



## Research Article

### Landslide susceptibility prediction using the coupled Mahalanobis distance and machine learning models (Case study: Owghan watershed, Golestan province)

Aiding Kornejady<sup>1</sup>, Majid Ownegh<sup>1\*</sup> , Hamid Reza Pourghasemi<sup>2</sup>, Abdolreza Bahremand<sup>1</sup>, Manouchehr Motamedi<sup>3</sup>

1-Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran

2-Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

3-Southern New Hampshire University, New Hampshire, USA

Received: 03 Sep 2019 Accepted: 14 Mar 2020

## Extended Abstract

### Introduction

Landslide susceptibility maps are considered a backbone for decision-makers to suggest solitary or combined technical and regulatory measures. Such maps are also considered an invaluable tool for engineers, earth scientists, planners, and decision-makers to select the most suitable areas for agriculture, building, and other development activities. Hence, thanks to landslide susceptibility maps, addressing highly susceptible areas are feasible, so that over the course of further detailed studies on the imminent landslide occurrences in the future, landslide potential risk is mitigated.

### Materials and Methods

In this study, two robust data mining models, namely random forest and maximum entropy were used to map landslide susceptibility across the Owghan Watershed in Golestan province. After preparing the landslide inventory map via extensive field surveys, interpreting Google Earth images, and the archived data acquired from different organizations, landslide points were split into two sets of training (70%) and validation (30%) by using the Mahalanobis distance technique. Further, drawing on the extensive literature review, fifteen factors including climatic, geological, tectonic, topo-hydrological, and anthropogenic drivers, as landslide-controlling factors were selected and sieved through the variance inflation factor test. Ultimately, by implementing the above-mentioned data mining techniques, the most important factors in the modeling process, as well as the highly susceptible locations in the study area, were introduced.

### Results and Discussion

Evaluating the learning capability, both the random forest and maximum entropy models with the respective area under the receiver operating characteristic curve (AUROC) values of 0.923 and 0.91, showed almost identical fitting abilities. However, getting to the validation stage, it was found that the random forest with the AUROC value of 0.9 clearly outperforms maximum entropy (AUROC= 0.85) in terms of prediction power and generalization capacity.

**Citation:** Kornejady, A. et al, 2020. Landslide susceptibility prediction using the coupled Mahalanobis distance and machine learning models ..., *Res. Earth. Sci.* 11(2), (1-18) DOI: 10.52547/esrj.11.2.1

\* Corresponding author E-mail address: [mownegh@yahoo.com](mailto:mownegh@yahoo.com)





Hence, the random forest was suggested as a better-performing model for landslide susceptibility mapping in the Owghan watershed, compared to its counterpart. About 10% of the study area falls into high and very high landslide susceptibility zones. Furthermore, five landslide-controlling factors including rainfall, normalized difference vegetation index, height above the nearest drainage, lithological formation, and proximity to roads have been found to be the most significant factors contributing to landslide occurrence in the study area. Additionally, the results attest that announcing the Safiabad village as a landslide-prone area by the authorities is technically sound and evacuating the residents to a new place has been a right decision; however, some parts of the newly inhabited area shows landslide predisposing patterns which can lead to a higher susceptibility of the area to landslide occurrence in the future.

### Conclusion

Scrutinizing the results of random forest model revealed that a combination of natural factors (intense rainfall, bare lands, susceptible lithological formations, and topo-hydrological mechanisms) and anthropogenic interferences (tillage parallel to slope length/perpendicular to contour lines and unprincipled road construction) are synergistically responsible for landslide occurrence in the Owghan Watershed. On the other hand, announcing the Safiabad village as a critical landslide-prone area seems to be a wise decision, although the newly inhabited place seems to be selected merely based on having a suitable slope steepness (i.e., almost flat) and being accessible through several connecting routes, while the enhanced conservation tillage methods have not been applied to the selected site and adjacent areas. The latter, according to our inferences, can trigger a crisis in a larger extent. Moreover, owing to the presence of other landslide predisposing factors in the new residential site, safe areas should be pointed out and announced by adopting a holistic view on the entire influential and predisposing conditions for landslide occurrence.

**Keywords:** Maximum entropy, Random forest, Geographical information system, Machine learning models.



## پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ترکیبی فاصله ماهالانوبیس و یادگیری ماشین (مطالعه موردی: حوزه آبخیز اوغان، استان گلستان)

آیدینگ کرنژادی<sup>۱</sup>، مجید اونق<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا پورقاسمی<sup>۲</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۱</sup>، منوچهر معتمدی<sup>۳</sup>

۱- گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- گروه مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشگاه SNHU، نیوهامپشیر، آمریکا

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۶/۱۲

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

### چکیده

هدف از تحقیق پیش‌رو، پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز اوغان، واقع در استان گلستان می‌باشد. بدین منظور از دو مدل توانمند داده‌کاوی شامل جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی استفاده گردید. زمین‌لغزش‌ها با استفاده از الگوریتم فاصله ماهالانوبیس به دو دسته ۷۰ درصد (واسنجی پارامترها و تعلیم مدل‌ها) و ۳۰ درصد (اعتبارسنجی نتایج مدل‌ها) تقسیم شدند. هم‌چنین با توجه به مرور منابع گسترده، ۱۵ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه با روش تورم واریانس غربال، عوامل بهینه انتخاب و لایه‌های رقومی عوامل در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شدند. به منظور ارزیابی نتایج مدل‌ها (قدرت یادگیری و اعتبارسنجی نتایج) از مقدار مساحت زیرمنحنی تشخیص عملکرد نسبی با استفاده از دو دسته داده واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی قدرت یادگیری مدل‌ها نشان داد که مدل جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی به ترتیب با مقادیر سطح زیر منحنی ۰/۹۱ و ۰/۹۲۳ دارای قدرت یادگیری و برازش نسبتاً مشابهی می‌باشند. اگرچه در مرحله اعتبارسنجی مشخص گردید که مدل جنگل تصادفی با مقدار ۰/۹ نسبت به مدل بیشینه آنتروپی با مقدار ۰/۸۵ قدرت پیش‌بینی و تعمیم نتایج بالاتری دارد. لذا مدل جنگل تصادفی به عنوان مدل برتر در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش حوزه آبخیز اوغان معرفی گردید. براساس نتایج مدل جنگل تصادفی، حدود ۱۰ درصد از حوزه آبخیز اوغان در پهنه حساسیت زیاد و خیلی زیاد به وقوع زمین‌لغزش قرار گرفته است. هم‌چنین، عوامل بارش، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده، شاخص ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش، سنگ‌شناسی و فاصله از جاده به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه معرفی گردیدند.

**واژه‌های کلیدی:** بیشینه آنتروپی، جنگل تصادفی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل‌های یادگیری ماشین.

## مقدمه

زمین‌لغزش به حرکت مواد تشکیل‌دهنده دامنه، شامل صخره‌های طبیعی، خاک، انباشته‌های مصنوعی، قطعات یخی و یا مخلوطی از آن‌ها که توسط نیروی ثقل به سمت پایین جابه‌جا می‌شوند، اطلاق می‌شود ( Radbruch-Hall and Varnes, 1976). متن و همکاران ( Meten et al, 2015) اظهار دارند که نقشه‌های حساسیت زمین-لغزش به مثابه سنگ بنایی برای تصمیم‌گیران برای پیشنهاد اقدامات فنی، نظارتی و یا ترکیبی از این دو می‌باشد. این نقشه‌ها هم‌چنین ابزار مهمی برای مهندسان، دانشمندان علوم زمین، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران به‌منظور انتخاب مکان‌های مناسب برای کشاورزی، ساخت‌وساز و سایر فعالیت‌های توسعه‌ای محسوب می‌شوند (Ercanoglu and Gokceoglu, 2002). مدل‌های ماشین یادگیری به‌لحاظ به‌کارگیری الگوریتم‌های تخمین توزیع، طبیعت داده‌محور و تکرار بالای فرآیند مدل‌سازی، توانایی بالایی در شناسایی رفتار وقوع پدیده زمین‌لغزش داشته و در تحقیقات متعددی برتری نسبی خود را نسبت به مدل‌های آماری دومتغیره و چندمتغیره اثبات نموده‌اند (Vorpahl et Stumpf and Kerle, 2011; Trigila et al, Lee et al, 2013; al, 2012; 2013). محمدی و پورقاسمی (۱۳۹۶) از مدل جنگل تصادفی برای اولیت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه آبخیز باغه‌سالیان در استان گلستان استفاده نمودند که مبتنی بر نتایج تحقیق، فاصله از جاده و فاصله از گسل به‌عنوان عوامل مؤثر شناسایی شده و دقت مدل با شاخص AUROC برابر با ۰/۷۰۶، قابل قبول ارزیابی شده است. چن و همکاران (Chen et al, 2017) با استفاده از سه مدل بیشینه آنتروپی، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان به پهنه‌بندی

