

تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های کم‌عمق در حوزه آبخیز خیاوچای

سید سعید غیائی^۱، فائزه رجب‌زاده^۲، سمیه ناجی‌راد^{۳*}، سادات فیض‌نیا^۴ و علی‌اکبر نظری‌سامانی^۵
^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران، ^۲ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس، ^۳ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اردبیل، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اردبیل، ایران و ^۴ استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران و ^۵ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۹

چکیده

ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق با استفاده از روش‌های مناسب و تعیین عوامل مؤثر در کاهش خطرات آن بسیار مؤثر می‌باشد. هدف از این مطالعه تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و بررسی کارایی مدل شاخص آماری در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری می‌باشد. بدین منظور تعیین نرخ مربوط به طبقات هر عامل با استفاده از روش شاخص آماری صورت پذیرفت که با تطبیق نقشه پراکنش زمین‌لغزش و ۱۰ لایه اطلاعاتی تهیه‌شده شامل؛ شیب، جهت، بارندگی، ارتفاع، تراکم زهکشی، انحنای دامنه، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، رخساره‌های ژئومورفولوژی و حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش در محیط ArcGIS 9.3 انجام شد. سپس آزمون کارایی مدل مورد استفاده با استفاده از شاخص درصد سطح زیر منحنی (ROC) صورت پذیرفت که حاکی از دقت بالای مدل شاخص آماری می‌باشد (۰/۹۵۲). به‌منظور تعیین عوامل اصلی در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. نتایج نشان داد که متغیرهای میزان بارندگی، شیب، جهت شیب، حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش و انحنای دامنه به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند.

واژه‌های کلیدی: حساسیت‌پذیری، روش شاخص آماری، منحنی ROC، ArcGIS 9.3، PCA

مقدمه

می‌شوند. عموماً زمین‌لغزش‌ها از پیچیدگی خاصی برخوردارند که ارزیابی آن‌ها با مدنظر قرار دادن تاریخچه وقوع و شرایط محیطی حاکم انجام می‌شود. مدل‌سازی این پیچیدگی نیازمند تمرکز بر نقش نسبی عوامل محرک زمین‌لغزش همراه با اثرات متقابل رژیم‌های هیدرولوژیکی با دیگر عوامل در طی زمان می‌باشد (Schmidt و Dikau، ۲۰۰۵). با توجه به اهمیت آن‌ها در مطالعات مربوط به مدیریت و کاهش خطر، تعداد زیادی از محققین به بررسی نقش آن‌ها در مدل‌سازی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش پرداخته‌اند

از جدیدترین تعاریفی که از سوی محققین برای زمین‌لغزش ارائه شده زمین‌لغزش را عمدتاً نوعی از حرکت مواد زمینی و آوار یافته می‌دانند که بر روی شیب‌های تند شکل گرفته و به شکل سیلاب واریزه‌ای تکامل می‌یابد و حاوی مواد کوه‌رفتی و رگولیت می‌باشد که سنگ بستر را تحت پوشش قرار می‌دهد (Trigila و همکاران، ۲۰۱۵). ذوب برف، بارندگی شدید، زمین‌لرزه‌ها، فعالیت آتشفشان و فعالیت‌های انسانی عوامل اصلی ایجاد زمین‌لغزش محسوب

جاده‌های ارتباطی، مراتع، ایجاد فرسایش و رسوب داشته، یکی از مهم‌ترین عوامل تغییردهنده فعال در لندفرم‌های کوتاه‌تری است. این امر سبب شده تا محققین، مطالعات مختلفی را در زمینه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و نیز تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش داشته باشند. برای مثال Gharahi و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی در مخزن سد البرز با بکارگیری شش عامل شیب، جهت، سنگ‌شناسی، ارتفاع، فاصله از گسل و آبراه و با استفاده از روش‌های آماری دومتغیره و AHP اقدام به تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش شاخص آماری تصویر واقعی‌تری از پراکندگی حساسیت زمین‌لغزش نشان می‌دهد.

Shirani و Seif (۲۰۱۲) در تحقیقی در منطقه پیشکوه، شهرستان فریدون‌شهر با استفاده از روش‌های آماری و در نظر گرفتن هشت عامل شیب، جهت، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، ارتفاع، فاصله از گسل، جاده و آبراه اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نمودند. نتایج نشان داد که روش ارزش اطلاعاتی یا همان شاخص آماری در پهنه‌بندی دارای مطلوبیت و عملکرد بهتری می‌باشد. Shirani و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای در ارتفاعات دنای زاگرس و با مدنظر قرار دادن شش عامل شیب، جهت، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، بارندگی و فاصله از آبراه به بررسی عوامل مؤثر بر حرکت‌های توده‌ای پرداختند. نتایج این تحقیق عامل سنگ‌شناسی را مؤثرترین عامل نشان داد. Pourghasemi و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی در شمال تهران و با به‌کارگیری ۱۲ عامل مؤثر به ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری، AHP و رگرسیون لجستیک دوتایی پرداختند. نتایج نشان داد زمانی که تعداد کافی از داده‌ها وجود داشته باشد، مدل شاخص آماری می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ساده در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرد.

در خارج از کشور نیز Pradhan و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای در مالزی به‌منظور به نقشه در آوردن حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری درختی، انفیس و ماشین بردار

(Shariat Jafari و Ghaioimian، ۲۰۰۸؛ Gharahi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳). برای مدل‌سازی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش نیاز به بررسی مجموعه‌ای از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. عوامل مرتبط با زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک، کاربری اراضی، پوشش اراضی و شرایط هیدرولوژیکی به‌کرات مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر موارد مذکور، عوامل حاصل از مدل ارتفاع رقومی نیز در مدل‌سازی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش نقش مهمی ایفا می‌کنند (Shariat Jafari و Ghaioimian، ۲۰۰۸؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور کلی روش‌های مختلفی به‌منظور تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش وجود دارد که سطح زمین را به مناطق جدا از هم تبدیل نموده و این مناطق را بر اساس پتانسیل خطر ناشی از وقوع زمین‌لغزش رتبه‌بندی می‌کنند (Shariat Jafari، ۱۹۹۶). در دهه‌های اخیر علاوه بر استفاده از روش‌های مبتنی بر آزمون و خطا و روش‌های آماری از سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود (Gharahi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳). از طرفی شناسایی عوامل مؤثر یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین چالش‌هایی است که محققان در تجزیه و تحلیل حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش پیش رو دارند. گذشته از این در خصوص انتخاب تعداد عوامل مؤثر در زمین‌لغزش چهارچوب کلی وجود نداشته و تعیین عوامل مؤثر امر مشکلی می‌باشد و عوامل انتخابی بیشتر بر مبنای مشاهدات و نظرات متخصصان امر صورت می‌پذیرد.

آمار انتشاریافته از سوی مرکز تحقیقات واگیرشناسی بلابای طبیعی نشان می‌دهد ۱۷ درصد از مرگ و میر ناشی از بلابای طبیعی در دنیا مربوط به زمین‌لغزش می‌باشد (Nadim و Lacasse، ۲۰۰۹). در کشور ایران نیز بر اساس گزارش کمیته ملی کاهش آثار بلابای طبیعی وزارت کشور در سال ۱۳۷۳، سهم خسارت سالانه ناشی از حرکت‌های توده‌ای ۵۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است. پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش در یک منطقه در کاهش خطرات و خسارات ناشی از بروز این امر نقش بسزایی دارد. همچنین، حرکت‌های توده‌ای، نقش مؤثری در تخریب

طول شرقی و "۵۰' ۱۱' ۳۸° تا "۵۶' ۲۳' ۳۸° عرض شمالی، با بیشینه ارتفاع ۴۵۶۰ متر از سطح دریا در محل قله کسری در ارتفاعات جنوبی حوضه و کمینه ارتفاع ۱۳۷۵ متر در محل خروجی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی واقع شده (شکل ۱- الف). خیاو چای رودخانه اصلی حوضه می‌باشد که جزو رودخانه‌های با سابقه وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای محسوب می‌شود که تهدیدی بالفعل برای منابع طبیعی و ساکنین منطقه محسوب می‌شود.

پردازش و گردآوری اطلاعات: مجموعه مختلفی از عوامل به‌هم‌پیوسته بر زمین‌لغزش‌ها اثر می‌گذارند. در این مطالعه مجموعه‌ای از عوامل محیطی و محرک زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گرفت. عامل بارندگی به‌عنوان عامل محرک و عوامل شیب، جهت، ارتفاع، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، انحنا، سطح، رخساره‌های ژئومورفولوژیکی و حساسیت واحدهای سنگی به فرسایش به‌عنوان عوامل محیطی مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور تولید و نمایش لایه‌های اطلاعاتی مذکور از نرم‌افزار ESRI ArcGIS 9.3 استفاده شد (شکل ۲).

