نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

سال هجدهم- شماره ٦٤- بهار ١٤٠٣

Vol. 18, No. 64, Spring 2024

کاربرد الگوریتم یادگیری ماشین بیشینه آنتروپی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان

ابراهیم کریمی سنگچینی[1]*، علی دسترنج[2]، سید حسین آرامی[3]، صمد شادفر[4]
ایرج ویسکرمی[5]

تاریخ دریافت:۲۹ /۰۵/ ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۸ /۰۷/ ۱۴۰۲
DOI: 10.22034/18.64.50

چکیده مبسوط

مقدمه

اشکال بسیاری از خطرات طبیعی و فاجعه‌های مربوطه که شامل زمین‌لرزه، آتشفشان، سونامی، زمین‌لغزش، سیل، فرسایش خاک و غیره در سراسر جهان رخ می‌دهند. در میان این خطرات طبیعی، زمین‌لغزش‌ها یکی از وحشتناک‌ترین و پرتکرارترین اتفاقات در سراسر جهان هستند. هر سال، زمین‌لغزش‌ها خسارات گسترده‌ای از لحاظ جانی و مالی را به همراه دارند که شامل تخریب جنگل‌ها، زمین‌های کشاورزی حاصلخیز، مناطق سکونتی و شبکه‌های ارتباطی به علاوه گردشگری می‌شود. همچنین تغییرات در سطح زمین نیز نتیجه زمین‌لغزش‌های ویرانگر هستند. ایران با انواع مختلفی از تهدیدات و فاجعه‌های طبیعی روبرو شده است، از جمله فرسایش شدید خاک که به پیشرفت سیلاب‌های معمولی، سیلاب‌های عظیم و زمین‌لغزش منجر می‌شود. بنابراین، به دلیل رخدادهای متعدد زمین‌لغزش و خسارات مالی گسترده، این واقعه به عنوان یکی از فاجعه‌های کشور ایران شناخته شده است و حدود ۵۰۰ میلیارد تومان خسارت مالی ایجاد کرده است. ارزیابی حساسیت به زمین‌لغزش می‌تواند به برنامه‌ریزان در مدیریت نهایی آلودگی محیطی و منابع طبیعی در پیشگیری از خسارات احتمالی و در نهایت توسعه فعالیت‌های اقتصادی در حوزه آبخیز کمک کند. روش‌های برنامه‌ریزی‌شده همزمان از ایده‌های ظرفیت و حقیقت زمین استفاده می‌کنند. روش‌های برنامه‌ریزی‌شده هم از دیدگاه متخصصین و هم از واقعیت‌های زمینی در زمان مشابه استفاده می‌کنند. این می‌تواند به عنوان یک روش کاملاً جدید برای مشکلات پهنه‌بندی زمین لغزش در نظر گرفته شود. هدف از این مطالعه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی (ME) و مقایسه اثربخشی این روش در مکان‌یابی حساسیت وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان است.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز کرگانه بین طول جغرافیایی"۵۹ '۲۳ °۴۸ تا "۲۴ '۴۴ °۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی "۱۲ '۲۵ °۳۳ تا "۱۲ '۳۷ °۳۳ شمالی با مساحتی حدود ۲۹۴/۲ کیلومتر مربع در غرب استان لرستان قرار دارد. این حوضه یکی از زیرحوضه‌های اصلی رودخانه کرخه است. یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی حساسیت زمین لغزش، شناسایی و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های موجود در حوزه آبخیز است. این نقشه از طریق تلفیق اطلاعات مرتبط با زمین‌لغزش‌ها و از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های GIS تهیه شده است. برای این منظور، لایه نقشه پراکنش زمین لغزش در حوضه تهیه و به صورت تصادفی به دو مجموعه برای آموزش مدل (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی مدل (۳۰ درصد) تفکیک شد. همچنین ۱۶ عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در این حوضه با امکان بررسی منابع و استفاده از آزمون‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، Tolerance و آزمون VIF انتخاب شدند. لایه‌های رقومی عوامل موثر در سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. در مرحله بعد نقشه خطر زمین لغزش بر اساس روش ماشین بیشینه آنتروپی (ME) تهیه شد. برای ارزیابی دقت مدل‌سازی و مقایسه کارایی روش، از شاخص سطح زیر منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. بر اساس نتایج نمودار حداکثر احتمال، زمین شناسی، کاربری اراضی و شیب، بهترین عوامل مهم تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه هستند.

نتایج و بحث

نقشه پراکنش زمین لغزش حاکی از وجود ۹۵ زمین لغزش پراکنده

۱- استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران نویسنده مسئول:
E.karimi64@gmail.com
۲- استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی خراسان‌رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد.
۳- استادیار، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.
٤- دانشیار، پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
۵- مربی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران.

در حوضه آبخیز کرگانه بود. مساحت کل زمین‌لغزش‌های رخداده ۶۳۵ هکتار (۲/۲۳ درصد مساحت حوزه آبخیز) است. بر اساس نتایج شاخص PCA ، ضریب KMO برابر با ۰/۶۱ محاسبه شد که نشان‌گر همبستگی لازم بین متغیرهای ورودی برای انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی است. از بین ۱۹ عامل به عنوان تعداد متغیرهای مورد بررسی در ارزیابی خطر زمین لغزش، با در نظر گرفتن مقدار ویژه بالاتر از یک، تعداد دو مؤلفه اصلی اول بررسی شد. نتایج نشان داد که این دو مؤلفه اصلی نزدیک به ۶۷ درصد از تغییرات را بیان می‌کنند. پس از بررسی، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، شاخص قدرت رودخانه (SPI) ، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص طول شیب (LS) ، توپوگرافی شاخص موقعیت (TPI) ، شاخص زبری توپوگرافی (TRI) و شاخص اندازه‌گیری ناهمواری برداری (VRM)، کاربری اراضی، فاصله از روستا و میزان بارندگی به‌عنوان مؤثرترین عوامل وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه انتخاب شدند. براساس نمودار شاخص کاپا، عوامل زمین شناسی، کاربری اراضی، شیب، شاخص زبری توپوگرافی (TRI) ، طول شیب و جهت شیب مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار هستند. سطح زیر منحنی (AUC) بر اساس منحنی تشخیص عملکرد نسبی نشان‌دهنده دقت خوب (AUC=0.787) در مرحله اعتبارسنجی است. با در نظر گرفتن نتایج روش حداکثر آنتروپی، حدود ۲۸ درصد از حوزه آبخیز کرگانه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد وقوع زمین‌لغزش قرار دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد از تمامی عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه استفاده شود. برای تعیین رابطه بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و تعیین مؤثرترین عوامل از آنالیز مؤلفه اصلی (PCA)، Tolerance و VIF استفاده شد. ظرفیت حمل آبراهه در واقع تاثیر توپوگرافی بر فرسایش را تعیین می‌کند. هر چه شیب بیشتر باشد، ظرفیت حمل رسوب بیشتر می‌شود و شرایط لغزش در حاشیه آبراهه افزایش می یابد. افزایش در شاخص زبری توپوگرافی (TRI) نشان‌دهنده برآمدگی و فعالیت غیر زمین‌ساختی است. تغییر کاربری از مرتع به دیم و راه‌سازی در حوزه آبخیز کرگانه در سال‌های اخیر به شدت انجام شده و نشان‌دهنده نقش مهم عوامل انسانی در زمین‌لغزش در مقایسه سایر عوامل در این حوزه آبخیزشده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مدل، ۵۰/٤ درصد از مساحت حوضه در کلاس حساسیت بسیار کم و کم، ۲۱/٦ درصد در کلاس حساسیت متوسط و ۲۸ درصد در سطح منطقه‌ای با حساسیت بالا و بسیار بالا قرار دارد. افزایش این شاخص منجر به ناهمواری بیشتر سطح و افزایش شیب می‌شود که شرایط زا برای وقوع زمین‌لغزش‌ها را مستعدتر می‌کند. اجرای برنامه‌های مدیریت زمین‌لغزش بر اساس نتایج این تحقیق در حوزه آبخیز کرگانه می‌تواند مشکلات ناپایداری دامنه را حل کند.

