



Assessment of landslide sensitivity and determination of effective factors in its occurrence using the random forest algorithm

(Case study: Glandrood watershed)

Ali Gilanipoor^a, Sadroddin Motevalli^{b*}, Khabat Derafshi^c

^aPh.D. Student in Climatology, Department of Geography, Islamic Azad University of Noor, Noor, Iran

^bAssociate Professor, Department of Geography, Islamic Azad University of Noor, Noor, Iran

^cDepartment of Natural Heritage, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran, Iran

Article Info

Article history

Received: 22 August 2024

Received in revised form:
10 January 2025

Accepted: 20 January 2025

Available online:
21 March 2025

Keywords:

Landslide ,
Susceptibility
Assessment, Random
Forest Algorithm,
Glandrood Watershed

Abstract

The Glandrood watershed, given its geological, tectonic, climatic, hydrological characteristics, topography, and poor vegetation cover, has a landslide potential, and inappropriate human intervention in it leads to the occurrence and intensification of mass movements. In the present study, using a descriptive-analytical and survey approach, an attempt has been made to prepare a sensitivity map for slope instability and landslides in the study area using 11 factors effective in causing slope instability. These factors include: slope, aspect direction, elevation, distance from the road, distance from the fault, distance from the waterway, total annual precipitation, average annual temperature, land use, geology, and slope curvature. Then, a total of 352 landslide points were identified using satellite images and field visits, of which 70% were used for model training and the remaining 30% for validation. Subsequently, the random forest algorithm was coded in the MATLAB R2020a environment to identify areas susceptible to landslides. According to the landslide hazard map in the Glandrood watershed, over 30% of the area is classified as "very high risk," 19% as "high risk," 13% as "medium risk," 19% as "low risk," and 16% of the study area is classified as "very low" landslide risk. The prioritization of effective variables indicates that the highest weight, with a criterion ranking of 0.98, is related to elevation. The analysis of the catena concept, which reflects the relationship between soil patterns and landscape slopes with topography and leads to variability in soil properties and subsequently changes in vegetation cover, can well justify the relationship or influence of the elevation factor on landslide movements in the study area.

*.Corresponding author : Dr. Sadroddin Motevalli E-mail address: sadr_m1970@yahoo.com

How to cite this article: Gilanipoor, A., Motevalli, S., & Derafshi, K. (2025). Assessment of landslide sensitivity and determination of effective factors in its occurrence using the random forest algorithm(Case study: Glandrood watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp. 257-284, DOI: <https://doi.org/10.22067/geoech.2025.89542.1514>



Extended Abstract

Introduction

Landslides are one of the most common natural phenomena that generally occur in mountainous regions around the world. In many cases, they lead to financial and human losses and are recognized as a natural disaster. Continuous monitoring of surface changes and identifying areas prone to slope movements, including landslides—especially in human settlements and infrastructure such as roads and railways—are among the most effective factors in reducing the casualties and financial losses from natural hazards like landslides. Many researchers have attempted to present models for hazard zoning of landslide phenomena, or in other words, to create landslide hazard maps, primarily based on inductive methods, quantitative, and statistical modeling. They have examined various factors influencing the occurrence of landslides and then analyzed how these factors affect the distribution of landslides. By correlating the landslide hazard map with land use maps, it is possible to identify areas at risk, including cities, villages, bridges, factories, and other structures, so that necessary measures can be taken to protect these assets.

Materials and Methods

The study area is located in Mazandaran Province, south of Noor County, within the Glandrood watershed, in the central part of the Alborz Mountain range. It is part of the larger Haraz watershed. The Glandrood watershed, given its geological, tectonic, climatic, and hydrological characteristics, topography, and poor vegetation cover, has a landslide potential, and inappropriate human intervention in it leads to the occurrence and intensification of mass movements. In the present study, using a descriptive-analytical and survey approach, an attempt has been made to prepare a sensitivity map for slope instability and landslides in the study area using 11 factors that are effective in causing slope instability. These factors include: slope, aspect direction, elevation, distance from the road, distance from the fault, distance from the waterway, total annual precipitation, average annual temperature, land use, geology, and slope curvature. Then, a total of 352 landslide points were identified using satellite images and field visits, of which 70% were used for model training and the remaining 30% for validation. Subsequently, the random forest algorithm was coded in the MATLAB R2020a environment to identify areas susceptible to landslides.

Results and Discussion

According to the landslide hazard map in the Glandrood watershed, over 30% of the area is classified as "very high risk," 19% as "high risk," 13% as "medium risk," 19% as "low risk," and 16% of the study area is classified as "very low risk" for landslides. The prioritization of effective variables indicates that the highest weight, with a criterion ranking of 0.98, is related to elevation. The analysis of the catena concept, which reflects the relationship between soil patterns and landscape slopes with topography and leads to variability in soil properties and subsequently changes in vegetation cover, can well justify the relationship or influence of the elevation factor on landslide movements in the study area. The study of slope movements in the examined watershed indicates that this area is prone to landslides due to natural conditions such as fault structures,

steep slopes, humid climate, and sensitive and non-resistant soil. Human intervention in this area leads to the creation and intensification of these movements.

Conclusion

Identifying landslide-prone areas and evaluating landslide susceptibility is crucial for avoiding these areas and implementing preventive and control methods. One of the main actions in this regard is the preparation of landslide hazard susceptibility maps. Planners and decision-makers can use these maps in various fields such as soil and natural resource conservation management, infrastructure and tourism planning, land allocation for urban and rural development, environmental planning, and determining the routes for roads and power transmission lines. Additionally, determining the impact and importance of each variable on the occurrence of slope movements can be the next step in reducing and controlling these movements in the study area. Modeling using the random forest algorithm based on the variables affecting slope movements in the Glandrood watershed indicates that the largest area of this watershed falls within the classes with very high and high landslide susceptibility. The analysis of the relationship between landslide occurrence and influencing factors shows that elevation is the most significant factor affecting this phenomenon in the study area. To justify the impact of elevation as the most important factor, the relationship between vegetation density and elevation in the Glandrood watershed can be mentioned.



ارزیابی حساسیت زمین لغزش و تعیین عوامل مؤثر در وقوع آن با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلندرد)

علی گیلانی پور^۱،  صدرالدین متولی^{۲*}،  خه بات درفش^۳

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، واحد نور دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

^۲ دانشیار گروه جغرافیا، واحد نور دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

^۳ هیأت علمی گروه میراث طبیعی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	پژوهشگران بسیاری سعی نموده‌اند که مدل‌هایی برای ارزیابی حساسیت خطر زمین لغزش ارائه داده و به عبارت دیگر، به نقشه پهنه‌بندی لغزش‌ها برسند که بیش‌تر بر اساس روش استقرار و مدل‌سازی‌های کمی و آماری بوده است. به این صورت که عوامل مختلف مؤثر در وقوع زمین لغزش را بررسی نموده و سپس چگونگی تأثیر آن‌ها را در پراکندگی لغزش‌ها تحلیل کرده‌اند. حوضه آبخیز گلندرد با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی، شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی و پوشش گیاهی فقیر، دارای پتانسیل لغزشی بوده و دخالت غیراصولی انسان در آن باعث وقوع و تشدید حرکات توده‌ای می‌شود. در پژوهش حاضر با رویکردی توصیفی-تحلیلی و پیمایشی، به منظور تهیه نقشه حساسیت به ناپایداری دامنه‌ای و لغزش‌های حوضه مطالعاتی از ۱۱ فاکتور مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای و الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شده است. این فاکتورها عبارت است از: شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، مجموع بارندگی سالانه، میانگین دمای سالانه، کاربری زمین، زمین‌شناسی و انحناء دامنه‌ها. تعداد ۳۵۲ نقطه لغزشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی مشخص شدند که از این تعداد، ۷۰ درصد برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقیمانده آن برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، از کد نویسی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱	
کلمات کلیدی:	
لغزش زمین	
ارزیابی حساسیت لغزش زمین	
الگوریتم جنگل تصادفی	
حوضه آبخیز گلندرد	

الگوریتم جنگل تصادفی در محیط MATLAB R2020a برای شناسایی پهنه‌های مستعد به حرکات لغزشی استفاده شد. با توجه به نقشه خطرپذیری زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرد، بیش از ۳۰ درصد منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد، ۱۹ درصد در کلاس خطر زیاد، ۱۳ درصد در کلاس خطر متوسط، ۱۹ درصد در کلاس خطر کم و ۱۶ درصد از حوضه مطالعاتی نیز در کلاس خطر زمین لغزش خیلی کم قرار دارد. اولویت‌بندی متغیرهای مؤثر بیان‌گر آن است که بیش‌ترین وزن با رتبه معیار ۰/۹۸ مربوط به ارتفاع می‌باشد. تحلیل مفهوم کاتنا که بیان‌گر ارتباط میان الگو و چشم‌انداز خاک بر روی شیب دامنه با توپوگرافی است و منجر به تغییرپذیری خصوصیات خاک و به‌دنبال آن تغییر در پوشش گیاهی می‌شود، می‌تواند توجیه ارتباط یا اثرگذاری عامل ارتفاع بر حرکات لغزشی منطقه مطالعاتی باشد. مطالعه دقیق موضوع دلایل وقوع حرکت توده‌ای در منطقه گلندرد و راه‌های پیش‌گیری از خسارات ناشی از آن توسط متخصصین ذی‌ربط، مهم‌ترین اقدام برای کاهش خسارت‌های ناشی از آن است.

مقدمه

یکی از شایع‌ترین پدیده‌های طبیعی که عموماً در نقاط کوهستانی جهان رخ می‌دهد، زمین لغزش است که در بسیاری موارد منجر به خسارات مالی و جانی گشته و به‌عنوان بلای طبیعی شناخته می‌شود. نظارت مستمر تغییرات سطح زمین و شناسایی مناطق مستعد حرکات دامنه‌ای، از جمله زمین لغزش، خصوصاً در محدوده سکونتگاه‌های انسانی و زیرساخت‌های ارتباطی مانند جاده و خطوط ریلی، از مؤثرترین عوامل کاهش تلفات جانی و مالی مخاطرات طبیعی مثل زمین لغزش می‌باشد (Abedini & Mohammadzadeh Shisha, 2015; Aleotti & Chowdhury, 1999; Derafshi, Motevalli, Hosseinzadeh & Esmaili, 2013; Garan, 2022; Motevalli, Hosseinzadeh, Esmaili & Derafshi, 2015).