نقشه سنگ‌شناسی منطقه از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مشگین‌شهر (تهیه شده به‌وسیله سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) استخراج شد. نقشه حساسیت واحدهای سنگی به فرسایش از نقشه سنگ‌شناسی حاصل شد. برای تهیه نقشه‌های شیب، جهت، ارتفاع و انحنا، سطح از مدل ارتفاع رقومی (تهیه شده به‌وسیله سازمان نقشه‌برداری کشور) با اندازه سلولی ۳۰ متر استفاده شد. نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی از ترکیب نقشه مورفولوژی (عوامل شیب، جهت و ارتفاع) با نقشه سنگ‌شناسی منطقه حاصل شد. نقشه تراکم زهکشی از طریق آبراهه‌های استخراج شده از مدل ارتفاع رقومی تهیه شد. به‌منظور تهیه لایه کاربری اراضی از تصویر ماهواره لندست هشت مربوط به ماه سپتامبر سال ۲۰۱۳ و از نوارهای با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. به‌منظور انجام تجزیه و تحلیل اوزان، تمام لایه‌های برداری (.shp) به لایه‌های رستری (GeoTIFF) تبدیل شد. با کمک نرم‌افزار ArcGIS درصد مساحت هر طبقه از هر عامل محاسبه شده و تعداد

پشتیبان به بررسی پنج ترکیب از هشت پارامتر پرداخت و به این نتیجه دست یافت که پارامترهای ارتفاع، شیب، انحنا، سطح، فاصله از آبراهه و جاده، نوع خاک و شاخص پوشش گیاهی برای تولید نقشه‌های حساسیت‌پذیری مؤثر برای زمین‌لغزش کفایت می‌کنند.

از بررسی پژوهش‌های صورت پذیرفته چنین جمع‌بندی می‌شود که در برخی از مطالعات محققین تنها به ارزیابی تعدادی از عوامل اصلی بسنده نموده و در برخی نیز چندین ترکیب از عوامل انتخابی در تولید نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش معرفی شده است. در این مطالعه بر اساس بازبندی مکرر میدانی، شناخت قبلی نگارندگان از منطقه و نیز با استناد به مطالعات مشابه در دیگر مناطق کشور، ۱۰ عامل دخیل در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از مدل آماری شاخص آماری اقدام به تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش شد در نهایت به‌منظور تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش از روش آماری چند متغیره تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. هدف از این مطالعه تعیین عوامل مؤثر در حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش و بررسی کارایی مدل شاخص آماری در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش می‌باشد. تحقیق حاضر در حوزه آبخیز خیاوچای از زیرحوزه‌های آبخیز بزرگ خزر در استان اردبیل به‌دلیل سابقه وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای شدید انجام شده که به‌منظور شناسایی مناطق حساس و تولیدکننده رسوب به‌منظور کاهش خطرات احتمالی ناشی از وقوع زمین‌لغزش و سیلاب واریزه‌ای به مناطق مسکونی، زیرساخت‌ها و تاسیسات منطقه انجام پذیرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز خیاوچای به وسعت تقریبی ۱۳۰۰۰ هکتار، در حاشیه غربی کوه سبلان، در جنوب شهرستان مشکین‌شهر قرار گرفته، از نظر تقسیمات سیاسی بخشی از استان اردبیل و از لحاظ تقسیمات جاماب از زیرحوزه‌های آبخیز بزرگ خزر محسوب می‌شود. که با هشت زیرحوضه در محدوده جغرافیایی "۳۸' ۳۷' ۴۷° تا "۱۸' ۴۸' ۴۷°

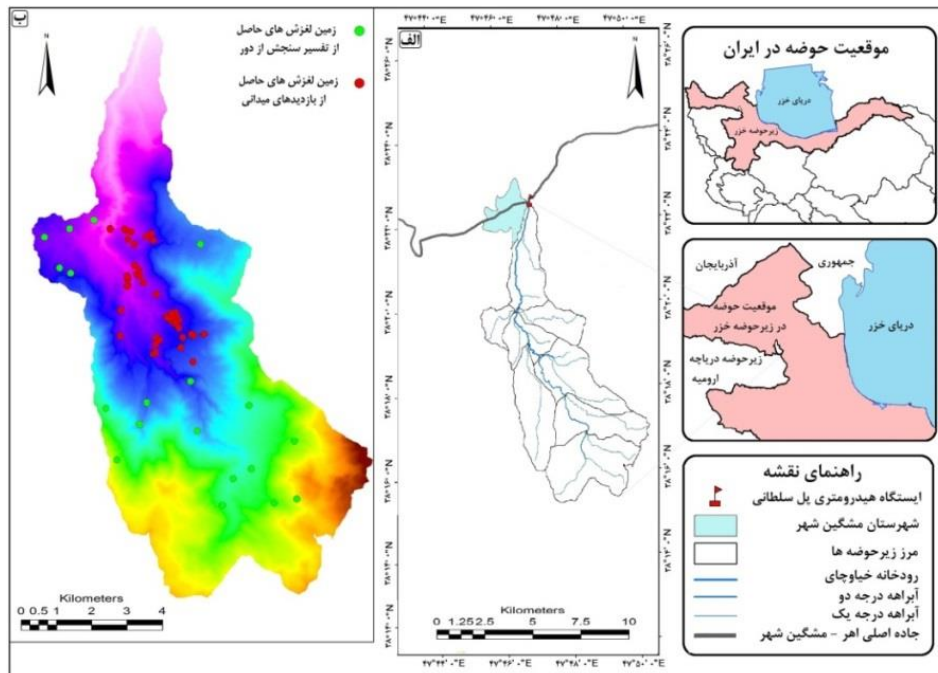
زمین لغزش‌ها منشأ اصلی تولید رسوب برای وقوع سیلاب واریزه‌ای باشد.

نقشه جهت: عامل جهت بر عواملی مانند هوازدگی، شرایط آب و هوا، پوشش اراضی و خاک تأثیر می‌گذارد. از این‌رو جهت جزء عوامل مهم در آماده‌سازی نقشه حساسیت‌پذیری می‌باشد (Shariat و همکاران، ۲۰۰۸؛ Ghaiomian, Jafari و Zhang؛ ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶). عامل جهت از مدل رقومی ارتفاع در محیط ArcGIS 9.3 و با استفاده از الحاقی Spatial Analyst Tools تهیه و سپس در هشت طبقه گروه‌بندی شد (شکل ۲-الف)، شمال، شمال شرق، شرق، جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب، غرب و شمال غرب. بیشترین تعداد زمین لغزش در جهات شمال شرق و شمال به ترتیب با تعداد ۲۲ و ۱۶ مشاهده شد.

