

ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان)

بهاره قاسمیان - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
موسی عابدینی* - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
شهرام روستائی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز.
عطا الله شیرزادی - کارشناس آموزشی و پژوهشی گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹

چکیده

یکی از انواع فرآیندهای دامن‌های که هر ساله موجب خسارات جانی و مالی فراوان در بسیاری از نقاط ایران و جهان می‌شود، پدیده زمین لغزش است. شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش از طریق پهنه‌بندی خطر، یکی از اقدامات مؤثر و ضروری در کاهش خطرات احتمالی و مدیریت آن می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی حساسیت زمین لغزش در شهرستان کامیاران با استفاده از مدل ماشین پشتیبان بردار می‌باشد. در ابتدا، نقشه پراکنش زمین لغزش با ۶۰ نقطه لغزشی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از منابع مختلف ترسیم گردید. پس از آن مکان‌های لغزشی، به صورت تصادفی به یک نسبت ۷۰ به ۳۰ برای ساخت مدل زمین لغزش و اعتبارسنجی آن تقسیم شدند. آموزش و صحت‌سنجی تابع RBF از الگوریتم SVM توسط یک پایگاه داده مکانی با مجموع دوازده عامل زمین لغزش از جمله شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای شیب، انحنای عرضی شیب، انحنای طولی شیب، شدت تابش خورشید، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه با توجه به مدل مرجع مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت منطقه مورد مطالعه به پنج کلاس حساسیت بسیار بالا، بالا، متوسط، کم و بسیار کم تقسیم شد. سپس عملکرد این الگوریتم با استفاده از منحنی ROC مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که سطح زیر منحنی (AUC) با استفاده از مجموعه داده‌های آموزشی (۰/۹۷۰) و با استفاده از داده‌های صحت‌سنجی (۰/۸۸۲) می‌باشد. لذا تجزیه و تحلیل نتایج نشان‌دهنده آن بود که تابع RBF مدل SVM عملکرد خوبی جهت ارزیابی حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه دارد و نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌تواند برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی، کاهش خطرات زمین لغزش و تصمیم‌گیری در مناطق مستعد لغزش مفید واقع گردد.

واژگان کلیدی: حساسیت، زمین لغزش، الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (SVM)، منحنی (ROC) کامیاران.

مقدمه

زمین‌لغزش به عنوان یکی از مهم‌ترین خطرات طبیعی در دنیا معرفی شده است (مالامود^۱ و همکاران، ۲۰۰۴، ۶۸۷). با وجود بررسی‌های جامع و گسترده در زمینه زمین‌لغزش و مدیریت خطر آن، همچنان این پدیده به عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدات در سراسر دنیا و خصوصاً مناطق کوهستانی به شمار می‌آید (گوتز^۲ و همکاران، ۲۰۱۱، ۳۷۷). زمین‌لغزش به عنوان یکی از حرکات توده‌ای، حرکت یک توده سنگ، آوار، خاک در روی دامنه به سمت پایین تحت تأثیر نیروی جاذبه است (کرودن و وارنز^۳، ۱۹۹۶، ۴۲). بروز این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل متعدد زمین‌شناسی (لیتولوژی)، ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، بیولوژیکی و انسانی باشد. با این وجود، مهم‌ترین عوامل محرک زمین‌لغزش‌ها؛ بارندگی شدید، ذوب سریع برف، تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی، زمین لرزه و فرسایش با سرعت زیاد (سیدلی و اوچایی^۴، ۲۰۰۶، ۳۱۳) شرایط اقلیمی، ویژگی‌های زمین‌شناختی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و یا ترکیبی از این عوامل می‌باشند (اوزت^۵ و همکاران، ۲۰۰۳، ۳۳۱). در سطح جهانی، بر اساس مطالعات انجام شده توسط شبکه موضوعی ژئوتکنیکی اروپا، زمین‌لغزش به تنهایی ۱۷٪ از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده است و میزان مرگ و میر ناشی از این پدیده در طی سال‌های ۱۹۰۳ تا ۲۰۰۴ به ترتیب در آمریکا ۳۹٪، آسیا ۲۹٪، آفریقا ۱٪ و اقیانوسه ۱٪ می‌باشد و بیش از ۶۶ میلیون نفر از مردم دنیا در مناطق لغزشی در معرض خطر ریسک بالا زندگی می‌کنند (کوهورست^۶ و همکاران، ۲۰۰۵، ۱۷۳). در ایران نیز در مورد خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش‌ها مطالعاتی صورت گرفته است. چنانچه بر طبق آمار بانک اطلاعاتی زمین‌لغزش‌های کشور میزان خسارات ناشی از ۴۹۰۰ زمین‌لغزش ثبت شده (از سال ۱۳۷۲ تا پایان شهریور ۱۳۸۶) در کشور ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد گردیده است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۱، ۲). لذا اقدامات ضروری جهت کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش‌ها، شناسایی نواحی مستعد زمین‌لغزش، تعیین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها و تهیه نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش‌ها ضروری می‌باشد. در واقع تهیه نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش، ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت بحران در نواحی کوهستانی است (دهال^۷، ۲۰۰۸، ۴۹۸). روش‌های کمی زیادی در مطالعات پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌ها تاکنون استفاده شده است، از جمله؛ رگرسیون لجستیک^۸ (عابدینی^۹ و همکاران، ۲۰۱۷، روستایی و خدائی، ۱۳۹۵، کاووزوگلو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۵، تسانگاراتوس و لیا^{۱۱}، ۲۰۱۵)، روش آماری دو متغیره^{۱۲} (خو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۲، جی‌وانگ^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۵)، روش آماری چند متغیره^{۱۵} (وانگ و چن^{۱۶}، ۲۰۱۵)، نسبت فراوانی^{۱۷} (شهابی^{۱۸}، ۲۰۱۴، تای‌فام^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۵a)،

1. Malamud

2. Goetz

3. Cruden & Varnes

4. Sidle & Ochiai

5. Ost

6. Koehorst

7. Dahal

8. Logistic Regression

9. Abedini

10. Kavzoglu

11. Tsangaratos & Ilia

12. Bivariate statistics

13. Xu

14. Jie Wang

15. Multivariate Regression

16. Wang & Chen

17. Frequency Ratio

18. Shahabi

19. Thai Pham

وزن دهی شواهد^۱ (فرجی سبکبار^۲ و همکاران ۲۰۱۴، کاواز و گلو^۳ و همکاران ۲۰۱۵)، تئوری بیزین^۴ (ونکاتسان^۵ و همکاران ۲۰۱۳، تای فام و همکاران b ۲۰۱۵، شیرزادی^۶ و همکاران، ۲۰۱۷)، درخت تصمیم‌گیری^۷ (تای فام ۲۰۱۶، تسانگاراتوس و لیا ۲۰۱۵) و غیره. با این حال، نیاز ضروری به استفاده از مدل‌ها و تکنیک‌هایی برای افزایش صحت پیش‌بینی زمین لغزش‌ها در مقیاس منطقه‌ای وجود دارد. لذا این مدل‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است که یکی از نوین‌ترین و دقیق‌ترین آن‌ها الگوریتم ماشین پشتیبان بردار^۸ (SVM) می‌باشد. یمانی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی تحت عنوان به‌کارگیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش حوضه آبریز درکه به این نتیجه رسیدند که در بین توابع اجرا شده، تابع حلقوی به خاطر انطباق بیشتر با واقعیت، بهترین عملکرد و تابع خطی از نظر عملکرد، پایین‌ترین دقت را نشان می‌دهد. پنگ^۹ و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی به تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش بر اساس نظریه‌ی Rough set و الگوریتم ماشین پشتیبان بردار در سه منطقه‌ی دره‌ای واقع در کشور چین پرداختند. نتایج بیانگر این بود که ۱۹/۷ درصد از منطقه دارای حساسیت متوسط و بالا جهت وقوع لغزش می‌باشد و سطح بالایی از خطر لغزش در داخل و اطراف مناطق اصلی ساکنان شهرستان بادونگ^{۱۰} و شهرستان‌های دیگر، مناطق روستایی و مناطق حمل و نقل در امتداد رودخانه یانگ تسه^{۱۱} و شاخه‌های آن می‌باشد. در واقع مدل ترکیبی که شامل نظریه‌ی RS و مدل SVM می‌باشد، جهت پیش‌بینی خطر زمین لغزش، دارای مهارت پیش‌بینی بهتر و قابلیت اطمینان بالاتر می‌باشد. هانگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به پیش‌بینی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک (LR)، درخت تصمیم‌گیری (DT) و الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار (SVM) در منطقه یهانگ^{۱۳} واقع در کشور چین پرداختند که مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌های بکار گرفته شده با استفاده از شاخص (ROC) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشانگر آن بود که مقدار سطح زیر منحنی شاخص ROC برای مدل رگرسیون لجستیک ۹۲/۵٪، برای مدل ماشین‌های پشتیبان بردار ۸۸/۸٪ و برای مدل درخت تصمیم‌گیری ۹۵/۷٪ می‌باشد، هم‌چنین قابلیت پیش‌بینی خطر زمین لغزش برای مدل رگرسیون لجستیک ۸۱/۱٪، برای مدل ماشین پشتیبان بردار ۸۴/۲٪ و برای مدل درخت تصمیم‌گیری ۹۳/۳٪ می‌باشد، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی کاربری اراضی و شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش مفید باشد. بر اساس آمارهای موجود استان کردستان از لحاظ وقوع زمین لغزش بعد از استان‌های مازندران و گلستان سومین استان در کشور است و چنانچه ملاک رتبه‌بندی مساحت استان‌ها باشد این استان در رتبه بالاتری قرار می‌گیرد (میرصانعی و مهدوی‌فر، ۱۳۸۵؛ ۲۶)، لذا اهمیت پژوهش در منطقه مورد مطالعه بیشتر احساس می‌شود. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی و مقایسه کارایی مدل ماشین پشتیبان بردار جهت تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش‌های منطقه مطالعاتی به عنوان یکی از مستعدترین نواحی زمین لغزش در استان کردستان بر اساس لغزش‌های ثبت شده می‌باشد.