زمین لغزش‌ها یکی از انواع ناپایداری دامنه‌ای هستند که هر سال خسارت مالی و تلفات جانی فراوانی بر زندگی انسان‌ها وارد می‌کنند. زمین لغزش به‌عنوان یکی از فرآیندهای محیط طبیعی، دارای مکانیزمی پیچیده بوده و به عوامل بسیاری وابسته می‌باشد. این عوامل که درونی و بیرونی هستند، می‌توانند در وقوع یا عدم وقوع ناپایداری مؤثر باشند. بررسی و ارزیابی خطر زمین لغزش، همکاری گوناگون رشته‌های علمی چون ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، سنجش از دور، دینامیک سیالات و ویژگی‌های اجتماعی را مورد تأکید قرار می‌دهد و همچنین لزوم درک فرایند فیزیکی حاکم بر لغزش و بالا بردن سطح آگاهی عمومی از خطرات لغزش و مدیریت صحیح برای کاهش خطر را گوش‌زد می‌کند (Karam & Tourani, 2013; Motevalli et al., 2015).

با توسعه سریع ساخت‌وسازهای مهندسی و افزایش فراوانی رخداد‌های شدید آب‌وهوایی، خطر زمین لغزش شدیدتر می‌شود و به‌طور بالقوه باعث تلفات و از دست دادن مقادیر زیادی از اموال در سراسر جهان می‌شود (Zeng et al., 2023). زمین لغزش می‌تواند اثرات اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی داشته باشد

و منجر به تلفات، جراحات و آسیب به اموال و زیرساخت‌ها شود (Zhao & Lu, 2018). پیش‌گیری از وقوع چنین مخاطره‌ای غیر ممکن است؛ با این حال، کاهش خطرات آن از طریق برنامه‌ریزی آگاهانه، امکان‌پذیر است. در خصوص توزیع و پراکندگی لغزش‌ها و علل وقوع آن‌ها، مطالعات جامعی، هم در سطح بین‌المللی و هم در سطح داخلی، صورت گرفته است. در این زمینه مطالعاتی، پژوهشگران بسیاری سعی نموده‌اند که مدل‌هایی برای ارزیابی حساسیت خطر این پدیده ارائه داده و به عبارت دیگر، به نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمی‌لغزش‌ها برسند که بیش‌تر بر اساس روش استقرایی و مدل‌سازی‌های کمی و آماری بوده است. به این‌صورت که عوامل مختلف مؤثر در وقوع زمین‌لغزش را بررسی نموده و سپس چگونگی تأثیر آن‌ها را در پراکندگی لغزش‌ها تحلیل کرده‌اند. با تطبیق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با نقشه‌های کاربری اراضی می‌توان مناطق تحت خطر شامل شهرها، روستاها، پل‌ها، کارخانه‌ها، و غیره را شناسایی کرد تا اقدامات لازم برای حفاظت از این سرمایه‌ها انجام پذیرد. سه رویکرد اصلی در ارزیابی خطر زمین‌لغزش به‌صورت کیفی، نیمه کمی و کمی وجود دارد؛ روش‌های کمی بر پایه منطق ریاضی از همبستگی بین فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش می‌باشند که شامل رگرسیون تحلیلی دو متغیره، چند متغیره و لجستیک یا منطق فازی و شبکه مصنوعی هستند (Karimi Sangchini, Awnagh & Saedaldin, 2012).

تاکنون تکنیک‌های متعددی مانند استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی^۱، روش ژئودزی^۲ و تاکئومتری^۳، دوربین‌های نقشه‌برداری، اسکن لیزری و لیدار^۴ برای پایش تغییرات سطح زمین ارائه شده است (Abedini & Mohammadzadeh Shisha garan, 2022; Hooper, Zebker, Segall & Kampes, 2004). روش‌های کمی و کیفی زیادی هم برای انجام فرآیند ایجاد نقشه حساسیت زمین‌لغزش، از جمله تحلیل سلسله مراتبی^۵، آماری دو متغیره، رگرسیون لجستیک^۶، منطق فازی^۷ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۸، به کار گرفته شده است (Talebi, Goudarzi & Pourghasemi, Abedini & Mohammadzadeh Shisha garan, 2022; Metternicht, Hurni & Gogu, 2005).

تکنیک‌های داده‌کاوی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، همانند الگوریتم جنگل تصادفی^۹، به دلیل دقت بالاتر نسبت به مدل‌های پیش گفته، از جمله روش‌هایی است که در سال‌های اخیر به‌منظور ارزیابی خطر زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته است (Youssef, Pourghasemi, Pourtaghi & Al-Katheeri, 2015; Rahmati, Pourghasemi & Melesse, 2016; Talebi et al., 2018). مدل‌های یادگیری ماشین به‌لحاظ به‌کارگیری الگوریتم‌های تخمین توزیع، طبیعت داده‌محور و تکرار بالای فرآیند مدل‌سازی، توانایی بالایی در

1 Global Position System

2 Geodesy

3 Tacheometry

4 LiDAR

5 AHP

6 Logistic Regression

7 Fuzzy Logic

8 Machine Learning

9 Random Forest

شناسایی رفتار وقوع پدیده زمین لغزش داشته و در پژوهش‌های متعددی، برتری نسبی خود را نسبت به مدل‌های آماری دو متغیره و چند متغیره اثبات نموده‌اند (Rott, Scheuchl, Siegel & Grasemann, 1999; Berardino, Fornaro, Lanari & Sansosti, 2002; Mora, Mallorqui & Broquetas, 2003; Hilley, Bürgmann, Ferretti, Novali & Rocca, 2004; Strozzi et al., 2005; Lauknes et al., 2010; Intrieri, Gigli, Mugnai, Fanti & Casagli, 2012; Akbarimehr, Motagh & Haghshenas-Haghighi, 2013; Carlà, Intrieri, Di Traglia & Casagli, 2016; Carlà, Intrieri, Farina & Casagli, 2017; Di Martire et al., 2018; Sabeti et al., 2019; Abedini & Mohammadzadeh Shisha garan, 2022).

الگوریتم جنگل تصادفی یکی از روش‌های مدل‌سازی درخت تصمیم است که از تلفیق نتیجه‌های به‌دست آمده از درخت‌های مختلف، ارتباط میان رخداد زمین لغزش و عامل‌های محیطی را برآورد می‌کند. از طرف دیگر، این روش داده‌کاوی عامل‌های مؤثر را اولویت‌بندی و اهمیت آن‌ها را تعیین می‌کند. دقت این روش در مقایسه با مدل‌های آماری و سنتی که نیاز به برخی فرضیه‌ها از جمله به‌هنگار بودن داده‌ها و طبقه‌بندی عامل‌ها دارند، بسیار بیش‌تر است (Rahmati et al., 2016; Garosi et al., Naghabi & Pourghasemi, 2015; Arabameri, Pradhan, Pourghasemi, Rezaei & Kerle, 2018; Amiri, Pourghasemi, Ghanbariana 2018; Rahmati et al., 2019; Davoudi Moghaddam, Pourghasemi & Rahmati, 2019).

شناخت دقیق مکانیسم و نحوه عملکرد پارامترهای مؤثر بر گستره و ویژگی‌های فیزیکی زمین لغزش‌های حوضه آبخیز گلندرد بسیار حائز اهمیت است. با توجه به نتایج پژوهش‌های بررسی شده و اهمیت موضوع تحلیلی بر میزان اثرگذاری عوامل وقوع زمین لغزش این حوضه، از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شده است. شناسایی پهنه‌های مستعد به حرکات لغزشی در حوضه مورد بررسی، می‌تواند گامی مؤثر در راستای کاهش اثرات مخرب وقوع این پدیده باشد و نقشه پهنه‌بندی حساسیت، راهنمایی برای مدیریت جامع این مخاطره طبیعی خواهد بود.

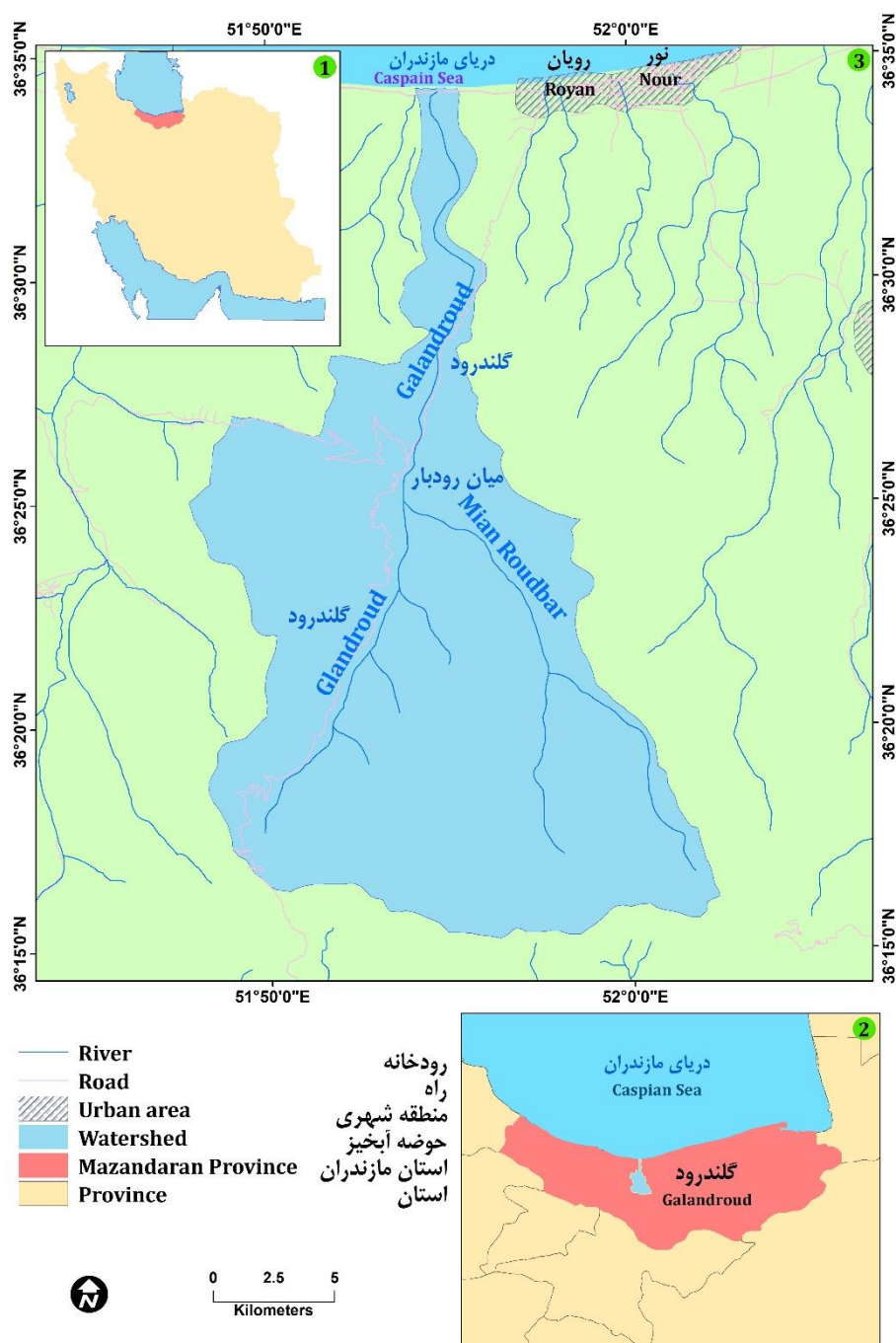
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان مازندران و جنوب شهرستان نور، حوضه آبخیز گلندرد، در بخش مرکزی سلسله جبال البرز قرار دارد که بخشی از حوضه بزرگ آبخیز هراز می‌باشد. مساحت منطقه مورد مطالعه ۳۵۱ کیلومتر مربع است و دارای مختصات عرض شمالی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه و طول شرقی ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه و ۴۷ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۰۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه قرار گرفته است (شکل ۱). در بالادست منطقه مورد مطالعه روستاهای کپ، کالج، دونکوه، نشو، پس‌پرس، خورتاب رودبار، هلوپشته، بومک، لوس و ونگزیار قرار گرفته‌اند. ارتفاع بیشینه و کمینه حوضه به‌ترتیب ۳۵۷۳ متر و ۶۰ متر است. ریزش‌های جوی در منطقه، بیش‌تر تحت تأثیر توده‌های هوای پرفشار سیبری و مدیترانه‌ای است که از نواحی شمال و شمال شرق و یا سمت غرب و شمال غرب، منطقه را مورد تهاجم قرار می‌دهند (Alijani, 2003).