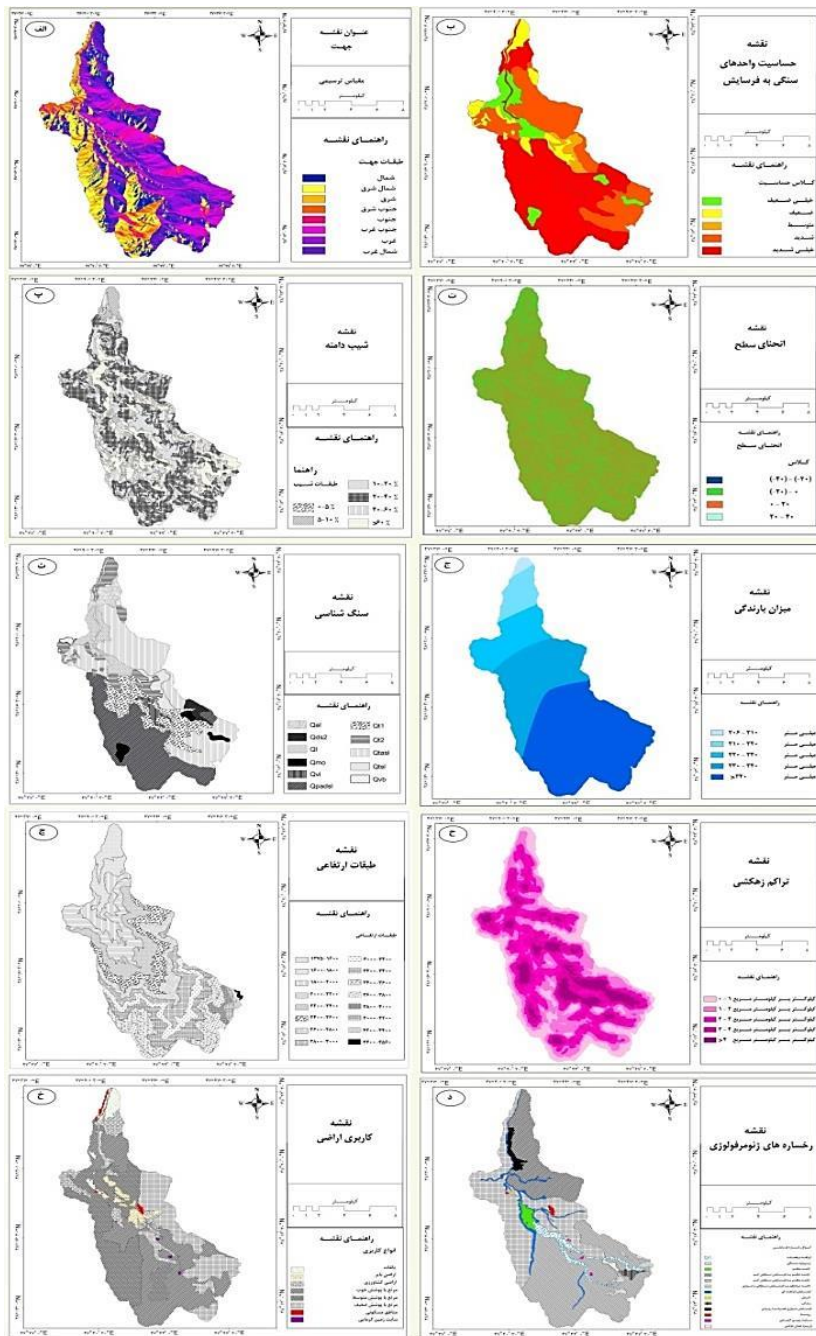
نقشه حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش: تهیه این عامل نسبت به دیگر عوامل زمان‌بر و نیازمند عملیات طاقت‌فرسای آزمایشگاهی می‌باشد و برای اولین‌بار در ارزیابی آسیب‌پذیری زمین لغزش به‌عنوان یک عامل مؤثر دخالت داده می‌شود.

زمین لغزش‌های موجود در آن‌ها مورد شمارش قرار گرفت.

نقشه پراکنش زمین لغزش: تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش منطقه از طریق بررسی‌های میدانی و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای انجام شد (شکل ۱-ب). در نیمه اول سال ۱۳۹۲ بررسی‌های میدانی تکمیل شد و ۵۵ مورد زمین لغزش (اغلب از نوع کم‌عمق کنار آبراهه‌ای) شناسایی شد. با توجه به این‌که شناسایی تمامی زمین لغزش‌ها در بررسی‌های میدانی دشوار بوده، همواره تعدادی از زمین لغزش‌ها در نقاط دورافتاده و صعب‌العبور رخ می‌دهند که از نظر دورمانده، امکان ثبت آن‌ها وجود ندارد به همین دلیل با مراجعه به نرم‌افزار Google Earth تعداد ۱۹ زمین لغزش دیگر به مجموع زمین لغزش‌های تحت مطالعه اضافه شد. تمام زمین لغزش‌های رخ داده از نوع واریزه‌ای بوده که ۵۵ درصد از زمین لغزش‌ها و به‌عبارتی ۴۱ مورد در کنار آبره‌ها اتفاق افتاده بود و مابقی زمین لغزش‌ها (تعداد ۳۳ زمین لغزش) در دامنه‌ها اتفاق افتاده بودند و رسوب قابل توجهی تولید شده بود. با توجه به سابقه وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای متعدد در منطقه مطالعاتی، به نظر می‌رسد این



شکل ۱- الف) نمایی از منطقه تحت مطالعه و ب) پراکنش زمین لغزش در حوزه آبخیز خیاوچای



شکل ۲- خروجی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش

توجه به واحدهای سنگی مؤثر و سنگ‌شناسی آن‌ها، این ذرات به واحدهای سنگی مؤثر نسبت داده شد. در نهایت با تلفیق نتایج مربوط به دو غربال با استفاده از رابطه تجربی Feiznia (۲۰۰۸) اقدام به تعیین پتانسیل رسوب‌زایی برای واحدهای سنگی هر زیرحوضه شد. پتانسیل رسوب‌زایی یک عدد بدون بعد و بیانگر حساسیت نسبی واحدها در برابر فرسایش می‌باشد که هر چه این نسبت برای هر یک از واحدهای همگن بالاتر باشد رسوب‌زایی نیز بالاتر است. (شکل ۲-ب)

به منظور تعیین حساسیت واحدهای سنگی با تقسیم‌بندی حوضه به زیرحوضه‌های کوچک‌تر و نمونه‌برداری از نقطه خروجی هر زیرحوضه و الک‌بندی نمونه‌های برداشتی با سری الک‌های استاندارد، الک‌های با قطر ۶۰۰ میکرون و چهار میلی‌متر به دلیل دارا بودن بیشترین فراوانی رسوب به‌عنوان الک شاخص انتخاب شد. سپس با انتخاب ۱۰۰ دانه رسوبی از هر نمونه، بررسی‌های کانی‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ بینوکلر صورت پذیرفت که در نهایت با

همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶). زیرا واحدهای سنگ‌شناسی مختلف در ناپایداری دامنه و وقوع زمین‌لغزش متفاوت عمل می‌نمایند. این عامل بر اساس پارامترهای مهندسی شامل نوع سنگ، ساختار فیزیکی و سن زمین‌شناسی در قالب ۱۱ نوع واحد سنگی طبقه‌بندی شد (شکل ۲-۱): واحد Q_1^a ، آبرفت‌های جوان (۲) واحد Q_2^1 ، پادگانه‌های آبرفتی جوان (۳) واحد Q_3^{mo} ، رسوبات یخچالی (۴) واحد Q_4^1 ، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی (۵) واحد Q_5^1 ، نهشته‌های لاهار (۶) واحد Q_{s2}^d ، گدازه و گنبد‌های داسیتی-ریوداسیتی (۷) واحد Q_{sl}^{pad} ، آندزیت-داسیت پورفیری (۸) واحد Q_{sl}^{ta} ، تراکی آندزیت-تراکیت پورفیری (۹) واحد Q_{sl}^1 ، گدازه‌های آندزیتی (۱۰) واحد Q_{sl}^{vb} ، جریان‌های گدازه و گدازه‌های برشی تراکی آندزیتی-تراکی بازالتی و فونولیتیکی (۱۱) واحد Q_{sl}^{vl} ، لایت. بیشترین تعداد زمین‌لغزش در پادگانه آبرفتی جوان با تعداد ۲۸ مشاهده شد.

نقشه بارندگی: بارندگی یکی از عوامل بسیار مهم در ایجاد و تسریع زمین‌لغزش می‌باشد و توزیع زمانی و مکانی آن اغلب به‌عنوان موضوع اصلی در شروع زمین‌لغزش مطرح است زیرا مقدار آب خاک را بارندگی کنترل می‌کند (Duc، ۲۰۱۳). منحنی‌های هم باران سالانه بر اساس آمار ۲۰ ساله نه ایستگاه باران‌سنجی (لای، نیرچای، پل سلطان (مشکین‌شهر)، تازه‌کند (اهر)، موئیل، سهزاب، سراب اسبرقان (میرکوه)، میرکوه حاجی و هریس) و با مدل واریوگرام دایره‌ای^۲، روش کریجینگ معمولی^۳ به‌دلیل داشتن کمینه نسبت میانگین مجذور مربعات خطا^۴ برابر با ۶۱/۲۴ و با استفاده از الحاقی Geostatistical Analyst در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 تهیه و سپس در قالب پنج طبقه تهیه شد (شکل ۲-ج): ۳۱۰-۳۰۶، ۳۲۰-۳۱۰، ۳۳۰-۳۲۰، ۳۴۰-۳۳۰، ۳۵۰-۳۴۰ میلی‌متر. بیشترین تعداد زمین‌لغزش در طبقه ۳۳۰-۳۴۰ میلی‌متر با تعداد ۲۸ مشاهده شد.

نقشه ارتفاع: در گزارش محققین مکرراً به ارتباط نزدیک زمین‌لغزش با ارتفاع اشاره شده است (Shariat

کوچک‌تر از ۵۰ (خیلی ضعیف)، ۱۰۰-۵۰ (ضعیف)، ۲۰۰-۱۰۰ (متوسط)، ۳۰۰-۲۰۰ (شدید) و بزرگ‌تر از ۳۰۰ (خیلی شدید). بیشترین تعداد زمین‌لغزش در طبقه دارای پتانسیل رسوب‌زایی خیلی شدید با تعداد ۳۳ مشاهده شد.