1. Weight of Evidence (WoE)

2. Faraji Sabokbar

3. Kavzoglu

4. Naïve Bayes

5. Venkatesan

6. Shirzadi

7. Decision Tree

8. Support Vector Machine

9. Peng

26. Badong

11. Yangtze

12. Hang

13. Yihuang

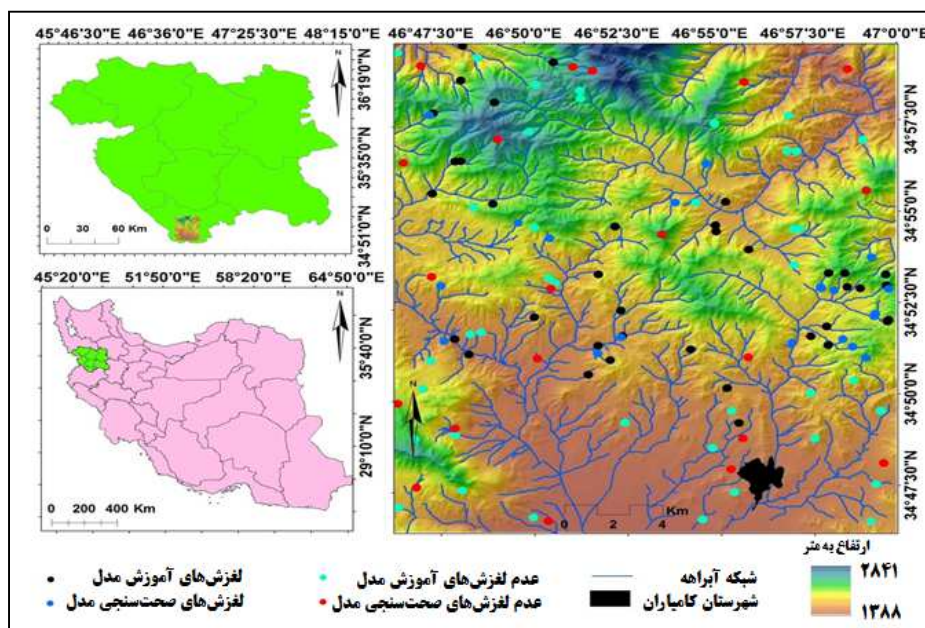
موقعیت جغرافیایی و خصوصیات فیزیکی، زمین‌شناسی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه

شهرستان کامیاران، واقع در بخش شرقی استان کردستان، در طول جغرافیایی $30^{\circ} 47' 34''$ تا $30^{\circ} 47' 30''$ شرقی و عرض جغرافیایی $34^{\circ} 47' 30''$ تا $34^{\circ} 57' 30''$ شمالی جای گرفته است. منطقه مورد مطالعه زمین‌لغزش‌های اطراف شهرستان کامیاران در مساحتی حدود $516/44$ کیلومتر مربع را شامل می‌گردد (شکل ۱). از نظر توپوگرافی و فیزیکی، حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع از سطح دریا به ترتیب 2841 ، 1757 و 1388 متر و اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقطه 1453 متر می‌باشد. از لحاظ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در زون ساختاری سنندج - سرجان و زاگرس قرار دارد. از لحاظ چینه‌شناسی منطقه مطالعاتی رخنمون‌هایی از سنگ‌های کرتاسه تا کواترنر را شامل می‌شود، که قدیمی‌ترین آن‌ها سازند گورپی (شامل مارن و شیل با رگه‌هایی از آهک رسی) و جدیدترین آن‌ها رسوبات عهد حاضر، مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی جوان و قدیم می‌باشد. از نظر لیتولوژی و تشکیلات منطقه مطالعاتی در (هشت گروه بر اساس دوره زمین‌شناسی) (پورقاسمی^۱ و همکاران، 2013 ، 5) شامل گروه ۱- دوره کواترنر (دوران سنوزوئیک)، گروه ۲- اواخر کرتاسه - اوائل پالتوسن (دوران مزوزوئیک - سنوزوئیک)، گروه ۳- اواخر ائوسن - اوائل الیگوسن (دوران سنوزوئیک)، گروه ۴- پالتوسن - ائوسن (دوران سنوزوئیک)، گروه ۵- اواخر کرتاسه - پالتوسن (دوران مزوزوئیک - سنوزوئیک)، گروه ۶- الیگوسن - میوسن (دوران سنوزوئیک)، گروه ۷- دوره کرتاسه (دوران مزوزوئیک)، گروه ۸- ژوراسیک - کرتاسه (دوران مزوزوئیک) دارای لیتولوژی شامل رسوبات آبرفتی، ماسه سنگ، کنگلومرا و سنگ آهک، مارن و شیل با رگه‌هایی از آهک رسی به طوری که بیشترین تعداد لغزش‌های منطقه در این سنگ‌ها رخ داده است. همچنین بررسی‌های صورت گرفته با توجه به آمار پرسسشنامه‌های سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری نشان داد که نوع لغزش چرخشی ($54/61\%$) و مرکب ($31/53\%$) به ترتیب بیشترین نوع لغزش‌های منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص داده‌اند. حداکثر طول زمین‌لغزش 3043 متر و حداقل طول 55 متر می‌باشد. همچنین حداکثر عرض زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی 6320 متر و حداقل عرض زمین‌لغزش منطقه 87 متر می‌باشد (جدول ۱). مطابق با طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن ($D = 23/56$) اقلیم منطقه مدیترانه‌ای می‌باشد. متوسط بارندگی منطقه در طول دوره آماری $2000 - 2012$ ، 560 میلی‌متر در سال و میانگین درجه حرارت سالانه آن $13/69$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جدول (۱) مشخصات اصلی زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

اندازه‌گیری‌های آماری	معادل لاتین	طول زمین‌لغزش به متر	عرض زمین‌لغزش به متر
محدوده کل زمین‌لغزش‌ها	Total range of length	۵۵ ~ ۳۰۴۳	۸۷ ~ ۶۳۲۰
میانگین	Average	۴۵۲/۸۱	۷۰۲/۹۸
انحراف معیار	S.D	۴۰۵/۸۲	۸۲۶/۸۸
چولگی	Skewness	۳/۶۹۰	۳/۶۹۶
کشیدگی	kurtosis	۱۸/۸۵۹	۱۸/۷۵۱
میانه	Median	۳۴۴/۵	۴۵۶/۶
مد	Mode	۲۲۵	۵۰۰

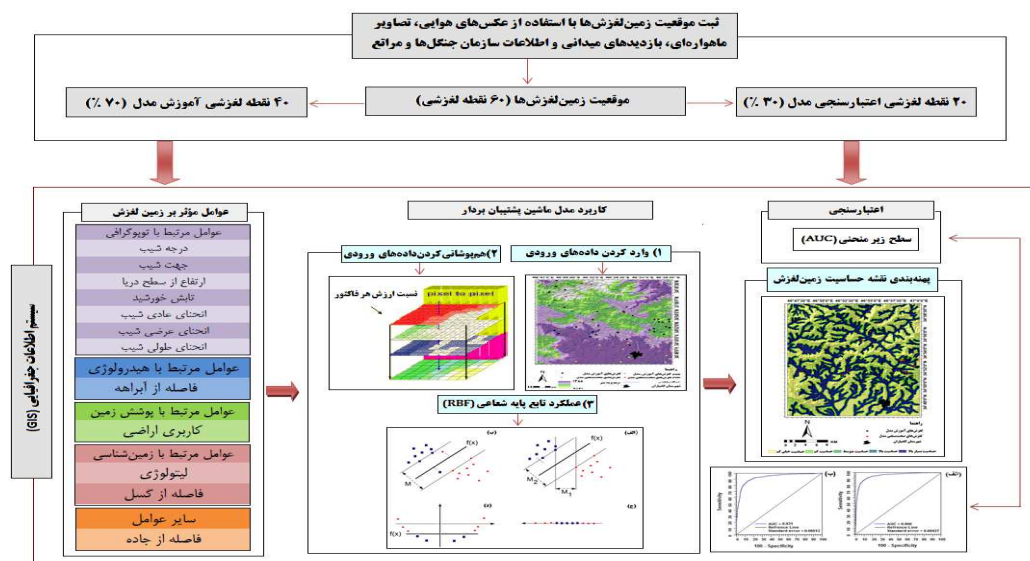
^۱. Pourghasemi



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

مواد و روش‌ها

مرحله اول ارزیابی حساسیت زمین لغزش، جمع‌آوری همه اطلاعات قابل دسترس برای منطقه مورد مطالعه می‌باشد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به‌منظور استخراج پارامترهای محیطی عبارتند از: نقشه زمین‌شناسی منطقه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه توپوگرافی منطقه در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای ETM⁺ منطقه مورد مطالعه سال ۲۰۱۱، داده‌های بارندگی ایستگاه‌های کليما تولوژی و باران‌سنجی (۲۰۰۰ - ۲۰۱۲). در مرحله‌ی بعد انجام بررسی‌های میدانی و ثبت مشخصات هر یک از زمین‌لغزش‌ها (طول، ارتفاع، موقعیت، مساحت) با بهره‌گیری از دستگاه GPS و استفاده از نرم‌افزار GIS جهت رقمی کردن آن‌ها، استفاده از داده‌های سازمان جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری کشور، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و به روز نمودن آن از طریق بررسی‌های میدانی اقدام به تهیه‌ی نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها گردید. بر اساس این پژوهش‌ها و خصوصیات منطقه مورد مطالعه دوازده متغیر برای ارزیابی حساسیت وقوع زمین‌لغزش مورد ارزیابی قرار گرفت. نقشه‌های عوامل مؤثر در وقوع پدیده زمین‌لغزش، شامل نقشه‌های درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای عرضی شیب، انحنای طولی شیب، شدت تابش خورشید، کاربری اراضی، فاصله از عوارض خطی گسل، جاده و آبراهه، لیتولوژی مورد طبقه‌بندی قرار گرفتند. از آنجایی که روش‌های کمی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش نتایج مطمئن‌تری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهند، لذا استفاده از این روش‌ها از اعتبار علمی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار می‌باشند (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹، ۸۴). این روش‌ها طی سال‌های اخیر توسط محققین علوم زمین توسعه زیادی پیدا کرده است، لذا در پژوهش حاضر جهت ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با مدل ماشین پشتیبان‌بردار، لایه‌های تهیه شده توسط نرم‌افزار ARC GIS 10.3 ترسیم شدند و جهت تحلیل آماری داده‌ها و الگوریتم‌ها نرم‌افزارهای SPSS 18 و WEKA 2.7.12 مورد استفاده قرار گرفتند و در نهایت نقشه نهایی حساسیت وقوع پدیده زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل ارائه شده ترسیم گردید. مراحل انجام پژوهش در قالب یک فلوجارت در شکل (۲) ترسیم شده است.