اقلیم ناحیه به روش آمبرژه از نوع مرطوب سرد است. میزان ریزش‌های جوی سالیانه منطقه مورد مطالعه بر اساس دو ایستگاه هواشناسی نوشهر و چمستان، به‌طور متوسط حدود ۶۵۱ میلی‌متر بوده است که

بیشترین مقادیر آن به آبان ماه و فصل پاییز و کمترین مقادیر آن نیز به تیر ماه و فصل تابستان تعلق دارد. میانگین بارش حوضه با استفاده از منحنی‌های هم‌بارش ۵۱۰ میلی‌متر محاسبه شده که در قسمت‌های شمالی حوضه بیش از ۹۰۰ میلی‌متر و در قسمت‌های جنوبی آن به ۲۵۰ میلی‌متر می‌رسد. به لحاظ زمین‌شناسی، چینه‌شناسی سازندهای حوضه عمدتاً رسوبی بوده و از دوران مزوزوئیک (تریاس) تا سنوزوئیک (نئوژن-کواترن) در آن وجود دارد. تقریباً ۷۶ درصد مساحت حوضه از سازند شمشک (ژوراسیک) تشکیل شده است که لیتولوژی آن از شیل، ماسه‌سنگ، رگه‌های زغالی و کنگلومرا همراه با آبرفت‌های رودخانه‌ای است. بقیه مساحت حوضه به ترتیب از سنگ‌های دوران کرتاسه، تریاس و سنوزوئیک تشکیل شده و شامل انواع سنگ آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ، شیل و مارن می‌شود. از لحاظ کاربری اراضی، بخش اعظم منطقه مورد مطالعه را ناحیه جنگلی و مرتعی تشکیل داده و دامداری گاو و گوسفند در سراسر منطقه رایج است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز گلندرود در استان مازندران

Fig. 1. Geographical location of Glandroud watershed in Mazandaran Province

از کل مساحت حوزه آبریز گلندرود، تقریباً ۵۵ درصد زیر پوشش جنگل، ۳۵ درصد تحت پوشش مرتع و ۱۰ درصد در محدوده کاربری‌های انسانی (آبادی، اراضی کشاورزی و ...) قرار دارد. به‌لحاظ خاک‌شناسی بخش

اعظم منطقه دارای بافت رسی - سیلتی و رسی است. نوع سازند زمین‌شناسی یکی از انواع عوامل طبیعی مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش است و در منطقه مورد مطالعه، سازند شمشک حاوی خاک‌های شیل بوده که کانی‌های حساس رسی چون مونت موریلونیت و سایر کانی‌های موجود در خاک‌های رسی، می‌توانند با جذب آب متورم شده و پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش دهند. وجود دو گسل در ضلع شمالی و جنوبی سازنده شمشک، گاهی با حرکات خفیف خود، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش می‌دهند. آب زیرزمینی، توپوگرافی (شامل ارتفاع، میزان شیب و جهت دامنه)، یخبندان، بارش باران و برف، نوع پوشش گیاهی و رودخانه گلندرود هم در وقوع زمین‌لغزش اثرگذار است. علاوه بر عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی در منطقه گلندرود نیز عامل مهمی در وقوع زمین‌لغزش است؛ فعالیت‌هایی همچون احداث شهرک معدن گلندرود، افزایش ساخت و ساز در آبادی گلندرود، تخریب پوشش گیاهی در منطقه، نوسان سطح آب زیرزمینی، جاده‌سازی به روش نامناسب، فعالیت‌های معدنی، تغییر کاربری اراضی (شکل ۲).



شکل ۲- وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز گلندرود با مکانیسم چرخشی پسرونده

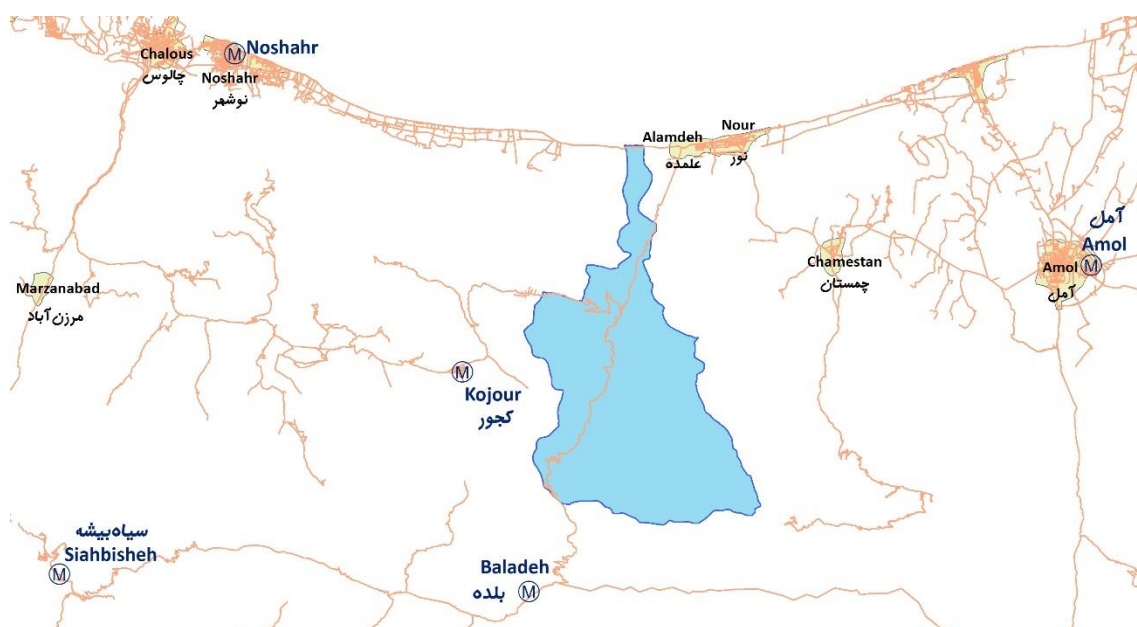
Fig. 2. Occurrence of landslides in Glandrood with a retrogressive rotational mechanism

روش انجام پژوهش

روش‌شناسی

پژوهش حاضر با رویکرد توصیفی - تحلیلی پیمایشی، به‌منظور تهیه نقشه حساسیت به ناپایداری دامنه‌ای و زمین‌لغزش‌ها انجام شده که در آن از ۱۱ فاکتور مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای استفاده شده است. این فاکتورها عبارت است از: شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، مجموع بارندگی

سالانه، میانگین دمای سالانه، کاربری زمین، زمین‌شناسی و انحناء دامنه‌ها. برای تهیه این لایه‌ها از داده‌های اولیه از جمله نقشه توپوگرافی ۱:۵۰,۰۰۰ شیت ۶۴۶۳ نور و برای تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و نقشه گسل‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ شیت آمل و ۱:۱۰۰,۰۰۰ شیت‌های نور- آمل انتشار یافته توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شده است. از مدل رقومی ارتفاعی ASTER با تفکیک زمینی ۳۰ متر برای تهیه فاکتورهای چون ارتفاع، شیب، جهت دامنه، و انحناء دامنه‌ها استفاده شده است. در ابتدا، نقاط لغزشی با تعداد ۳۵۲ نقطه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و Google Earth و بازدیدهای میدانی مشخص شدند. از این تعداد، ۷۰ درصد نقاط برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقیمانده آن برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است. رقومی‌سازی نقشه‌های پایه و توابع با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.7 انجام گرفته است. از تابع فاصله اقلیدوسی برای تهیه و آماده‌سازی فاکتورهای زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه استفاده شده است. برای تهیه نقشه مجموع بارندگی سالانه از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه (نوشهر، سیاه‌بیشه، بلده، کجور و آمل) در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳، با استفاده از توابع ریاضی درونیابی استفاده شده است (شکل ۳). فاکتور کاربری اراضی با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال (میزان دقت کل ۰/۸۲ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۹) از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 7 (۲۰۲۰) و آرشیو Google Earth و همچنین لایه اطلاعاتی کاربری اراضی استان مازندران (اداره کل منابع طبیعی) آماده شده است.