حساسیت زمین‌لغزش در استان سیچوان چین پرداختند که مبتنی بر نتایج، مدل حداکثر آنتروپی با شاخص AUROC برابر با ۰/۷۵، دقت قابل قبولی ارائه نموده؛ اگرچه این مقدار از دقت مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان به‌مراتب کم‌تر بوده است. طالبی و همکاران (۱۳۹۷) از مدل جنگل تصادفی برای تهیه نقشه حساسیت حوضه سردارآباد استان لرستان استفاده نمودند که براساس نتایج تحقیق، دقت مدل عالی ارزیابی شده است (شاخص AUROC برابر با ۰/۹۸). رحمتی و همکاران (Rahmati et al, 2018) با بهره‌گیری از مدل جنگل تصادفی و مجموعه‌ای از عوامل محیطی به پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در حوزه آبخیز چهل‌چای پرداختند که مبتنی بر نتایج تحقیق، مقدار AUROC برابر با ۰/۹۱۷ بیانگر دقت عالی مدل جنگل تصادفی می‌باشد. هم‌چنین، در این تحقیق کاربرد شاخص توپوهایدرولوژیکی ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش (HAND) در علوم محیطی امیدوارکننده ارزیابی شده که پیش‌تر در تحقیق کرنژادی و همکاران (Kornejady et al, 2017ab) نیز به‌آن اشاره شده بود. پورقاسمی و رحمتی (Pourghasemi and Rahmati, 2018) به مقایسه تفصیلی ۱۰ مدل داده‌کاوی در زمینه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در شهرستان قائم‌شهر در استان مازندران پرداختند که براساس نتایج تحقیق، مدل جنگل تصادفی و درخت رگرسیون تقویت شده به ترتیب با مقادیر AUROC ۰/۸۳۷ و ۰/۸۰۷ به‌عنوان مدل‌های برتر معرفی شده‌اند. کرنژادی و همکاران (Kornejady et al, 2019) با ترکیب دو مدل جنگل تصادفی و نسبت فراوانی در حوزه آبخیز چهل‌چای به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش پرداختند که براساس نتایج، مدل تلفیقی با مقدار

### منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز اوغان با مساحتی حدود ۳۹۰ کیلومتر مربع در موقعیت مختصات جغرافیایی  $37^{\circ} 8' 5''$  تا  $37^{\circ} 21' 15''$  عرض شمالی و  $55^{\circ} 41' 59''$  تا  $55^{\circ} 26' 43''$  طول شرقی در شرق شهرستان گالیکش واقع شده است (شکل ۱). شیب متوسط حوضه ۱۷ درجه بوده و حداقل و حداکثر ارتفاع به ترتیب ۲۱۰ و ۲۵۵۲ متر از سطح دریا می‌باشد. کاربری‌های غالب منطقه شامل جنگل (۵۱ درصد) و کشاورزی دیم (۳۸ درصد) می‌باشد. سازند آهکی Jlm (۳۷ درصد)، سازند آهک توده‌ای لار (I؛ ۱۸ درصد)، آبرفت‌های کواترنری Qzm (مجاور اراضی زراعی؛ ۱۰ درصد) و سازند شمشک (ماسه‌سنگ و شیل) بیشترین سطح حوضه را اشغال نموده‌اند (اداره کل آبخیزداری استان گلستان، ۱۳۸۸).

AUROC  $0/831$  دقت خوبی ارائه داده است. حوزه آبخیز اوغان به لحاظ شرایط خاص محیطی اعم از عوامل زمین‌شناختی حساس و فاکتورهای انسانی پویا، به‌عنوان یکی از مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در استان گلستان شناسایی شده است. به‌طوری‌که به‌سبب وقوع یک زمین‌لغزش چرخشی بزرگ مشرف به روستای صفی‌آباد، سابقه جابه‌جایی بخش اعظم ساکنین منطقه وجود دارد (اداره کل آبخیزداری استان گلستان، ۱۳۸۸). لذا، اهداف این تحقیق عبارتند از: تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مجموعه‌ای از عوامل مؤثر و دو مدل داده‌کاوی نوین جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی؛ مقایسه نتایج دو مدل با منحنی ROC، بررسی تفاوت‌های ساختار مدل‌ها و معرفی مدل برتر؛ ارزیابی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی و در نهایت بررسی وضعیت استقرار قبلی و جدید ساکنین روستای صفی‌آباد مبتنی بر نتایج مدل برتر.

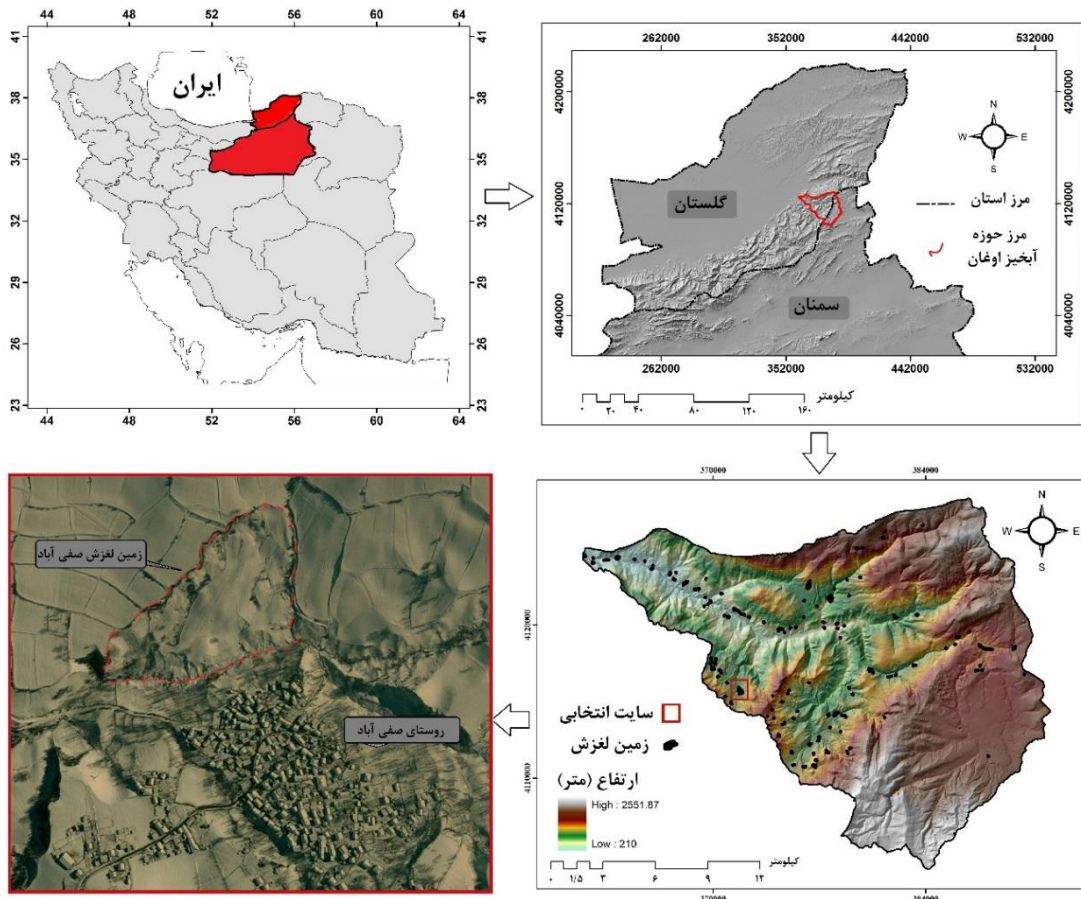


شکل ۱: نمودار جریان‌ی مراحل انجام تحقیق

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از دو مدل پیشینه آنتروپی و جنگل تصادفی و ارزیابی ۱۴ عامل زمین‌ساز، حساسیت زمین لغزش در حوضه بحرانی

اوغان پهنه‌بندی و در نهایت براساس شاخص AUC مدل برتر معرفی خواهد شد. نمودار جریان‌ی مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: موقعیت حوضه آبخیز اوغان در ایران و استان گلستان (سایت انتخاب شده نمایانگر بزرگ‌ترین زمین لغزش چرخشی حوضه مورد مطالعه بوده که در بخش فوقانی روستای صفی‌آباد واقع شده و سبب جابجایی بخشی از ساکنین روستا شده است).

## تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها

یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی حساسیت زمین-لغزش، شناسایی و تهیه نقشه پراکنش زمین-لغزش‌های موجود در حوضه مورد مطالعه می‌باشد. در این تحقیق، ثبت و بررسی زمین لغزش‌های موجود در حوضه از طریق بازدیدهای میدانی، اطلاعات محلی، نقشه‌های موجود در اداره کل آبخیزداری استان گلستان (۱۳۸۸) (حاصل از

تفسیر عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰) و آرشیو اطلاعات مرکز مطالعات زمین لغزش در سازمان جنگل‌ها و مراتع انجام گردید. جهت تفکیک زمین لغزش‌ها به دو دسته داده جهت مدل‌سازی (۷۰ درصد نقاط لغزشی) و ارزیابی نتایج مدل‌ها (۳۰ درصد نقاط لغزشی) (Kornejady et al, 2017a)، از روش تلفیقی فاصله ماهالانویس و انتخاب تصادفی استفاده

جاده، حداکثر شتاب بیشینه افقی ( $PGA^1$ )، واحدهای سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش ( $HAND^2$ )، بارش متوسط سالانه، انحنای طولی دامنه، انحنای عرضی دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی ( $TWI^3$ )، شاخص طول شیب ( $LS^4$ ) و شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده ( $NDVI^5$ ) می‌باشند. نقشه این عوامل در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS 10.3) تهیه گردید که در ادامه، توضیحات مرتبط ارائه شده است. نقشه مدل رقومی ارتفاع ( $DEM^6$ ) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، از روی نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان نقشه‌برداری کشور) تهیه شد. نقشه‌های آبراهه و جاده از روی نقشه توپوگرافی تهیه شده و سپس با استفاده از الگوریتم Euclidean Distance در محیط ArcGIS 10.3، نقشه‌های فاصله‌ای تهیه شدند. عوامل درجه شیب، جهت شیب، انحنای طولی و عرضی دامنه و شاخص  $TWI$ ، و شاخص  $HAND$  از نقشه  $DEM$  منطقه در محیط ArcGIS 10.3 و SAGA-GIS استخراج و تهیه شدند. شاخص‌های انحناء نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارت دیگر محدب و مقعر بودن دامنه می‌باشند. مقادیر مثبت و منفی در انحنای عرضی دامنه<sup>۷</sup> به ترتیب بیان‌گر تحدب (واگرایی جریان) و تقعر (همگرایی جریان) بوده و مقادیر مثبت و منفی در انحنای طولی دامنه<sup>۸</sup> به ترتیب بیانگر تقعر (کاهش سرعت جریان) و تحدب دامنه (افزایش سرعت جریان) می‌باشند (Jenness et al, 2013). جهت تهیه این دو عامل (انحناء طولی و عرضی) از افزونه DEM Surface Tools در محیط ArcGIS 10.3 استفاده گردید. شاخص  $TWI$  نیز از رابطه ۲ محاسبه

گردید. این نوع از فاصله در سال ۱۹۳۶ توسط پراسانتا کاندرا ماهالانوبیس ارائه شد، اما اخیراً به منظور ارزیابی مکانی زمین‌لغزش استفاده می‌شود (Tsangaratos and Benardos, 2014). در این روش پیکسل‌هایی که در آن‌ها زمین‌لغزش رخ داده تعیین شده، مقادیر عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در این سلول‌ها لیست‌برداری شده و از هرکدام از آن‌ها میانگین گرفته می‌شود. این مقدار میانگین به عنوان عامل مسبب وقوع زمین‌لغزش شناخته می‌شود. حال احتمال وقوع زمین‌لغزش در سایر سلول‌ها (سلول‌های فاقد زمین‌لغزش) از رابطه ۱ و در قالب فاصله بیان می‌گردد (Fukunaga, 1990).

رابطه ۱)

$$D_m = \sqrt{(x - m)^T \Sigma^{-1} (x - m)}$$

که در آن:  $X$  بردار یا ماتریس هر یک از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش،  $m$  میانگین مقادیر هر یک از عوامل در محل‌های وقوع زمین‌لغزش،  $T$  معکوس یا به اصطلاح ریاضی ترانهاده ماتریس مقادیر عوامل و  $\Sigma^{-1}$  ماتریس کوواریانس معکوس می‌باشند. هرچه این فاصله ( $D_m$ ) کم‌تر باشد، نزدیکی به شرایط میانگین لغزش بیشتر، در نتیجه احتمال وقوع زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. تهیه نقشه عوامل کنترل‌کننده و مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

براساس مرور منابع گسترده، بازدیدهای گسترده میدانی و بررسی شرایط و عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه مورد مطالعه و همچنین در نظر گرفتن قابلیت دسترسی به داده‌های عوامل، ۱۵ عامل مؤثر از مجموعه عوامل اقلیمی، زمین‌شناختی، تکتونیکی، توپو-هیدرولوژیکی و انسان-ساخت انتخاب گردید که شامل ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از



تبدیل واحد شیب به رادیان در محیط ArcGIS استفاده می‌شود. همچنین، افزونه جدید HAND-Tool در محیط GIS جهت استخراج شاخص جدید توپو-هیدرولوژیکی HAND از نقشه DEM استفاده گردید (Rahmati et al, 2018). مقادیر کم در شاخص HAND بیان‌گر زون اشباع واقع در حاشیه آبراهه‌ها بوده و افزایش تدریجی مقادیر نمایان‌گر زون‌های دامنه (ارتفاع و شیب بیشتر) و فلات (ارتفاع بیشتر، شیب کمتر) می‌باشند. نقشه کاربری اراضی از اداره منابع طبیعی استان گلستان تهیه و سپس با استفاده از جدیدترین تصاویر گوگل‌ارث اصلاح و به‌روزرسانی گردید. نقشه سازندهای سنگ‌شناسی و گسل‌های منطقه از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه و استخراج گردید.

(Beven and Kirkby, 1979) و در محیط SAGA-GIS تهیه شد.

رابطه ۲)

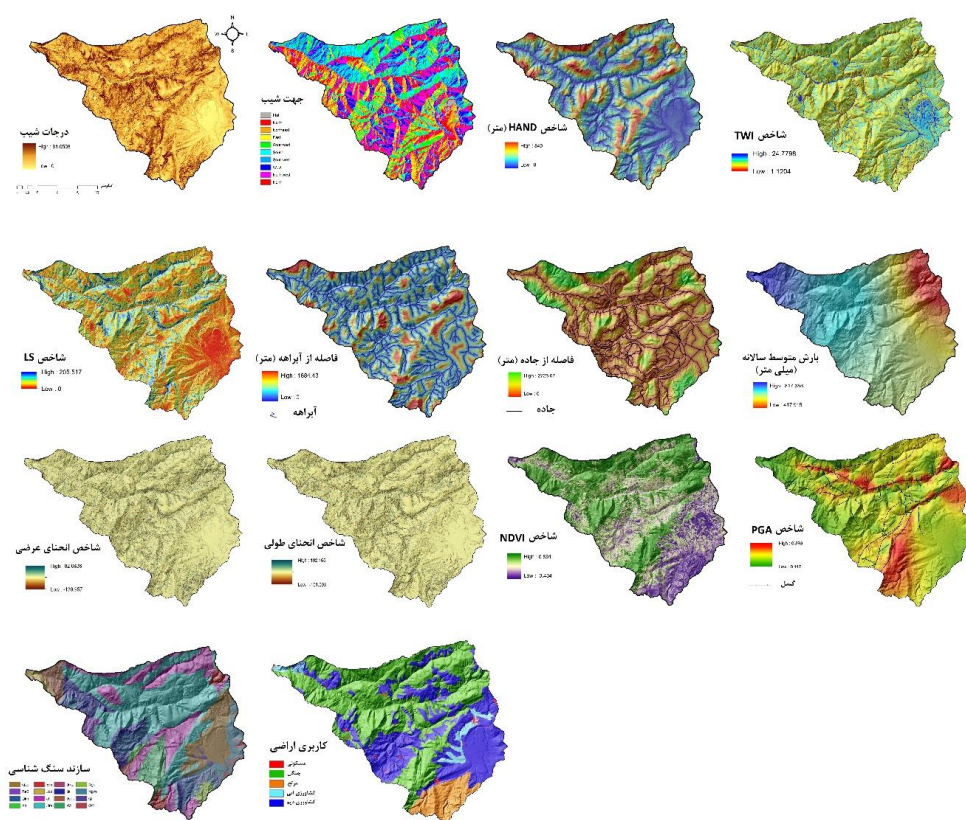
$$TWI = \alpha / \tan \beta, \quad \alpha = A / L$$

که در آن: A کل مساحت بالادست، L طول مؤثر خط تراز (عمود بر جهت جریان) و  $\beta$  زاویه شیب (درجه) می‌باشد. مقادیر زیاد در این شاخص بیان‌گر مناطقی است که مشارکت بیشتری در هدایت رواناب به خروجی حوضه دارند. شاخص LS نیز در محیط SAGA-GIS با استفاده از رابطه ۳ تهیه گردید.