کلیدواژه‌ها: *بیشینه آنتروپی، خطر وقوع زمین لغزش، شاخص ROC، مدیریت زمین‌لغزش*

مقدمه

ایران ازنظر بلایای طبیعی جزء ده کشور اول دنیا بوده و هرساله وقوع خطرات مختلف در مناطق مختلف کوهستانی آن خسارات و صدمات جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد [۱۵، ۲۰]. زمین‌لغزش از بلای طبیعی است که همه ساله خسارات جانی و مالی زیادی به ایران وارد می‌سازد [۷، ۱٤]. در بین چهل و سه خطر طبیعی تهدیدکننده زندگی بشر و منابع‌طبیعی، پدیده زمین‌لغزش با وجود تفاوت‌های شدید از هم‌دیگر بدلیل وابستگی به شرایط محیطی، از جایگاه خاصی برخوردار است [۱۸]. زمین‌لغزش به طور معمول شکل زمین را به‌طور ناگهانی برهم می‌زند و خسارت‌های فراوانی به مناطق مسکونی، جاده‌ها و زمین‌های کشاورزی وارد می‌کند [۲۹]. برای پهنه‌بندی خطر نسبی ناپایداری دامنه‌ها، ده‌ها مدل عددی با عوامل، وزن، نرخ، منطق محاسباتی و مقیاس متفاوت ابداع شده و در شرایط متنوع براساس شواهد زمینی واسنجی صورت گرفته است [۱۹، ۳۸، ٤۷]. نقشه‌های خطر زمین‌لغزش ابزار مهمی برای مهندسان، دانشمندان علوم زمین، برنامه‌ریزان و مدیران به‌منظور انتخاب مکان‌های مناسب برای کشاورزی، ساخت‌وساز و سایر فعالیت‌های توسعه‌ای محسوب می‌شوند [۸، ۲٤]. در سال‌های اخیر روش‌های داده‌کاوی مانند روش‌های یادگیری ماشین شامل: شبکه عصبی مصنوعی [۱۲، ٤٥]. رگرسیون لجیستیک [۱، ۱۳، ۱۷]، ماشین بردار پشتیبان [۹، ۱۱، ۱٦، ۲٤، ۳٤] و جنگل تصادفی [۳۸، ٤۱، ٤٦] به دلیل قابلیت پردازش قوی اطلاعات و دقت بالا به‌منظور تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش مورداستفاده قرارگرفته‌اند. مدل بیشینه آنتروپی (ME) یکی دیگر از روش‌های یادگیری ماشین است که در سال‌های اخیر به‌صورت گسترده مورداستفاده قرارگرفته است. تیموری و همکاران [٤۳]، رجب‌زاده و همکاران [۳۷]، کرکس و همکاران [۲۱]، کرنژادی و همکاران [۲٦] و پاندی و همکاران [۳۱] در مطالعات خود از روش بیشینه آنتروپی در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش استفاده کردند. نتایج این مطالعات بر کارایی مدل بیشینه آنتروپی (ME) در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش تٌکید دارند.

تیموری و همکاران [٤۳] با مدل بیشینه آنتروپی در استان لرستان و با کمک ۱۱ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، اقدام به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش کردند. نتایج حاصل سطح زیر منحنی (AUC) بر اساس منحنی ROC نشان‌دهنده دقت عالی (AUC=۰/۹) در مرحله آموزش و خیلی خوب (AUC=۰/۸۳) در مرحله اعتبارسنجی مدل بوده است. رجب‌زاده و همکاران [۳۷] کارایی مدل بیشینه آنتروپی و GIS در ارزیابی حساسیت پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق در آبخیز خیاوچای در استان اردبیل را موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی احتمال وقوع زمین‌لغزش با الگوریتم بیشینه آنتروپی بسیار بهتر از دیگر مدل‌ها مانند رگرسیون لجیستیک است. کرکس و همکاران [۲۱] با استفاده از روش بیشینه آنتروپی و هفت پارامتر مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در رومانی پرداختند. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از منحنی

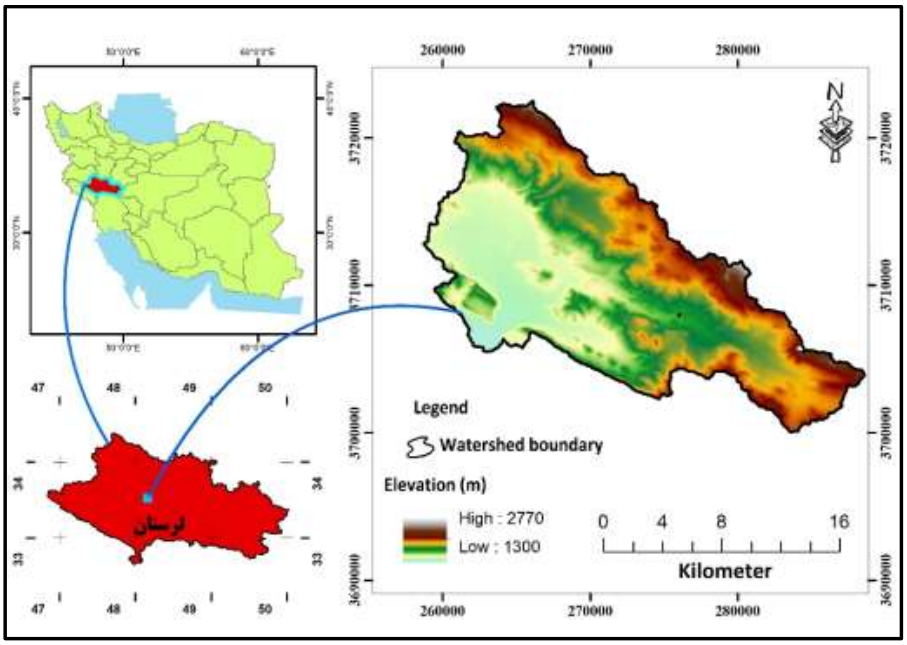
ROC نشان داد که مدل عملکرد بسیار خوبی در ارزیابی حساسیت وقوع زمین‌لغزش دارد. کرنژادی و همکاران [۲۶]، به‌منظور ارزیابی حساسیت به زمین‌لغزش در حوزه زیارت در استان گلستان از مدل بیشینه آنتروپی استفاده کردند. با تجزیه‌وتحلیل‌های انجام‌شده، نتیجه را خوب ارزیابی نمودند. پاندی و همکاران [۳۱] دو روش بیشینه آنتروپی و ماشین بردار پشتیبان را به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در هیمالیا به کار گرفتند. برای این منظور از ۱۱ پارامتر مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش استفاده کردند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که هر دو مدل کارایی خوبی در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش دارند.

در این مطالعه سعی شده که از بیشترین پارامترهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و همچنین از روش جدید الگوریتم بیشینه آنتروپی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزه آبخیز کرگانه استفاده شود. حوزه آبخیز کرگانه در شمال و شرق شهرستان خرم‌آباد واقع شده است. به دلیل استقرار روستاهای متعدد و شهر خرم‌آباد که عمده فعالیت‌های آن‌ها کشاورزی، باغداری و دامداری است، نقش مهمی در تولیدات باغی و کشاورزی و تولیدات دامی در استان لرستان دارد. شرایط توپوگرافی و فراهم‌بودن شرایط زمین‌شناسی حساس به زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه سبب شده که سطح قابل توجهی به طور بالقوه مستعد وقوع زمین‌لغزش است. از طرفی عوامل انسانی نظیر تغییر شدید کاربری اراضی و احداث متعدد و نظارت‌نشده جاده روستایی سبب تشدید شرایط مستعد موجود شده است. ازاین‌رو ضرورت شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در این حوزه آبخیز می‌تواند اثرات مثبتی بر زندگی و اقتصاد مردم منطقه داشته باشد. در همین راستا، هدف پژوهش حاضر تعیین مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه با استفاده از مجموعه‌ای از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و با کمک روش بیشینه آنتروپی، اولویت‌بندی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در این منطقه و ارزیابی عملکرد مدل بیشینه آنتروپی است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند برای برنامه‌ریزی در جهت کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش و برنامه‌های توسعه‌ای منطقه مورد استفاده مسئولان و تصمیم‌گیران قرار بگیرد.