نقشه شیب: بالا رفتن شیب دامنه باعث افزایش حجم و وزن نسبی توده لغزشی بر واحد سطح صفحه لغزش می‌شود و نیروی محرک لغزش را افزایش می‌دهد. عامل شیب یکی از مهم‌ترین عوامل در توده مخرب می‌باشد که مکرراً در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته است (Gharahi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Meinhardt و همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶). تهیه نقشه شیب مشابه عامل جهت صورت پذیرفت و در قالب شش طبقه طبقه‌بندی شد (شکل ۲-پ) ۵-۰ درصد، ۱۰-۵ درصد، ۲۰-۱۰ درصد، ۳۰-۲۰ درصد، ۴۰-۲۰ درصد، ۶۰-۴۰ درصد، ۷۰-۶۰ درصد، ۸۰-۶۰ درصد، ۹۰-۶۰ درصد، ۱۰۰-۶۰ درصد. بیشترین تعداد زمین‌لغزش در طبقه بزرگ‌تر از ۶۰ درصد با تعداد ۳۹ مشاهده شد.

نقشه انحنای سطح^۱: به‌طور خاص انحنای دامنه اشتقاق خط عمود از بیشینه شیب در راستای جهت دامنه می‌باشد که امکان برجسته نمودن همگرایی (انحنای مقعر) و واگرایی (انحنای محدب) جریان آب را فراهم می‌آورد (Trigila و همکاران، ۲۰۱۵). انحنای سطح دارای دامنه‌ای از اعداد منفی، صفر و مثبت می‌باشد که منفی حاکی از حالت تقعر دامنه، مثبت نشانگر تحدب دامنه و صفر نشانه مسطح بودن دامنه می‌باشد. عامل انحنای دامنه با استفاده از روش زونبرگر-تورن از مدل رقومی ارتفاع و در محیط ArcGIS 9.3 در قالب چهار طبقه تهیه شد (شکل ۲-ت): ۲۰-(-۲۰)، ۰-(-۲۰)، ۲۰-۰ و ۴۰-۲۰. بیشترین تعداد زمین‌لغزش در طبقه ۰-(-۲۰) با تعداد ۴۵ مشاهده شد.

نقشه سنگ‌شناسی: سنگ‌شناسی منطقه نقش بسیار مهمی در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش ایفا می‌کند (Gharahi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Meinhardt

² Circular Variogram Model

³ Ordinary Kriging

⁴ RRMSE

¹ Plan Curvatur

در مرحله بعد، با توجه به کوهستانی بودن منطقه تصحیح اتمسفری بر روی تصویر انجام شد. سپس با ترکیب نوارهای، قرمز (۴)، سبز (۳) و آبی (۲)، تصویری با رنگ‌های طبیعی به دست آمد، سپس در محیط نرم‌افزار ENVI، با انتخاب مناطق تعلیمی (ROI) متغیر از هر کدام از کاربری‌ها با استفاده از روش بیشینه احتمال از سامانه طبقه‌بندی نظارت شده به دلیل دارا بودن بالاترین ضریب کاپا و صحت کلی (به ترتیب ۰/۸۳ و ۹۱/۲ درصد)، اقدام به تفکیک کاربری‌های مختلف از یکدیگر شد. پس از جداسازی کاربری مرتع از سایر کاربری‌ها، با استفاده از باند پنج تصویر مذکور (با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) مراتع منطقه مطالعاتی به لحاظ تراکم پوشش به سه دسته مراتع ضعیف، متوسط و خوب تفکیک شد.

به منظور بررسی صحت این تفکیک، با فراخوانی تعداد ۳۰ نقطه از نقاط واقعی زمینی، که در بازدیدهای مکرر میدانی و با استفاده از دستگاه موقعیت یاب جهانی (GPS) از نقاط مختلف مراتع منطقه برداشت شده بود، مورد مطابقت قرار گرفت و صحت تفکیک مورد تایید قرار گرفت. پس از تهیه نقشه کاربری با مراجعه مجدد به منطقه مطالعاتی نسبت به تدقیق مرز کاربری‌ها و به‌ویژه مراتع تفکیک شده اقدام شد. هفت نوع کاربری تشخیص داده شده در حوضه عبارت‌اند از: باغات، مناطق مسکونی، اراضی بایر، اراضی کشاورزی، مراتع با پوشش ضعیف، مراتع با پوشش متوسط و مراتع با پوشش گیاهی قوی (شکل ۲-خ). بیشترین تعداد زمین‌لغزش در مراتع با وضعیت پوشش خوب و اراضی بایر به ترتیب با تعداد ۳۰ و ۲۰ مشاهده شد.

نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی: استفاده از این عامل به دلیل کم‌عمق بودن نوع زمین‌لغزش‌های رخ داده می‌باشد که بیشترین تعداد در راستای طولی آبراه‌ها و کمتر از ۵۰ درصد زمین‌لغزش‌ها نیز در دامنه‌ها پراکنش دارند. برای تهیه این لایه اطلاعاتی با تلفیق نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع در محیط ArcGIS 9.3 نقشه مورفولوژی منطقه تهیه شد و با کمک نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی ۱:۵۰۰۰۰ تصحیحات لازم صورت پذیرفت و در نهایت

Jafari و Ghaiomian، ۲۰۰۸؛ Gharahi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳). مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه و نقشه ارتفاع در قالب ۱۶ طبقه طبقه‌بندی شد با توجه به وجود اختلاف ارتفاع ۳۰۰۰ متری در منطقه (از ۱۳۷۵ تا ۴۵۶۰ متر)، طبقات ارتفاعی با اختلاف ارتفاع ۲۰۰ متر شکل گرفت (شکل ۲-ج): نزدیک به ۸۵ درصد از زمین‌لغزش‌های رخ داده در محدوده ارتفاعی ۱۶۰۰ تا ۲۴۰۰ متر می‌باشد که بیشترین تعداد زمین‌لغزش در طبقه ۲۲۰۰-۲۰۰۰ متر با تعداد ۳۱ مشاهده شد.

نقشه تراکم زهکشی: پارامتر مهمی که پایداری دامنه را تحت کنترل دارد درجه اشباع مواد روی دامنه می‌باشد. تراکم زهکشی، نسبت طول کل آبراه‌ها به مساحت حوزه آبخیز است. هر چه تراکم زهکش‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد (Yalcin، ۲۰۰۸). شبکه آبراهه با فرسایش کناری و با اشباع بخش تحتانی دامنه اثر معکوسی بر پایداری دامنه دارد (Yalcin، ۲۰۰۵). شبکه آبراهه‌ها در محیط ArcGIS 9.3 و با استفاده از الحاقی Spatial Analyst Tools تهیه شد، سپس در قالب پنج طبقه طبقه‌بندی شد (شکل ۲-ح): ۱-۰، ۲-۱، ۳-۲، ۴-۳ و بزرگ‌تر از چهار کیلومتر بر کیلومترمربع. بیشترین تعداد زمین‌لغزش در طبقه ۳-۲ کیلومتر بر کیلومترمربع با تعداد ۲۹ مشاهده شد.

نقشه کاربری اراضی: کاربری اراضی به‌عنوان یک عامل مهم در حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (Jafari و Ghaiomian، ۲۰۰۸؛ Trigila و همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶). به‌منظور تهیه لایه کاربری اراضی از تصویر ماهواره‌ای اخذ شده از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا مربوط به ماهواره لندست ۸، ماه سپتامبر سال ۲۰۱۳ و از نوارهای با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. بدین منظور در نرم‌افزار ENVI ابتدا تطابق هندسی با استفاده از ۳۲ نقطه کنترل زمینی و با میانگین خطای مربعات ۰/۴۲ بر روی تصویر اعمال شد.