شکل ۲: فلوجارت روش شناسی مورد استفاده در این پژوهش (منبع: نگارندگان)

نقشه پراکنش زمین لغزش

نقشه‌ی پراکنش زمین لغزش مجموعه‌ای از لغزش‌های رخ داده در یک ناحیه مشخص است و سبب نوعی آگاهی و بصیرت در مورد مکان‌های وقوع زمین لغزش و کسب اطلاعات از نوع و خسارت آن‌ها می‌شود (وان وسترن^۱ و همکاران، ۲۰۰۸، ۱۱۵). در پژوهش حاضر به منظور تشخیص حساسیت زمین لغزش، تعداد ۶۰ نقطه‌ی لغزشی به‌وقوع پیوسته (شکل ۳) در منطقه مورد مطالعه برداشت و با استفاده از تصویر ماهواره‌ای ETM⁺ منطقه مورد مطالعه سال ۲۰۱۱ برگرفته از سایت GLOVIS^۲ و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور به پیکسل‌هایی که در آن زمین لغزش مشاهده شد ارزش "۱" و به پیکسل‌هایی که در آن زمین لغزش مشاهده نشد ارزش "۰" اختصاص داده شد (تین بای^۳ و همکاران، ۲۰۱۲، ۷). در نتیجه شاخص حساسیت زمین لغزش از نظر احتمال وقوع بین ۰ و ۱ (۰-۱۰۰٪) متفاوت است. سپس نمونه‌های تصادفی جمع‌آوری شده از مناطق لغزشی به دو بخش تقسیم می‌شود: نمونه‌هایی که برای آموزش ساخت مدل از آن‌ها استفاده می‌شود و نمونه‌هایی که در آزمون اعتبارسنجی مدل آن‌ها را به کار می‌برند (مرجانویچ^۴، ۲۰۱۱، ۲۲۹). ساخت یک مدل و آزمون آن، هدف اصلی تفکیک نمودن مجموعه نمونه‌های آموزشی و آزمایشی است. چنانچه نمونه‌های تصادفی جمع‌آوری شده برای آموزش و آزمون هم‌زمان با نمونه‌های تصادفی مبتنی بر نقاط پیکسلی لغزش مورد استفاده قرار بگیرد، عملکرد مدل افزایش می‌یابد (تانر سان^۵، ۲۰۱۴، ۴۰۵).

1. Van Westen

2. The USGS Global Visualization Viewer

3. Tien Bui

4. Marjanović

5. Taner San



شکل ۳: تصاویری از زمین لغزش‌های منطقه مطالعاتی: (الف) زمین لغزش جنوب غرب پلنگان در شهرستان کامیاران، (ب) زمین لغزش دامنه غربی روستای ورمهنگ در شهرستان کامیاران، (ج) زمین لغزش شمال غرب یوزیدر در شهرستان کامیاران (منبع: نگارندگان)

عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش

تعیین عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و آماده‌سازی مجموعه داده‌های مرتبط با آن از مراحل مهم در تهیه نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش هستند (نماه‌جبور^۶ و همکاران ۲۰۱۵، ۶۸۱). در این پژوهش دوازده فاکتور شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب، انحنای عرضی شیب^۷، انحنای طولی شیب^۸، شدت تابش خورشیدی^۹، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع لغزش‌های منطقه مطالعاتی تهیه شدند.

درجه شیب: درجه شیب یک پارامتر کنترل‌کننده ضروری در ارزیابی پایداری شیب است (خو و همکاران، ۲۰۱۲ b، ۷۵). به طور کلی با افزایش زاویه شیب، خطر لغزش نیز افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود میزان وقوع زمین لغزش در دامنه‌های پرشیب بیشتر از دامنه‌های با شیب ملایم باشد (دهنوی و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۲۶). نقشه شیب در محیط Arc map، از

⁶ Neamah Jebur

⁷ Profile curvature

⁸ Plan curvature

⁹ Solar radiation

روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در ۶ طبقه برای منطقه مطالعاتی ترسیم گردید (شکل ۴ الف). توزیع پراکنش زمین‌لغزش‌ها بر روی نقشه شیب منطقه مطالعاتی نشان‌دهنده آن است که کلاس ۱۵ - ۸ درجه بیشترین درصد پیکسل‌های لغزشی (۳۹/۴۳٪) و بیشترین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را دارد ($FR = 1/889$).

جهت شیب: حداکثر جهت شیب از سطح زمین با توجه به شمال جهت شیب نامیده می‌شود (خو و همکاران، ۲۰۱۲c، ۳۲۲). اثرات جهت شیب در بی‌ثباتی شیب از طریق تأثیر در روند هیدرولوژیکی از طریق تبخیر و تعرق، تأثیر بر روند هوازدگی، پوشش گیاهی و رشد ریشه می‌باشد (سیدلی و اوچای، ۲۰۰۶، ۳۲۱). نقشه جهت شیب با استفاده از Arc GIS، از روی مدل رقومی ارتفاعی در نه کلاس ترسیم شده است (شکل ۴ ب). بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که به ترتیب جهات جنوب شرق ($FR = 1/67$)، جنوب غرب ($FR = 1/59$) و جنوب ($FR = 1/28$) بیشترین جهات مستعد وقوع پدیده لغزش هستند.

ارتفاع از سطح دریا: تغییرات ارتفاعی هر منطقه به عنوان عامل مؤثر در ایجاد حرکت‌های توده‌ای محسوب می‌شود. این عامل، جهت رواناب‌ها و میزان تراکم شبکه زهکشی را کنترل می‌کند (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸، ۲۹). نقشه طبقات ارتفاعی منطقه از DEM منطقه استخراج شده و در پنج طبقه بر پایه natural breaks طبقه‌بندی شده است (شکل ۴ پ). بر اساس بررسی‌های انجام شده در پژوهش حاضر بیشترین فراوانی پیکسل‌های لغزشی (۴۵٪) در کلاس ۲۰۰۰ - ۱۸۰۰، در حالی که کلاس $2200 >$ بیشترین مقدار نسبت فراوانی وقوع لغزش را دارد ($FR = 2/06$).

انحنای (شکل) شیب: در انحنای شیب، خمیدگی منفی نشان‌دهنده مقعر بودن دامنه، انحنای شیب صفر نشان‌دهنده مسطح بودن دامنه و خمیدگی مثبت نشان‌دهنده محدب بودن دامنه می‌باشد (پرادهان^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۰، ۴۱۶۹). انحنای زمین بین مقادیر مثبت (محدب) و منفی (مقعر) در نوسان می‌باشد (ملکی و میلادی، ۱۳۹۱، ۳۲). تحدب و تقعر نقشه انحنای شیب با استفاده از فواصل بین خطوط توپوگرافی متوالی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) از DEM منطقه استخراج و در پنج کلاس (۱) بسیار مقعر [$(-7/2) - (-7/6)$]، (۲) مقعر [$(-2/4) - (-7/1)$]، (۳) مسطح [$(0/8) - (-2/3)$]، (۴) محدب [$(0/81) - (5/6)$]، (۵) بسیار محدب [$(60) - (5/7)$] طبقه‌بندی شد (شکل ۴ ت). بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان‌دهنده آن بود که کلاس $(5/6) - (0/81)$ بیشترین فراوانی پیکسل‌های لغزشی (۵۱/۷٪) و کلاس $(-7/2) - (-7/6)$ بیشترین کلاس مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌باشد ($FR = 2/15$).

انحنای عرضی شیب (پروفیل شیب): پروفیل شیب معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است (ویلسون و لورانگ^{۱۱}، ۲۰۰۰، ۸۳). انحنای عرضی شیب به عنوان یک فاکتور مهم، نشان‌دهنده شدت جریان آب و فرایندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌باشد (ارکانگلو و گوانگلو^{۱۲}، ۲۰۰۲، ۴۲۵). چنانچه ارزش‌های مثبت در انحنای عرضی شیب نشانگر تقعر بودن (کاهش سرعت جریان) و ارزش‌های منفی نشانگر محدب بودن (افزایش سرعت جریان) می‌باشد (کورنژادی^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۷، ۱۴۷). نقشه انحنای عرضی شیب از نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه استخراج شده و ارزش‌های این فاکتور از ۱۵- تا ۱۵ در پنج کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۴ ث). بیشترین پیکسل‌های لغزشی (۳۸/۳٪) در کلاس $(-0/3) - (-0/42)$ مشاهده شده و کلاس ۱۵ - ۱/۶ بیشترین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش کلاس را دارد ($FR = 2/31$).

(=)

¹¹. Wilson & Lorang

¹². Ercanoglu & Gokceoglu

¹³. Kornejady

انحنای طولی شیب: انحنای طولی شیب بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد و نشان‌دهنده واگرایی و همگرایی توپوگرافیکی است (دهنوی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۲۷). نقشه انحنای طولی شیب از DEM منطقه استخراج و در پنج کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۴ ج). بر طبق بررسی‌های به عمل آمده بیشترین پیکسل‌های لغزشی در کلاس (۰/۵۲) - (۰/۲۸) با ۴۱/۳٪ و کلاس (۰/۵۳) - (۱/۷) بیشترین پتانسیل وقوع زمین لغزش کلاس را دارد (FR = ۱/۷۲). **شدت تابش خورشیدی:** میانگین همگرایی تابش خورشیدی در یک پیکسل در طول یک سال شدت تابش خورشیدی نامیده می‌شود (براون^{۱۵}، ۲۰۰۹، ۱۷۲). در واقع تابش خورشیدی سالانه کمتر، احتمال شکست بیشتری به دلیل فضاهای تخلخل کمتر قابل جذب خاک را به وجود می‌آورد. این فاکتور بر اساس شیب و جهت شیب در تحلیل گر GIS 10.2 ARC با استفاده از دستور "Area Solar Radiation" در پنج کلاس طبقه‌بندی شده است (شکل ۴ ج). کلاس ۷۳۵۰۰۰ - ۸۸۱۰۰۰ بیشترین پیکسل‌های لغزشی (۴۶/۷٪) و بیشترین پتانسیل وقوع لغزش را دارد (FR = ۱/۷۷) (شیرزادی و همکاران، ۱۳۹۶؛ ۲۳۰؛ شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ ۶۰).

کاربری اراضی: کاربری اراضی به عنوان یک عامل مهم در ارزیابی حساسیت زمین لغزش در نظر گرفته می‌شود. این عامل ویژگی‌های زمین را تحت تأثیر قرار داده و سبب تغییر رفتار آن می‌شود (ارومیه‌ای، ۱۳۷۷؛ ۳۷). در این پژوهش لایه کاربری اراضی با توجه به نقشه‌های قابلیت اراضی تحقیقات منابع آب و خاک، اطلاعات سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، مطالعات میدانی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ETM⁺ سال ۲۰۱۱ در شش کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۴ ج). بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که کلاس مرتب بیشترین پیکسل‌های لغزشی (۳۸/۳۳٪) و بیشترین پتانسیل وقوع زمین لغزش را دارد (FR = ۱/۴۶).