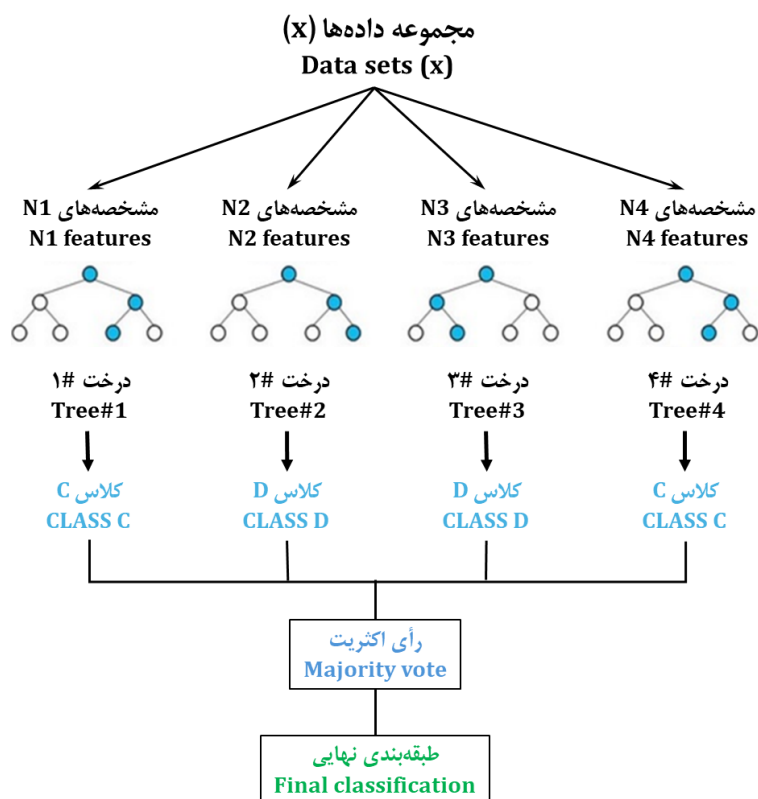


شکل ۳- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده شده در این پژوهش

Fig. 3. Geographical location of the synoptic stations used in this study

الگوریتم جنگل تصادفی (RF)

این الگوریتم در واقع یک الحاقی از مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی است که اولین بار توسط Berman در سال ۲۰۰۱ ایجاد و توسعه داده شده است. جنگل تصادفی یک نوع مدرن از درخت پایه است که شامل انبوهی از درخت‌های کلاس‌بندی و رگرسیون می‌باشد (Ebrahimkhani, Afzali & Shokoohi, 2011). الگوریتم جنگل تصادفی برای مشخص کردن این است که هر متغیر چه نقشی در پیش‌بینی پاسخ دارد. جنگل تصادفی شامل سه پارامتر تعریف شده توسط کاربر است: (۱) تعداد متغیرهای مورد استفاده در ساخت هر درخت که قدرت هر درخت مستقل را بیان می‌کند؛ (۲) تعداد درختان در جنگل تصادفی و (۳) حداقل تعداد گره‌های انتهایی (Peters, Verhoest, Samson, Boeckx & De Baets, 2008). قدرت پیش‌بینی جنگل تصادفی با افزایش قدرت درختان مستقل و کاهش همبستگی بین آن‌ها افزایش می‌یابد (Lieb, Glaser & Huwe, 2012). الگوریتم جنگل تصادفی از تمام داده‌های موجود برای رویاندن درخت استفاده نمی‌کند؛ بلکه از ۶۶ درصد داده‌ها استفاده می‌کند که به آن نمونه Bootstrap گفته می‌شود این الگوریتم، برای تکمیل ایده‌های جنگل تصادفی و افزایش تنوع و پراکندگی در آن طراحی شده است. ۳۳ درصد از داده‌های باقیمانده نیز برای ارزیابی درخت برازش شده، استفاده می‌شود. این فرآیند چندین بار تکرار و میانگین تمام مقادیر پیش‌بینی شده، به‌عنوان پیش‌بینی نهایی الگوریتم استفاده می‌شود. تعداد درختان بهینه به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که اولاً کم‌ترین خطای آموزش در مدل‌سازی به‌دست آید؛ ثانیاً تعداد درختان نباید آن قدر زیاد شود که تجزیه و تحلیل متغیرها نیازمند زمان و محاسبات کامپیوتری زیادی باشد (Talebi et al., 2018). یکی از پارامترهای اصلی در جریان مدل جنگل تصادفی، پیش‌بینی کننده K (متغیر مستقل) در هر گره جهت پیش‌بینی وابسته (پاسخ) است. مجموعه داده‌ها با D نمایش داده می‌شود (رابطه ۱) و B درخت تصادفی با ایجاد B داده جدید از D ایجاد می‌شود. N نمونه را با جایگزینی از داده D انتخاب می‌کند و این نمونه‌ها را در مجموعه داده D_b قرار می‌دهد (رابطه ۱). از آنجا که نمونه‌گیری با جایگزینی صورت می‌گیرد، یک نمونه ممکن است چندین بار انتخاب شود (شکل ۴).



شکل ۴- نمودار مراحل انتخاب درخت‌ها در مدل الگوریتم جنگل تصادفی

Fig. 4. Chart of tree selection stages in the random forest algorithm model

$$D = (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n) \quad (1)$$

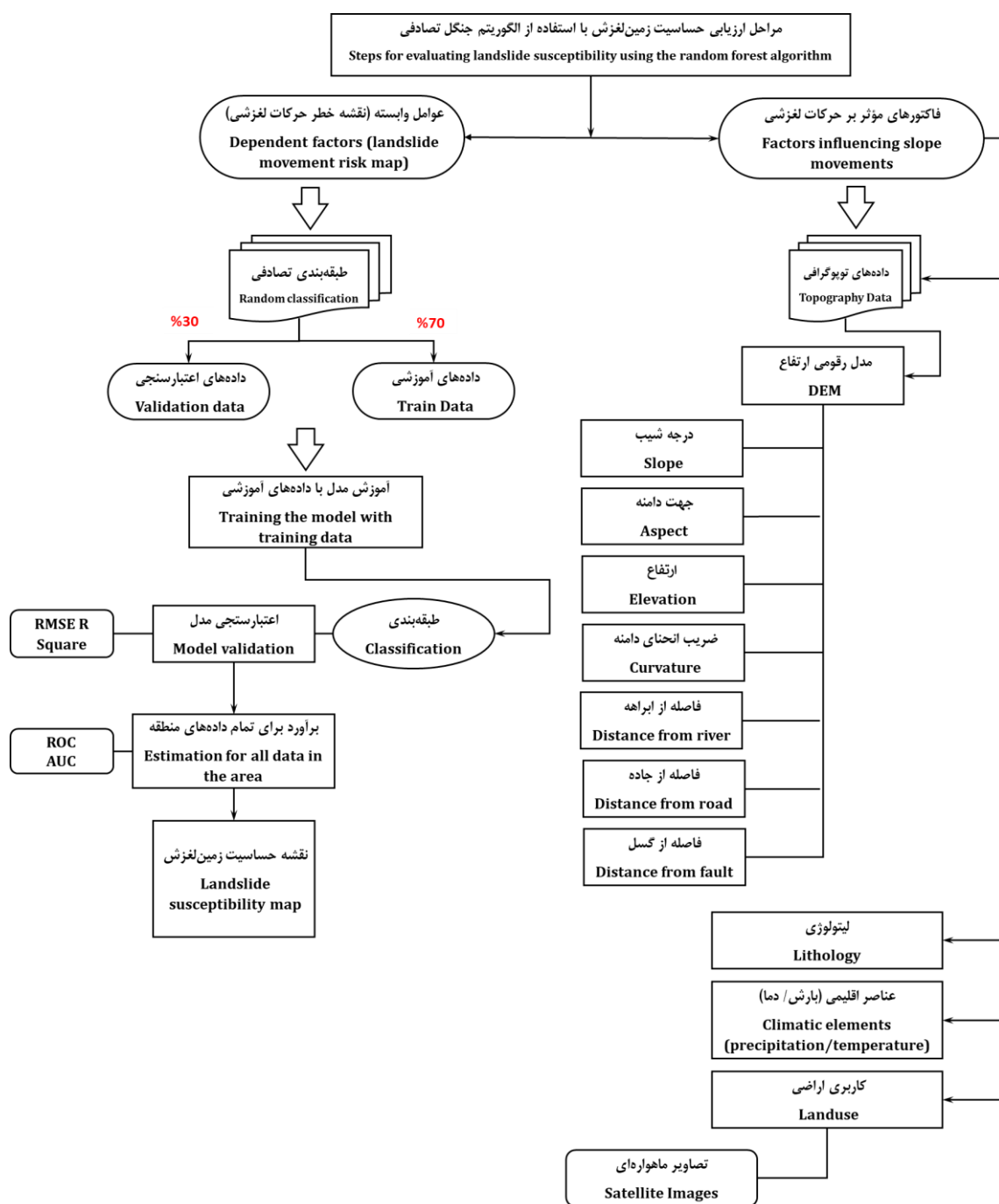
از جمله مزایای این الگوریتم می‌توان به مواردی اشاره نمود که از مهم‌ترین آن‌ها جلوگیری از بیش برازش مدل می‌باشد. استفاده از میانگین کاهش دقت در مقایسه با شاخص اهمیت جینی در تعیین اولویت عوامل مؤثر، بهتر و پایدارتر است؛ به‌ویژه در شرایطی که بین فاکتورهای محیطی ارتباط وجود دارد (Nicodemus, 2011). بر این اساس، در پژوهش حاضر، از الگوریتم جنگل تصادفی برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرد استفاده شده است.

برای این کار، پس از تهیه و آماده‌سازی ۱۱ فاکتور مستقل و داده‌های مربوط به حرکات لغزشی، از کد نویسی الگوریتم جنگل تصادفی در محیط MATLAB R2020a استفاده شده است. این فرآیند شامل پیش‌پردازش داده‌ها، پیکربندی پارامترهای الگوریتم، آموزش مدل و ارزیابی عملکرد آن است. هرچند ساختار داده‌کاوی، به منبع داده‌ها مرتبط می‌گردد، اما تا قبل از پردازش، شامل هیچ داده‌ای نمی‌شود و در هنگام پردازش نمودن ساختار داده‌کاوری، اطلاعات گردآوری شده برای آنالیز آماده می‌شود. پیش از پردازش ساختار و مدل، مدل داده‌کاوی نیز تنها یک ظرفیت خالی محسوب می‌شود که مشخص‌کننده ستون‌های مربوط به داده‌های ورودی یا صفات پیش‌بینی شده و پارامترهایی می‌باشد که نحوه پردازش داده‌ها توسط الگوریتم را