بهوسیل van Westen (۱۹۹۷) روش شاخص آماری نام‌گذاری شد و بعدها با همین عنوان مورد استفاده قرار گرفت (Shariat Jafari و Ghaioimian، ۲۰۰۸؛ Pourghasemi و Gharahi و همکاران، ۲۰۱۱؛ این روش بر مبنای توزیع همکاران، ۲۰۱۳). این روش در طبقات هر عامل عمل می‌کند. مقدار نرخ طبقات مربوط به هر عامل به صورت لگاریتم طبیعی تراکم زمین‌لغزش در هر طبقه تقسیم بر تراکم کل زمین‌لغزش تعریف می‌شود، معادله (۱) اساس این روش را نشان می‌دهد:

$$Si = \ln \left(\frac{Densclass}{Densmap} \right) = \ln \left(\frac{Npix(Si)}{Npix(Ni)} \frac{SNpix(Si)}{SNpix(Ni)} \right) \quad (1)$$

که در آن، Si نرخ داده شده به طبقات هر معیار، $Densclass$ تراکم زمین‌لغزش مربوط به هر طبقه، $Densmap$ تراکم زمین‌لغزش در تمام نقشه، $Npix(Si)$ تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزش در هر طبقه، $Npix(Ni)$ تعداد کل پیکسل‌های طبقات، $SNpix(Si)$ تعداد کل پیکسل‌های زمین‌لغزش و $SNpix(Ni)$ تعداد کل پیکسل‌های نقشه می‌باشد. روش شاخص آماری به منظور ترکیب هر عامل با نقشه توزیع زمین‌لغزش استفاده شد، سپس نرخ (Si) برای هر طبقه از پارامترها محاسبه شد.

آزمون کارایی مدل ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از منحنی ROC^۲: منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمال و پیش‌بینی سامانه‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (van Western، ۱۹۹۷) که به طور گسترده به منظور آزمون مدل حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش استفاده شده است (Shariat Jafari و همکاران، ۲۰۰۸؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳). در واقع منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست (Trade off). محور X درصد اختصاصیت^۳ (معادله ۲) و محور Y حساسیت^۴ (معادله

با تلفیق نقشه سنگ‌شناسی با نقشه مورفولوژی، نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی تهیه و ۱۱ نوع رخساره در منطقه شناسایی شد (شکل ۲-۵). آبراهه برف‌ساب، برون‌زد سنگی، دامنه منظم، دامنه منظم با فرسایش سطحی کم، دامنه منظم با فرسایش سطحی متوسط، دامنه نامنظم با فرسایش سطحی و شیاری، فرسایش آبراهه‌ای، فرسایش خندقی، ریزش سنگی، ریزش همراه با فرسایش سطحی و واریزه بلوکی. بیشترین تعداد زمین‌لغزش در رخساره فرسایش آبراهه‌ای و دامنه نامنظم با فرسایش سطحی و شیاری به ترتیب با تعداد ۳۵ و ۲۱ مشاهده شد.

ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش: به منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش از روش شاخص آماری استفاده شد. روش شاخص آماری بر اساس قوانین تصمیم‌گیری به‌تنهایی قادر به ارزیابی واقعی زمین‌لغزش می‌باشد بدین منظور اقدام به تعیین نرخ مربوط به طبقات هر عامل و تهیه نقشه نهایی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش شد که به وضوح نحوه تعیین نرخ مربوط به هر طبقه در توضیحات مربوط به روش شاخص آماری آورده شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش، زمین‌لغزش‌های موجود به صورت تصادفی به دو مجموعه تقسیم‌بندی شد، دسته اول به منظور آموزش مدل و دسته دیگر برای آزمون مدل استفاده شد. بیش از ۷۰ درصد از کل داده‌ها (۵۵ مورد زمین‌لغزش) به عنوان داده‌های ورودی برای تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در مدل‌سازی نقشه حساسیت‌پذیری استفاده شد و کمتر از ۳۰ درصد داده‌ها (۱۹ مورد زمین‌لغزش) به منظور آزمون نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت.

روش شاخص آماری^۱: روش شاخص آماری عموماً به منظور توسعه ارتباط بین توزیع زمین‌لغزش و عوامل کنترلی آن و به دلیل ساده‌سازی، توانمندی و عدم حساسیت به متغیرهای وابسته، برای مطالعه مناطقی که از داده‌های محدودی برخوردارند بسیار مناسب می‌باشد (Meinhardt و همکاران، ۲۰۱۵). این روش

^۲ Receiver Operating Characteristic Curve

^۳ Specificity

^۴ Sensitivity

^۱ Statistical Index Method

در این روش هر مؤلفه مستقل از مؤلفه‌های دیگر است. هر مؤلفه ترکیب خطی از متغیرها می‌باشد که می‌توان رابطه آن را به صورت معادله (۴) نمایش داد.

$$PC_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{ij}X_j \quad (4)$$

که در آن، PC مؤلفه اصلی، a_{ij} ضریب یا بردار ویژه (Eigen Vector) و X_j متغیر مورد نظر می‌باشد. به منظور انتخاب تعداد مؤلفه‌های مؤثر، مؤلفه‌هایی انتخاب شدند که مقدار ارزش ویژه (Eigenvalue) آن‌ها از یک بیشتر بود. برای تفسیر ویژگی‌های مؤثر در یک مؤلفه که بیشترین تغییرات را کنترل می‌کند از شاخص انتخاب (Selection Criteria)، استفاده شد.

$$SC = \frac{0.5}{(PCEigenvalue)^{0.5}} \quad (5)$$

که در آن، SC شاخص انتخاب (SC)، PC مؤلفه اصلی و $Eigenvalue$ همان ارزش ویژه می‌باشد. از آنجائی که تمامی واحدهای متغیرهای مورد بررسی یکسان نبودند، لذا برای محاسبه مؤلفه‌های اصلی از ماتریس همبستگی (Correlation matrix) استفاده شد. از آنجایی که در بسیاری از موارد تعدادی از متغیرها به یک مؤلفه ویژه یا حتی به تعدادی از مؤلفه‌ها بستگی دارند، تعبیر مؤلفه‌ها مشکل خواهد بود. لذا، روش‌هایی ابداع شده‌اند که بدون تغییر میزان‌های اشتراک، باعث تعبیر ساده‌تر عوامل می‌شوند. این روش‌ها با چرخش مؤلفه‌ها در قالب ماتریس دوران یافته، اقدام به شناسایی موثرترین متغیرها از بین متغیرهای موجود می‌نماید. تمامی تحلیل‌های آماری در محیط نرم‌افزار SPSS v.20 انجام شد.

نتایج و بحث

ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش: بر اساس مقادیر اوزان S_i سطح منطقه در قالب پنج طبقه طبقه‌بندی شد. طبقه حساسیت‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد. نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش بر اساس طبقه‌بندی فوق در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج مربوط به روش شاخص آماری نشان داد، بیشترین زمین‌لغزش در طبقات با حساسیت زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با تعداد ۱۳ و ۵۹ اتفاق افتاده است که نزدیک به ۸۰ درصد از

۳) را نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی ROC بیانگر مقدار پیش‌بینی سامانه از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداد (وقوع زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین‌لغزش) آن است (Bui و همکاران، ۲۰۱۱). ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد (Shakoor و Nandi، ۲۰۱۰) و مقادیر AUC از ۰/۵ تا یک متغیر است. چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین زند مقدار AUC آن ۰/۵ می‌باشد و زمانی که منحنی ROC ، سطح زیر منحنی برابر با یک داشته باشد، بیان‌گر بهترین دقت از نقشه حساسیت‌پذیری تهیه شده است (Lee و Talib، ۲۰۰۵). همبستگی کیفی-کمی سطح زیرمنحنی و ارزیابی تخمین به صورت زیر است (۰/۹-۱، عالی؛ ۰/۹-۰/۸، خیلی خوب؛ ۰/۷-۰/۸، خوب؛ ۰/۶-۰/۷، متوسط؛ ۰/۵-۰/۶، ضعیف) (Wang و Zhu، ۲۰۰۹).

$$Specificity = \frac{d}{c+d} = \frac{True\ Negative}{False\ Positive + True\ Negative} \quad (2)$$

$$Sensitivity = \frac{a}{a+b} = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative} \quad (3)$$

انتخاب مؤثرترین عوامل در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق با استفاده از تحلیل‌های آماری PCA: به منظور تعیین مؤثرترین عوامل از بین عوامل دخیل در وقوع زمین‌لغزش سلسله مراتب آماری به صورت زیر انجام شد. تعیین و تشخیص تناسب داده‌ها در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق با استفاده از ضریب KMO ^۳ و آزمون بارتلت^۴ انجام شد. برای تعیین رابطه بین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و تعیین مؤثرترین عوامل در قالب مؤلفه‌های اصلی از آزمون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، بیشترین ارزش ویژه (Eigenvalue) متعلق به مؤلفه نخست (PC_1) می‌باشد و به تدریج با افزایش رده مؤلفه‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است،