مواد و روش‌ها

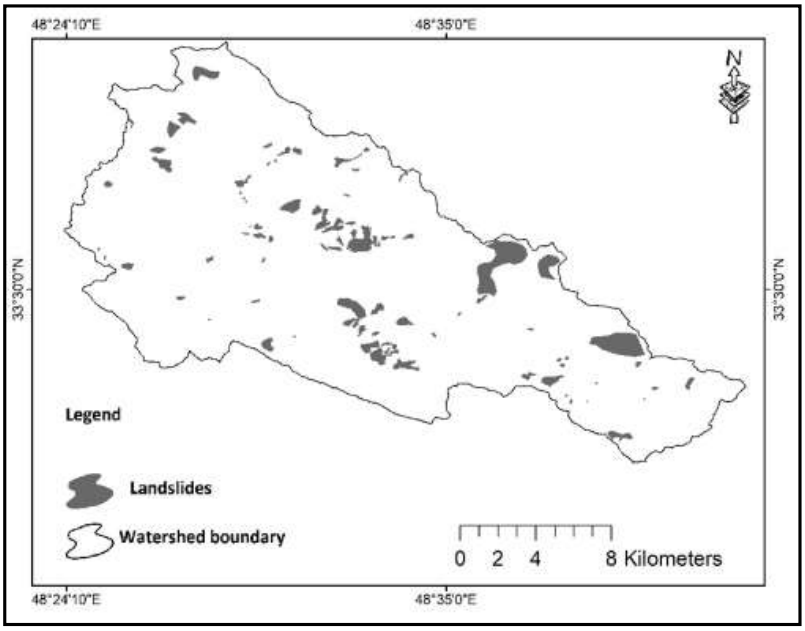
منطقه موردمطالعه

حوزه آبخیز کرگانه یکی از زیر حوزه‌های بزرگ آبخیز خرم‌آباد با مساحت ۲۹۴/۲ کیلومترمربع است. حداقل ارتفاع حوزه آبخیز کرگانه ۱۳۰۰ و حداکثر آن ۲۷۰۰ متر است و ۶۰ درصد از مساحت این آبخیز دارای شیب بیش از ۱۲ درصد (شیب نسبتاً بالا و بیشتر) است. این شرایط بیان‌کننده کوهستانی‌بودن حوزه آبخیز مورد بررسی است. حوزه آبخیز کرگانه بین طول جغرافیایی "۵۹ '۲۳ °۴۸ تا "۲۴ '۴۴ °۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی "۱۲ '۲۵ °۳۳ تا "۱۲ '۳۷ °۳۳ شمالی واقع‌شده است (شکل ۱). این حوزه آبخیز به دلیل کوهستانی بودن و شیب زیاد، سازندهای مستعد، جاده‌سازی و همچنین تغییرکاربری‌های متعدد از جنگل و مرتع به زراعت دیم از نظر وقوع زمین‌لغزش از اهمیت بالایی برخوردار است. متوسط بارندگی آن ۴۶۹ میلی‌متر است. بر اساس نقشه کاربری اراضی وضع موجود تهیه شده برای حوزه آبخیز مورد مطالعه از کل مساحت حوزه، ۴۰/۹ درصد مرتع، ۶/۲ درصد جنگل که بیشتر آن تخریب شده، ۲۶/۵ درصد زراعت دیم، ۱/۲ درصد زراعت دیم در زیر اشکوب جنگل، ۱۳/۲ درصد زراعت آبی و ۸/۳ درصد اراضی صخره‌ای است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان

Fig1. Geographical location of Karganeh Watershed, Lorestan Province



شکل ۲- نقشه پراکنش زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه

Fig 2. Landslide distribution map in the Karganeh Watershed

روش تحقیق

- تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش

یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی خطر زمین‌لغزش، شناسایی و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های موجود حوضه است. بدین منظور ابتدا با استفاده از نقشه زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه که توسط اداره کل منابع طبیعی استان لرستان که با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه‌شده بود، استخراج شد. سپس از طریق انجام بازدید میدانی در حوضه و همچنین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth این نقشه اصلاح و به‌روز شد و درنهایت نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تهیه شد. درنهایت ۹۵ مورد زمین‌لغزش در حوضه موردمطالعه شناسایی شد که سطحی حدود ۱۴۸۳/۲۴ هکتار از حوضه را دربرگرفته‌اند (شکل ۲). جهت مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش از ۷۰ درصد نقاط لغزشی برای آموزش مدل و ۳۰ داده‌های لغزشی به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

- تهیه لایه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

برای تعیین رابطه بین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در آبخیز کرگانه و تعیین مؤثرترین عوامل در قالب مؤلفه‌های اصلی از آزمون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، Tolerance و VIF در نرم‌افزار SPSSنسخه ۲۰ استفاده شد. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، بیشترین ارزش ویژه متعلق به مؤلفه نخست (PC1) است و به‌تدریج با افزایش رده مؤلفه‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. برای به کارگیری این آزمون باید با استفاده از ضریب KMO[1] اقدام به تعیین مناسب بودن داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی شود. مقدار این آزمون همواره بین صفر و یک متغیر است. اگر مقدار این ضریب کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب نیستند و اگر مقدار این ضریب بین ۰/۵ تا ۰/۶۹ باشد، با قطعیت بالاتر به تجزیه مؤلفه‌های اصلی پرداخت. در صورتی که ضریب بیشتر از ۰/۷ باشد، تجزیه مؤلفه‌های اصلی در کاهش داده‌ها مؤثر خواهد بود. در این روش هر مؤلفه مستقل از مؤلفه‌های دیگر است. هر مؤلفه ترکیب خطی از متغیرها است که می‌توان رابطه آن را به صورت معادله زیر نمایش داد [۱۰].

$$PC1=a11X1+ a12X2+\ldots+ aijXj \quad (۱)$$

که در آن PC مؤلفه اصلی، aij صریب یا بردار ویژه و XJ متغیر مورد نظر است. به منظور انتخاب تعداد مؤلفه‌های مؤثر، مؤلفه‌هایی انتخاب شدند که عدد ارزش ویژه[2] آن‌ها از یک بالاتر بود. برای تفسیر ویژگی‌های مؤثر در یک مؤلفه که بیشترین تغییرات را کنترل می‌کند از شاخص انتخاب [3] استفاده شد [۱۰].

$$SC = \frac{0.5}{(PCeigenvalue)^{0.5}} \quad (۲)$$

که در آن، SC شاخص انتخاب، PC مؤلفه اصلی و Eigenvalue همان ارزش ویژه است. از آنجایی که تمامی متغیرهای مورد بررسی یکسان نبوده‌اند، برای محاسبه مؤلفه‌های اصلی از ماتریس همبستگی استفاده شد. Tolerance و VIF از شاخص‌های بسیار پرکاربرد در بررسی هم‌خطی بین عوامل هستند. مقادیر Tolerance کمتر از ۰/۱ و مقادیر VIF بزرگتر از ۱۰ بیانگر هم‌خطی بین عوامل است [۱۰]. وجود هم‌خطی بین عوامل باعث کاهش دقت نقشه حساسیت زمین‌لغزش می‌شود [۳]. براساس نتایج بدست آمده شاخص PCA،

1. Kaiser-Meyer-Olkinmeasure of Sampling

2. Eigenvalue

3. Selection Criteria

ضریب KMO مقدار ۰/۶۱ محاسبه شد که این مقدار همبستگی لازم بین متغیرهای ورودی برای انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی را تأیید می‌کند. از بین ۱۹ مؤلفه به تعداد متغیرهای مورد بررسی در ارزیابی خطر زمین لغزش با نظر گرفتن ارزش ویژه بالاتر از یک، تعداد دو مؤلفه اصلی اول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، این دو مؤلفه اصلی نزدیک به ۶۷ درصد تغییرات را بیان می‌کنند. در این مطالعه به منظور تعیین متغیرهای مؤثر در هر مؤلفه از شاخص معیار انتخاب (SC) استفاده شد. معیار انتخاب برای مؤلفه اول ۰/۱۷ و برای مولفه دوم ۰/۲۱۱ محاسبه شد. رابطه ۳ عوامل موثر با بیشترین همبستگی را نشان می‌دهد.

(۳)

PC1=0.322DEM+0.421LS-0.391River+0.597Slope-0.557Geo+0.601 TPI-0.468Fault-0.263Road+0.306 SPI-0.289Aspect+0.66Landuse+0.474Rainfall

PC2=0.249 TWI-0.501Village +0.183Soil +0.065NDVI +0.362 VRM+0.159Curvature +238 TRI

نتایج حاصل از تست هم‌خطی با استفاده از شاخص‌های Tolerance و VIF در جدول ۲ بیان شده است. با توجه به نتایج بررسی عوامل مؤثر با شاخص‌های مورد ذکر، عوامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، شبکه زهکشی (فاصله از رودخانه)، جاده (فاصله از جاده)، گسل (فاصله از گسل)، شاخص‌های توپوگرافیک (شاخص توان رودخانه (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص طول شیب (LS))، شاخص‌های ژئومورفولوژیک (شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) و شاخص قدرت بردار یا اندازه‌گیری زبری سطح (VRM) کاربری اراضی، فاصله از روستا و خطوط هم بارش به عنوان مؤثرترین عوامل وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه شناخته شدند (شکل ۳).

نقشه کاربری منطقه موردمطالعه با استفاده از نقشه کاربری اراضی استان لرستان که از اداره کل منابع طبیعی لرستان تهیه شد، استخراج شد. از طریق بازدید میدانی و بخصوص از طریق تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، اصلاح شد. لایه‌های شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر و نرم‌افزار Arc GIS 10.8 تهیه شد. برای تهیه لایه‌های زمین‌شناسی و گسل‌های منطقه موردمطالعه بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. از تابع فاصله اقلیدسی برای تهیه و آماده‌سازی فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.8، استفاده شد. نقشه بارش نیز با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی که داخل و نزدیک به منطقه موردمطالعه واقع شدند، استخراج شد. شاخص NDVI با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۹ و در فصل رشد در محیط Google Earth engine، تهیه شد. نقشه جاده‌های منطقه مورد با استفاده از نقشه جاده‌های استان که از اداره منابع طبیعی استان لرستان تهیه شد، استخراج و از طریق بازدیدهای میدانی و تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، اصلاح شد. شاخص توان آبراهه (SPI) از رابطه چهار و با توجه به دستور Raster calculator در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.8 محاسبه می‌شود [٤].

SPI=Astanβ (٤)

در این رابطه AS: مساحت حوزه و Tanβ: مقدار شیب منطقه در هر پیکسل هست. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) از رابطه ٤ در محیط نرم‌افزار SAGA GIS، تهیه شد.

