لجستیک به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان تاثیر عوامل مختلف دقت بیشتری در منطقه دارد. دقت قابل قبول مدل‌های مورد استفاده بیانگر انتخاب درست عوامل موثر بوده و می‌توان آنها را به عنوان مهم‌ترین عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش در شهرستان چالوس در نظر گرفت. محاسبه مساحت طبقه‌های حساسیت در مدل رگرسیون لجستیک نشان داد که طبقات با خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۳۰۹، ۳۰۵، ۳۳۰ و ۱۶۳ کیلومتر مربع از منطقه را اشغال کرده است. مساحت طبقات حساسیت زیاد و خیلی زیاد حدود ۴۴ درصد از منطقه را اشغال کرده است که نشان می‌دهد که این منطقه به شدت در معرض زمین لغزش قرار دارد. با توجه به شرایط منطقه، تهیه نقشه‌ای دقیق از حساسیت‌پذیری زمین لغزش برای مدیران منابع طبیعی، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان استفاده از زمین ضروری است تا بتوانند اقدامات کاهشی مناسب را توسعه داده و به کار گیرند. در واقع ارزیابی خطر زمین لغزش به‌عنوان ابزاری سودمند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه کمک می‌کند.

تشکر و قدردانی

مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی بوده که توسط دانشگاه سمنان و با تامین مالی توسط شرکت مقاوم‌سازان آشیانه (کارفرما) با شماره قرارداد اصلی ۵۸۸۷ و شماره قرارداد داخلی ۱۴۰۳۴۱ انجام شده است.

References

- Aghayary, L., Asghari Saraskanrood, S., & Zeynali, B. (2024). Identification and zoning of landslide prone areas in Germe city. *Hydrogeomorphology* 11(39), 1-18.
- Ali, S., Biermanns, P., Haider, R., & Reicherter, K. 2019. Landslide susceptibility mapping by using a (GIS) along CPEC (Karakoram Highway), Pakistan." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 19 (5), 999–1022.
- Alsabhan, A.H., Singh, K., Sharma, A., Alam, S., Pandey, D.D., Rahman, S.A.S., Khursheed, A., & Munshi, F.M. (2022). Landslide susceptibility assessment in the Himalayan range based along Kasauli–Parwanoo road corridor using weight of evidence, information value, and frequency ratio. *Journal of King Saud University - Science*, 34(2), 101759.
- Amponsah, P.O., Forson, E.D., Sungzie, P.S., & Akosuah Loh, Y.S. 2023. Groundwater prospectivity modeling over the Akatsi Districts in the Volta Region of Ghana using the frequency ratio technique. *Modeling Earth Systems and Environment*. 9,937–955.
- Asmare, D. (2023). Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern Ethiopia. *Scientific African* 19, e01470.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005). The Application of GIS – based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda–Yahiko Mountains, central Japan. *Geomorphology*, 65, 15-31.
- Bisht, S., Rawat, K.S., & Singh, S.K. (2024). Earth observation data and GIS based landslide susceptibility analysis through frequency ratio model in lesser Himalayan region, India. *Quaternary Science Advances*. 13,100141.
- Chang, Z., Catani, F., Huang, F., Liu, G., Meena, S., Huang, J., & Zhou, C. (2023). Landslide susceptibility prediction using slope unit-based machine learning models considering the heterogeneity of conditioning factors, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 15 (5),1127–1143.
- Chen, J., Yang, Z.F., & Liu, H.Q. 2005. Landslide susceptibility zoning and its probabilistic forecast. *Chin J Rock Mech Eng* 24(13),2392–2396.
- Chowdhury, S., Rahman, N., Sheikh, S., Sayeid, A., Mahmud, K.H., & Hafsa, B. (2024). GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in Chattogram District, Bangladesh. *Heliyon* 10, e23424. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23424>.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Li, J.X.Z.W., & Xu, Z.W. 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environ. Geol.* 40 (3), 381–391.
- Dhakal, D., Singh, K. (2025). A Geospatial Approach to Landslide Susceptibility Mapping of Spiti, India. *Journal of Mining and Environment*. <https://doi.org/10.22044/jme.2024.14684.2779>.
- Esfandyari Darabad, F., Rostami, G., Mostafazadeh, R., & Abedini, M. (2024). Spatial assessment and zoning of landslide risk in Zamkan watershed using support vector machine and logistic regression. *Hydrogeomorphology*, 11(40), 102-123.
- Fatemi Aghda, S.M., Bagheri, V., & Razifard, M. (2018). Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic System and Its Influences on Mainlines in Lashgarak Region, Tehran, Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 915–937.
- Froude, M., & Petley, D. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>.
- Guo, Z., Guo, F., Zhang, U., He, J. Li, G., Yang, Y., & Zhang, X. (2023). A python system for regional landslide susceptibility assessment by integrating machine learning models and its application. *Heliyon*. 9, e21542.
- Hong, H., 2023. Assessing landslide susceptibility based on hybrid Best-first decision tree with ensemble learning model. *Ecological Indicators* 147,109968.

- Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H.R., Rezaeian, J., & Sattarian, A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran, *International Journal of Environmental Science and Technology*. 11, 909-926.
- Li, M., Wang, H., Chen, J., & Zheng, K. (2024). Assessing landslide susceptibility based on the random forest model and multi-source heterogeneous data. *Ecological Indicators* 158:111600. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111600>.
- Liao, X., & Carin, L. (2009). Migratory logistic regression for learning concept drift between two data sets with application to UXO sensing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 47,1454–1466.
- Lima, P., Steger, S., Glade, T., & Mergili, M. (2023). Conventional data-driven landslide susceptibility models may only tell us half of the story: Potential underestimation of landslide impact areas depending on the modeling design. *Geomorphology* 430: 108638.
- Liu, X.D., Xiao, T., Zhang, S.H., Sun, P.H., Liu, L.L., & Peng, Z.W. (2024). Comparative study of sampling strategies for machine learning-based landslide susceptibility assessment. *Stoch Env Res Risk Assess* 38,4935–4957.
- Lombardo, L., Martin, & Mai, P. (2018). Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results". *Eng. Geol* 244, 14–24.
- Mohammady, M., & Davudirad, A. (2024). Gully Erosion Susceptibility Assessment Using Different Machine Learning Algorithms: A Case Study of Shazand Watershed in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*. 29,249–261.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*. 61,221–236.
- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., & Durmaz, S. (2008). Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey). *Geomorphology*. 94,401-418.
- Ogbonna, J.U., Alozie, M., Nkemdirim, V., & Eze, M. (2011). GIS analysis for mapping gully erosion impacts on the geo- formation of the Old Imo State, Nigeria. *ABSU J Environ Sci Technol* 1,48–61.
- Pourghasemi, H.R., Mohammady, M., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena* 97, 71–84.
- Rai, S.C., Pandey, V.K., Sharma, K.K., & Sharma, S. (2024). Landslide susceptibility analysis in the Bhilangana Basin (India) using GIS-based machine learning methods. *Geosystems and Geoenvironment* 3, 100253. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100253>.
- Rasyid, A.R., Bhandary, N.P., & Yatabe, R. (2016). Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain. Indonesia Geoenviron Disasters. 3,19. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0053>.
- Saha, S., Majumdar, P., & Bera, B. (2023). Deep learning and benchmark machine learning based landslide susceptibility nvestigation, arhwal Himalaya (India). 10: 100075. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100075>.
- Sakar, S., Kanungo, D., & Mehrotar, G.S. (1995). Landslide hazard zonation: a case study in Garhwal Himalaya, India. *Mt Res Dev* 15,301–309.
- Sahana, M., Hong, H., Sajjad, H., Liu, J., & Zhu, A. (2018). Assessing deforestation susceptibility to forest ecosystem in Rudraprayag district, India using fragmentation approach and frequency ratio model. *Sci Total Environ*. 627,1264–1275.
- Shafique, M., van der Meijde, M., & Khan, M.A. (2016). A review of the 2005 Kashmir earthquake-induced landslides; from a remote sensing prospective. *J. Asian Earth Sci*. 118, 68–80.
- Sharma, N., Saharia, M., & Ramana, G.V. (2024). High resolution landslide susceptibility mapping using ensemble machine Learning and geospatial big data. *Catena* 235, 107653. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107653>.

- Singh, P., Sur, U., Kumar Rai, P., & Singh, S.K. (2023). Landslide susceptibility prediction using frequency ratio model: a case study of Uttarakhand, Himalaya (India). *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 89,600-612.
- Wang, L.Q., Xiao, T., Liu, S.L., Zhang, W.G., Yang, B.B., & Chen, L.C. (2023). Quantification of model uncertainty and variability for landslide displacement prediction based on Monte Carlo simulation. *Gondwana Res.* 123, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.03.006>.
- Wang, Y., Kang, L., & Wang, J. (2024). Landslide risk assessment combining kernel extreme learning machine and information value modeling-A case study of Jiaxian Country of loess plateau, China. *Heliyon* 10, e37352. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37352>.
- Wubalem, A., Getahun, B., Hailemariam, Y., Mesele, A., Tesfaw, G., Dawit, Z., & Goshe, E. (2022). Landslide susceptibility modeling using the index of entropy and frequency ratio method from nefas-mewcha to weldiya road corridor, northwestern Ethiopia. *Geotech. Geol. Eng* 40 (10), 5249–5278.
- Xi, C. Han, M. Hu, X. Liu, B. He, K. Luo, G. & Cao, X. (2022). Effectiveness of Newmark-based sampling strategy for coseismic landslide susceptibility mapping using deep learning, support vector machine, and logistic regression, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 81 (5), 1–21.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations, *Catena*, 72, 1-12.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey, *Catena* 85 (3), 274–287.
- Yin, K.L. (2004). Landslide hazard prediction and evaluation. China University of Geosciences Press, Wuhan
- Yuvaraj, R.M., & Dolui, B. (2023). Geographical assessment of landslide susceptibility using statistical approach. *Quaternary Science Advances* 11, 100097. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100097>.
- Zhang, A., Zhao, X.W., Zhao, X.Y., Zheng, X.Z., Zeng, M., Huang, X., Wu, P., Jiang, T., Wang, S.C., He, J., & Li, Y.Y. (2024). Comparative study of different machine learning models in landslide susceptibility assessment: A case study of Conghua District, Guangzhou, China. *China Geology* 7, 104–115.