¹ Area Under of Curve

² Principal Component Analysis

³ Kaiser-Meyer-Olkinmeasure of Sampling

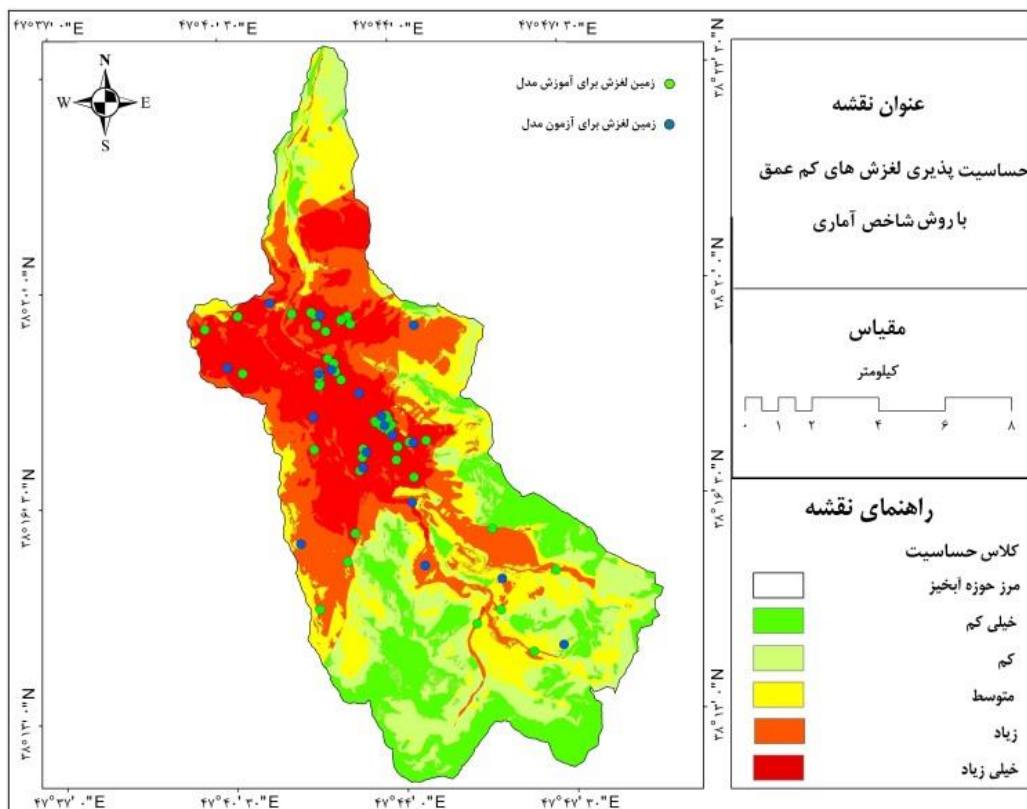
⁴ Bartlett's Test

زمین لغزش در مجموعه داده‌های مربوط به آموزش مدل با روش شاخص آماری نشان می‌دهد در این مطالعه پنج طبقه حاصل برای ارزیابی زمین لغزش و منطقه مناسب بوده، مطابقت آن با واقعیت زمینی قابل قبول می‌باشد (شکل ۴).

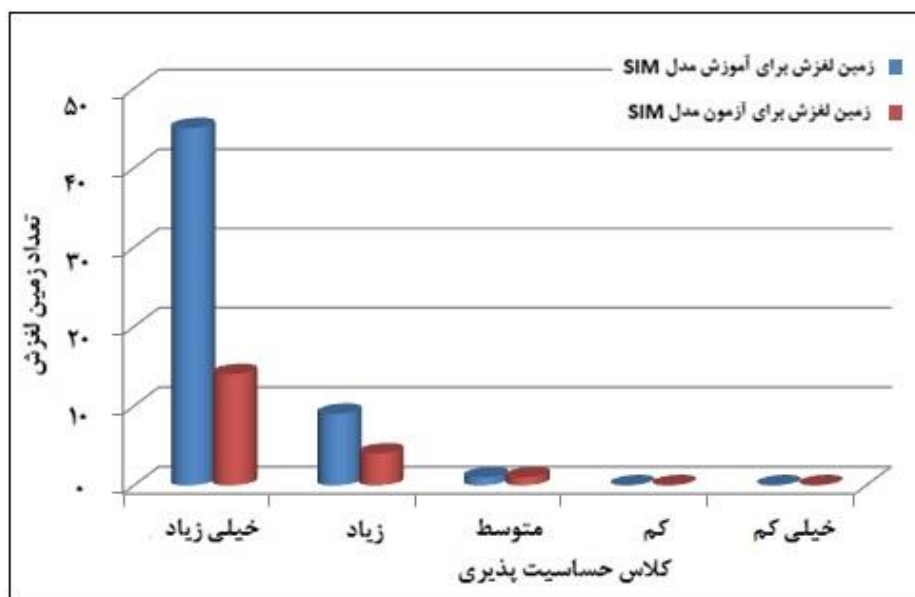
در این تحقیق منحنی ROC به منظور آزمون نقشه‌های حساسیت‌پذیری تهیه شده با مدل شاخص آماری مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۵ مقدار سطح زیرمنحنی (AUC) مدل را ۹۵/۲ درصد نشان می‌دهد که حاکی از کارایی بالای مدل شاخص آماری در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین لغزش‌های کم‌عمق در منطقه و تعیین مناطق آسیب‌پذیر دارد، بنابراین توانایی بالایی در سنجش حساسیت‌پذیری ارائه شده از منطقه نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق از این نظر که روش‌های آماری دومتغیره عملکرد بالایی در پیش‌بینی حساسیت‌پذیری منطقه به زمین لغزش دارند با یافته‌های Gharahi و همکاران (۲۰۱۱)، Shirani و Seif (۲۰۱۲)، Pourghasemi و همکاران (۲۰۱۳)، Meinhardt و همکاران (۲۰۱۵) کاملاً مطابقت دارد.

زمین لغزش‌های رخ داده را شامل می‌شود. در حالی که کمترین سطح از منطقه را طبقات با حساسیت زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با مساحت ۲۵/۷۹۵ و ۲۴/۰۷۷ کیلومتر مربع در بر دارد. از طرفی با وجود این که طبقات با حساسیت کم و خیلی کم بیشترین سطح از منطقه را دربر دارند (به ترتیب با ۲۶/۴۳۵ و ۲۷/۸۵۷ کیلومتر مربع) زمین لغزشی اتفاق نیفتاده است و تراکم زمین لغزش در این دو طبقه صفر می‌باشد. طبقه با حساسیت متوسط نیز با دو وقوع، ۲/۵ درصد از زمین لغزش‌های رخ داده را داراست و از لحاظ وسعت نیز با سطحی برابر با ۲۵/۸۳۹ کیلومتر مربع پس از طبقه با حساسیت کم در رتبه سوم قرار دارد (شکل ۴). با توجه به سطح پراکنش طبقات با حساسیت مختلف می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش شدت حساسیت‌پذیری سطح طبقات حساسیت‌پذیری کاهش می‌یابد.

مقایسه تعداد زمین لغزش با نرخ‌های Si نشان می‌دهد زمانی که سطوح حساسیت‌پذیری افزایش می‌یابد، تعداد زمین لغزش کاهش می‌یابد (شکل ۳). به طوری که نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های تراکم



شکل ۳- نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش با روش شاخص آماری



شکل ۴- تراکم زمین‌لغزش در پنج طبقه حساسیت‌پذیری از داده‌های آموزش و آزمون مدل

حدود $0/53$ به‌دست آمد که این مقدار وجود همبستگی لازم بین متغیرهای ورودی برای انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی را تأیید می‌کند و آزمون بارتلت نیز در سطح $0/01$ معنی‌دار شد بنابراین داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مناسب می‌باشند (جدول ۱).