فاصله از گسل: ساختارهایی با مقیاس بزرگ شبیه گسل‌ها و تراست‌ها از عوامل نگران کننده برای شکست و ناپایداری - های دامنه‌ها به شمار می‌روند. احتمال شکست شیب در نزدیکی گسل‌های اصلی افزایش می‌یابد (سویک و توپال^{۱۶}، ۲۰۰۳، ۹۵۲) که خود باعث فعال شدن تکتونیک در منطقه و تشدید وقوع لغزش‌ها می‌شود (سها^{۱۷} و همکاران، ۲۰۰۲، ۳۵۹). در پژوهش حاضر نقشه فاصله از گسل منطقه مطالعاتی در پنج کلاس ترسیم شد (شکل ۴ ج) که کلاس ۲۰۰ > متر بیشترین فراوانی پیکسل‌های لغزشی (۷۱/۷٪) و بیشترین پتانسیل وقوع را دارد (FR = ۱۲/۵۲).

فاصله از جاده: این عامل نیز به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در ارزیابی حساسیت زمین لغزش در نظر گرفته شده است چنانچه ساخت و سازهای جاده‌سازی در نزدیکی دامنه‌ها ممکن است شرایط شیئی را قبل از شروع ساخت و ساز متعادل بوده کاملاً تغییر دهد (یالسن، ۲۰۰۸، ۶). این لایه در پژوهش حاضر در پنج کلاس ترسیم شده (شکل ۴ د) که کلاس ۲۰۰ > متر بیشترین فراوانی پیکسل‌های لغزشی (۶۸/۷٪) و بیشترین پتانسیل وقوع زمین لغزش را دارد (FR = ۲/۵۸).

فاصله از آبراهه: این عامل به عنوان یکی از عوامل مهم در ارزیابی خطر زمین لغزش در نظر گرفته می‌شود (شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۷، ۴). آب‌های جاری می‌تواند از طریق فرسایش یا اشباع مواد در پای دامنه، شکست‌های شیب را تحت تأثیر قرار دهد (دهنوی و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۲۸). در واقع به عنوان یک اصل شناخته شده با فاصله گرفتن از آبراهه‌ها، پتانسیل وقوع زمین لغزش‌ها کاهش می‌یابد (دای و لی^{۱۸}، ۲۰۰۲، ۲۱۸). در این پژوهش نقشه فاصله از آبراهه منطقه مورد مطالعه در پنج کلاس ترسیم شده است (شکل ۴ ذ). کلاس ۵۰ - ۱۰۰ متر بیشترین درصد فراوانی پیکسل لغزشی (۵۳٪) و کلاس ۱۰۰ - ۵۰ متر بیشترین پتانسیل وقوع زمین لغزش را دارد (FR = ۲/۸۲).

14. Dehnavi

15. Brown

16. Cevik and Topal

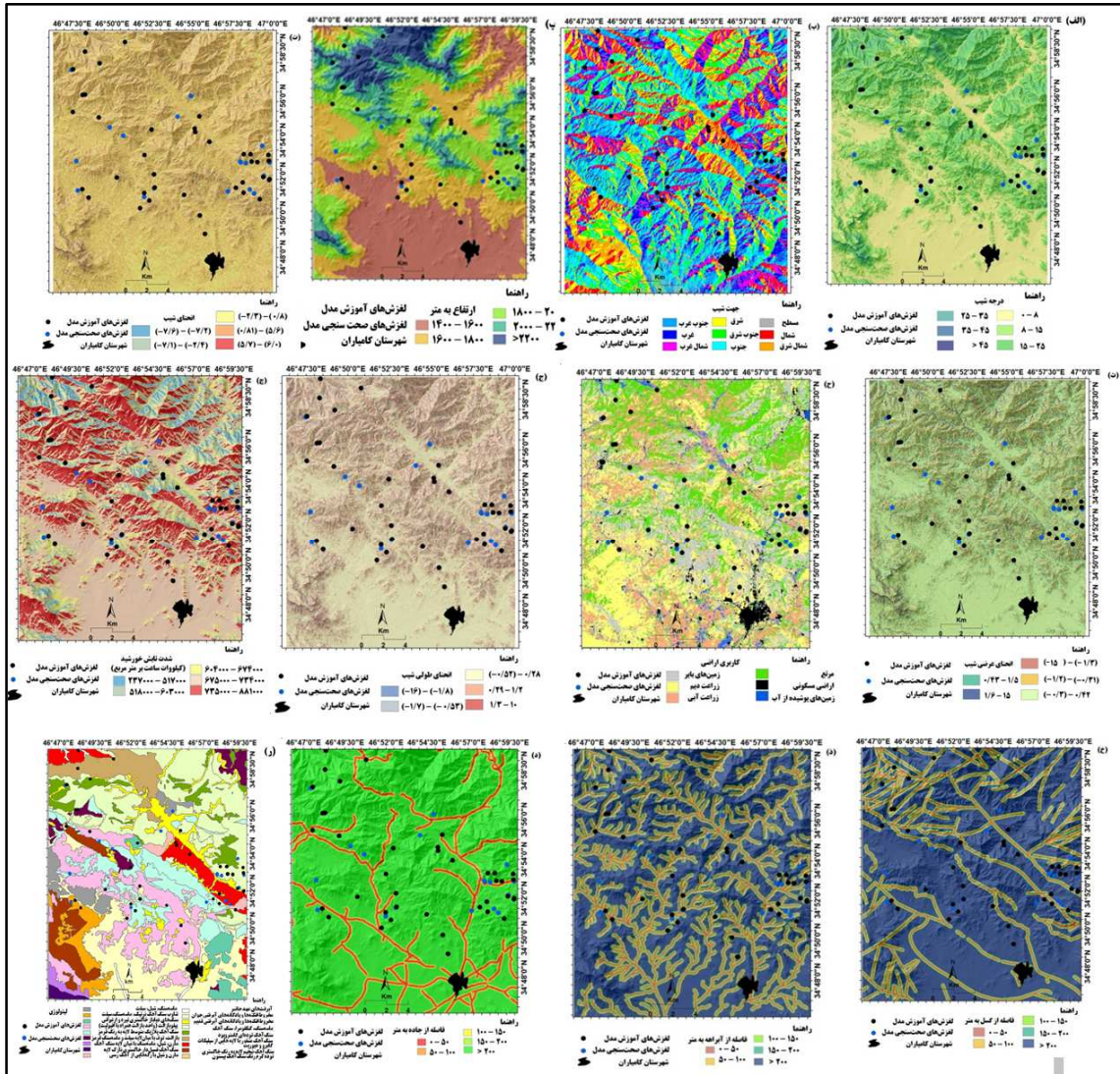
17. Saha

18. Dai & Lee

لیتولوژی: عامل لیتولوژی یکی از پارامترهای مهم در مطالعات زمین‌لغزش محسوب می‌شود. سنگ‌ها به واسطه‌ی تفاوت در جنس رسوبات تشکیل‌دهنده و شرایط و دوران شکل‌گیری، مقاومت‌های مختلفی را در مقابل نیروهای خارجی از خود نشان می‌دهند (رنجبر و معمارافتخاری، ۱۳۹۱، ۱۱۹). در واقع نوع سنگ به عنوان یکی از عوامل زمین‌شناسی، کنترل‌کننده میزان تغییر رخساره‌های سنگی و تبدیل آن‌ها به واریزه‌های سنگی وقوع سنگ‌لغزش و افزایش پتانسیل خاک‌زایی و ایجاد دامنه‌های با شیب‌های متغیر و در نهایت وقوع زمین‌لغزش بوده است (مددی، ۱۳۸۷، ۵۷). واحدهای مختلف سنگ‌شناسی، از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه مطالعاتی استخراج شدند (جدول ۲). با توجه به وضعیت لیتولوژی منطقه مطالعاتی گروه ۲ اواخر کرتاسه – پالئوسن (دوران مزوزوئیک – سنوزوئیک) با لیتولوژی ماسه سنگ، کنگلومرا و سنگ آهک بیشترین فراوانی پیکسل‌های لغزشی (۳۳/۳٪)، را به خود اختصاص داده‌اند در حالی که گروه ۷ دوره کرتاسه (دوران مزوزوئیک) با لیتولوژی مارن و شیل با رگه‌هایی از آهک رسی بیشترین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را دارد. (۳/۸۸) (FR =

جدول ۲: مشخصات لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

کد	گروه	لیتولوژی	سن زمین‌شناسی
Q ^{al}	۱	آبرفت‌های عهد حاضر	کواترنر
Q ²	۱	مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی جوان	کواترنر
Q ¹	۱	مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی قدیم	کواترنر
kp ^f	۲	ماسه‌سنگ، کنگلومرا، سنگ آهک	اواخر کرتاسه – اوائل پالئوسن
k ^{fl}	۲	سنگ آهک توده‌ای گاستروپود	اواخر کرتاسه – اوائل پالئوسن
h	۳	سنگ آهک متبلور با لایه‌هایی از سیلیکات سیلیکات	اواخر ائوسن – اوائل الیگوسن
gb	۳	گابرو، دیوریت	اواخر ائوسن – اوائل الیگوسن
PE ^{lg}	۴	سنگ آهک ضخیم‌لایه به رنگ خاکستری	پالئوسن – ائوسن
PE ^f	۴	ماسه سنگ، شیل و سیلت	پالئوسن – ائوسن
PE ^{lr}	۴	تناوب سنگ آهک نرتیک، ماسه سنگ و سیلت	پالئوسن – ائوسن
db	۵	سنگ‌های دیاباز خاکستری تیره و ارغوانی رنگ	اواخر کرتاسه – پالئوسن
b	۵	پیلوبازالت (واحد بازالتی همراه با مجموعه افیولیتی)	اواخر کرتاسه – پالئوسن
kp ^l	۵	سنگ آهک پلاژیک متوسط لایه قرمز رنگ	اواخر کرتاسه – پالئوسن
kp ^{vc}	۵	بازالت، توف با میان‌لایه سیلت و ماسه سنگ قرمز رنگ	اواخر کرتاسه – پالئوسن
OM ^m	۶	مارن، شیل، ماسه سنگ با میان‌لایه سنگ آهک	اواخر الیگوسن – میوسن
OM ¹	۶	سنگ آهک فسیل دار خاکستری نازک لایه	اواخر الیگوسن – میوسن
K ^{gu}	۷	مارن و شیل با رگه‌هایی از آهک رسی	دوره کرتاسه
JK _b	۸	توده کرم‌رنگ سنگ آهک بیستون	ژوراسیک – کرتاسه