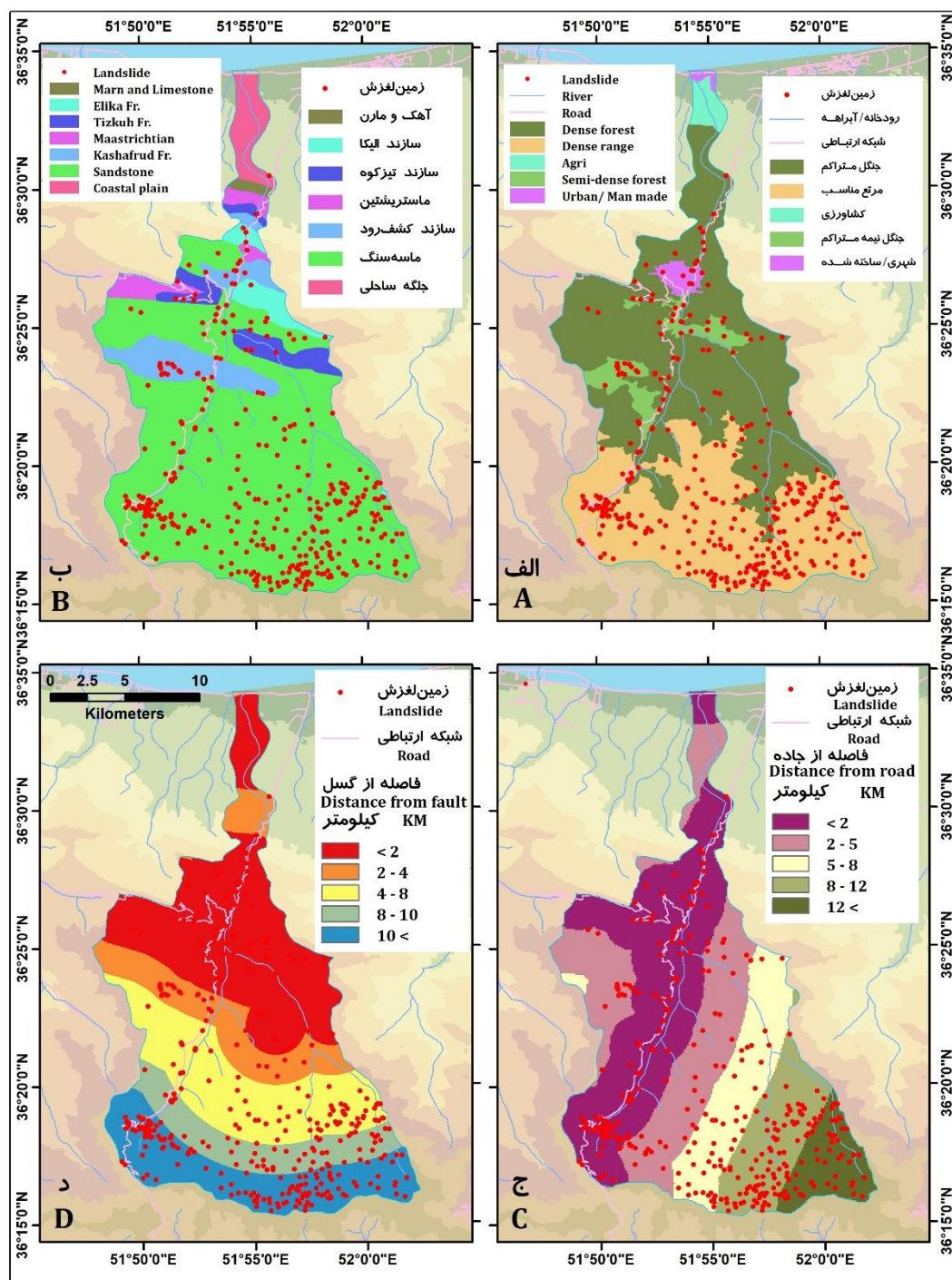
معین می‌کند. در رابطه نوشته شده، ابتدا مدل بهینه با میزان خطا و عملکرد مناسب و قابل قبولی طراحی شده و پس از برآورد، برای تمامی محدوده انجام گرفته است. با توجه به شکل ۵ در روند مدل‌سازی جنگل تصادفی، پس از ساخت و آموزش مدل از دو مرحله ارزیابی استفاده شده است. بخش اول مربوط به مرحله ساخت بوده که با معیارهای مجذور میانگین مربعات خطای اندازه‌گیری، تهیه و ضریب تعیین مشخص گردیده است؛ بخش دوم مربوط به ارزیابی نقشه نهایی خطرپذیری زمین‌لغزش با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های اعتبارسنجی است که در ابتدای کار کنار گذاشته شده بود.

به‌منظور دستیابی به مدل منطقی و مناسب برای حوضه آبریز گلندرود، از منحنی ROC استفاده شده است. منحنی ROC از کامل‌ترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیین، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها می‌باشد که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند.

در این ارزیابی به روش منحنی ROC، هر چه سطح منحنی بیش‌تر باشد، دقت مدل بیش‌تر است که میزان آن بین ۰/۵ تا ۱ در تغییر است. به‌طور کلی، تقسیم‌بندی ۰/۹-۱ عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵ تا ۰/۶ ضعیف را برای آن ارائه کرده‌اند. برای رسم منحنی ROC در الگوریتم جنگل تصادفی، قبل از کلاس بندی نقشه وزن نهایی، نقاط لغزشی را که برای ارزیابی در نظر گرفته روی نقشه قرار داده و وزنی که در هر نقطه بدست آمده را (منظور کدهای ۱ و ۰) به نرم‌افزار MATLAB R2020a انتقال داده و با استفاده از کد دستوری، سطح زیر منحنی دقت مدل به‌دست آمده است. منحنی عملکرد نسبی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در پیش‌بینی و تعیین دقت مدل‌سازی می‌باشد؛ در حقیقت یک نمایش گرافیکی از تضمین درست وقوع یا عدم وقوع زمین‌لغزش‌ها محسوب می‌شود. سطح زیر منحنی بیان‌گر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده و عدم وقوع رخداد آن است. چنانچه مدلی نتواند وقوع پدیده‌ای را بهتر از دیدگاه احتمالی و یا تصادفی تخمین زند، مقدار زیر نمودار ۰/۵ خواهد بود که کم‌ترین دقت را دارد. در حالی که سطح نمودار برابر با ۱ باشد، مدل تهیه شده بیش‌ترین دقت را داراست. شکل‌های ۶، ۷ و ۸، نقشه‌های عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل‌سازی آن را نشان می‌دهد.



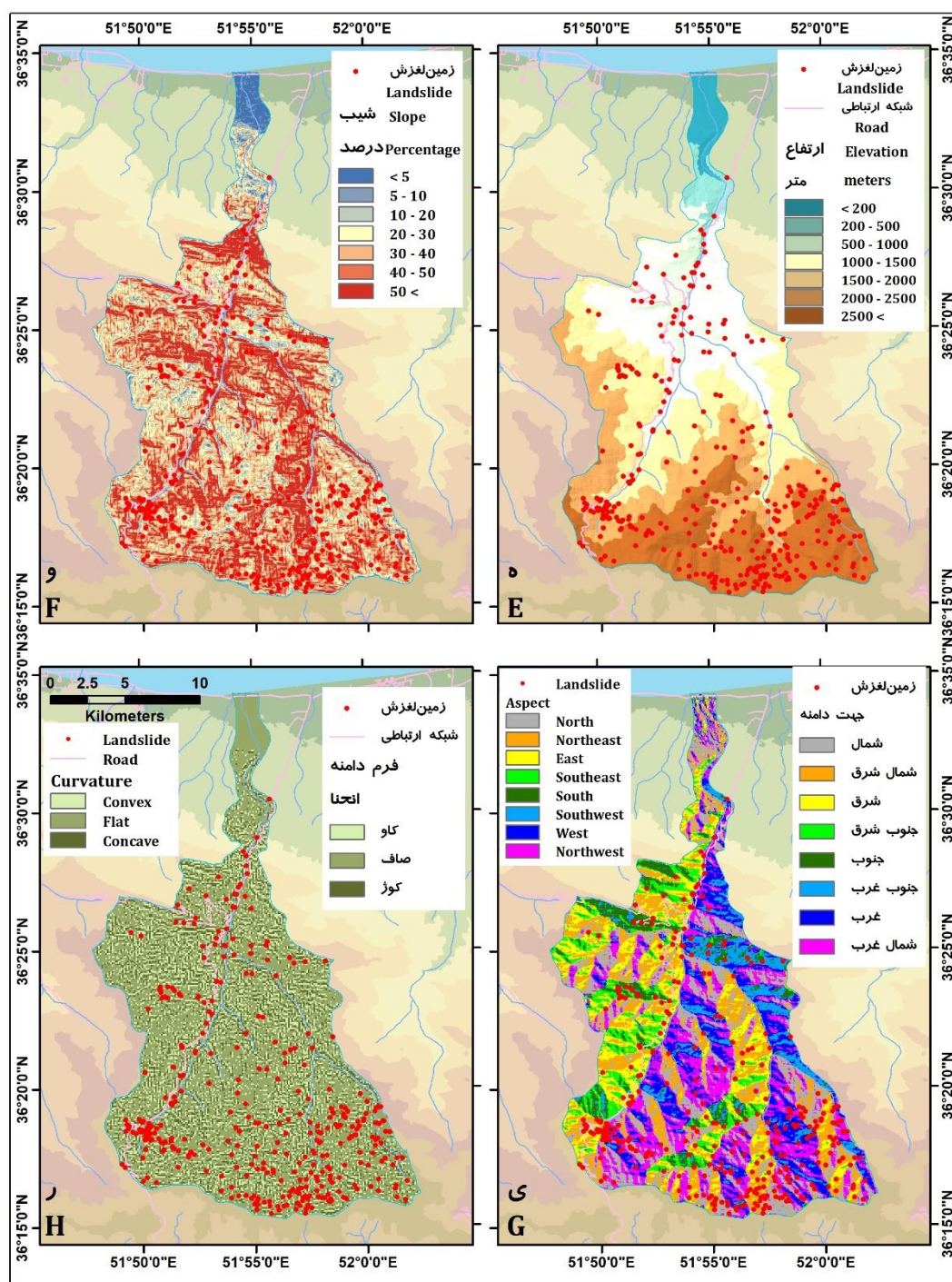
شکل ۵- نمودار فرایند پژوهش: مدل‌سازی و ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوضه گلندرود
Fig. 5. Research process diagram: Modeling and evaluating landslide susceptibility in Glandrood watershed



شکل ۶- نقشه عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل سازی آن در حوضه آبخیز