رابطه ۳)

$$LS = \left[ FAG * \frac{Cell-size}{22.13} \right]^{0.4} \times \left[ \frac{\sin(slope-grid) * 0.01745}{0.0896} \right]^{1.3}$$

که در آن: FAG شاخص جریان تجمعی (flow accumulation grid) بوده و عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای



شکل ۳: عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های حوزه آبخیز اوغان



رابطه ۶)  

$$D = (R^2 + 30.03)^{0.5}$$
 که در آن: M بزرگی زمین لرزه (ریشتر)، L طول گسل (کیلومتر)، R کوتاه‌ترین فاصله از روی هر پیکسل تا گسل (کیلومتر) و PGA بیان‌گر حداکثر شتاب افقی زمین لرزه (g؛ شتاب گرانش) می‌باشد. نقشه بارش متوسط سالانه حوضه مورد مطالعه از میان‌یابی (روش IDW<sup>a</sup> به دلیل کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطا) داده‌های بارش ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی موجود در محدوده مطالعاتی (آق‌سو، پارک ملی گلستان، تمر، تنگ-دره، تیل‌آباد، دشت شاد، فرسیان-فرنگ، گالیکش، گنبد، مینودشت و نوده) تهیه گردید.

مساحت و مواد تشکیل‌دهنده سازندهای سنگ-شناسی در جدول ۱ ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی لرزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه، به ترتیب از رابطه بزرگی زمین لرزه امبرسیز-ملویل (Ambraseys and Melville, 1982) و رابطه کاهندگی جویئر-بور-فومال (Joyner and Boore, 1981) استفاده شد (رابطه‌های ۴ تا ۶) و در نتیجه نقشه PGA در محیط ArcGIS 10.3 تهیه گردید.

رابطه ۴)

$$M = \log L + 5.4$$

رابطه ۵)

$$PGA = 10^{((0.216 \times (M-6)) - (0.777 \times (\log D))) - 0.038}$$

جدول ۱: مشخصات سازندهای سنگی منطقه مورد مطالعه

کد	نام سازند	جنس	کد	نام سازند	جنس
Re2	سازند الیکا	دولومیت توده‌ای	Qzs	-	آبرفت- زمین‌های زراعی
Jcb	سازند چمن بید	آهک و مارن خاکستری تا تیره	Dkh	سازند خوش بیلاق	شیل خاکستری تیره
Jsdk	سازند کشف رود	شیل و زغال سنگ	Ngm	-	مارن‌های گچ‌دار
E1	-	سنگ آهک دولومیت دار	K2	-	سنگ آهک تخریبی
Js	سازند شمشک	ماسه‌سنگ خاکستری و شیل	Em	-	مارن و ماسه‌سنگ
Jlm	-	سنگ آهک	Jmz	سازند مزدوران	آهک دولومیتی خاکستری ضخیم لایه
Qt2	-	پادگانه‌ها و مخروط‌افکنه‌های آبرفتی	Ngc	-	کنگلومرا
Jl	سازند لار	آهک ضخیم لایه تا توده‌ای خاکستری	Ql	-	نهشته‌های رسوبی (لس)

براساس نتایج اُبرایان (O'brien, 2007) و تین‌بوئی و همکاران (Tien Bui et al, 2011)، مقادیر تورم واریانس بالای ۵ بیان‌گر هم‌خطی بحرانی بین عوامل می‌باشد.

#### مدل پیشینه آنتروپی

در این تحقیق با استفاده از مدل پیشینه آنتروپی (Phillips et al, 2006) به عنوان یک مدل وابسته به نقاط حضور نواحی دارای پتانسیل در نرم‌افزار MaxEnt مدل‌سازی شده است. در این روش همبستگی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش (۱۴ عامل مؤثر) با نقاط شواهد زمین‌لغزش محاسبه شده و با همبستگی متغیرها با ۱۰۰۰۰ نقطه

هم‌چنین، با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک (باند ۸) و قرمز (باند ۴) تصاویر Sentinel-2 سال ۲۰۱۷ با قدرت تفکیک ۱۰ متر (مطابق با قدرت تفکیک نقشه DEM) و استفاده از رابطه ۷، نقشه شاخص NDVI برای حوزه آبخیز اوغان تهیه گردید (Van der Knijff et al, 2000).

رابطه ۷)

$$NDVI = \frac{Band\ 8 - Band\ 4}{Band\ 8 + Band\ 4}$$

به‌منظور بررسی هم‌خطی عوامل مؤثر و برای جلوگیری از استفاده چندباره نقشه‌های با همبستگی بالا و ایجاد اریبی در نتایج مدل‌سازی، از عامل تورم واریانس (VIF<sup>۱۰</sup>) استفاده شد.

شده‌اند و در واقعیت فاقد زمین‌لغزش بوده‌اند روی محور افقی (مثبت غلط<sup>۱۲</sup> یا 1-Specificity) و در برابر آن نسبت پیکسل‌هایی که به درستی توسط مدل تحت عنوان دارای زمین‌لغزش شناسایی شده‌اند (مثبت درست<sup>۱۳</sup> یا Sensitivity) روی محور عمودی ترسیم می‌گردد. مساحت زیر این منحنی<sup>۱۴</sup> AUC نام داشته و AUC برابر با ۰/۵ معادل مدل خنثی (نتایج ناشی از شانس) بوده و هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر شود کارایی مدل افزایش می‌یابد (Pontius and Schneider, 2001). در تحقیق حاضر، منحنی‌های ROC در محیط SPSS ترسیم شده‌اند.

### نتایج

شواهد زمین‌لغزش و بررسی هم‌خطی عوامل طی مطالعات میدانی گسترده و بهره‌گیری از اطلاعات سازمانی و تصاویر گوگل‌ارث، در مجموع تعداد ۱۵۹ زمین‌لغزش به مساحت کلی ۵۲/۵۶ هکتار در حوزه آبخیز اوغان ثبت گردید. کم‌ترین و بیش‌ترین مساحت زمین‌لغزش به ترتیب ۱۰۷ و ۷۵۸۸۴ مترمربع می‌باشند. ۷۰ درصد از این تعداد زمین‌لغزش (۱۱۱ عدد) برای مدل‌سازی و باقیمانده (۴۸ عدد) برای ارزیابی مدل‌ها با روش تلفیقی فاصله ماهالانوبیس - تصادفی انتخاب شدند. براساس نتایج شاخص VIF (جدول ۲)، عامل ارتفاع و کاربری اراضی به‌ترتیب با مقادیر ۵/۴۵۲ و ۱/۰۴ دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار هم‌خطی می‌باشند. با توجه به این‌که مقدار هم‌خطی عامل ارتفاع بیش‌تر از حد بحرانی (عدد ۵) بوده و سبب اریبی در نتایج نهایی مدل‌ها خواهد شد، لذا از مرحله مدل‌سازی حذف گردید. از لحاظ تئوری، ارتباط عامل ارتفاع و وقوع زمین‌لغزش تنها با تفاسیر زمین‌شناسی و بارش امکان‌پذیر می‌باشد. به‌طوری‌که، برخی از مطالعات به ارتباط

تصادفی از منطقه به‌عنوان نقاط زمینه (مناطق شبه عدم حضور زمین‌لغزش) مقایسه می‌گردد. درنهایت مدلی به‌دست می‌آید که دارای بیش‌ترین قدرت تشخیص مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش براساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در پنج کلاس استعداد (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) پهنه‌بندی می‌گردد (Kornejady et al, 2019).

### مدل جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی یکی از روش‌های ماشین یادگیری جهت مدل‌سازی درخت تصمیم است (Shataee et al, 2012). در این مدل، نمونه‌گیری تصادفی از اطلاعات و متغیرها، به صورت خودکار و تکرارشونده به‌منظور تولید انبوهی از درختان رگرسیونی انجام می‌شود. برای تعیین تعداد بهینه درختان، ابتدا یک تعداد درخت اولیه برای تولید منحنی تغییرات میانگین مربعات خطا (MSE) در مقابل تعداد مشخصی از درختان نمونه آموزشی و ارزیابی، تشکیل می‌شوند (Kornejady et al, 2019). به‌منظور به کارگیری این مدل در ارزیابی استعداد زمین‌لغزش از نرم‌افزار R و پکیج randomForest استفاده می‌شود. از مهم‌ترین نتایج حاصل از این مدل می‌توان به اولویت‌بندی متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش) در حوزه مورد مطالعه اشاره کرد. برخلاف وابستگی صرف مدل پیشینه آنتروپی به مناطق حضور پدیده، مدل جنگل تصادفی یک مدل وابسته به نقاط (لغزشی) حضور و عدم حضور می‌باشد.