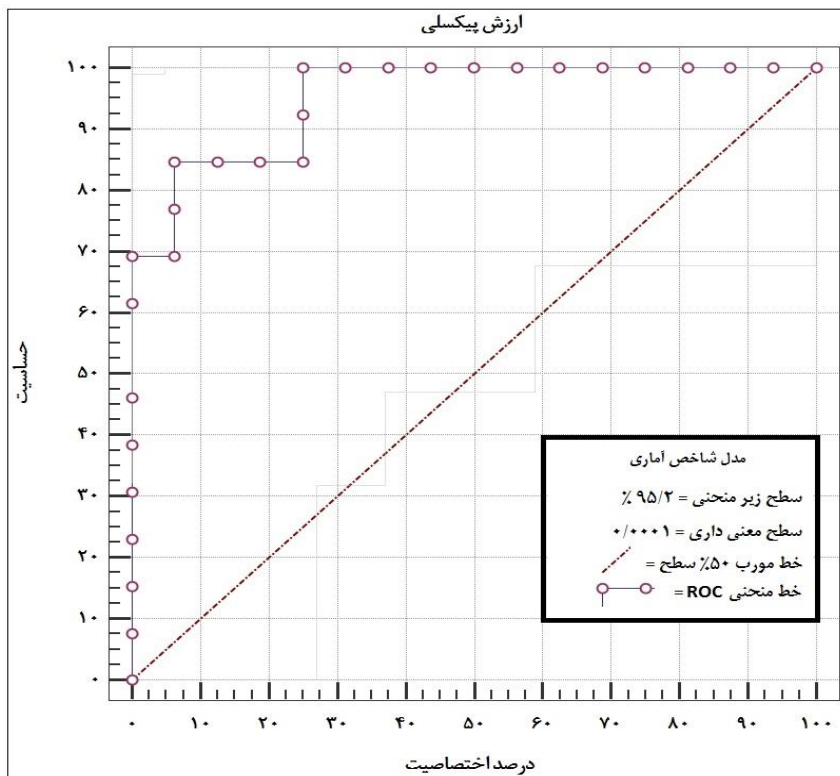
از بین ۱۰ مؤلفه که به تعداد متغیرهای مورد بررسی در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش می‌باشد، با در نظر گرفتن ارزش ویژه بالاتر از یک، تعداد سه مؤلفه اصلی اول مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). نتایج نشان داد، این سه مؤلفه اصلی نزدیک به ۷۰ درصد تغییرات را بیان می‌کنند. همچنین، اولین و آخرین مؤلفه اصلی به ترتیب از بیشترین و کمترین ارزش ویژه (Eigenvalue) برخوردارند. در این مطالعه به‌منظور تعیین متغیرهای مؤثر در هر مؤلفه از شاخص معیار انتخاب (Selection criteria) استفاده شد (جدول ۲).

تعیین کمینه مجموعه داده‌ها برای ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق: به‌منظور تعیین کمینه متغیرهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. برای نیل به این هدف ابتدا با استفاده از ضریب KMO اقدام به تعیین و تشخیص مناسب بودن داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی شد. مقدار این ضریب همواره بین صفر و یک متغیر است. در صورتی که مقدار این ضریب کمتر از $0/5$ باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب نخواهد بود و اگر مقدار آن بین $0/5$ تا $0/69$ باشد، می‌توان با احتیاط بیشتر به تجزیه مؤلفه‌های اصلی پرداخت. در صورتی که ضریب KMO بزرگ‌تر از $0/7$ باشد، تجزیه مؤلفه‌های اصلی در کاهش داده‌ها، مؤثر خواهد بود. همچنین، برای اطمینان از وجود همبستگی بین متغیرهای ورودی یا مستقل از آزمون بارتلت استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده ضریب KMO

جدول ۱- بررسی آزمون‌های KMO و بارتلت در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق

نوع حساسیت‌پذیری	آزمون KMO	آزمون بارتلت	سطح معنی‌داری
زمین‌لغزش‌های کم‌عمق	$0/531$	$85/374$	$0/000$

** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد



شکل ۵- منحنی ROC برای صحت‌سنجی مدل حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق

در مورد مؤلفه سوم با معیار انتخاب برابر با ۰/۳۹۹ تنها بردار ویژه دو متغیر شیب و جهت شیب بزرگ‌تر از معیار انتخاب مؤلفه مذکور می‌باشد که به‌عنوان متغیرهای مؤثر در مؤلفه سوم معرفی شدند (معادله ۸). برای تعیین متغیرهای اصلی (مؤثرترین عوامل) در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد بدین‌صورت که متغیرهایی که دست‌کم یکی از ضرایب آن‌ها برای تشکیل مؤلفه مربوطه استفاده می‌شود، دارای مقدار نسبتاً بالایی باشد. نتایج محاسبات نشان داد، با توجه به پیچیدگی مکانیسم وقوع زمین‌لغزش این معیار معادل با ۰/۸ انتخاب شده است (جدول ۴) (Singha و همکاران، ۲۰۰۴؛ Sheikholeslam و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به معیار در نظر گرفته شده مشخص شد از بین متغیرهای موجود تنها پنج متغیر ضریب بالای ۰/۸ را در سه مؤلفه استخراج شده دارند. بنابراین متغیرهای میزان بارندگی، شیب، جهت شیب، حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش و انحنا دامنه به‌ترتیب بیشترین تأثیر و بقیه متغیرها کمترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق دارند.

با در نظر گرفتن معیار انتخاب محاسبه شده برای هر مؤلفه، متغیرهایی که قدر مطلق بردار ویژه آن‌ها بالاتر از معیار انتخاب بود، به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار در آن مؤلفه انتخاب شدند (جدول ۳).

$$PC1 = 0.771X_9 - 0.734X_{10} + 0.616X_3 + 0.602X_7 - 0.597X_6 + 0.478X_4 - 0.458X_2 + 0.360X_5 + 0.343X_1 - 0.155X_8 \quad (۶)$$

$$PC2 = 0.719X_7 + 0.604X_4 + 0.601X_8 - 0.545X_5 + 0.551X_3 + 0.493X_2 + 0.454X_6 \quad (۷)$$

$$PC3 = 0.822X_1 - 0.576X_2 - 0.399X_9 \quad (۸)$$

برای مثال معیار انتخاب در مؤلفه اول (PC1) ۰/۲۹۲ بود (جدول ۲) و بردار ویژه برای تمامی ۱۰ متغیر موجود (جدول ۳) بیشتر از ۰/۲۹۲ می‌باشد، لذا تمامی متغیرها به‌عنوان متغیرهای مؤثر در مؤلفه اول معرفی شدند که نشان از تأثیر این پارامترها در تشکیل مؤلفه اول می‌باشد (معادله ۶). در خصوص مؤلفه دوم به‌جز سه متغیر شیب، حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش و کاربری اراضی، مقادیر بردار ویژه برای بقیه متغیرها بیشتر از معیار انتخاب مؤلفه دوم (۰/۳۲۶) می‌باشد که حاکی از تأثیر بالای این متغیرها در تشکیل مؤلفه دوم می‌باشد (معادله ۷).

جدول ۲- تعداد مؤلفه‌های اصلی، EV (ارزش ویژه)، SC (شاخص انتخاب) و Cu (واریانس جمعی) در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق

مؤلفه اصلی ۱ (PC1)			مؤلفه اصلی ۲ (PC2)			مؤلفه اصلی ۳ (PC3)		
EV	SC	Cu	EV	SC	Cu	EV	SC	Cu
۲/۹۳	۰/۲۹۲	۲۹/۴	۲/۳۵۶	۰/۳۲۶	۵۲/۹	۱/۵۷	۰/۳۹۹	۶۸/۶

جدول ۳- مقادیر بردار ویژه برای پارامترهای انتخاب شده در هر مؤلفه اصلی (PC)

متغیرهای موجود											
حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق	شیب (X1)	جهت (X2)	طبقات ارتقاعی (X3)	تراکم زهکشی (X4)	سنگ‌شناسی (X5)	انحنای دامنه (X6)	بازندگی (X7)	رخساره‌های ژئومورفولوژی (X8)	به فرسایش (X9)	واحدهای سنگی	حساسیت نسبی (X10)
PC1	۰/۳۴۳	-۰/۴۵۸	۰/۶۱۶	۰/۴۷۸	۰/۳۶۰	-۰/۵۹۷	۰/۶۰۲	-۰/۱۵۵	۰/۷۷۱	-۰/۷۳۴	
PC2	-۰/۱۱۵	۰/۴۹۳	۰/۵۵۱	۰/۶۰۴	-۰/۵۴۵	۰/۴۵۴	۰/۷۱۹	۰/۶۰۱	-۰/۱۵۵	۰/۱۵۹	
PC3	۰/۱۸۲۲	-۰/۵۷۶	-۰/۰۵	۰/۱۳۶	۰/۳۱۷	۰/۳۴۱	۰/۰۷۰	۰/۳۲۲	-۰/۳۹۹	۰/۲۳۶	

جدول ۴- مقادیر حاصل از ماتریس دوران یافته (مقادیر بردارهای ویژه در روش تجزیه و تحلیل عامل‌های اصلی)