گلندرود؛ الف) کاربری اراضی، ب) زمین شناسی، ج) فاصله از جاده، د) فاصله از گسل

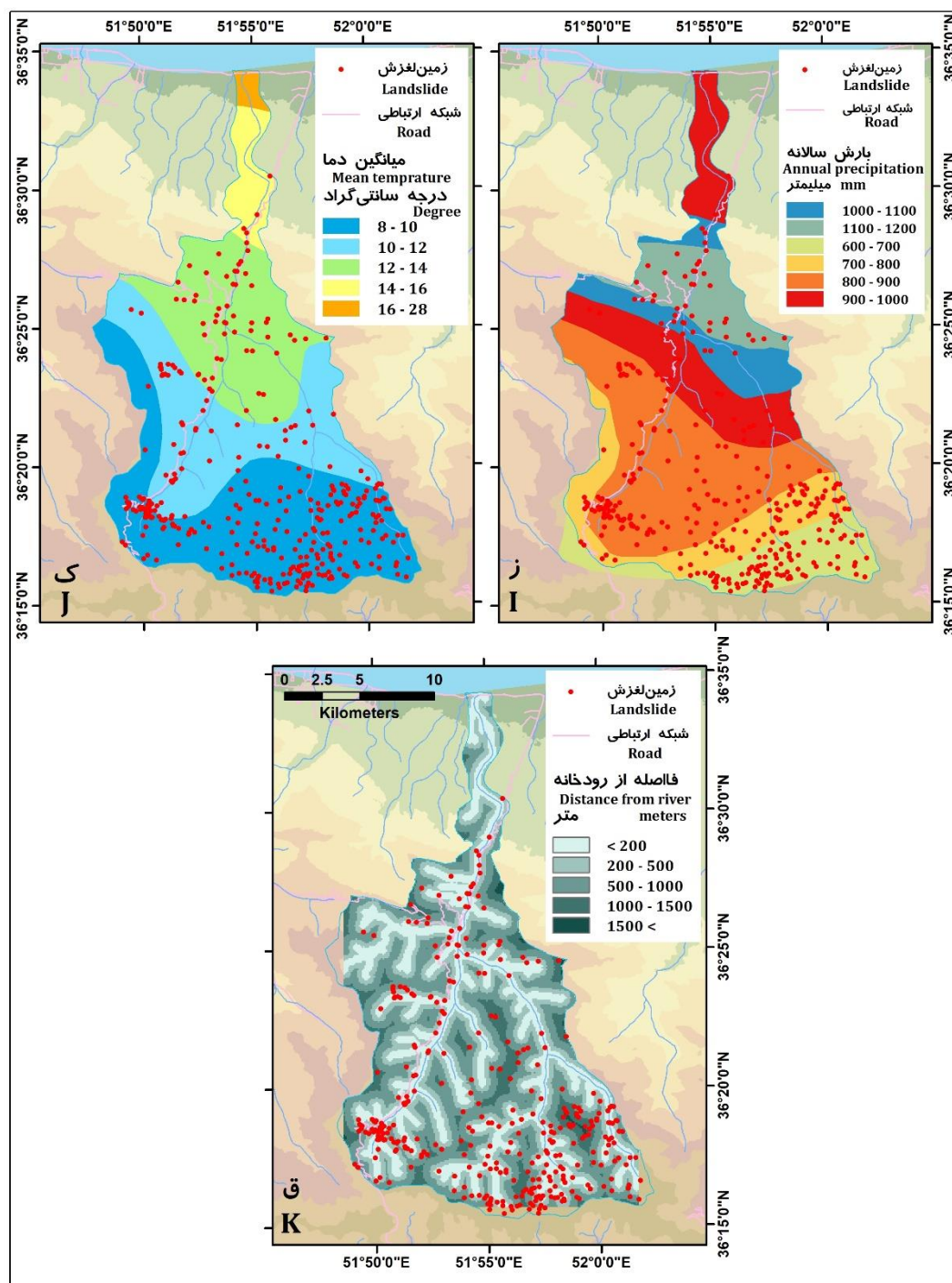
Fig. 6. Map of factors affecting landslide hazard susceptibility assessment and modeling in Glandrood watershed; A) Landuse, B) Geology, C) Distance from road, D) Distance from fault



شکل ۷- نقشه عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل سازی آن در حوضه آبخیز

گلندرود؛ د) ارتفاع، ه) شیب، و) جهت دامنه، ر) فرم دامنه

Fig. 7. Map of factors affecting landslide hazard susceptibility assessment and modeling in Glandrood watershed; E) Elevation, F) Slope, G) Aspect, H) Range form

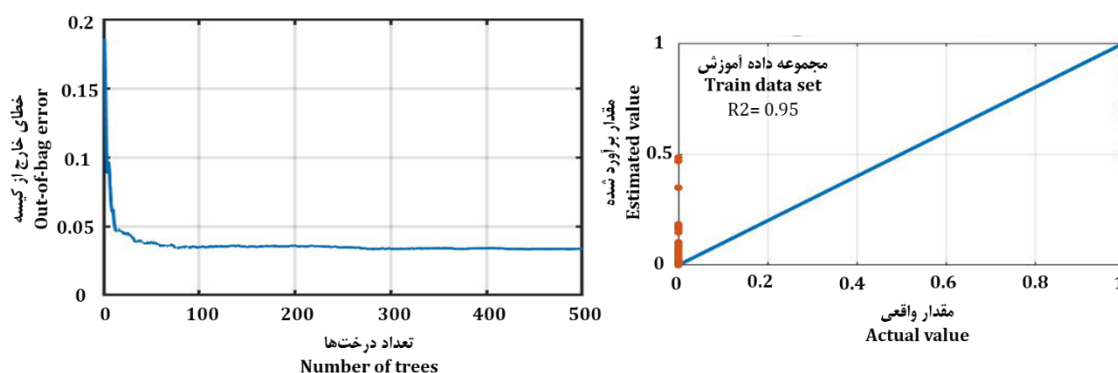


شکل ۸- نقشه عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل سازی آن در حوضه آبخیز گلندرود؛ ز) بارش سالیانه، ک) میانگین دما، ق) فاصله از رودخانه

Fig. 8. Map of factors affecting landslide hazard susceptibility assessment and modeling in Glandrood watershed; h) Annual precipitation, i) Average temperature, j) Distance from river

نتایج و بحث

زمین لغزش‌ها معمولاً توسط اثرات ترکیبی داخلی با اشاره به ویژگی‌های ذاتی شیب طبیعی و عوامل محرک خارجی از جمله بارندگی مداوم یا ذوب یخچال‌ها و زمین‌لرزه‌های ناگهانی و همچنین عامل انسانی ایجاد می‌شوند (Pirasteh & Li, 2017). به‌طور کلی، تعیین حساسیت زمین لغزش و پیش‌بینی احتمال وقوع آن، عمدتاً با در نظر گرفتن عوامل داخلی انجام می‌شود (Jaboyedoff et al., 2018). در این پژوهش، برای ارزیابی حساسیت وقوع زمین لغزش حوضه آبخیز گلندرد، از ۱۱ فاکتور اثرگذار و الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. مهم‌ترین نکته در اجرای مدل‌سازی، اعتبارسنجی و آموزش آن است. در اجرای مدل جنگل تصادفی، در تعیین درخت‌ها برای آموزش و اعتبارسنجی، خطای خارج از کیسه^۱، اهمیت بسیار زیادی دارد. برای تعیین تعداد مناسب درخت‌ها، با استفاده از معیار میانگین مربعات خطا (MSE)، ابتدا چند مقدار اولیه برای تعداد درخت‌ها تعیین و سپس مدل اجرا گردید. با بررسی میزان میانگین خطا و معیار ضریب تعیین برای آموزش، مدل بهینه با کم‌ترین میزان خطا طراحی شد. مدل به‌دست آمده با مقدار ضریب تعیین ۰/۹۴ و مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۱۷ برای مرحله آموزش به‌دست آمد. نتایج آموزش مدل در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹- ضریب تعیین رگرسیون (راست) و کاهش خطایی آموزش در ازای درختان (چپ)

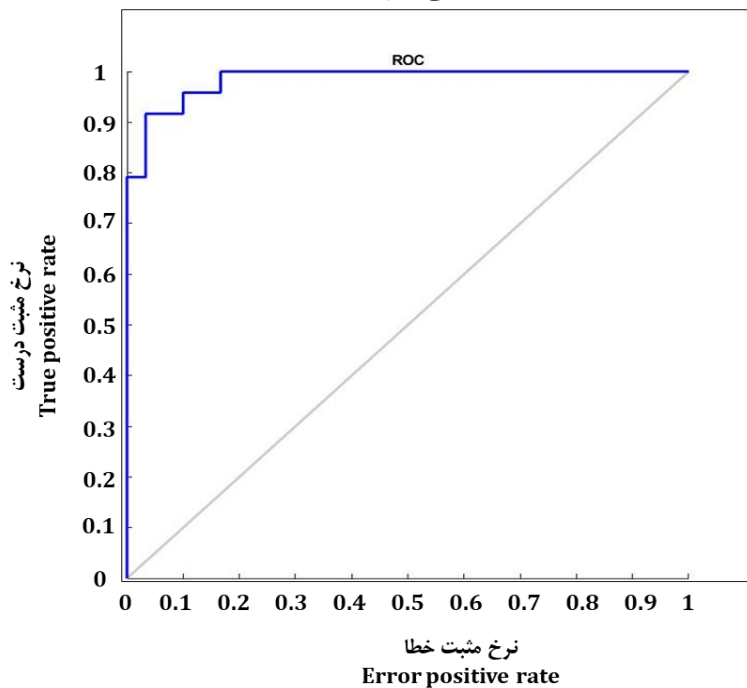
Fig. 9. Coefficient of determination for regression (right) and reduction in training error per tree

پس از آموزش مدل و اعتبارسنجی آن، اعداد خطرپذیری زمین لغزش برای تمامی منطقه در بازه عددی ۰ الی ۱ به‌دست آمد. سپس نتایج مدل به محیط ArcGIS منتقل و نقشه نهایی تهیه شده در ۵ کلاس آسیب‌پذیری با روش طبقه‌بندی شکست طبیعی^۲، تهیه شد. بر اساس نتایج منحنی ROC، مقدار سطح منحنی منطقه مورد نظر با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ۰/۹۴ برآورد گردیده است (شکل ۱۰). با توجه