TWI= Ln α/tanβ (۵)

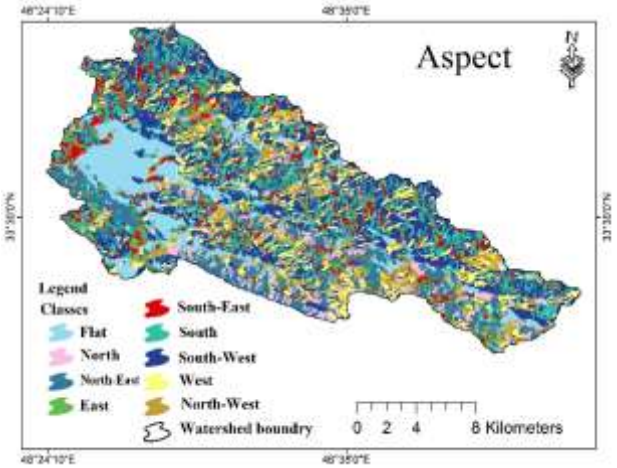
در این رابطه α: زهکش شیب بالاست در واحد طول و β: شیب منطقه‌ای است. شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) طبق رابطه ٦ به دست می‌آید:

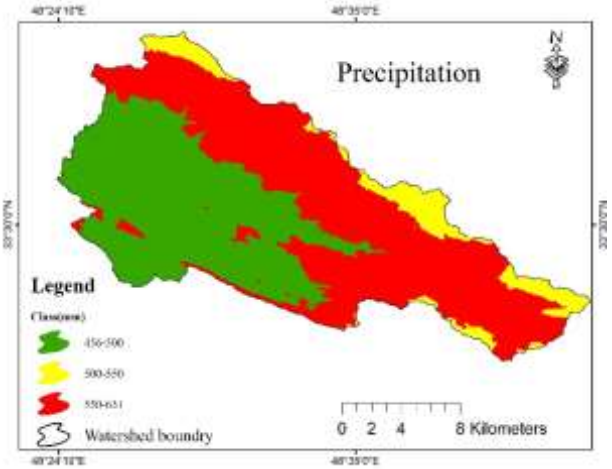
TPI= Z0-∑n-1Zn/n (٦)

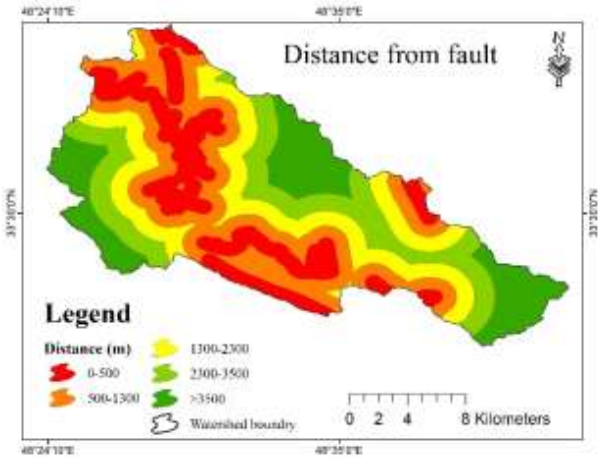
که Z0= ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Zn= ارتفاع از شبکه و n= تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته‌شده در ارزیابی. شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) نیز از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

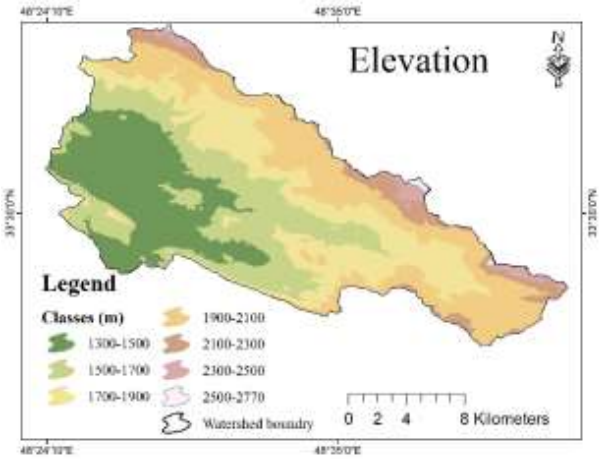
TRI=√∑8p=1ZMd (۷)

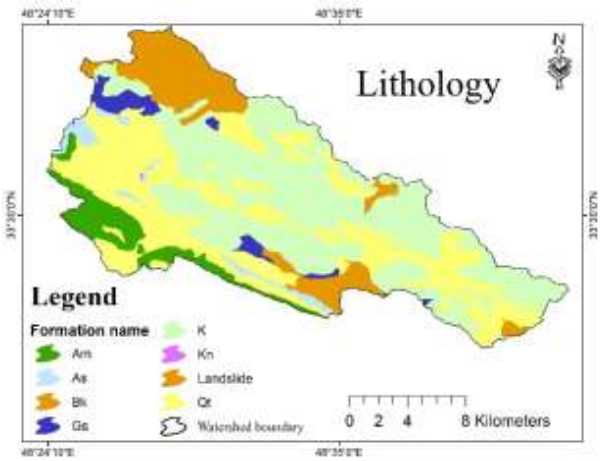
P=تعداد پیکسل اطراف، ZMd= میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هرپیکسل.