متغیرهای مؤثر											
حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق	شیب (X1)	جهت (X2)	طبقات ارتقاعی (X3)	تراکم زهکشی (X4)	سنگ‌شناسی (X5)	انحنای دامنه (X6)	بازندگی (X7)	رخساره‌های ژئومورفولوژی (X8)	به فرسایش (X9)	واحدهای سنگی	حساسیت نسبی (X10)
PC1	۰/۲۱۴	۰/۰۴۷	۰/۷۹۸	۰/۷۸۱	-۰/۱۷۹	۰/۰۴۶	۰/۹۳۸	۰/۴۲۵	۰/۲۸۷	-۰/۲۸۲	
PC2	۰/۱۶۳	۰/۲۲۲	-۰/۲۱۹	۰/۰۰۷	-۰/۳۲۰	۰/۸۱۱	-۰/۰۶۶	۰/۵۵۴	-۰/۸۳۳	۰/۷۱۹	
PC3	۰/۱۸۵۷	-۰/۱۸۵۶	-۰/۰۳۶	۰/۰۴۵	۰/۶۲۷	-۰/۱۳۷	-۰/۰۱۰	-۰/۰۴۵	۰/۰۳۲	-۰/۱۵۴	

به‌وسیله مدل شاخص آماری حاکی از دقت بسیار بالای مدل شاخص آماری می‌باشد. به‌عبارتی تراکم زمین‌لغزش برای پنج طبقه حساسیت‌پذیری خیلی کم تا خیلی زیاد از روند خطی افزایشی خبر دارد که حاکی از تطابق کافی بین نقشه حساسیت‌پذیری و داده‌های واقعی زمین‌لغزش می‌باشد که با یافته‌های Shariat Jafari (۱۹۹۶)، Shariat Jafari و همکاران (۲۰۱۱)، Ghaiomian (۲۰۰۸)، Gharahi و همکاران (۲۰۱۱)، Shirani و Seif (۲۰۱۲)، Pourghasemi و همکاران

ارزیابی حساسیت‌پذیری صورت گرفته در این مطالعه از دانش تخصصی یکپارچه‌ای برخوردار می‌باشد که با پراکنش واقعی رخداد‌های زمین‌لغزش برای بهینه‌سازی زنجیره پردازش برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری صورت پذیرفته، با تعیین کمینه داده‌های لازم برای ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق پایه‌ریزی شده است. روش شاخص آماری به‌منظور توسعه روابط بین عوامل کنترلی و پراکنش زمین‌لغزش استفاده شد. نتایج مربوط به ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌ها

اصلی به تعیین کمینه متغیرها برای ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش اقدام شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده ویژگی‌هایی همانند میزان بارندگی، شیب، جهت شیب، حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش و انحنای دامنه به‌عنوان عوامل مؤثر انتخاب شدند. شرایط کوهستانی منطقه و بارش طولانی‌مدت برف و باران و نیز شیب‌های تند منطقه باعث چیره شدن عوامل محرک و محیطی در بروز زمین‌لغزش در منطقه می‌باشد. البته وقوع زمین‌لغزش در شیب‌های کمتر دلیل انسانی دارد چرا که دامنه‌های بسیار پرشیب دور از دسترس بشر بوده و عملاً تجمع انسان‌ها در این‌گونه نقاط به‌ندرت صورت پذیرفته و یا اصلاً شکل نگرفته است. به همین دلیل می‌توان به‌روشنی بیان نمود که فعالیت‌های انسانی نقش بسیار مهمی در تحریک و تسریع حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در منطقه داشته است. بنابراین پیشنهاد می‌شود، از تغییر کاربری و جاده‌سازی‌های غیراستاندارد در مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش جلوگیری شود و با انجام پژوهش‌هایی در زمینه انتخاب عوامل مؤثر، تعیین کمینه و یا بهینه‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در مناطق مختلف، ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با صرف کمینه هزینه و زمان همراه باشد.

(Meinhardt, ۲۰۱۳) و همکاران (۲۰۱۵) کاملاً مطابقت دارد.

با استناد به نتایج این مطالعه استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره به‌خصوص در مناطق با سطوح نسبتاً کوچک (کمتر از ۲۰۰ کیلومتر مربع) نتایج قابل توجهی را ارائه می‌دهد. دلیل موفقیت روش شاخص آماری به‌عنوان یک روش آماری دو متغیره دخالت وزن‌دهی بینا بر اساس واقعیت زمینی (زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده) می‌باشد. از این‌رو می‌توان با انتخاب عوامل مؤثر و اصلاح عوامل ناپایداری شیب، روش حاضر را نسبت به استفاده در مناطق با وضعیت مشابه توصیه نمود. با قطع نقشه عوامل مختلف، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و قضاوت‌های کارشناسی مشاهده شد، محدوده‌ای از منطقه با میزان بارندگی ۳۳۰-۳۴۰ میلی‌متر در جهات شمال و شمال شرقی که با پوشش پادگانه آبرفتی جوان و با حساسیت بسیار شدید به فرسایش در شیب‌های بیش از ۶۰ درصد پراکنش دارند بسیار مستعد شکست شیب می‌باشند.

همچنین، با انتخاب عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق می‌توان نسبت به شناخت بیشتر، مدیریت و کاهش خطرات آن اقدام نمود. در این مطالعه با استفاده از روش‌های تجزیه به مؤلفه‌های

منابع مورد استفاده

1. Bui, D.T., O. Lofman, I. Revhaug and O. Dick. 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59: 1413-1444.
2. Duc, D.M. 2013. Rainfall-triggered large landslides on 15 December 2005 in Van Canh district, Binh Dinh province, Vietnam. *Landslides*, 10: 219-230.
3. Feiznia, S. 2008. Applied sedimentology (with emphasize on soil erosion and sediment production). University of Gorgan Press, 356 pages (in Persian).
4. Gharahi, H., B. Bahloli, A. Sayyar and M. Shariat Jafari. 2011. Providing landslide susceptibility map using the hierarchical analysis and bivariate statistical model in Alborz dam reservoir. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 21(81): 93-100 (in Persian).
5. Lee, S. and J.A. Talib. 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47: 982-990.
6. Lacasse, S. and F. Nadim. 2009. Landslide risk assessment and mitigation strategy. *Landslides-Disaster risk reduction*. Springer, 12: 31-61.
7. Meinhardt, M., M. Fink and H. Tünschel. 2015. Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. *Geomorphology*, 234: 80-97.
8. Nandi, A. and A. Shakoor. 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110(1): 11-20.
9. Pourghasemi, H.R., H.R. Moradi and SM. Fatemi Aghda. 2013. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process and statistical index models and assessment of their performances. *Natural Hazards*, 69(1): 749-779.

10. Pradhan, B., E. Sezer, A.C. Gokceoglu and M.F. Buchroithner. 2013. Landslide susceptibility mapping by neuro-fuzzy approach in a landslide-prone area (Cameron Highlands, Malaysia). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12): 4164-4177.
11. Schmidt, J. and R. Dikau. 2005. Preparatory and triggering factors for slope failure: analyses of two landslides near Bonn, Germany. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 191: 121-138.
12. Shariat Jafari, M. 1996. Landslide principles of natural slope stability. Publications Structures, 218 pages (in Persian).
13. Shariat Jafari, M. and J. Ghaiomian. 2008. Evaluation of performance of model bivariate statistical analysis in landslide hazard zonation. *Journal of Science, University of Tehran*, 34: 137-143 (in Persian).
14. Sheikholeslami, A., F. Bagheri Khalili and A. Mahmood Abadi. 2011. Determination of effective indicators for soil quality assessment in different land use types of Chughakhor basin. *Water and Soil Resources Conservation*, 3: 55-71 (in Persian).
15. Shirani, K. and A. Seif. 2012. Landslide hazard zonation by using statistical mMethods (Pishkuh Region in Fereydonshahr Province). *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 22(85): 149-158 (in Persian).
16. Shirani, K., S. Chavoshi and J. Ghaiomian. 2013. Investigation and assessment of the landslide hazard zonation methods in the upper Padena Semirom. *Journal of Basic Science, University of Isfahan*, 23-35 (in Persian).
17. Singha, K.P., A. Malika, D. Mohana and S. Sinhab. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India), a case study. *Water Research*, 38: 3980-3992.
18. Trigila, A., C. Iadanza, C. Esposito and G. Scarascia-Mugnozza. 2015. Comparison of logistic regression and random forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 249: 119-136.
19. Van Westen, C.J. 1997. Statistical landslide hazard analysis. *ILWIS*, 2: 73-84.
20. Yalcin, A. 2005. An investigation on Ardesen (Rize) region on the basis of landslide susceptibility. PhD Thesis, 347 pages.
21. Yalcin, A. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey), comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72: 1-12.
22. Zhang, G., Y. Cai, Z. Zheng, J. Zhen, Y. Liu and K. Huang. 2016. Integration of the statistical index method and the analytic hierarchy process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. *CATENA*, 142: 233-244.
23. Zhu, C. and X. Wang. 2009. Landslide susceptibility mapping: A comparison of information and weights-of evidence methods in Three Gorges Area. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, DOI 10.1109/ESIAT.2009. 187: 342-346.