شکل ۴: عوامل مؤثر بر وقوع پدیده زمین لغزش در منطقه مطالعاتی: درجه شیب (الف)، جهت شیب (ب)، ارتفاع (پ)، انحنای شیب (ت)، انحنای عرضی شیب (ث)، انحنای طولی شیب (ج)، شدت تابش خورشید (چ)، کاربری اراضی (ح)، فاصله از گسل (خ)، فاصله از جاده (د)، فاصله از آبراهه (ذ) و لیتولوژی (ر) (منبع: نگارندگان)

الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (SVM)

الگوریتم SVM تحت عنوان ماشین پشتیبان بردار توسط واپنیک^{۱۹} بر پایه‌ی تئوری یادگیری آماری^{۲۰} است که از حداقل ریسک ساختاری^{۲۱} تبعیت می‌کند و برای ارزیابی و آزمون مجموعه‌ای از داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (یائو^{۲۲} و همکاران، ۲۰۰۸، ۵۷۸). بر اساس این نظریه یادگیری آماری، می‌توان کران نرخ خطای ماشین یادگیری را برای داده‌های طبقه‌بندی نشده، به عنوان نرخ خطای تعمیم‌یافته، در نظر گرفت. این کران‌ها به عنوان تابعی از مجموعه نرخ خطاهای آموزش هستند

19. Vapnik
 20. Statistical Learning Theory
 21. Structure Risk Minimization
 22. Yao

که میزان پیچیدگی طبقه‌بندی‌کننده‌ها را نشان می‌دهند (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲، ۱۳۰). این الگوریتم در سال‌های اخیر، توجه زیادی را به دلیل عملکرد خوب طبقه‌بندی و قابلیت تعمیم مناسب به خود جلب کرده است. جزئیات توضیحی درباره مدل‌سازی SVM در این پژوهش به صورت زیر می‌باشد:

اگر X_i مجموعه‌ای از سلول‌های آموزشی به صورت رابطه (۱) باشد:

$$X_i = (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{رابطه (۱)}$$

سلول‌های آموزشی شامل دو کلاس $Y_i = \pm 1$ (زمین لغزش و عدم وقوع زمین لغزش) بوده که به وسیله شکاف حداکثری آن‌ها مشخص می‌شود. این معادله از نظر ریاضی به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد:

$$1/2 = \|W^2\| \quad \text{رابطه (۲)}$$

که منوط به محدود کردن رابطه (۳) است:

$$Y_i = ((W \cdot X_i) + b) \geq 1 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که $\|W^2\|$ قاعده‌ای از فراطرح نرمال بوده که ۱ پایه عددی بوده و ۰ مشخص‌کننده عمل تولید عددی است و ارزش آن با استفاده از چند ضریبی لاگرانژیان^{۲۳} محاسبه می‌شود که عملکرد آن به صورت زیر تعریف شود رابطه (۴):

$$\|W\|^2 - \sum_{i=1}^n \gamma_i ((W \cdot X_i) + b) - \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$L = \frac{1}{2}$$

که λ_i چند ضریبی لاگرانژیان است و می‌تواند صفر یا غیر صفر باشد و فقط مجموعه داده‌هایی که ضرایب آن‌ها غیر صفر است در معادله نهایی وارد می‌شوند و این مجموعه داده‌ها به عنوان بردارهای پشتیبان شناخته می‌شوند (اسکولچوف^{۲۴} و همکاران، ۲۰۰۰:۱۲۰۷؛ هاستی^{۲۵} و همکاران، ۲۰۰۱:۲). انتخاب توابع مختلف کرنل در مدل SVM خیلی مهم است اگر چه توابع هسته‌ای $K(X_i, X_j)$ زیادی قبلاً پیشنهاد و استفاده شده‌اند. تنها بعضی از آن‌ها برای کار در طیف گسترده‌ای از کاربردها مفید شناخته می‌شوند. آن‌هایی که این مهارت‌ها را نشان می‌دهند عبارتند از:

$$K(X_i, X_j) = \quad \text{تابع خطی}$$

$$X_i^t \cdot X_j$$

$$K(X_i, X_j) = (Y \cdot X_i^t \cdot X_j + r)^d, y > 0 \quad \text{تابع پایه شعاعی}$$

$$K(X_i, X_j) = e^{-\gamma (X_i - X_j)^2}, \gamma > 0 \quad \text{تابع پایه شعاعی}$$

$$\tan h = (y \cdot X_i^t \cdot X_j + r) \quad \text{تابع حلقوی}$$

که r, y, d پارامترهای توابع هسته‌ای هستند و به صورت دستی وارد می‌شوند.

در پژوهش حاضر کرنل پایه شعاعی (RBF) از مدل ماشین پشتیبان بردار مورد استفاده قرار گرفت. در واقع از دوازده عامل، به منظور تهیه نقشه حساسیت خطر زمین‌لغزش استفاده گردیده است که مقادیر هر یک از فاکتورها با استفاده از ماشین‌های پشتیبان بردار محاسبه گردیده است (جدول ۳). در مرحله بعد مقادیر عددی هر یک از پارامترها در محدوده لغزش‌های موجود و مناطق فاقد زمین‌لغزش استخراج گردید و با وارد کردن داده‌ها در محیط نرم‌افزار WEKA 2.7.12، وزن هر یک از عوامل مؤثر با هم جمع شده و از تلفیق آن‌ها نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی در نهایت نقشه‌های وزنی عوامل مؤثر با هم جمع شده و از تلفیق آن‌ها نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی حاصل گردید. الگوریتم SVM یک طبقه‌بندی برای دو کلاس است که میزان حساسیت بین عدد ۰ تا ۱ نمایش داده

23. Lagrangian

24. Scholkoph

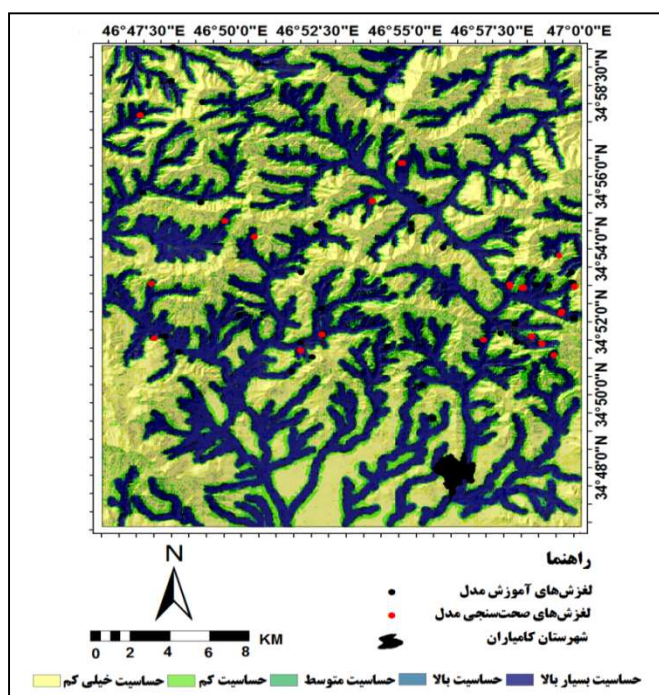
25. Hastie

می‌شود و هر چه این میزان به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، حساسیت زیادی به وقوع زمین لغزش داشته و امکان وقوع زمین لغزش بیشتر خواهد شد. در نهایت نقشه خروجی به دست آمده از میزان حساسیت لغزش در پنج طبقه (بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا) از منطقه مطالعاتی ترسیم شد (شکل ۵). این الگوریتم در سال‌های اخیر عنوان یکی از محبوب‌ترین روش‌ها جهت حل مشکلات طبقه‌بندی و رگرسیونی است (کاوازوگلو و همکاران، ۲۰۱۴، ۴۳۱) و به نتایج موفقیت‌آمیزی در بسیاری از مشکلات از جمله پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش دست یافته است (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳، ۳۵۲؛ پرادهان، ۲۰۱۳:۳۵۴).

بحث و نتایج

تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش منطقه مورد مطالعه

نتایج به دست آمده از نقشه خروجی در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد مناطق نزدیک به آبراهه امکان لغزش‌پذیری بیشتری داشته و بر اساس تابع SVM – RBF عامل آبراهه بیشترین تأثیر را در وقوع این مخاطره دارند. هم‌چنین بر اساس این نقشه خروجی بیش از ۷۰ درصد از زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه مطالعاتی در کلاس خطر بسیار بالا (۰/۹۹ – ۰/۱۸۶) رخ داده است که نشان‌دهنده حساسیت منطقه مورد مطالعه به وقوع پدیده زمین لغزش است. هم‌چنین نقشه ترسیم شده نشان می‌دهد که از سمت خط الرأس‌ها به سمت پاشنه دامنه‌ها به مقدار حساسیت وقوع زمین لغزش‌های سطحی افزوده شده است؛ به طوری که این مناطق را می‌توان پر رنگ تر مشاهده کرد که این نتایج با نتایج شیرزادی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد.



شکل (۵) نقشه حساسیت زمین لغزش منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

تعیین قابلیت پیش‌بینی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش بر اساس عوامل مؤثر در آن می‌باشد (کوستانزو^{۲۶} و همکاران، ۲۰۱۲، ۳۳۱). جهت تعیین توانایی پیش‌بینی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها روش‌های متعددی وجود دارد: از جمله-Chi-Square (شهابی و همکاران، ۲۰۱۴؛ تای فام و همکاران a، ۲۰۱۵)، Relief Significance (احمد و دی^{۲۷}، ۲۰۰۵)، Gain Ratio (نیتیا و دورایسومی^{۲۸}، ۲۰۱۴)، Information Gain Ratio (تیان‌بای و همکاران، ۲۰۱۶) در پژوهش حاضر از شاخص Information Gain Ratio (IGR) که اولین بار (کوویلین^{۲۹}، ۱۹۹۳) آن را پیشنهاد داد جهت تشخیص قابلیت پیش‌بینی کمی عوامل مؤثر استفاده شد. مقادیر IGR بالاتر نشان‌دهنده‌ی توانایی پیش‌بینی بالاتر آن عامل مؤثر برای مدل‌سازی است (شیرزادی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۳۱). جهت شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در منطقه مطالعاتی، از بین دوازده عامل مؤثر به کار رفته، از آزمون IGR استفاده شد.