### ارزیابی کارایی مدل‌ها

منحنی<sup>۱۱</sup> ROC (مشخصه عملکرد نسبی سیستم) نموداری است که در آن نسبت پیکسل‌هایی که به اشتباه توسط مدل به‌عنوان زمین‌لغزش شناسایی

حوضه‌ها نیست. از بعد دیگر، ارتباط ارتفاع و جهت کلی رژیم بارش به مراتب منطقی‌تر به نظر می‌رسد و در تحقیق چن و همکاران (Chen et al, 2017) به خوبی تشریح شده است. به استناد مطالب فوق، ارتباط ضمنی و غیرمستقیم عامل ارتفاع در وقوع زمین‌لغزش مبرهن بوده و در صورت حضور عوامل اصلی نظیر زمین‌شناسی و بارش و همچنین وجود هم‌خطی بالا ناشی از عامل ارتفاع، حذف این عامل توجیه‌پذیر می‌باشد.

معنی‌دار ارتفاع و وقوع زمین‌لغزش اشاره داشته و این ادعا را با تفاسیر زمین‌شناختی اثبات نموده‌اند (Ercanoglu and Gokceoglu, 2002). با توجه به نتایج این تحقیقات، ارتفاعات بالاتر به سبب رخنمون سازندهای سنگی مقاوم، حساسیت کم-تری به وقوع زمین‌لغزش دارند. با وجود سندیت چنین ارتباط معنی‌داری در سطح یک حوضه خاص و مشاهده آن در حوضه‌های متعدد، تاکنون هیچ ارتباط کلی و قابل اتکایی بین زمین‌شناسی و ارتفاع ارائه نشده؛ از این‌رو قابل تعمیم به سایر

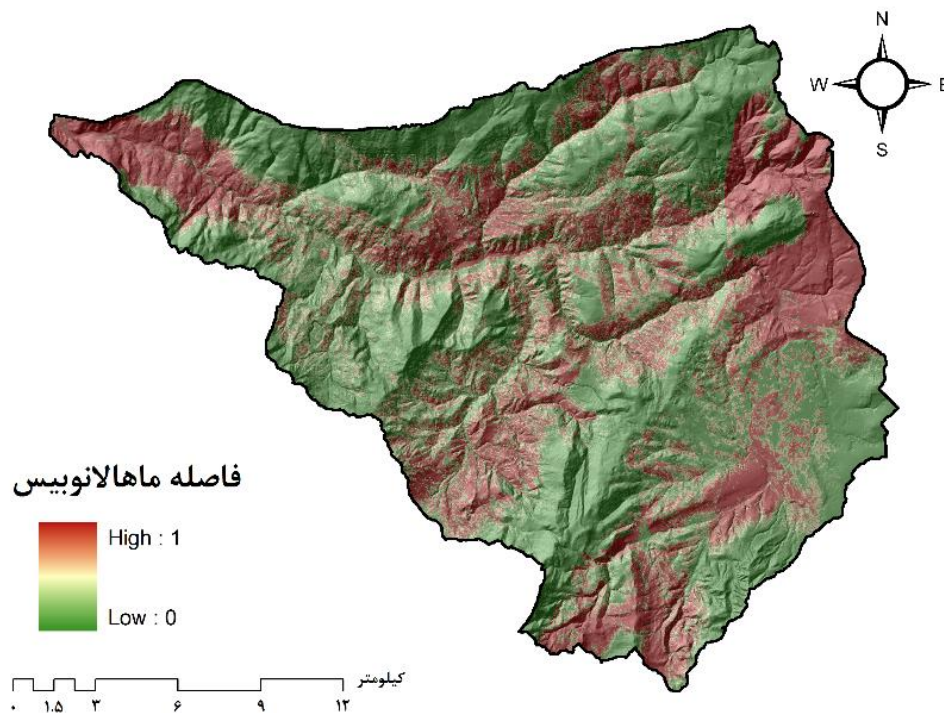
جدول ۲: مقادیر هم‌خطی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش حاصل از فاکتور تورم واریانس (VIF) در نرم‌افزار SPSS

شاخص‌های هم‌خطی		عامل	شاخص‌های هم‌خطی		عامل
VIF	Tolerance		VIF	Tolerance*	
۱/۱۴۴	۰/۸۷	فاصله از جاده	۵/۴۵۲	۰/۱۸	ارتفاع
۱/۲۲۰	۰/۸۲	درجه شیب	۱/۰۴۵	۰/۹۶	جهت شیب
۱/۹۸۱	۰/۵۰	کاربری اراضی	۱/۷۶۲	۰/۵۷	شاخص PGA
۱/۲۳	۰/۸۱	شاخص LS	۱/۲۷۴	۰/۷۸	سازند سنگی
۱/۳۴۵	۰/۷۴	شاخص TWI	۱/۹۳۵	۰/۵۲	شاخص HAND
۲/۱	۰/۴۸	انحنای عرضی دامنه	۱/۳۶۰	۰/۷۴	شاخص NDVI
۲/۴	۰/۴۲	انحنای طولی دامنه	۳/۰۲۱	۰/۳۳	بارش متوسط سالانه
			۱/۲۹۲	۰/۷۷	فاصله از آبراهه

\* شاخص حدود تفرانس (Tolerance) معکوس شاخص تورم واریانس (VIF) بوده، به طوری که اعداد کم‌تر از ۰/۱ بیان‌گر هم‌خطی بحرانی می‌باشد.

با تلفیق با روش انتخاب تصادفی، تقسیم‌بندی نقاط یادگیری-اعتبارسنجی و همچنین نقاط حضور-عدم حضور انجام گردید.

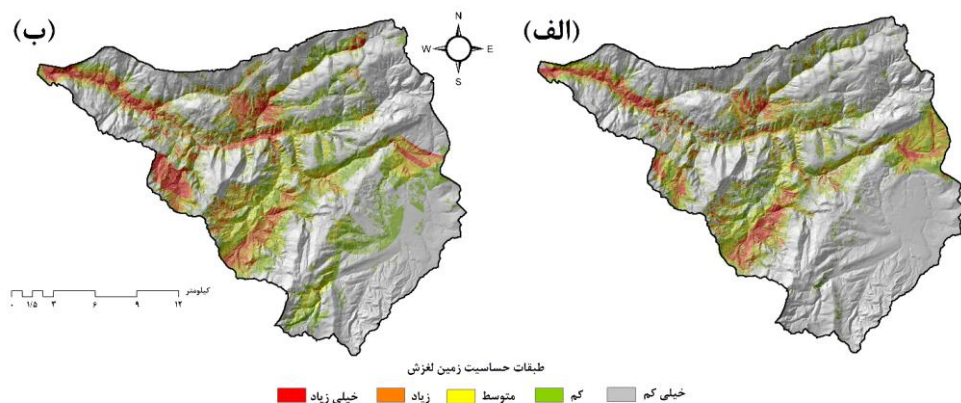
با ورود لایه عوامل مؤثر فاقد هم‌خطی و نقاط لغزشی به افزونه Land Facet Corridor Tools در محیط ArcGIS 10.3 نقشه نهایی فاصله ماهالانوبیس تهیه گردید (شکل ۴)؛ که در نهایت



شکل ۴: نقشه فاصله ماهالانوبیس برای حوزه آبخیز اوغان

مرحله اعتبارسنجی، اختلاف بین کارایی دو مدل شفاف‌تر می‌گردد. به طوری که مدل جنگل تصادفی با مقدار  $0/9$  نسبت به مدل حداکثر آنتروپی با مقدار  $0/85$  برتری قابل توجهی نشان داده است. با توجه به یکسان بودن شرایط مدل‌سازی (ورودی‌های مشابه) برای هر دو مدل، این اختلاف می‌تواند از ساختار مدل‌های مورد استفاده ناشی گردد. براساس نتایج الیت و همکاران (Elith et al, 2006)، مدل بیشینه آنتروپی و سایر مدل‌های مشابه که وابستگی صرف به نقاط حضور پدیده دارند، با توجه به این که دسترسی به داده‌های عدم حضور ندارند، در نتیجه اطلاعاتی نیز از غلبه مکانی ذاتی آن پدیده نخواهند داشت. لذا، نتایج حاصل از این مدل‌ها در تفکیک مناطق عدم وقوع از وقوع، قابلیت اتکای پایینی داشته و نقشه نهایی صرفاً یک اشاره ضمنی و تلویحی به الگوی وقوع پدیده می‌باشد.