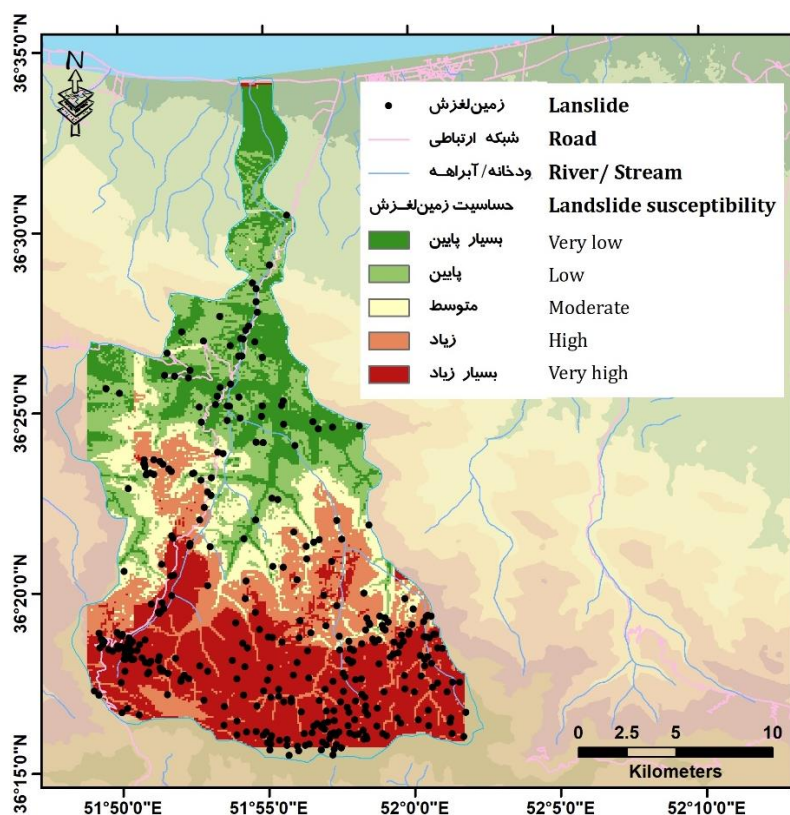
1 ooB: Out of Bag Error

2 Natural Break

به نقشه خطرپذیری لغزش در حوضه آبخیز گلندرود، بیش از ۳۰ درصد منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد، ۱۹ درصد از منطقه مورد مطالعه در کلاس خطر زیاد، ۱۳ درصد در کلاس متوسط، ۱۹ درصد در کلاس کم و ۱۶ درصد از حوضه مطالعاتی در کلاس خطر زمین لغزش خیلی کم قرار دارد (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- نمودار منحنی عملکردی راک و مقدار عددی سطح زیر نمودار
Fig. 10. ROC curve and numerical value of the area under the curve



شکل ۱۱- نقشه ارزیابی حساسیت خطر زمین لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

Fig. 11. Landslide hazard susceptibility assessment map using the random forest algorithm

نتایج به دست آمده از مدل جنگل تصادفی به صورت وزن و اهمیت متغیرها در وقوع حرکات لغزشی در جدول ۱ آورده شده است. بر این اساس، بیشترین وزن با رتبه معیار ۰/۹۸ مربوط به ارتفاع می باشد که در رده اول قرار می گیرد؛ با توجه به به کوهستانی بودن و پر شیب بودن دامنه ها، این امر هر ساله باعث ایجاد حرکات لغزشی در محدوده مطالعاتی می شود. طی بازدیدهای میدانی که از منطقه صورت گرفته است، این حرکات بیش تر در شیب های ۳۰ درجه به بالا رخ داده که با مدل انجام شده همخوانی دارد. دومین عامل در ایجاد این حرکات، متغیر فاصله از گسل با وزن ۰/۸۵ است. فاصله از آبراهه، شیب دامنه و بارش، عامل های بعدی اثرگذار بر رخداد زمین لغزش در حوضه آبریز گلندرود هستند.

جدول ۱- وزن متغیرهای مورد استفاده بر مبنای مدل جنگل تصادفی در مدل سازی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرود

Table 1- Weight of used variables based on random forest model in modeling factors affecting landslide occurrence in Glandrood watershed

متغیر Variable	ارتفاع Elevation	فاصله از گسل Dis. From Fault	فاصله از آبراهه Dis. From River	شیب Slope	بارش Precipitation	دما Temperature	فاصله از جاده Dis. From Road	کاربری اراضی Landuse	فرم دامنه Curvature	جهت دامنه Aspect	لیتولوژی Lithology
وزن Weight	0.98	0.85	0.65	0.57	0.45	0.27	0.18	0.17	0.13	0.03	0.02
رتبه Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

بررسی حرکات لغزشی در حوضه مورد بررسی نشان می دهد که این حوضه به دلیل داشتن شرایط طبیعی از جمله ساختمان گسلی، شیب زیاد، اقلیم مرطوب، خاک حساس و غیر مقاوم، دارای استعداد لغزشی بوده و دخالت انسان در آن، سبب ایجاد و تشدید این حرکات می شود. یافته های اثرگذاری عوامل بر حساسیت زمین لغزش گلندرود با یافته های پژوهش های پیشین از جمله طالبی (Talebi et al., 2018; Talebi, 2011) همخوانی دارد. از مقایسه لغزش های ناشی از دخالت انسان با لغزش های ناشی از شرایط طبیعی، معلوم می شود که دامنه هایی که کم تر مورد دخالت انسان بوده اند، در آن شیب لازم برای ایجاد حرکات دامنه ای و لغزشی، عمدتاً بالای ۵۰ درصد می باشد. این در حالی است که دامنه هایی که بیش تر مورد دخالت و استفاده انسان قرار گرفته اند (دامنه های پاک سازی شده از جنگل، جنگل بهره برداری شده، زمین های زراعی و مسکونی، جاده ها و ...)، این مقدار شیب به ۲۰ درصد تقلیل می یابد. یافته های حاصل از آزمایش بافت خاک در مناطق لغزشی، بیان گر این موضوع می باشد که نوع بافت خاک منطقه متشکل از چهار نوع بافت لومی رسی، لومی شنی، لومی رسی شنی و رسی است؛ بر این اساس، دانه بندی خاک نشان دهنده ساختمان ریزدانه آن می باشد. این نکته اثرگذاری عامل خاک حساس در وقوع پدیده زمین لغزش در این منطقه را توجیه می کند (Raefatnia, Kaviyanpour & Ahmadi, 2011).

تحلیل مفهوم کاتنا که بیان گر ارتباط میان الگو و چشم انداز خاک بر روی شیب دامنه با توپوگرافی است و منجر به تغییرپذیری خصوصیات خاک و به دنبال آن تغییر در پوشش گیاهی می شود، می تواند توجیه ارتباط یا اثرگذاری عامل ارتفاع بر حرکات لغزشی منطقه مطالعاتی باشد. گسترش پوشش جنگلی منطقه تا حد ارتفاعی ۲۳۰۰ متر بوده و بالاتر از آن، تراکم جنگل و پوشش گیاهی کم می شود. بیش تر لغزش ها در زمین ها و دامنه هایی اتفاق افتاده است که از نظر پوشش گیاهی دارای پوشش علفی بوده یا در آن بهره برداری به صورت قطع یک سره درخت صورت گرفته است، یا این که محور جاده سبب قطع پیوستگی دامنه شده و یا در آن ارتفاع و دامنه، پوشش گیاهی اندک است. اثر پوشش گیاهی به این صورت است که هر چه این مقدار

فقیرتر باشد، زمینه برای وقوع این پدیده مستعدتر می‌شود. نمونه‌هایی از دخالت انسانی در حوضه آبخیز گلندرود در شکل ۱۲ نشان داده شده است، شامل: قطع درختان و از بین بردن پیوستگی دامنه برای جاده‌سازی بدون توجه به جریان آب‌های جاری سطحی و زیر سطحی و به‌صورت کلی سیستم زهکشی طبیعی. با وجود ایجاد سازه‌های استحکام‌بخشی در دیواره دامنه، بر هم زدن تعادل طبیعی، به‌صورت از بین بردن پوشش درختان و اختلال در سیستم زهکشی، سبب می‌شود رسوبات بارگذاری شده بر روی دامنه، پس از مدتی به حالت ناپایدار درآمده و سازه‌های ایجاد شده نیز قادر به کنترل حرکت آن‌ها نباشند.

بارش‌های منطقه و حرکت آب‌های سطحی و نفوذ آن در بین ذرات خاک، موجب کاهش پیوستگی اراضی شیب‌دار نسبت به وقوع زمین‌لغزش می‌شود. یافته‌های مدل‌سازی الگوریتم جنگل تصادفی هم، بارش را به‌عنوان یکی از اثرگذارترین متغیرها بر رخداد حرکات لغزشی در حوضه آبخیز گلندرود، معرفی می‌کند که با یافته‌های تیموری و اسدی (Teimouri & Asadi Nalivan, 2020) و چن و همکاران (Chen, Zhang, Li & Shahabi, 2018) مبنی بر افزایش میزان حساسیت به وقوع زمین‌لغزش با افزایش بارندگی، همخوانی دارد. بارش‌های سطح حوضه، جاری شدن آب و نفوذپذیری آن در خاک، سبب می‌شود مناطقی که دارای نفوذپذیری سریع‌تری نسبت به عبور آب هستند، دارای لغزش‌های بیش‌تری می‌باشند و زمانی که بافت خاک رسی در پروفیل خاک قرار گیرد، سبب نگه‌داشت آب در خاک شده و منجر به ناپایداری در دامنه‌ها می‌شود. آب حاصل از ریزش باران سبب شست‌وشوی مواد سیمانی که عامل پیوستگی ذرات خاک هستند، می‌شود و از پیوستگی خاک کم کرده، مقاومت مکانیکی خاک را کاهش می‌دهد و عامل محرک محسوب می‌شود.