اگر F داده‌های آموزشی با n نمونه ورودی و $n(M_i, F)$ تعداد نمونه‌ها در داده‌های آموزشی F متعلق به کلاس M_i (زمین‌لغزش، عدم زمین‌لغزش) باشد، در این صورت رابطه ۵ را داریم:

$$Info(F) = - \sum_{i=1}^2 \frac{n(M_i, F)}{|F|} \log_2 \frac{n(M_i, F)}{|F|} \quad (5)$$

با توجه به عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، مقدار اطلاعات مورد نیاز برای تقسیم F به مجموعه (F_1, F_2, \dots, F_m) از رابطه ۶ برآورد می‌گردد:

$$Info(F, E) = \sum_{j=1}^m \frac{F_j}{|F|} Info(F) \quad (6)$$

شاخص IGR برای یک عامل مؤثر خاص مثل عامل S (به عنوان مثال: شیب) از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$information\ gain\ ratio(F, S) = \frac{Info(F) - Info(F, S)}{Split\ Info(F, S)} \quad (7)$$

که در آن Split Info نشان‌دهنده‌ی اطلاعات تولید شده توسط تقسیم F داده‌های آموزشی به L زیر مجموعه است که از رابطه (۸) زیر محاسبه می‌شود:

$$SplitInfo(F, E) = \sum_{j=1}^L \frac{F_j}{|F|} \log_2 \frac{F_j}{|F|} \quad (8)$$

شاخص IGR برای دوازده عامل مؤثر انتخاب شده بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه مورد مطالعه جهت ارزیابی توانایی پیش‌بینی مدل لغزشی در (جدول ۳) آمده است. این نتایج نشانگر آن است بیشترین مقادیر این شاخص به ترتیب به عوامل فاصله از آبراهه، شدت تابش خورشیدی، انحنای طولی شیب درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای معمولی شیب، انحنای عرضی شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل و فاصله از جاده اختصاص یافتند.

جدول ۳: تعیین مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر لغزش‌های منطقه مطالعاتی (منبع: نگارندگان)

26. Costanzo

27. Ahmad & Dey

28. Nithya & Duraiswamy

29. Quinlan

عوامل مؤثر	IGR میانگین	عوامل مؤثر	IGR میانگین
فاصله از آبراهه	۰/۹۵۱	انحنای معمولی شیب	۰/۰۱۶
شدت تابش خورشیدی	۰/۰۲۵	انحنای عرضی شیب	۰/۰۱۵
انحنای طولی شیب	۰/۰۲۳	کاربری اراضی	۰/۰۱۲
درجه شیب	۰/۰۲۲	لیتولوژی	۰/۰۱۱
جهت شیب	۰/۰۲۱	فاصله از گسل	۰/۰۰۲
ارتفاع از سطح دریا	۰/۰۱۷	فاصله از جاده	۰/۰۰۱

عملکرد مدل‌ها و اعتبارسنجی آن‌ها بر اساس داده‌های تعلیمی^{۳۰} و داده‌های صحت‌سنجی^{۳۱}

ارزیابی عملکرد الگوریتم RBF - SVM جهت پیش‌بینی حساسیت زمین لغزش‌های منطقه مطالعاتی توسط معیارهای sensitivity, specificity, accuracy, RMSE مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴). بر این اساس، در مدلی که مقادیر معیارهای sensitivity, specificity, accuracy به سمت یک تمایل داشته باشند، مدل مناسبی شناخته می‌شود (تیان‌بای و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۳).

جدول (۴) شرح معیارهای آماری به کار رفته بر اساس الگوریتم RBF - SVM در منطقه مطالعاتی (منبع: نگارندگان)

معیار	فرمول	توضیح
True positive	-	تعداد پیکسل زمین لغزش‌هایی (ارزش ۱) که به درستی به عنوان زمین لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
True negative	-	تعداد پیکسل عدم حضور زمین لغزش‌هایی که به درستی به عنوان عدم حضور زمین لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
False positive	-	تعداد پیکسل عدم حضور زمین لغزش‌هایی (ارزش ۰) که به اشتباه به عنوان زمین لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
False negative	-	تعداد پیکسل حضور زمین لغزش‌هایی که به اشتباه به عنوان عدم حضور زمین لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
Sensitivity	$SST = \frac{TP}{TP + FN}$	حساسیت: نسبت پیکسل‌های لغزشی که به درستی به عنوان لغزش طبقه‌بندی شده‌اند. این بیانگر قابلیت پیش‌بینی خوب مدل لغزشی برای طبقه‌بندی پیکسل‌های لغزشی است.
Specificity	$SPF = \frac{TN}{FP + TN}$	شفافیت: نسبت پیکسل‌های غیرلغزشی که به درستی به عنوان غیرلغزش طبقه‌بندی شده‌اند. این بیانگر قابلیت پیش‌بینی خوب مدل لغزشی برای طبقه‌بندی پیکسل‌های غیرلغزشی است.
Accuracy	$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP}$	صحت: نسبت پیکسل‌های لغزشی و غیر لغزشی که به درستی طبقه بندی شده‌اند. این بیانگر چگونگی عملکرد خوب مدل لغزشی است.
Root Mean Squared Error (RMSE)	$RMSE = \left[(1/m) \sum_{i=1}^m (e_i - \bar{e}_i)^2 \right]^{0.5}$	مجزور مربعات خطا: مقدار خطای متریک در همان داده‌ها با داده‌های اصلی است. مقدار RMSE کمتر بیانگر عملکرد بهتر مدل لغزشی است.

با توجه به نتایج به دست آمده از (جدول ۵) و استفاده از بهترین فاکتورهای مؤثر، الگوریتم RBF - SVM برای مجموعه داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی ساخته شد. نتایج نشانگر آن است که معیارهای حساسیت، شفافیت و صحت برای داده‌های تعلیمی به ترتیب ۰/۹۵۱، ۰/۹۶۶ و ۰/۹۵۸ می‌باشند. از سوی دیگر نتایج این مقادیر برای داده‌های صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۸۵۰، ۰/۸۵۰ و ۰/۸۵۱ می‌باشند. همچنین، مقدار RMSE در داده‌های تعلیمی مقدار ۰/۰۵۸ و در داده‌های صحت‌سنجی با مقدار ۰/۱۲۶ می‌باشد که مقدار به دست آمده از داده‌های تعلیمی از مقدار کمتری نسبت به داده‌های صحت‌سنجی با مقدار ۰/۱۲۶ برخوردار است که خود نشانگر بالای مدل به کار رفته در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

^{۳۰}. Training dataset

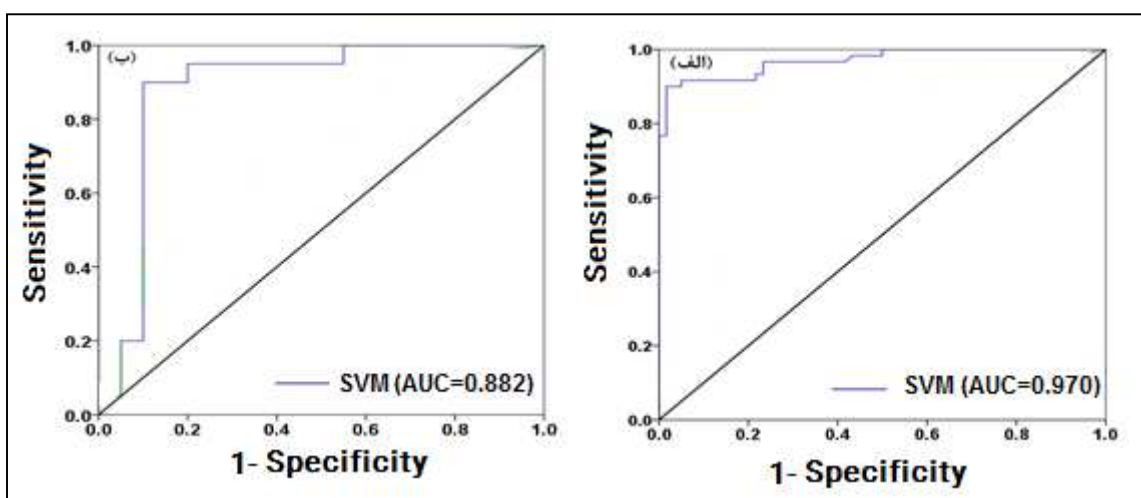
^{۳۱}. Validation dataset

جدول (۵) ارزیابی مدل‌سازی داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی با الگوریتم RBF - SVM (منبع: نگارندگان)

شاخص	داده‌های تعلیمی	داده‌های صحت‌سنجی
True positive	۵۸	۱۷
True negative	۵۷	۱۷
False positive	۲	۳
False negative	۳	۳
Sensitivity (%)	۰/۹۵۱	۰/۸۵۰
Specificity (%)	۰/۹۶۶	۰/۸۵۰
Accuracy (%)	۰/۹۵۸	۰/۸۵۱
RMSE	۰/۰۵۸	۰/۱۲۶

ارزیابی صحت نقشه‌های پیش‌بینی مکانی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه مورد مطالعه

اعتبارسنجی، یک بخش ضروری از حساسیت زمین‌لغزش به شمار می‌رود و نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش بدون اعتبارسنجی فاقد ارزش می‌باشند (پرادهان، ۲۰۱۱: ۳۳۴). در پژوهش حاضر ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی با استفاده از شاخص‌های نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. در حال حاضر قابلیت پیش‌بینی حساسیت لغزش‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) مورد بررسی قرار گرفت و از مقدار AUC، درصد نرخ موفقیت و قابلیت پیش‌بینی هر دو مجموعه داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی به دست آمد. در موضوع ارزیابی صحت نقشه مکان‌یابی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش هم از داده‌های تعلیمی و هم از داده‌های صحت‌سنجی استفاده می‌گردد. بر این اساس هنگامی که از داده‌های تعلیمی استفاده شود، منحنی نرخ موفقیت (SRC) success rate curve نام دارد و هنگامی که از داده‌های صحت‌سنجی استفاده شود، منحنی نرخ پیش‌بینی (PRC) prediction rate curve اطلاق می‌گردد (شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۳). مقادیر AUC مابین ۰/۵ الی ۱ است و ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه احتمالی تخمین زند، مقدار AUC آن ۰/۵ است و زمانی که منحنی ROC سطح زیر منحنی برابر با یک داشته باشد، بهترین دقت را از نقشه پهنه‌بندی نشان می‌دهد (عابدینی و همکاران، ۲۰۱۷: ۸). همبستگی کیفی - کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین بدین صورت است: (۱ - ۰/۹، عالی؛ ۰/۸ - ۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۷ - ۰/۸، خوب؛ ۰/۶ - ۰/۷، متوسط؛ و ۰/۵ - ۰/۶، ضعیف). شکل شماره (۶) نتایج ارزیابی صحت نقشه‌های پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه را با استفاده از منحنی ROC برای داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد.