ارزیابی کارایی نقشه‌های حساسیت زمین لغزش پس از تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش با دو مدل بیشینه آنتروپی و جنگل تصادفی، نقشه حاصل با استفاده از نقاط عطف (شکست طبیعی) منحنی تجمعی فراوانی پیکسل‌ها به پنج کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند (شکل ۵). با توجه به تحقیقات آیالو و یاماگاشی (Ayalew and Yamagishi, 2005) و آکگون (Akgun, 2012)، روش شکست طبیعی برای تقسیم‌بندی نمودارهای تجمعی فراوانی دارای چولگی مثبت یا منفی کارآمد است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مقدار AUROC به‌منظور ارزیابی نتایج مدل‌ها استفاده شد (شکل ۶). براساس مقادیر AUROC در مرحله آموزش مدل‌ها، دو مدل بیشینه آنتروپی و جنگل تصادفی به ترتیب با مقادیر  $0/91$  و  $0/92$ ، کارایی نسبتاً مشابهی ارائه داده‌اند که بیان‌گر قدرت یادگیری و برازش فوق‌العاده این دو مدل می‌باشد. اگرچه در



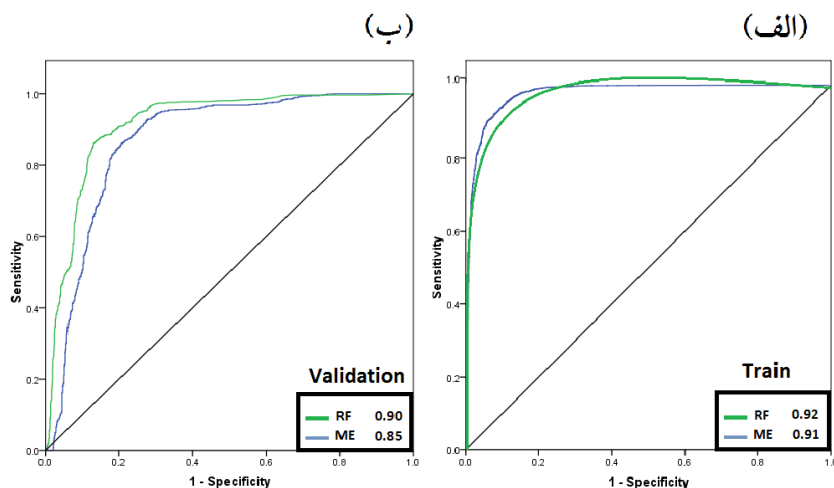
شکل ۵: نقشه‌های حساسیت زمین لغزش حاصل از مدل‌های حداکثر آنتروپی (الف) و جنگل تصادفی (ب)

زمینه‌ساز مؤثر و شواهد وقوع زمین لغزش در طول مدل‌سازی و با تکرار بالا، حذف شاخه‌های تصمیم ناکارآمد در فرآیند مدل‌سازی و در نهایت اصلاح پیوسته پیش‌بینی‌ها با به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی، قدرت بسیار بالایی در پیش‌بینی الگوی حساسیت مخاطرات طبیعی به‌ویژه زمین لغزش ارائه نموده که نتایج مشابهی نیز در تحقیقات محمدی و پورقاسمی (۱۳۹۶)، طالبی و همکاران (۱۳۹۷)، چن و همکاران (Chen et al, 2017)، رحمتی و همکاران (Rahmati et al, 2018) پورقاسمی و رحمتی (Pourghasemi and Rahmati, 2018) حاصل شده است. مقایسه مساحت کلاس‌های حساسیت زمین لغزش در دو مدل مورد استفاده نشان می‌دهد که مدل پیشینه آنتروپی ۱۲/۱ درصد از منطقه مورد مطالعه را در زون‌های با حساسیت بالا (حساسیت زیاد و خیلی زیاد) طبقه‌بندی نموده، در حالی که این مقدار در مدل جنگل تصادفی به مقدار ۹/۳۲ درصد کاهش یافته است (شکل ۷). لذا با توجه به برتری قبلی نتایج مدل جنگل تصادفی مبتنی بر شاخص AUROC، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل نه تنها نتایج بهتر، بلکه کاربردی‌تری نیز ارائه می‌دهد؛ به طوری که با فرض تمرکز عملیات مدیریتی

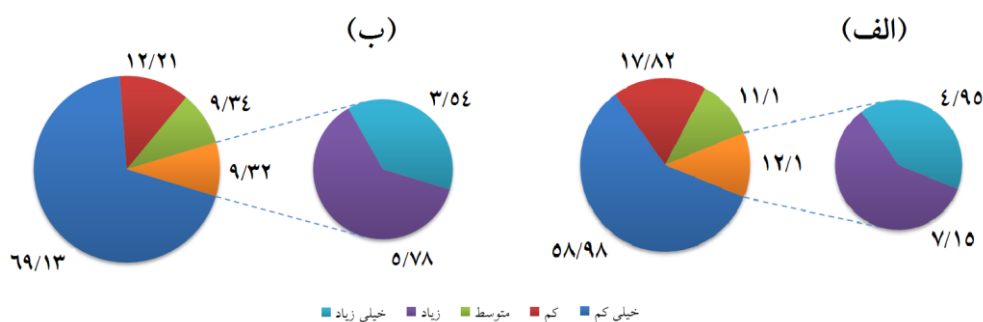
هرچند مدل پیشینه آنتروپی با انتخاب ۱۰۰۰۰ نقطه شبه عدم وقوع سعی در ارائه یک الگوی مکانی با قدرت تفکیک قابل قبول دارد، با این حال به دلیل آن که این نقاط به شکل کاملاً تصادفی توسط مدل انتخاب می‌شوند، لذا ممکن است مناطق استخراج نقاط شبه عدم وقوع دارای حساسیت ذاتی بالای وقوع بوده اما به دلیل عدم وجود شرایط تحریکی مورد نیاز، به تظاهر مورفولوژیکی کافی و در نتیجه وقوع کامل پدیده ختم نشده است. در مقابل، در این تحقیق سعی بر آن بود، تا مناطق عدم حضور پدیده در مدل جنگل تصادفی با استفاده از روش تلفیقی فاصله ماهالانویس- تصادفی و از مناطق با حساسیت ضمنی پایین انتخاب گردد. بنابراین، دقت بالای مدل جنگل تصادفی در مرحله اعتبارسنجی که دلالت بر قدرت پیش‌بینی بالا و تعمیم‌پذیری بالای نتایج مدل دارد، را می‌توان مرهون تکنیک نمونه‌برداری ارائه شده دانست که با تحقیقات سانگراتوس و بنارتوس (Tsangaratos and Benardos, 2014) و کرنژادی و همکاران (Kornejady et al, 2017a) هم‌راستا می‌باشد. علاوه بر این، مدل جنگل تصادفی با تشکیل انبوهی از درخت‌های تصمیم، درگیر نمودن عوامل

خارج شده و سبب تخصیص منابع مالی و زمان کم‌تری نیز خواهد شد.

در زون‌های با حساسیت بالا و هم‌چنین انتخاب مدل جنگل تصادفی به‌عنوان مدل برتر، ۲/۷۸ درصد از منطقه (۱۰۸۴ هکتار) از روند مدیریتی



شکل ۶: منحنی‌های ارزیابی کارایی ROC مدل‌های حساسیت زمین‌لغزش برای دو مرحله آموزش مدل (الف) و اعتبارسنجی نتایج (ب)

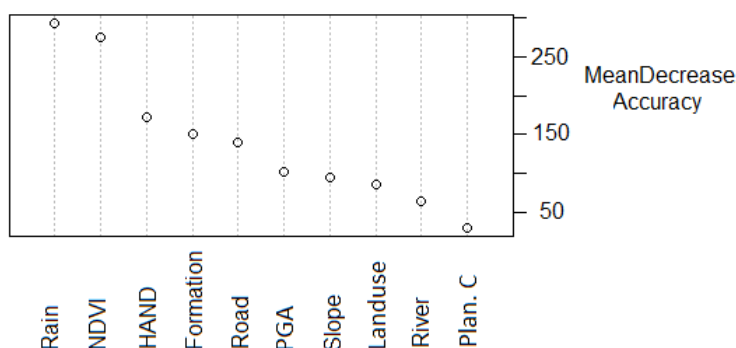


شکل ۷: مساحت طبقات حساسیت زمین‌لغزش در دو مدل حداکثر آنتروپی (الف) و جنگل تصادفی (ب)