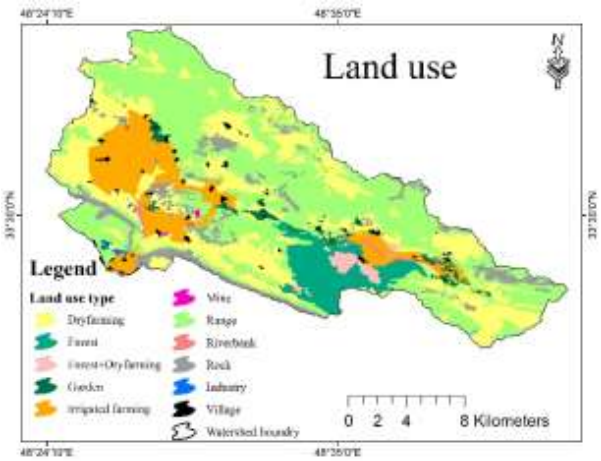


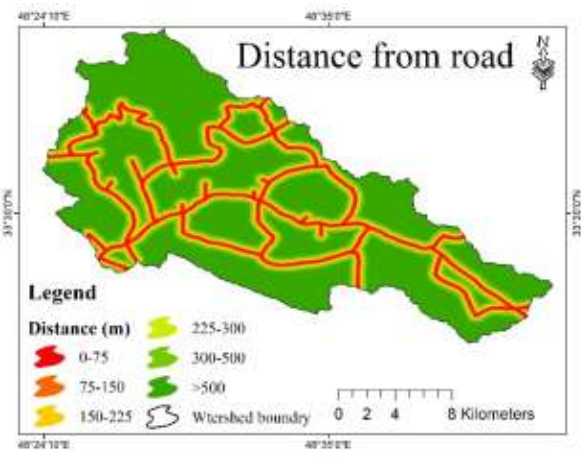


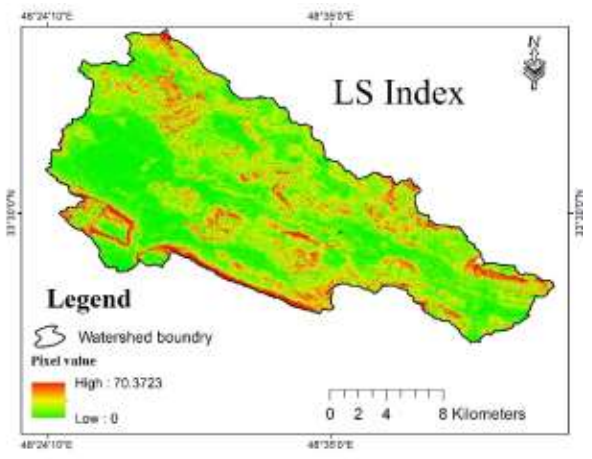


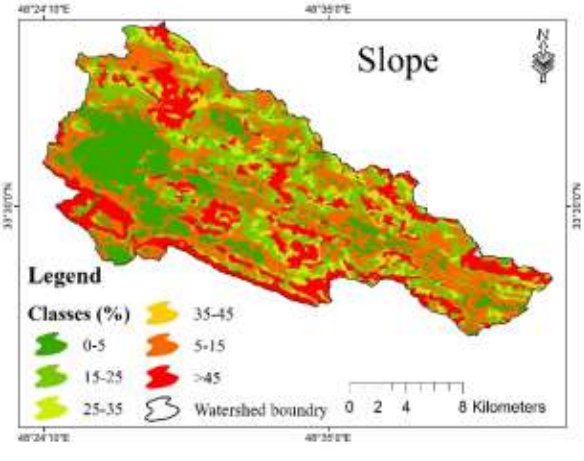


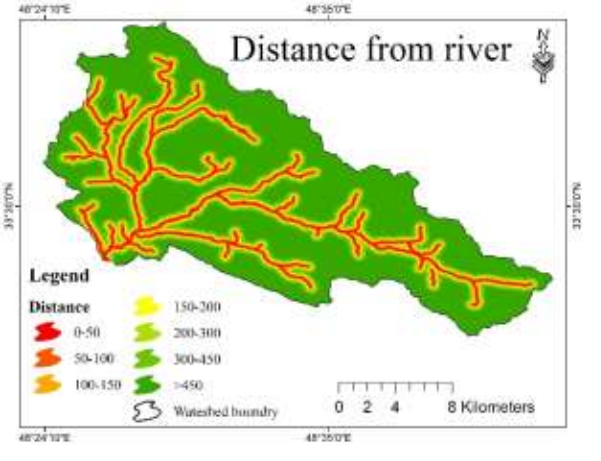


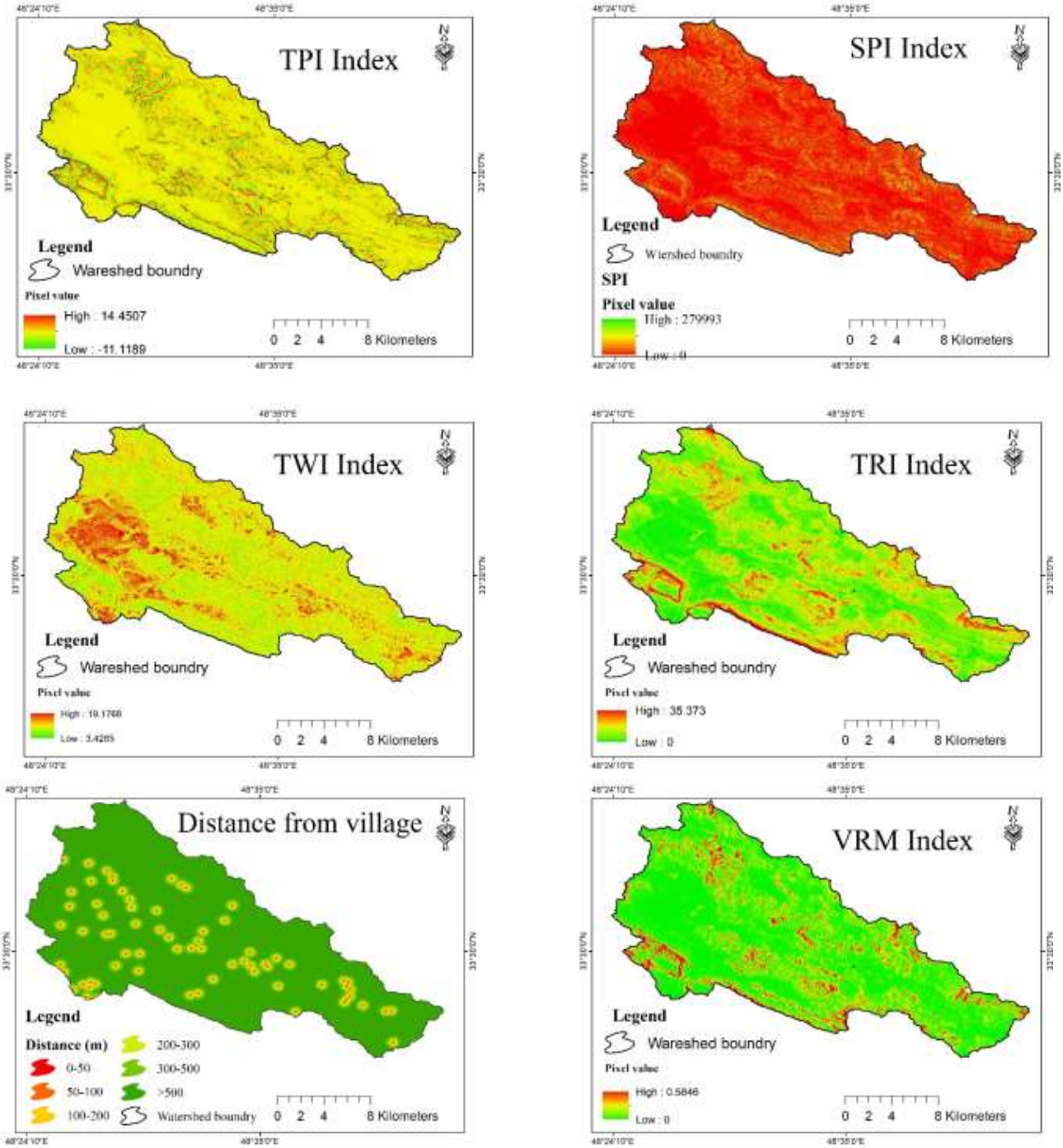












شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه.

Fig 3. Map of landslide conditioning factors in Karganeh Watershed**.**

جدول ۱- تست هم‌خطی بین عوامل مؤثر در زمین‌لغزش

Table 1. Collinearity test between effective factors in landslides.

عوامل	Factors	Tolerance	VIF	عوامل	Factors	Tolerance	VIF
شیب	Slope	0.62	1.6	موقعیت توپوگرافی	Topographic Position Index (TPI)	0.8	1.06
جهت	Aspect	0.58	1.8	ناهمواری توپوگرافی	Topographic Roughness Index (TRI)	0.73	1.53
ارتفاع	Elevation	0.54	2.3	اندازه‌گیری زبری سطح	Vector Roughness Measure (VRM)	0.32	2.6
زمین شناسی	Geology	0.67	2.3	بافت خاک	Soil texture	0.012	13.1
فاصله از رودخانه	Distance from river	0.78	1.02	فاصله از روستا،	Distance from village	0.82	1.61
فاصله از راه	Distance from road	0.39	3.1	شاخص NDVI	NDVI index	0.035	16.1
فاصله از گسل	Distance from fault	0.26	3.9	انحنای سطح	Curvature Index	0.063	18.4
توان رودخانه	River Power Index (SPI)	0.44	2.7	کاربری اراضی	Landuse	0.29	4.1
رطوبت توپوگرافی	Topographic Wetness Index (TWI)	0.51	3.5	میزان بارش	Precipitation	0.48	2.1
طول شیب	slope length (LS)	0.26	2.5				

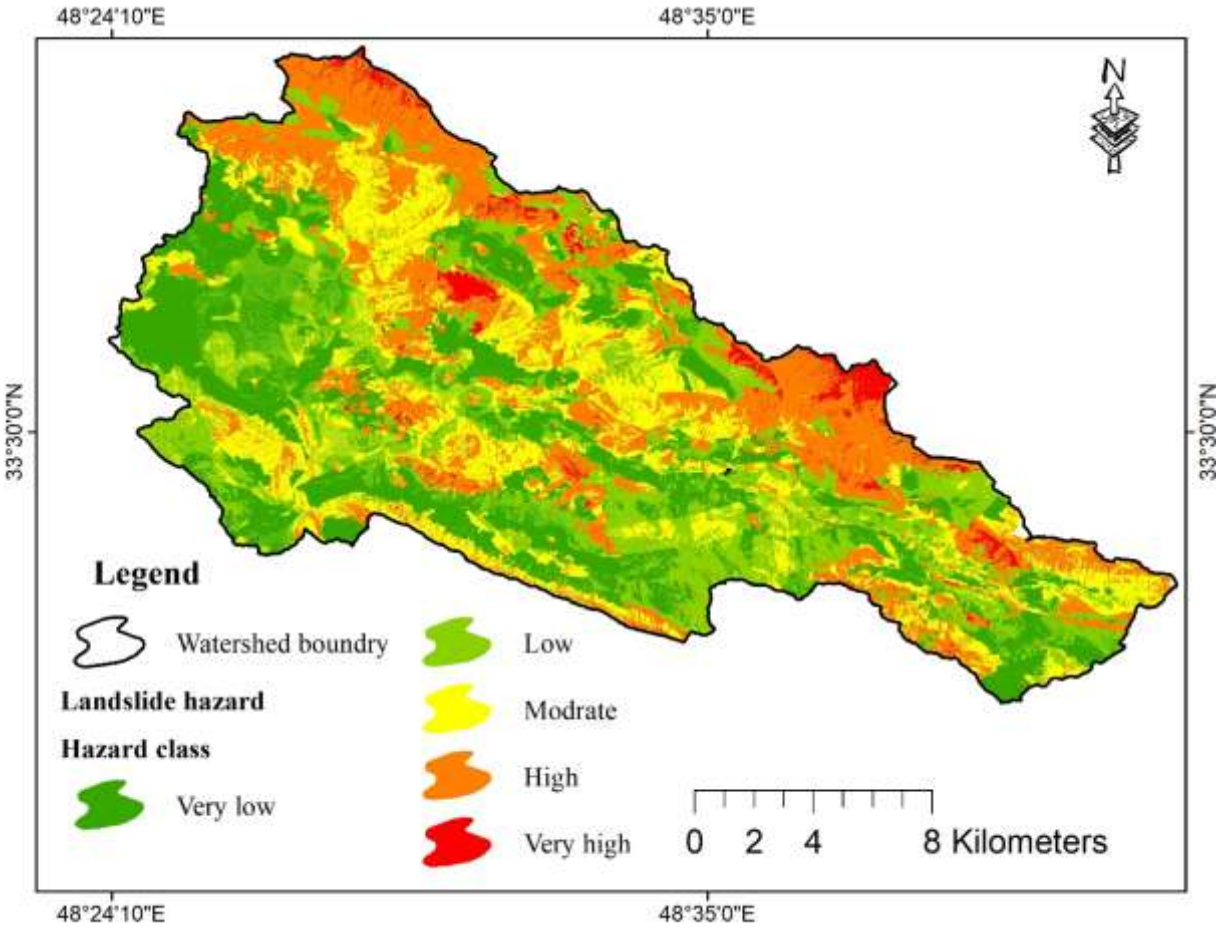
جدول ۲- توزیع فراوانی کلاس‌های خطر زمین‌لغزش با مدل بیشینه آنتروپی آبخیز کرگانه.