شکل (۶) ارزیابی نقشه پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی بر اساس الگوریتم SVM با داده‌های تعلیمی (الف) و با داده‌های صحت‌سنجی (ب) (منبع: نگارندگان)

مشاهده این شکل نشان می‌دهد که در منحنی SRC بر اساس داده‌های تعلیمی مقدار سطح زیر منحنی با استفاده از الگوریتم RBF - SVM، ۰/۹۷۰ می‌باشد که به این معنی است این الگوریتم ۹۷ درصد توانایی پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین لغزش را داشته است. این در حالی است که برای داده‌های صحت‌سنجی مقدار سطح زیر منحنی PRC، ۰/۸۸۲ به دست آمد. به طور کلی، نتایج صحت‌سنجی نقشه به دست آمده از مدل RBF - SVM با مقدار درصد مساحت زیر منحنی داده‌های تعلیمی و آموزشی بیان‌کننده عملکرد عالی مدل SVM است.

نتیجه‌گیری

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های موجود در یک منطقه و پهنه‌بندی خطر آن یکی از فاکتورهای اساسی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و انتخاب مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین گزینه مؤثر می‌باشد. ارزیابی حساسیت زمین لغزش یک فرآیند پیچیده و چند مرحله‌ای است که توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. تا به امروز روش‌های مختلفی جهت برآورد حساسیت زمین لغزش‌ها و عملکرد آن‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های مختلف آماری مطرح شده است. در این پژوهش تابع RBF روش SVM جهت ارزیابی حساسیت زمین لغزش در شهرستان کامیاران مورد ارزیابی قرار گرفت. این پژوهش با استفاده از دوازده فاکتور شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب، انحنای عرضی شیب، انحنای طولی شیب، شدت تابش خورشید، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که شهرستان کامیاران با توجه به سازندها و شرایط خاص زمین‌شناسی (وجود سازندهای حساس به لغزش از جمله مارن و شیل)، توپوگرافی و فعال بودن گسل‌های منطقه (گسل جدید اصلی زاگرس) و بارش فراوان به شکل برف (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر) و دامنه‌های ناپایدار و فعالیت فرآیندهای ژئومورفولوژیکی متعدد آب‌وهوایی از جمله مناطق زمین لغزش خیز استان و کشور است. عوامل انسانی نیز در تشدید ناپایداری‌ها و حرکات توده‌ای (به ویژه در نامتعادل کردن دامنه‌ها از طریق جاده‌سازی و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه نقش دارند). نتایج بررسی مهمترین عوامل اثرگذار از میان دوازده عامل مؤثر شناخته شده بر وقوع زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل RBF - SVM و مشاهده نقشه حساسیت زمین لغزش بر اساس الگوریتم به کار رفته نشان داد که عامل فاصله از آبراهه بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش منطقه مطالعاتی داشته است. همچنین، بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در انتهای دامنه (پاشنه دامنه) جایی که دامنه نزدیک به محل اتصال آبراهه‌ها می‌گردد، اتفاق می‌افتد. شاید دلیل این امر حرکت آب‌های زیر سطحی از طرف آبراهه‌ها به سمت دامنه‌های اطراف و ایجاد یک جبهه رطوبتی و کاهش مقاومت برشی خاک در این ناحیه باشد که وقوع زمین لغزش‌های سطحی با عمق کمتر را فراهم آورده است که با نتایج شیرزادی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. بررسی جهات جغرافیایی نسبت به پراکندگی لغزش‌ها در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت به زمین لغزش در طبقات جنوبی به دلیل تبخیر بالا می‌باشد. بررسی نتایج به دست آمده از لیتولوژی منطقه نشان می‌دهد که واحدهای KP^f با لیتولوژی ماسه‌سنگ، کنگلومرا، سنگ آهک و K^{gu} با لیتولوژی مارن و شیل با رگه‌هایی از آهک رسی به دلیل حساس بودن ماهیت سنگ‌های ذکر شده که با جذب آب حالت ارتجاعی پیدا کرده و باعث سر خورد لایه‌های بالایی به صورت لغزش می‌گردد، از بیشترین حساسیت در وقوع زمین لغزش برخوردارند. از آنجایی که زمین لغزش در شیب‌های کمتر به دلیل برتری نیروهای مقاومت برشی نسبت به تنش برشی کمتر (شیرزادی و همکاران، ۱۳۹۶، ۲۴۴) و در شیب‌های خیلی زیاد هم به دلیل عدم توسعه و وجود خاک با ضخامت قابل ملاحظه کمتر به وقوع می‌پیوندد. بنابراین در شیب‌های میانه با تساوی سایر شرایط می‌توان انتظار تعداد وقوع زمین لغزش بیشتری داشت. با این حال، به دلیل تپه ماهوری بودن و اختلاف ارتفاع کم ناهمواری‌های منطقه مورد مطالعه (۱۳۸۸ متر) توزیع زمین لغزش در کلاس‌های درجه شیب نشان داد که بیشترین درصد از آن‌ها در شیب‌های کمتر از ۱۵ درجه (۳۹/۴۳ درصد) رخ داد داده‌اند این نتیجه با نتایج عابدینی و همکاران (۲۰۱۷) مبنی بر این که درجه شیب به عنوان اثرگذارترین عامل می‌باشد مطابقت دارد. در نهایت جهت اعتبارسنجی مدل RBF - SVM از مجموع ۶۰ نقطه‌ی لغزشی

منطقه مطالعاتی ۴۰ نقطه (۷۰٪) به طور تصادفی جهت مدل‌سازی و باقی مانده ۲۰ نقطه لغزشی (۳۰٪) جهت اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. هم‌چنین نتایج به‌دست‌آمده از کاربری اراضی نشان داد که بیشترین حساسیت به لغزش در اراضی مرتعی وجود دارد که با توجه به چرای دام‌ها در سطح این کاربری این موضوع قابل تفسیر می‌باشد. اعتبار سنجی نتایج با استفاده از منحنی ROC و مقادیر به دست‌آمده از SCR (۹۷٪) و PCR (۸۸/۲٪) نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی و میزان موفقیت بسیار بالا مدل SVM می‌باشد. علاوه بر این، به منظور ارزیابی مدل ارائه شده از معیارهای حساسیت، شفافیت، صحت و مجذور مربعات خطا استفاده شدند. بر این اساس، مقادیر به‌دست‌آمده در مدل RBF - SVM هم در داده‌های تعلیمی و هم در داده‌های آموزشی بیانگر این مطلب است که مدل ذکر شده از نظر صحت و اعتبار مدل‌سازی مورد تأیید قرار گرفته است. در نهایت منطقه مطالعاتی به پنج کلاس حساسیت بسیار بالا، بالا، متوسط، خیلی کم و کم طبقه‌بندی شد که ارزیابی تمامی نتایج نشان‌دهنده عملکرد بالا و ظرفیت پیش‌بینی خوب مدل RBF - SVM در شناسایی پهنه‌ها با پتانسیل بالای لغزشی است که می‌تواند جهت انتخاب مکان مناسب، کاهش خطرات و خسارات زمین-لغزش، برنامه‌ریزی‌های کاربری اراضی، مدیریت و تصمیم‌گیری بهتر در شهرستان کامیاران مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- ارومیه‌ای علی، صفایی، مهرداد، ۱۳۷۷، کاربری زمین و تأثیر آن در ناپایداری دامنه‌ها در نکارود، خلاصه گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صفحه ۳۷.
- پورقاسمی، حمیدرضا، ۱۳۸۹، پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، سال یکم، شماره نهم، صص ۸۰ - ۶۹.
- حسین‌زاده محمدمهدی، ثروتی‌محمد رضا، منصور عادل، میرباقری بابک، خضری سعید ۱۳۸۸، پهنه بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای توسط از مدل رگرسیون لجستیک مسیر سنندج - دهگلان، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ش ۱۱، صص ۳۷-۲۷.
- رنجبر، محسن، معماری، محمد، ۱۳۹۱، پهنه بندی پدیده‌ی لغزش با استفاده از روش *LNRF* در جاده هراز (از امام‌زاده هاشم تا لاریجان)، فصلنامه انجمن جغرافیایی ایران، شماره ۳۳، صص ۱۱۹.
- روستایی، شهرام؛ خدائی، لیلا، ۱۳۹۵، ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (*ANP*) و رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سد، مطالعه موردی: سد قلعه‌چای، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۳، صص ۸۰ - ۶۷.
- شمسی پور، علی اکبر؛ هیمن شهبایی؛ ممد سالاری؛ محمد عباسی، ۱۳۸۹. پهنه بندی خطر زمین لغزش با مورد: حوضه ی (AHP) استفاده از تحلیل سلسله مراتبی، آبخیز سقز. نشریه محیط جغرافیایی. شماره ۱. صص ۸۴.
- شیرزادی، عطاله، سلیمانی کریم، حبیب‌نژاد محمود، کاویان عطاله، چپی کامران ۱۳۹۶، معرفی یک مدل جدید ترکیبی الگوریتم مینا به منظور پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۶، صفحات ۲۴۶ - ۲۲۵.
- مرادی، حمید رضا؛ محمدی، مجید؛ پورقاسمی، حمید رضا، ۱۳۹۱، حرکات دامنه‌ای (حرکات توده‌ای) با تأکید بر روش‌های کمی تحلیل وقوع زمین‌لغزش، انتشارات سمت، صفحه ۲.
- مددی، عقیل، ۱۳۸۷، ارزیابی و پهنه‌بندی مخاطرات ژئومورفولوژی جاده تازه احداث سردابه و قوتور سویی، دانشگاه محقق اردبیلی، صص ۵۷.
- میرصانعی، ر؛ مهدیفر، م. ۱۳۸۵. روش‌ها و معیارهای بهینه جهت تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، پژوهش‌کده سوانح طبیعی، ۲۷۷ - ۱.
- ملکی، امجد، میلادی، بهزاد ۱۳۹۱، شبیه‌سازی مناطق مستعد خندق‌زایی با استفاده از روش *SPI* در حوضه‌ی رودخانه مرگ، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، صص ۳۸ - ۲۳.