با توجه به مطالب فوق، مدل جنگل تصادفی به‌عنوان مدل برتر در زمینه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز اوغان معرفی می‌گردد. براساس نتایج مدل برتر (جنگل تصادفی)، مشارکت عوامل در فرآیند مدل‌سازی در شکل ۸ ارائه شده است. مقادیر مشارکت در این نمودار مبتنی بر متوسط کاهش مقدار شاخص AUROC در صورت حذف عامل موردنظر از فرآیند مدل‌سازی می‌باشد. طبق شکل ۸، از بین ۱۴ عامل انتخاب شده در فرآیند مدل‌سازی، به ترتیب عوامل بارش، شاخص NDVI، شاخص HAND، سازند سنگ-شناسی و فاصله از جاده بیش‌ترین مشارکت و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه آبخیز اوغان داشته و عوامل جهت شیب، شاخص TWI، شاخص LS و شاخص انحنای طولی هیچ‌گونه مشارکتی نداشته‌اند. براساس مشاهدات میدانی گسترده و اطلاعات سازمانی و محلی، اکثر زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه ناشی از بارش باران بوده و پراکنش زمین‌لغزش‌ها با زون‌های پرباران منطقه همبستگی بالایی دارد. به‌طوری که بارش-



های شدید یا مداوم با نفوذ به عمق خاک تا سطح نفوذناپذیر توده مواد دامنه‌ای پیش‌رفته، سپس به موازات سطح نفوذناپذیر حرکت کرده، به مرور این سطح به سطح جدایش تبدیل شده و در نهایت سبب حرکت رو به پایین توده و وقوع زمین‌لغزش می‌شود. هم‌چنین بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه به اراضی زراعی دیم و آبی تبدیل شده است که جهت شخم در بخش اعظم این مناطق در جهت شیب می‌باشد. افزایش سرعت رواناب، افزایش سرعت فرسایش، بالا آمدن مصنوعی سطح آب زیرزمینی در مناطق تحت آبیاری، متراکم شدن مصنوعی لایه‌های سطحی در اثر تردد ابزارآلات کشاورزی از جمله تأثیرات کشت بی‌رویه به‌ویژه در جهت شیب می‌باشد. نمونه بارز تأثیر اراضی زراعی در تحریک حرکات دامنه‌ای، زمین‌لغزش بزرگ صفی‌آباد می‌باشد. پس از وقوع زمین‌لغزش ناشی از کشت در جهت شیب، معمولاً اراضی زراعی رها می‌شوند و به زمین‌های بایر تبدیل می‌شوند که این الگو در نقشه NDVI با تن رنگ زرد و سفید (مناطق فاقد پوشش) نمایان است.



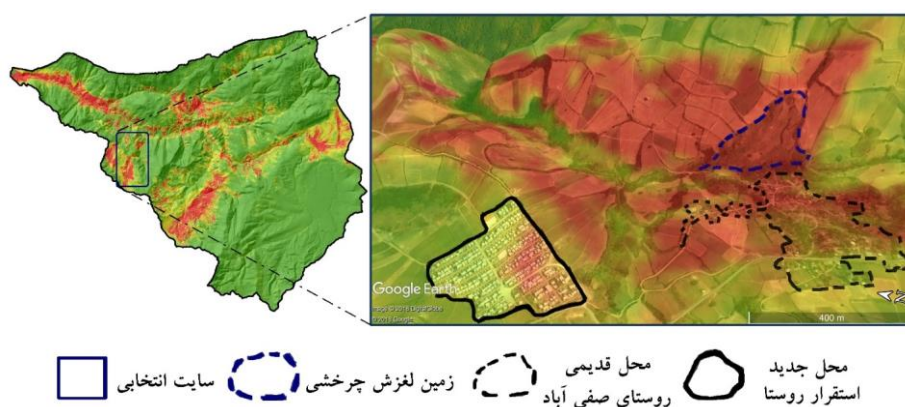
شکل ۸: نمودار مشارکت عوامل در فرآیند مدل‌سازی حاصل از مدل جنگل تصادفی

اشاره داشتند. مقادیر کم و متوسط در شاخص HAND به ترتیب نماینده محدوده‌های اشباع (حاشیه آبراهه‌ها) و دامنه می‌باشند. محدوده اشباع به سبب عمق بالای آب زیرزمینی و اشباع خاکدانه‌ها و محدوده دامنه به دلیل شیب بالا و غلبه جریان زیرقشری سریع می‌توانند نقش به‌سزایی در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه داشته باشند، که به خوبی در قالب یک بسته اطلاعات توأم توپوهایدرولوژیکی توسط شاخص HAND ارائه می‌شوند. سازندهای سنگی چمن‌بید (آهک و مارن)، کشف رود (شیل و زغال‌سنگ) و شمشک (ماسه‌سنگ و شیل) استعداد ذاتی بالایی به وقوع زمین‌لغزش داشته، به طوری که بخش اعظم زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی در این سازندها رخ داده‌اند. مارن معمولاً از هوازدگی بالایی

هم‌چنین، مناطق فاقد پوشش به دلیل غیرمسلح ماندن خاک سطحی و عدم تقویت خاکدانه‌ها با ریشه گیاهان به وقوع زمین‌لغزش حساسیت بالایی دارند. مشارکت بالای شاخص HAND در فرآیند مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی نسبت به سایر شاخص‌های فرعی مستخرج از DEM که معمولاً به بخشی (ناقص) از اطلاعات توپوگرافیکی یا هیدرولوژیکی اشاره دارند (مانند شاخص‌های TWI، LS، شیب، انحناهای طولی و عرضی دامنه)، بیان‌گر کاربرد امیدوار کننده این عامل در تحقیقات مرتبط با خطرات طبیعی بوده؛ به طوری که بهره‌مند و کرنژادی (الف ۱۳۹۴)، بهره‌مند و کرنژادی (ب ۱۳۹۴)، کرنژادی و همکاران (Kornejady et al, 2017) و رحمتی و همکاران (Rahmati et al, 2018) نیز به این امر

به‌عنوان یکی از مناطق تحت‌تأثیر از وقوع زمین‌لغزش در گذشته، نقشه حساسیت زمین‌لغزش حاصل از مدل جنگل تصادفی در نمایی نزدیک‌تر تهیه گردید (شکل ۹). با توجه به شکل ۹، محل استقرار قبلی روستا به دلیل قرارگیری در زون پنجه زمین‌لغزش چرخشی بزرگ در زون حساسیت بالا قرار گرفته است که در بخش‌های از روستا سبب تخریب آغل حیوانات و منابع آب محلی شده که در نهایت با تصمیم مسئولین ذی‌ربط، بخش اعظم روستا به محل جدید در فاصله ۵۰۰ متری غربی منتقل شده است. علاوه بر این، تمرکز زون خطر (رنگ قرمز) در مناطق کشاورزی با شخم در جهت شیب حائز اهمیت است. به طوری که این الگوی کشت، محل استقرار جدید روستای صفی‌آباد را نیز احاطه کرده و به دلیل درهم‌کنش با سایر عوامل زمینه‌ساز محیطی و انسان‌ساخت (بارش زیاد، پوشش کم در فصول پس از برداشت محصول و سازندهای سنگی حساس) بخش‌هایی از محل جدید در زون حساسیت بالا به وقوع زمین‌لغزش معرفی شده‌اند که شایسته است مورد توجه مسئولین و تصمیم‌گیران ذی‌ربط قرار گیرد.