Table 2. Frequency distribution of landslide hazard classes with maximum entropy model of Karganeh Watershed.

کلاس خطر	کلاس ارزش	نوع خطر	مساحت کلاس (هکتار)	درصد مساحت
Hazard class	Value class	Hazard type	Class area (ha)	Area percentage
1	0-0.2	Very low	7709.38	26.2
2	0.2-0.4	Low	7134.48	24.2
3	0.4-0.6	Modrate	6347.89	21.6
4	0.6-0.8	High	7342.38	25
5	0.8-1	Very high	882.13	3
	Total		29416.24	100

- پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با مدل بیشینه آنتروپی (ME)

روش بیشینه آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف محیطی دارد [۳۲]. مدل بیشینه آنتروپی از ابتدا سعی در یافتن روابط متغیرهای مستقل و وابسته دارد تا بر اساس آن پیش‌بینی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد. برای استفاده از این مدل برای پیش‌بینی رفتار یک‌گونه یا پدیده نیاز به نقاط عدم حضور آن گونه یا پدیده نیست؛ بلکه از یک سری عوامل تأثیرگذار (عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش) و همچنین نقاط حضور آن پدیده (نقاط لغزشی برای مدل‌سازی) استفاده می‌کند. در این تحقیق به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش از مدل بیشینه آنتروپی در نرم‌افزار MaxEnt استفاده شد. به‌منظور استفاده از این مدل ابتدا متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش) و متغیرهای وابسته (نقاط وقوع زمین‌لغزش) در محیط نرم افزار Arc GIS نقشه‌بندی شدند. در مرحله بعد نقشه متغیرهای مستقل براساس ارزش عددی به فرمت رستر تبدیل شدند و نقشه نقاط وقوع و عدم وقوع زمین لغزش در فایل اکسل خروجی گرفته شدند. در مرحله بعد نقشه متغیرهای مستقل به فرمت ASCII تبدیل و وارد محیط نرم‌افزار MaxENT شد و در این نرم‌افزار پس از معرفی داده‌های ورودی، مدل اجرا و نقشه شدت خطر زمین لغزش استخراج شد. این مدل بر اساس اصل



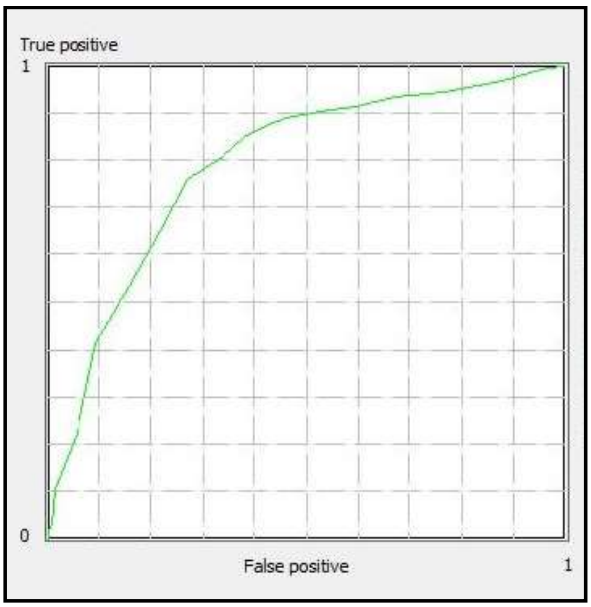
شکل ٤- نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش با مدل بیشینه آنتروپی حوزه آبخیز کرگانه

Fig 4. Landslide hazard map with maximum entropy model of Karganeh watershed

آنتروپی، شبکه ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته را تشکیل می‌دهد. درنهایت نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش بر اساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در پنج کلاس استعداد (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) پهنه‌بندی شد [۲۷]. از شاخص کاپا و روش حداکثر احتمال[1] محیط نرم‌افزار MaxENT، برای انتخاب مؤثرترین عوامل بر وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه استفاده شد.

- ارزیابی کارایی مدل

کارایی مدل‌های ارزیابی خطر زمین‌لغزش را می‌توان با شاخص ROC (مشخصه عملکرد نسبی) ارزیابی نمود. این شاخص از روی منحنی ROC محاسبه می‌شود. با تعیین یک حد آستانه (مثلاً ۰/۵) می‌توان خروجی مدل را به مقیاس گسسته صفر یا یک (تغییر یا عدم تغییر) تبدیل نمود. یعنی پیکسل‌هایی که احتمال تغییر در آن‌ها از حدآستانه بیشتر است، عدد یک و پیکسل‌هایی که در آن‌ها احتمال تغییر کمتر از حد آستانه است عدد صفر می‌گیرند و خروجی به صورت یک نقشه ارائه می‌شود. با مقایسه این نقشه با نقشه واقعی، نسبت پیکسل‌هایی که درست پیش‌بینی شده‌اند و آن‌هایی که غلط



شکل ٥- منحنی ROC و مقدار AUC محاسبه‌شده برای اعتبارسنجی مدل بیشینه آنتروپی

Fig 5. ROC curve and AUC value calculated to validation of the maximum entropy model

1. Maximum likelihood

پیش‌بینی شده‌اند مشخص می‌شود که می‌توان آن را در نمودار ROC به صورت یک نقطه نشان داد. با تغییر حد آستانه نقاط دیگری مشخص می‌شوند و با اتصال این نقاط، منحنی ROC ترسیم می‌شود. شاخص ROC برابر با سطح زیر این منحنی است [۱۸].

نتایج

نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

شکل ۲ نقشه پراکنش زمین‌لغزش حوضه با ۹۵ مورد ثبتی را نشان می‌دهد.

- شدت خطر زمین‌لغزش حوضه با مدل بیشینه آنتروپی (ME)

پس از تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی، نقشه حاصله با استفاده از کلاس‌بندی به صورت مساوی به پنج کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ٤ و جدول ۲).

- ارزیابی کارایی مدل با استفاده از شاخص ROC

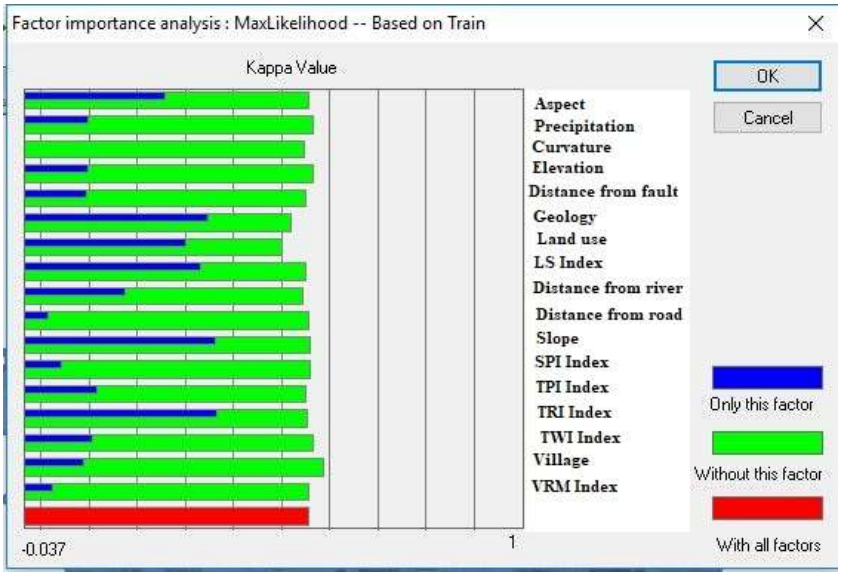
پس از تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی، کارایی مدل ارزیابی شد. همان‌طور که درروش کار نیز اشاره شد، مقدارAUROC به‌منظور ارزیابی نتایج مدل استفاده شد (شکل ۵). در این تحقیق ۷۰ درصد نقاط زمین‌لغزش برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد باقیمانده به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد. بر این اساس این شاخص، میزان مساحت سطح زیر نمودار شاخص ROC برای اعتبارسنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸٤۷ به دست آمد.

- تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش

بعد از انتخاب بهترین مدل از خروجی‌های این مدل به‌عنوان مدل پایه برای تعیین مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه استفاده شد که در شکل (٦) ارائه شده است. نتایج حاصل از نمودار شاخص کاپا جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها را در پیش‌بینی مدل بیشینه آنتروپی نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، شاخص‌های زمین‌شناسی، کاربری اراضی، شیب، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)، طول شیب و جهت شیب مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار هستند

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش بر اساس روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت مناسبی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشین مانند روش بیشینه آنتروپی امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. از این رو در این تحقیق از این روش به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه استفاده شد. در این مطالعه سعی شد تا تعداد گسترده‌ای از عوامل به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش استفاده شود. این عوامل حاصل نظرات کارشناسی و انجام مروری بر منابع در زمینه مدل‌های مختلف هست. بر اساس نتایج مدل حساسیت برتر، عوامل طول شیب (LS)، شیب و شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)مؤثرترین عوامل در وقوع زمین‌لغزش در آبخیز موردمطالعه هستند. شیب یکی از پارامترهای تأثیرگذار در ناپایداری‌های دامنه‌ای محسوب می‌شود. به‌طورکلی میزان شیب نقش مهمی را در عواملی همچون نفوذ آب در دامنه‌ها، زاویه شکست و چسبندگی خاک می‌گذارد [۱۷]. بسیاری از تحقیقات بر روی نقش مستقیم شیب و تأثیر آن بر روی زمین‌لغزش‌ها تأکید داشته‌اند [۳۵]. همچنین هانگ



شکل ٦- نتایج حاصل از نمودار شاخص کاپا جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار

Fig 6. The results of the Kappa index diagram to determine the most important influencing parameters

و همکاران [۱۶] در مطالعات خود به نقش مؤثر شیب در وقوع زمین‌لغزش تأکید دارند. در عامل شیب، با افزایش شیب حساسیت زمین‌لغزش افزایش‌یافته است که نماینده افزایش نیروی گرانش در شیب‌های بالا هست. لذا عامل شیب نسبت به ارتفاع یک عامل بهتر و کامل‌تر (به لحاظ اطلاعات گرانشی موجود) برای مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش معرفی می‌شود.

شاخص طول شیب (LS) یا حمل رسوب (STI) بیانگر توان حمل آبراهه است. درواقع تأثیر توپوگرافی را بر فرسایش مشخص می‌کند. درواقع هر چه طول شیب بیشتر باشد توان حمل رسوب بالاتری دارد. درنتیجه شرایط فرسایش کناری بیشتر شده و زمین‌لغزش‌های کناری بیشتر می‌شود. در ارتباط با شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)و ارتباط این شاخص با وقوع زمین‌لغزش می‌توان گفت که ازآنجایی‌که میزان بالای این شاخص نشان‌دهنده بالاآمدگی و فعالیت نئوتکتونیک است درنتیجه ناهمواری، به‌هم‌ریختگی و زبری سطوح و افزایش شیب بیشتری رخ می‌دهد، که باعث مساعد شدن شرایط وقوع زمین‌لغزش می‌شود. ترکیب نتایج این تحقیق نشان داد که عوامل محیطی و انسانی در ترکیب با هم سبب شده‌اند که احتمال وقوع رخداد زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه بالا باشد. با استفاده از شاخص‌های PCA، Tolerance و VIF به انتخاب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمین لغزش اقدام شد. این مطالعه می‌تواند الگویی برای تمامی تحقیقات در این زمینه باشد.

شرایط طبیعی حوزه آبخیز کرگانه مانند زمین‌شناسی، شرایط ناهمواری‌ها، ژئومورفولوژی و تکتونیک و همچنین عوامل تشدیدکننده انسانی مانند تغییر کاربری و راه‌های روستایی بستر مناسبی را برای وقوع زمین‌لغزش به وجود آورده که در مجموع ۹۵ مورد در منطقه موردمطالعه شناسایی شد.. بررسی نتایج مدل بیشینه آنتروپی نشان داد که تمام پارامترها اعم از عوامل محیطی و عوامل انسانی به شکل هم‌افزایی در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه آبخیز کرگانه تأثیرگذار هستند. این روش جز روش‌های کمی تعیین حساسیت هست و از مدل‌هایی هست که در دهه اخیر موردتوجه زیادی قرارگرفته و توسط محققان در نقاط مختلف دنیا مورداستفاده قرارگرفته است. کوه‌پیما [۲۳] و کرنژادی [۲۷] در ایران، کانورتینو و همکاران [۵] در ایتالیا و کیم و همکاران [۲۲] در کره جنوبی در مطالعات خود از روش بیشینه آنتروپی استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مدل ۵۰/٤ درصد مساحت سطح حوضه در کلاس حساسیت خیلی کم و کم، ۲۱/٦ درصد در کلاس حساسیت متوسط و ۲۸ درصد از سطح منطقه داری حساسیت زیاد و خیلی زیاد، قرارگرفته است.

تجزیه‌وتحلیل فاکتور توزیع، نشان داد که عوامل زمین شناسی، کاربری اراضی، شیب، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)، طول شیب و جهت شیب بیشترین مشارکت و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه آبخیز کرگانه داشته‌اند. همچنین میزان مساحت سطح زیر نمودار شاخص ROC در مرحله اعتبارسنجی ۰/۷۸٤ به دست آمد، حاکی از قابلیت خیلی خوب مدل در پهنه‌بندی و تعیین مناطق مستعد خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه است. می‌توان گفت که مدل بیشینه آنتروپی به دلیل توانایی نامحدود الگوریتم بیشینه آنتروپی در سنجش روابط پیچیده خطی و غیره خطی، سرعت و دقت بالایی در تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش دارد که با توجه به کمبود منابع مالی و امکانات و همچنین زمان‌بر بودن شناسایی مناطق دارای حساسیت، استفاده از این مدل می‌تواند به‌عنوان راهکاری در نظر گرفته شود. محققان دیگر ازجمله تیموری و همکاران [٤۳]، رجب‌زاده و همکاران [۳۷]، کرنژادی و همکاران [۲۵]، پاندی و همکاران [۳۱] و پارک [۳۲] نیز در مطالعات خود به توانایی بالای این مدل در پیش‌بینی حساسیت وقوع زمین‌لغزش تأکید کردند. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که مدل بیشینه آنتروپی، یک رویکرد امیدوارکننده برای مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه است. چون‌که نقشه‌ای که صحت بالا و معقول در شناسایی و تفکیک مناطق با خطر بالای وقوع زمین‌لغزش دارد، به تصمیم گیران و مهندسین جهت معرفی مناطق با خطر مختلف وقوع زمین‌لغزش به‌منظور احداث مکان مناسب برای جلوگیری از تخریب سازه‌های رسوب‌گیر، مدیریت دامنه‌ها، زهکشی و انتقال آب از مناطق حساس و نزدیک به اجرای سازه، توسعه شبکه جاده‌ای و برنامه‌های آمایش سرزمین کمک شایانی می‌نماید.

سپاسگزاری

این مقاله در قالب طرح پژوهشی با شماره مصوب ۲-۵۹-۲۹-۰۳۱-۰۰۰٤۸۹، با همکاری و هزینه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع‌طبیعی استان لرستان انجام شده است. مؤلفین برخود لازم می‌دانند تا از همکاری این مراکز در کلیه مراحل اجرای طرح صمیمانه سپاسگزاری نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت‌نویسندگان

ابراهیم کریمی‌سنگچینی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله

علی دسترنج: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

سیدحسین آرامی: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

صمد شادفر: راهنمایی، نظارت

ایرج ویسکرمی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی

منابع مورد استفاده

1. Abedini, M. Ghasemyan, B. and Rezaei Mogaddam, M. H. 2017. Landslide susceptibility mapping in Bijar city, Kurdistan Province, Iran: a comparative study by logistic regression and AHP models. Environmental Earth Sciences, 76(8): 1-14.

2. Afifi, M. 2021. Spatial analysis of landslide risk with emphasis on geomorphological factors using stochastic forest model (Case study: Larestan city in Fars province). Journal of Physical Geography, 14(51): 39-53. (In Persian).

3. Arab Ameri, A. R. Rezaei, K. Yamani, M and Shirani, K. 2018. Landslide spatial modeling: performance assessment of integrated model of data driven EBF model and knowledge driven AHP model (Case study: ferydoun shahr watershed). Journal of Water and Soil Conservation, 25(5): 47-67. (In Persian).

4. Azimpour Moghadam, V. 2014. Landslide risk zoning using Bayesian and Dempster-Schiffer theory (case study: a part of Babelrud watershed). Master's thesis. Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources. University of Sari, (In Persian).

5. Convertino, M. Troccoli, A and Catani F. 2013. Detecting fingerprints of landslide drivers: a MaxEnt model. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 118(3): 1367-1386.

6. Emadodin, S. Taheri, V. Ghasemi, M and Nazari, Z. 2021. Landslide Susceptibility Zonation applying frequency ratio models and statistical index in in Oghan watershed, quantitative geomorphological researches, 9(4): 75-95. (In Persian).

7. Emami, S. N. Karimi Sangchini, E. Shariat Jafari, M. Rezazadeh, F and Raeisi, H.A. 2015. Selection of the best statistical model for hazard zonation and assessment of landslide risk (Case study: Doab Samsami Watershed). Watershed Management Research Journal, 28(4): 62-73. (In Persian).

8. Ercanoglu, M and Gokceoglu, C. 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. Environmental geology, 41(6): 720-730.

9. Esfandiary Darabad, F. Rahimi, M. Navidfar, A and Mehrvarz, A. 2020. Assessment of landslide sensitivity by neural network method and Vector machine algorithm (Case study: Heyran Road -Ardebil province), quantitative geomorphological researches, 9(3): 18-33. (In Persian).

10. Ghiasi, S. S. Rajabzadeh, F. Najirda, S. Feiznia, S and Nazari Samani, A. 2017. A determination of effective factors on shallow landslide occurrence in Khiov-Chai watershed. Watershed Engineering and Management, 9(2): 140-154. (In Persian).