- یمانی، مجتبی، احمدآبادی، علی، زارع، غلامرضا، ۱۳۹۱، به کارگیری الگوریتم ماشین های پشتیبان بردار در پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سوم، صص ۱۴۲ - ۱۲۵.
- یمانی، مجتبی، مقامی مقیم، غلامرضا؛ عرب عامری، علیرضا، شیرانی، کورش، ۱۳۹۶، ارائه مدل ترکیبی نوین به منظور افزایش دقت تهیه نقشه های حساسیت زمین لغزش با تأکید بر مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) (مطالعه موردی: حوضه دزعلیا، استان اصفهان)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۴، صص. ۴۰ - ۱۵.
- *Abedini M, Ghasemyan B, Rezaei Mogaddam M H, 2017. Landslide susceptibility mapping in Bijar city, Kurdistan Province, Iran: a comparative study by logistic regression And AHP models, Environ Earth Sci, 76:308, DOI 10.1007/s12665-017-6502-3.*
- *Ahmad, A., Dey, L., (2005). A feature selection technique for classificatory analysis. Pattern Recogn. Let. 26 (1), 43-56.*
- *Brown S.; Row lands, I. Nodal pricing in Ontario, 2009. Canada: Implications for solar PV electricity. Renew. Energy, 34, 170-178.*
- *Cevik E Topal T 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey) Environmental geology 44:949-962*
- *Costanzo D Rotigliano E Irigaray C Jiménez-Perálvarez JD Chacón J 2012. Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the GIS matrix method: application to the River Beiro Basin (Spain). Nat Hazards Earth Syst Sci 12:327-340.*
- *Cruden D.M. and Varnes D.J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner A.K. and Schuster, R.L. Landslides, Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, pp: 36-75.*
- *Dahal R.K. Hasegava Sh. Nonoura A. Yamanka M. Dhakal S. Pauudyal P. 2008. Predictive Modeling of Rainfall-Induced Landslide Hazard in the Lesser Himalaya of Nepal Based on Weights of Evidence, Geomorphology, Vol.102, NO.3-4, PP.496-510.*
- *Dai, F., Lee, C., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology 42, 213-228.*
- *Dehnavi A, Aghdam IN, Pradhan B, Varzandeh MHM, 2015. A new hybrid model usi step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) technique and adaptive neuro-fuz inference system (ANFIS) for regional landslide hazard assessment in Iran Catena 135:122-148.*
- *Ercanoglu M, Gokceoglu C ,2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (North of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. Environ Geol 41:720-730.*
- *Faraji Sabokbar H, Shadman Roodposhti M, Tazik E, 2014. Landslide susceptibility mapping using geographically weighted principal component analysis. Geomorphology 226:15-24.*
- *Goetz, J., R.H. Guthrie and A. Brenning., 2011. Integrating Physical and Empirical Landslide Susceptibility Models Using Generalized, Geomorphology, 129: 376-386.*
- *Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.H., 2001. The Elements of Statistical Learning: Data Mining. Inference and Prediction. Springer Verlag, New York.*
- *Hong H, Pradhan B, Xu C, Bui DT, 2015. Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines Catena 133:266-281.*
- *Jie Wang, Min Guo b, Kazuhide Sawada, Jie Lina, Jinchi Zhanga, 2015. Landslide susceptibility mapping in Mizunami City, Japan: A comparison between logistic regression, bivariate statistical analysis and multivariate adaptive regression spline models, Catena 135: 271-282.*

- Kavzoglu, T., Sahin, E.K., Colkesen, I., 2014. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* 11 (3), 425e439.
- Kavzoglu, T., Sahin, E.K., Colkesen, I., 2015. An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district Natural Hazards. 76, 471–496.
- Koehorst, B.A.N. Kjekstad, O. Patel, D. Lubkowski, Z. Knoeff, J.G. Akkerman, G.J 2005. *Workpackage 6 Determination of Socio- Economic Impact of Natural Disasters, Assessing socioeconomic Impact in Europe*, PP.173.
- Kornejady Aiding, Majid Ownegh b, Abdolreza Bahremand, 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods, *Catena* 152 , 144–162.
- Malamud. B.D., Turcotte, D.L, Guzzeti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth surf. Process* 29. 687-711.
- Marjanovi´c, M., Kovačević, M., Bajat, B., Voženílek, V., 2011. Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm, *Engineering Geology*, No. 123, Pp. 225–234.
- Neamah Jebur, Mustafa Biswajeet Pradhan, and Mahyat Shafapour Tehrany ., 2015. Manifestation of LiDAR-Derived Parameters in the Spatial Prediction of Landslides Using Novel Ensemble Evidential Belief Functions and Support Vector Machine Models in GIS. *IEEE Journal of Selected Topi... > Volume: 8 Issue: 2*, pp. 674-691.
- Nithya, N.S., Duraiswamy, K., 2014. Gain ratio based fuzzy weighted association rule mining classifier for medical diagnostic interface. *Sadhana* 39 (1), 39–52.
- Ost, L., Van-Den, E.M., Poesen, J., and Vanmaercke-Gottigny, M.C. 2003. Characteristics and spatial distribution of large landslides in the Flemish Ardennes (Belgium). *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 47(3): 329–350.
- Peng Ling, Ruiqing Niu Bo Huang, Xueling Wua, Yannan Zhao, Runqing Ye, 2014. Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China. *Geomorphology* 204 287–301.
- Pradhan B, Sezer EA, Gokceoglu C, Buchroithner MF, 2010. Landslide susceptibility mapping by neuro-fuzzy approach in a landslide-prone area (Cameron Highlands, Malaysia) *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48:4164-4177 doi:10.1109/tgrs.2010.2050328.
- Pourghasemi.H. R. Moradi H. R.. Fatemi Aghda, S. M B. Gokceoglu Pradhan .2013. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arab J Geosci*, DOI 10.1007/s12517-012-0825-x
- Pradhan B, 2011. “Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in Malaysia”, *Environmental Earth Sciences* 63:329–349.
- Quinlan, J.R. (1993). *C4.5: programs for machine learning*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, USA.
- Saha A, Gupta R, Arora M .2002. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas *International Journal of Remote Sensing* 23:357-369.
- Scholkoph, B., Smola, A.J., Williamson, R.C., Bartlett, P.L., 2000. New support vector algorithms. *Neural Computation* 12, 1207–1245.
- Shahabi H, Khezri S, Ahmad BB, Hashim M, (2014), Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: a comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. *CATENA* 115:55–70.

- Shirzadi Ataollah, Dieu Tien Bui, Binh Thai Pham, Karim Solaimani, Kamran Chapi, Ataollah Kavian, Himan Shahabi, 2017. Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach, *Environmental Earth Sciences* 76:60. Pp 1-18.
- Sidle, R.C., and Ochiai, H., 2006. *Landslides: Processes, Prediction, and Land use, Water Resource Monograph: 18, AGU books, ISSN: 0170-9600. Pp 312 – 328.*
- Taner San, B., 2014. an evaluation of SVM using polygon-based random sampling in landslide Susceptibility mapping: The Candir catchment area (western Antalya, Turkey), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, No. 26, Pp. 399–412.
- Thai Pham, B.T., Tien Bui, D., Indra, P., Dholakia, M.B., 2015a. Landslide susceptibility assessment at a part of Uttarakhand Himalaya, India using GIS – based statistical approach of frequency ratio method. *International Journal of Engineering Research & Technology* 4, 338–344.
- Thai Pham, B.T., Tien Bui, D., Pourghasemi, H.R., Indra, P., Dholakia, M.B., 2015b. Landslide susceptibility assessment in the Uttarakhand area (India) using GIS: a comparative study of prediction capability of naïve bayes, multilayer perceptron neural networks, and functional trees methods. *Appl. Climatol.* 122 (3e4), 1e19.
- Thai Pham, B.T., Tien Bui, D., Dholakia, M.B., Prakash, I., Pham, H.V., 2016. A comparative study of least square support vector machines and multiclass alternating decision trees for spatial prediction of rainfall-induced landslides in a tropical cyclones area. *Geotech. Geol. Eng.* 34, 1–18.
- Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B., Revhaug, I., 2016. *Spatial prediction Models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of Support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic Model tree. Landslides* 13 (2), 361–378.
- Tien Bui Dieu, Biswajeet Pradhan, Owe Lofman, and Inge Revhaug, 2012. *Landslide Susceptibility Assessment in Vietnam Using Support Vector Machines, Decision Tree, a Naive Bayes Models, Mathematical Problems in Engineering.* Pp 1-26, p 7.
- Tien Bui Dieu, Tran Anh Tuan, Harald Klempe, Biswajeet Pradhan, Inge Revhaug, .2015. *spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree, Landslides.*
- Tsangaratos P, Ilia I 2015. *Landslide susceptibility mapping using a modified decision tree classifier in the Xanthi Perfection, Greece Landslides: 1-16 doi: 10.1007/s10346-015-0565-6.*
- Van Westen, C.J., Castellanos, E, Kuriakose. S.L, 2008. *Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment an overview. Engineering Geology* 102, pp. 112 – 131.
- Vapnik, V.N., 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory.* Springer, New York.
- 2 pp.
- Venkatesan, M., Thangavelu, A., Prabhavathy, P., 2013. *An improved Bayesian classification data mining method for early warning landslide susceptibility model using GIS. In: Proceedings of Seventh International Conference on Bio-inspired Computing: Theories and Applications.* Springer, pp. 277 - 288.
- Wang, Y.; Bouten, W.; Chen, Q., 2015. *ted Landslide Field Data* 12(2): 268-288.
- 56- Wilson, J.P., and Lorang M.S. 2000. Chapter 6, *Spatial Models of Soil Erosion and GIS. Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*, 83-86.
- Xu C, Xiwei Xu a,n, Fuchu Dai b, ArunK. Saraf, 2012. *Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China. Computers & Geosciences* 46, 317–329.

- Xu , Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei , Lee Hsi Yuan, 2012b. *GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang, China, Geomorphology 145–146, 70–80.*
- Xu C, XiweiXu a,n, FuchuDai b, ArunK. Saraf, 2012c. *Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China. Computers & Geosciences 46, 317–329.*
- Yalcin, A., 2008. *GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. Catena 72, 1–12.*
- Yalcin, A, Reis, S, Aydinoglu, AA,. Yomralioglu, T, .2011. *A GIS - based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. Geomorphology, Vol 85.PP 274-287.*
- Yao a, X., L.G. Tham b, F.C. Dai, 2008, *Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China, Geomorphology 101,572–582.*