برخوردار بوده و به‌ویژه در شرایط مرطوب به‌راحتی چسبندگی مواد خود را از دست می‌دهد. همچنین، شیل با ایجاد یک سطح غیرقابل نفوذ و هدایت جریان آب در راستای سطح خود به ایجاد یک سطح جدایش مواد دامنه‌ای تبدیل می‌گردد. به‌ویژه اگر این مواد با درون‌لایه‌های زغالی همراه باشند، مکانیسم لغزش از سرعت بالاتری همراه خواهد بود. یکی دیگر از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه اوغان عامل فاصله از جاده بوده که لغزش‌های متعدد حاشیه جاده طی بازدیدهای میدانی مؤید این موضوع می‌باشد. اختلال در شیب طبیعی دامنه، عدم رعایت در مقاوم‌سازی پی جاده، جاده‌سازی بدون احداث حائل (دیواره‌های نگه‌دارنده سنگی حاشیه جاده) جهت مقاوم‌سازی دامنه مجاور و در نهایت عدم در نظر گرفتن خصوصیات زمین‌شناسی محل احداث جاده (اعم از جنس، مقاومت و حساسیت ذاتی خاک زیرین) از جمله عوامل انسان‌سازی است که وقوع زمین‌لغزش را تشدید ساخته، به طوری که سازمان‌های متبوع حتی با احداث چندباره برخی از جاده‌های کوهستانی، شاهد وقوع مجدد زمین‌لغزش در محل و تخریب جاده بوده‌اند. جهت ارزیابی محل استقرار جدید روستای صفی‌آباد،



شکل ۹: نمایی نزدیک از حساسیت محل استقرار قدیمی و جدید روستای صفی‌آباد به وقوع زمین‌لغزش مبتنی بر نتایج مدل جنگل تصادفی

## نتیجه‌گیری

تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش به‌عنوان سنگ بنای تحقیقات زمین‌لغزش شناخته شده و در مواقع بحرانی به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر، دو مدل داده‌کاوی شامل بیشینه آنتروپی و جنگل تصادفی به همراه ۱۴ عامل محیطی جهت ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز اوغان واقع در استان گلستان به کار گرفته شد. براساس مقایسه نتایج دو مدل به لحاظ دقت یادگیری و برازش نتایج، قدرت پیش‌بینی و تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط مکانی جدید و همچنین خصوصیت کاربردی بودن و تمرکز مکانی، مدل جنگل تصادفی به‌عنوان مدل برتر شناخته و معرفی گردید. بررسی‌ها حاکی از آن بود که بخش اعظمی از دقت بالای مدل جنگل تصادفی مرهون استفاده از یک روش تلفیقی علمی و اصولی (فاصله ماهالانویس- انتخاب تصادفی) برای استخراج و معرفی مناطق فاقد زمین‌لغزش (مناطق صفر) به مدل بوده است. با بررسی نتایج مدل جنگل تصادفی مشخص گردید که مجموعه-

ای از عوامل محیطی (بارش بالا، اراضی بایر، سازندهای سنگی حساس و مکانیسم‌های توپویدروگرافیکی) و انسان‌ساخت (شخم در جهت شیب و جاده‌سازی غیراصولی) به‌شکل هم-افزائی در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه آبخیز اوغان مسئول می‌باشند. از سوی دیگر، به نظر می‌رسد شناسایی روستای صفی‌آباد به‌عنوان یک منطقه در معرض خطر بالای وقوع زمین‌لغزش تاحدی درست بوده، اما گویا محل استقرار جدید صرفاً بر مبنای شیب مناسب (تقریباً هموار) و دسترسی به جاده ارتباطی روستاها انتخاب شده و عملیات اصلاحی تکمیلی به‌ویژه اصلاح کشت در مجاورت محل جدید انجام نگرفته که براساس نتایج تحقیق حاضر می‌تواند به‌عنوان یک عامل تحریکی سبب ایجاد بحران در مقیاس وسیع‌تری شود. همچنین، با تکیه بر حضور سایر عوامل محیطی زمینه‌ساز در منطقه جدید استقرار روستا، شایسته است مناطق امن با یک دید کلی بر تمامی شرایط حاکم تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش استخراج و معرفی گردد.

## پانویس

1-Peak Ground Acceleration (PGA)  
2-Height Above the Nearest Drainage (HAND)  
3-Topographic Wetness Index (TWI)  
4-Slope Length (LS)  
5-Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)  
6-Digital Elevation Model (DEM)

7-Plan curvature  
8-Profile curvature  
9-Inverse Distance Weighting  
10-Variance Inflation Factor  
11-Receiver Operating Characteristic  
12-False positive  
13-True positive  
14-Area Under Curve

## منابع

سیل و رسوب حوزه آبخیز اوغان-گالیکش، شرکت مهندسی مشاور کاوش پی مشهد، مطالعات پایه.

-اداره کل منابع طبیعی استان گلستان (مدیریت آبخیزداری)، ۱۳۸۸. مطالعات سازه‌های کنترل

- طالبی، ع.، گودرزی، س. و پورقاسمی، ح.، ۱۳۹۷. بررسی امکان تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (محدوده مورد مطالعه: حوزه آبخیز سردارآباد، استان لرستان) دوره ۷، شماره ۱۶ - شماره پیاپی ۲، ص ۴۵-۶۴.
- محمدی، م. و پورقاسمی، ح.، ۱۳۹۶. اولویت‌بندی عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه حساسیت آن با استفاده از الگوریتم نوین جنگل تصادفی (مطالعه موردی: بخشی از استان گلستان)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال ۸، شماره ۱۵، ص ۱۶۱-۱۷۰.
- Akgun, A., 2012. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey: *Landslides*, v. 9, p. 93-106.
- Ambraseys, N.N. and Melville, C.P., 1982. *A History of Persian Earthquakes*: Cambridge Univ, Press, New York, 219 p.
- Ayalew, L. and Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan: *Geomorphology*, v. 65, p. 15-31.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant: *Hydrological Sciences Journal*, v. 24, p. 43-69.
- Chen, W., Pourghasemi, H.R., Kornejady, A. and Zhang, N., 2017. Landslide spatial modeling: introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques: *Geoderma*, v. 305, p. 314-327.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A. and Li, J., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data: *Ecography*, v. 29, p. 129-151.
- Ercanoglu, M. and Gokceoglu, C., 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach: *Environmental Geology*, v. 41, p. 720-730.
- Fukunaga, K., 2013. *Introduction to statistical pattern recognition*: Academic Press, Boston, 592 p.
- Jenness, J., Brost, B. and Beier, P., 2013. *Land facet corridor designer*: USDA forest service rocky mountain research station.
- Joyner, W.B. and Boore, D.M., 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 71, p. 2011-2038.

- Kornejady, A., Ownegh, M. and Bahremand, A., 2017a. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods: *Catena*, v. 152, p. 144-162.
- Kornejady, A., Ownegh, M., Rahmati, O. and Bahremand, A., 2018b. Landslide susceptibility assessment using three bivariate models considering the new topo-hydrological factor: *HAND: Geocarto International*, v. 33, p. 1155-1185.
- Kornejady, A., Pourghasemi, H.R. and Afzali, S.F., 2019. Presentation of RFFR New Ensemble Model for Landslide Susceptibility Assessment in Iran, In *Landslides: Theory, Practice and Modelling*: Springer, Cham, p. 123-143.
- Lee, S., Hwang, J. and Park, I., 2013. Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea: *Catena*, v. 100, p. 15-30.
- Meten, M., PrakashBhandary, N. and Yatabe, R., 2015. Effect of Landslide Factor Combinations on the Prediction Accuracy of Landslide Susceptibility Maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia: *Geoenvironmental Disasters*, v. 2, p. 1-17.
- O'Brien, R.M., 2007. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors: *Quality & Quantity*, v. 41, p. 673-690.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions: *Ecological Modelling*, v. 190, p. 231-259.
- Pontius Jr, R.G. and Schneider, L.C., 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 85, p. 239-248.
- Pourghasemi, H.R. and Rahmati, O., 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision?: *Catena*, v. 162, p. 177-192.
- Radbruch-Hall, D.H. and Varnes, D.J., 1976. Landslides—cause and effect: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, v. 13, p. 205-216.
- Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Nobre, A.D. and Melesse, A.M., 2018. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model: *Environmental Modelling & Software*, v. 102, p. 1-12.
- Shataee, S., Kalbi, S., Fallah, A. and Pelz, D., 2012. Forest attribute imputation using machine-learning methods and ASTER data: comparison of k-NN, SVR and random forest regression algorithms: *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, p. 6254-6280.
- Stumpf, A. and Kerle, N., 2011. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests: *Remote Sensing of Environment*, v. 115, p. 2564-2577.
- Tien Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O., 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression: *Natural Hazards*, v. 59, p. 1413.
- Trigila, A., Frattini, P., Casagli, N., Catani, F., Crosta, G., Esposito, C. and Spizzichino, D., 2013. Landslide susceptibility mapping at national scale: the Italian case study: In *Landslide science and practice*, p. 287-295: Springer, Berlin, Heidelberg.
- Tsangaratos, P. and Benardos, A., 2014. Estimating landslide susceptibility through a artificial neural network classifier: *Natural Hazards*, v. 74, p. 1489-1516.

- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2005. National report of the Islamic Republic of Iran: World Conference on Disaster Reduction, Kobe, Hyogo, Japan.
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A. and Montanarella, L., 2000. Soil erosion risk assessment in Europe.
- Van Westen, C.J., Van Asch, T.W. and Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 65, p. 167-184.
- Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M. and Schröder, B., 2012. How can statistical models help to determine driving factors of landslides?: *Ecological Modelling*, v. 239, p. 27-39.
- Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. and Kanamori, H., 1999. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California: *Earthquake Spectra*, v. 15, p. 557-564.