شکل ۱۲- نمونه‌هایی از دخالت انسانی در حوضه گلندرود و اتفاق افتادن حرکات دامنه‌ای: الف)

زمین لغزش، ب) خزش

Fig. 12. Examples of human intervention in Glandrood watershed and the occurrence of slope movements: A) Landslide, B) Creep

نتیجه‌گیری

شناسایی پهنه‌های مستعد لغزش و ارزیابی حساسیت رخدادهای زمین لغزش، برای اجتناب از این پهنه‌ها و اجرای روش‌های پیش‌گیری و کنترلی بسیار ضروری و با اهمیت است. یکی از اصلی‌ترین اقدامات در این زمینه، تهیه نقشه‌های ارزیابی حساسیت خطر رخدادهای زمین لغزش است. برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از نقشه‌های مورد اشاره در عرصه‌های مختلفی چون مدیریت حفاظت خاک و منابع طبیعی،

برنامه‌ریزی‌های عمرانی و گردشگری، مکان‌یابی اراضی مناسب برای توسعه شهرها و روستاها، برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی، تعیین مسیر راه‌ها و خطوط انتقال نیرو و انرژی استفاده کنند. در همین ارتباط، تعیین میزان اثرگذاری و اهمیت هر کدام از متغیرها بر وقوع حرکات لغزشی، می‌تواند گام بعدی برای کاهش و کنترل این حرکات در منطقه مطالعاتی باشد. مدل‌سازی الگوریتم جنگل تصادفی بر اساس متغیرهای مؤثر بر وقوع حرکات لغزشی در حوضه آبخیز گلندرود، بیان‌گر آن است که بیش‌ترین مساحت این حوضه در کلاس‌های با حساسیت زمین لغزش خیلی زیاد و زیاد قرار گرفته است. تحلیل ارتباط وقوع زمین لغزش با عوامل مؤثر، نشان می‌دهد ارتفاع مهم‌ترین عامل اثرگذار بر وقوع این پدیده در حوضه مورد مطالعه می‌باشد. در توجیه اثرگذاری عامل ارتفاع به‌عنوان مهم‌ترین عامل، می‌توان به رابطه تراکم پوشش گیاهی و ارتفاع در حوضه آبخیز گلندرود اشاره داشت. گسترش پوشش جنگلی منطقه تا حد ارتفاعی ۲۳۰۰ متر بوده و بالاتر از آن، تراکم جنگل و پوشش گیاهی کم می‌شود. در کنار ۱۱ متغیر مؤثر بر وقوع حرکات لغزشی حوضه آبخیز گلندرود که در این پژوهش بررسی شد، با توجه به گردشگر پذیر بودن منطقه، ساخت شهرک‌ها و مجتمع‌های مسکونی در آن دارای سرعت چشم‌گیری بوده و به همین علت، پوشش گیاهی در قسمتی از منطقه مطالعاتی به‌صورت پوشش گیاهی علفی و نهایتاً درختچه‌ای تغییر یافته است. از طرفی، ساخت ابنیه بر روی خاک حساس به لغزش در منطقه مطالعاتی، به شکل عامل محرک برای تشدید این پدیده در آمده است؛ به‌صورتی که می‌توان یکی از علل وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرود را وزن ناشی از احداث ساختمان‌های سیمانی و سنگی دانست.

References

- Abedini, M., & Mohammadzadeh Shisha Garan, M. (2022). Landslide assessment using radar images and radar interferometry Case area: Nirchai Basin. *Journal of Environmental Science Studies*, 7(3), 5161-5171. [In Persian]
<https://doi.org/10.22034/jess.2022.335908.1758.html>
- Akbarimehr, M., Motagh, M., & Haghshenas-Haghighi, M. (2013). Slope stability assessment of the Sarcheshmeh Landslide, Northeast Iran, Investigated using InSAR and GPS observations. *Remote Sensing*, 5(8), 3681-3700. <https://doi.org/10.3390/rs5083681>
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Alijani, B. (2003). *The Climate of Iran*. Payam Noor University Press, Tehran. [In Persian]
- Amiri, M., Pourghasemi, H. R., Ghanbariana, G. A., & Afzali, S. F. (2019). Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*, 340, 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.042>
- Arabameri, A., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Rezaei, K., & Kerle, N. (2018). Spatial modelling of gully erosion using GIS and R programming: A comparison among three data mining algorithms. *Applied Sciences*, 8(8), 1369. <https://doi.org/10.3390/app8081369>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 2375-2383.
<https://doi.org/10.3390/app8081369>
- Carlà, T., Intrieri, E., Di Traglia, F., & Casagli, N. (2016). A statistical-based approach for determining the intensity of unrest phases at Stromboli volcano (Southern Italy) using one-step-ahead forecasts of displacement time series. *Natural Hazards*, 84(1), 669-683.
<https://doi.org/10.1007/s11069-016-2451-5>
- Carlà, T., Intrieri, E., Farina, P., & Casagli, N. (2017). A new approach to assess the stability of rock slopes and identify impending failure conditions. In *Workshop on World Landslide Forum*, Springer, Cham, 733-739. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_84
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., & Shahabi, H. (2018). Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling. *Science of the Total Environment*, 644, 1006-1018.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.389>
- Davoudi Moghaddam, D., Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2019). Assessment of the contribution of geo-environmental factors to flood inundation in a semi-arid region of SW Iran: Comparison of different advanced modeling approaches. Natural hazards GIS-based spatial modeling using data mining techniques. In HR. Pourghasemi, and M. Rossi (Eds.), *Natural hazards GIS-based spatial modeling using data mining techniques*.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-73383-8_3
- Derafshi, K., Motevalli, S., Hosseinzadeh, M., & Esmaeili, R. (2013). Zoning the landslide hazard in the Taleghan watershed using frequency ratio and multivariate regression. Paper presented at the Proceedings of the Second National Conference of the Iranian Geomorphology Association (Geomorphology and Environmental Change Monitoring), Faculty of Geography, University of Tehran, 12-17. [In Persian]
- Di Martire, D., Tessitore, S., Brancato, D., Ciminelli, M. G., Costabile, S., Costantini, M., ... & Calcaterra, D. (2016). Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena*, 137, 406-421.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.002>
- Ebrahimkhani, R., Afzali, M., & Shokoohi, A. (2011). Prediction and analysis of factors in road traffic accidents using the random forest algorithm. *Danesh-e Entezami-e Zanjan*, 1(1), 111-127. [In Persian]
- Fruneau, B., Achace, J., & Delacourt, C. (1996). Observation and modeling of the Saint-Etienne-de Tine'e landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265(3-4), 181-190. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00047-9)
- Garosi, Y., Sheklabadi, M., Besalatpour, A. A., Pourghasemi, H. R., Conoscenti, C., & Van Oost, K. (2018). Comparison of the different resolution and source of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*, 330, 65-78.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.027>
- Hilley, G. E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., & Rocca, F. (2004). Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679), 1952- 1955.
<https://doi.org/10.1126/science.1098821>
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147, 124-136.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.017>

- Jaboyedoff, M., Michoud, C., Derron, M. H., Voumard, J., Leibundgut, G., Sudmeier-Rieux, K., ... & Leroi, E. (2018). Human-induced landslides: toward the analysis of anthropogenic changes of the slope environment. In *Landslides and engineered slopes. Experience, theory and practice*. CRC Press, 217-232. <http://dx.doi.org/10.1201/b21520-20>
- Karam, A., & Tourani, M. (2013). Zoning the land susceptibility to landslides using linear regression and hierarchical analysis process, case study: Haraz Axis from Rudehen to Rineh. *Applied Research in Geographical Sciences*, 13(28), 177-190. [In Persian] <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-691-fa.html>
- Karimi Sangchini, E., Awnagh, M., & Saedaldin, A. (2012). Comparing applicability of 4 quantitative and semi-quantitative models in landslide hazard zonation in Chehel-Chay watershed, Golestan province. *Water and Soil Conservation*, 19(1), 183-196. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1391.19.1.11.2>
- Lauknes, T. R., Shanker, A. P., Dehls, J. F., Zebker, H. A., Henderson, I. H. C., & Larsen, Y. (2010). Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2097-2109. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.015>
- Lieb, M., Glaser, B., & Huwe, B. (2012). Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 170, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.010>
- Metternicht, G., Hurni, L., & Gogu, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geospatial system for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 284-303. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.004>
- Mora, O., Mallorqui, J. J., & Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10), 2243-2253. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.814657>
- Motevalli, S., Hosseinzadeh, M., Esmaeili, R., & Derafshi, K. (2015). Evaluation of the accuracy of Multivariate Regression (MR), Logistic Regression (RL), Analytic Hierarchy Process (AHP), and Fuzzy Logic (FL) methods in landslide hazard zoning in the Taleghan watershed. *Quantitative Geomorphology Research*, 14(1), 1-20. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1394.4.1.1.4>
- Naghbi, A., & Pourghasemi, H. R. (2015). A comparative assessment of three machine learning models and their performance comparison by bivariate and multivariate. *Water Resource Management*, 29, 5217-5236. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-015-1114-8>
- Nicodemus, K. K. (2011). Letter to the Editor: On the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures. *Briefings in Bioinformatics*, 12, 369-373. <https://doi.org/10.1093%2Fbib%2Fbbr016>
- Peters, J., Verhoest, N., Samson, R., Boeckx, P., & De Baets, B. (2008). Wetland vegetation distribution modelling for the identification of constraining environmental variables. *Landscape Ecology*, 23, 1049- 1065. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9261-4>
- Pirasteh, S., & Li, J. (2017). Landslides investigations from geoinformatics perspective: quality, challenges, and recommendations. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1-18. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238850>
- Raefatnia, N., Kaviyanpour, M. K., & Ahmadi, T. (2011). Investigating the causes of landslide phenomena in the Glandrood forest (Case study, Series 3, Watershed 48). *Natural*

- Resources Science and Technology*, 6(1), 53-63. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/journal/jstnr/Article/1077144>
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Application of GIS-based data-driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.010>
- Rott, H., Scheuchl, B., Siegel, A., & Grasemann, B. (1999). Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters*, 26(11), 1629-1632. <https://doi.org/10.1029/1999GL900262>
- Sabeti, H., Motagh, M., Sharifi, M. A., Akbari, B., Akbarimehr, M., & Fard, D. (2019). Determination of the displacement rate of the Masoumeh landslide for management of landslide risk by Radar Interferometry. *Iranian Journal of Watershed Management Sciences*, 13(44), 103-113. [In Persian] <http://jwmsei.ir/article-1-745-fa.html>
- Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüning, M., Zilger, J., ... & Werner, C. (2005). Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2, 193-201. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0003-2>
- Talebi, A. (2011). Investigating the effect of subsurface flows on the occurrence of surface landslides. Paper presented at the Proceedings of the 7th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran. [In Persian]
- Talebi, A., Goudarzi, S., & Pourghasemi, H. R. (2018). Investigation of the possibility of landslide hazard mapping using the Random Forest algorithm (Case study: Sardarabad Watershed, Lorestan Province). *Natural Environmental Hazards*, 7(16), 45-64. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3213>
- Teimouri, M., & Asadi Nalivan, O. (2020). Susceptibility zoning and prioritization of the factors affecting landslide using MaxEnt, geographic information system and remote sensing models (Case study: Lorestan Province). *Hydrogeomorphology*, 6(21), 155-179. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1398.6.21.8.3>
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Al-Katheeri, M. M. (2015). Landslide susceptibility mapping using the random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin. *Asir Region, Saudi Arabia, Landslides*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0614-1>
- Zeng, T., Guo, Z., Wang, L., Jin, B., Wu, F., & Guo, R. (2023). Tempo-Spatial landslide susceptibility assessment from the perspective of human engineering activity. *Remote Sensing*, 15(16), 4111(1-28). <https://doi.org/10.3390/rs15164111>
- Zhao, C., & Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides - A review. *Remote Sensing*, 10(2), 279 (1-6). <https://doi.org/10.3390/rs10020279>