11. Gholami, M. Ghanavati, E and Ahmadabadi, A. 2019. Landslide susceptibility mapping of Kan using index of Entropy and LSM, quantitative geomorphological researches, 8(1): 16-33. (In Persian).

12. Harmouzi, H. Nefeslioglu, H. A. Rouai, M. Sezer, E. A. Dekayir, A and Gokceoglu, C. 2019. Landslide susceptibility mapping of the Mediterranean coastal zone of Morocco between Oued Laou and El Jebha using artificial neural networks (ANN). Arabian Journal of Geosciences, 12(22), 1-18.

13. Hemasinghe, H. Rangali, R. S. Deshapriya, N. L and Samarakoon, L. 2018. Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla District, Sri Lanka). Procedia engineering, 212: 1046-1053.

14.. Heydari, N. Habibnejad, M. Kavian, A and Pourghasemi, H. 2020. Landslide Susceptibility Modelling Using the Random Forest Machine Learning Algorithm in the Watershed of Rais-Ali Delvari Reservoir, Whatershed Management Research, 33(126): 2-13. (In Persian).

15. Hijazi, A and Ranjbarian Shadbad, M. 2013. Identification of effective factors and zoning of landslide risk in the western part of Serand Chai watershed, Quantitative Geomorphology Researches, 313): 114-129. (In Persian).

16. Hong, H. Pradhan, B. Xu, C and Bui, D. 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.

17. Karimi Sangchini, E. Arami, S. Rezaii Moghadam, H. Khodabakhshi, Z and Jafari, R. 2014. Landslide Risk Assessment for Baba Heydar Watershed, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. Iranian journal of earth sciences, 6(2): 121-132.

18. Karimi Sangchini, E. Emami, S. Tahmasebipour, N. Pourghasemi, H. Naghibi, S.A. Arami, S and Pradhan, B. 2016. Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharmahal-e-Bakhtiari Province, Iran.. arabian journal of geosciences, 9 (201): 1-15.

19. Karimi Sangchini, E. Ownegh, M and Saddodin, A. 2012. Comparing applicability of 4 quantitative and semi-quantitative models in landslide hazard zonation in Chehel-Chay watershed, Golestan province, Water and Soil Conservation, 19(1): 183-194. (In Persian).

20. Karimi Sangchini, E. Salehpour Jam, A and Mosaffaie, J. 2022. Flood risk management in Khorramabad watershed using the DPSIR framework. Natural Hazards, 122 (1): 3101-3121.

21. Kerekes, A. Poszet, S and Andrea, G. Á. L. (2018). Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj–Napoca Municipality, Romania. Revista de Geomorfologie, 20(1): 130-146.

22. Kim, H. G. Lee, D. K. Park, C. Kil, S. Son, Y and Park, J. H. 2015. Evaluating landslide hazards using RCP 4.5 and 8.5 scenarios. Environmental earth sciences, 73(3): 1385-1400.

23. Koohpayma, A. 2016. Susceptibility Zoning, Landslide Risk Assessment and Management (Case Study: Lethyan Watershed). Ph.D. Thesis. Tehran University, Agriculture and Natural Resources Campus, Faculty of Natural Resources. Tehran Iran. (In Persian).

24. Kornejady, A. Ownegh, M. Pourghasemi, H. Bahremand, A and Motamedi, M. 2020. Landslide susceptibility prediction using the coupled Mahalanobis distance and machine learning models (case study: Owghan watershed, Golestan province), Journal of Earth Science Researches, 11(42): 1-18. (In Persian).

25. Kornejady, A and Pourghasemi, H. 2019. Landslide Susceptibility Assessment Using Data Mining Models, A case study: Chehel-Chai Basin, Journal of Watershed Engineering and Management, 11(1): 28-42. (In Persian).

26. Kornejady, A. Pourghasemi, H. R and Afzali, S. F. 2019. Presentation of RFFR new ensemble model for landslide susceptibility assessment in Iran. In Landslides: theory, practice and modelling (pp. 123-143).

27. Kornejady, A. 2017. Assessing potential, danger, risk and preparation of landslide strategic management plan for Oghan watershed, Golestan province, Iran. Ph.D. Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Pasture and Watershed Management. Gorgan, Iran. (In Persian).

28. Lee, S. Hong, S. M and Jung, H. S. 2017. A support vector machine for landslide susceptibility mapping in Gangwon Province, Korea. Sustainability, 9(1), 48.

29. Mohammadnia, M and Fallah, G.H. 2018. Landslides susceptibility mapping using fuzzy logic and AHP, Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 18(48): 115-130. (In Persian).

30. Mohammady, M and Pourghasemi, H. 2017. Prioritization of Landslide-Conditioning Factors and its Landslide Susceptibility Mapping using Random Forest New Algorithm (Case Study: A Part of Golestan province), Journal of Watershed Management Research, 8(15): 161-170. (In Persian).

31. Pandey, V. K. Pourghasemi, H. R and Sharma, M. C. 2020. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. Geocarto International, 35(2): 168-187.

32. Park, N. W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. Environmental Earth Sciences, 73(3): 937-949.

33. Peng, L. Niu, R. Huang, B. Wu, X. Zhao, Y and Ye, R. 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.

34. Pham, B. T. Pradhan, B. Bui, D. T. Prakash, I and Dholakia, M. B. 2016. A comparative study of different machine learning methods for landslide susceptibility assessment: A case study of Uttarakhand area (India). Environmental Modelling & Software, 84: 240-250.

35. Pourghasemi, H. R and Rahmati, O. 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? Catena, 162: 177-192.

36. Rahmati, O. Kornejady, A. Samadi, M. Nobre, A. D and Melesse, A. M. 2018. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. Environmental modelling & software, 102: 1-12.

37. Rajabzadeh, F. ghiasi, S and Rahmati, O. 2019. The performance of the maximum entropy algorithm and geographic information system in shallow landslide susceptibility assessment, Journal of Water and Soil Resources Conservation, 8(2): 57-74. (In Persian).

38. Sevgen, E. Kocaman, S. Nefeslioglu, H. A and Gokceoglu, C. 2019. A novel performance assessment approach using photogrammetric techniques for landslide susceptibility mapping with logistic regression, ANN and random forest. Sensors, 19(18): 3940.

39. Shano, L. Raghuvanshi, T. K and Meten, M. 2021. Landslide Hazard Zonation using Logistic Regression Model: The Case of Shafe and Baso Catchments, Gamo Highland, Southern Ethiopia. Geotechnical and Geological Engineering, 1-19.

40. Shirani, K. and Naderi Samani, R. 2022. Determination of Effective factors and Assessment of Landslide Susceptibility Using Random Forest and Artificial Neural Network in Doab Samsami Region, Chaharmahal va Bakhtiari Province, Whatershed Management Research, 35(134): 40-60. (In Persian).

41. Sun, D. Xu, J. Wen, H and Wang, D. 2021. Assessment of landslide susceptibility mapping based on Bayesian hyperparameter optimization: A comparison between logistic regression and random forest. Engineering Geology, 281: 105972.

42. Talebi, T. Goudarzi, S and Pourghsemi, H. 2018. Investigation

of the possibility of landslide hazard mapping using the Random Forest algorithm (Case study: Sardarabad Watershed, Lorestan Province), Journal of Natural environment hazards, 7(16): 45-64. (In Persian).

43. Teimouri, M and Asadi Nalivan, O. 2020. Susceptibility Zoning and Prioritization of the Factors Affecting Landslide Using MaxEnt, Geographic Information System and Remote Sensing Models (Case study: Lorestan Province), Hydrogeomorphology, 6(21): 155-179. (In Persian).

44. Tyagi, A. Tiwari, R. K and James, N. 2021. GIS-Based Landslide Hazard Zonation and Risk Studies Using MCDM. In Local Site Effects and Ground Failures (pp. 251-266). Springer, Singapore.

45. Yao, J. Qin, S. Qiao, S. Liu, X. and Chen, J. 2022. Application of a two-step sampling strategy based on deep neural network for landslide susceptibility mapping. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(4): 1-20.

46. Zhao, L. Wu, X. Niu, R. Wang, Y and Zhang, K. 2020. Using the rotation and random forest models of ensemble learning to predict landslide susceptibility. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 11(1): 1542-1564.

47. Zhou, X. Wen, H. Zhang, Y. Xu, J. Zhang, W. 2021. Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. Geoscience Frontiers, 12(5): 101211.

نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 18, No. 64, Spring 2024
سال هجدهم- شماره ٦٤- بهار ١٤٠٣

Application of Maximum Entropy Machine Learning Algorithm in Landslide Hazard Zoning in Karganeh Watershed, Lorestan Province

Ebrahim. Karimi Sangchini[1*], Ali. Dastranj[2], Seyed. Hossein Arami[3], Samad. Shadfar[4]and Iraj. Vayskarami[5]

Received: 2023.10.22 Accepted: 2023.08.20

Abstract

Introduction:

Numerous forms of natural dangers and related tragedies containing earthquakes, volcanic eruptions, tsunamis, cloud burst, floods, soil erosion etc. happening in the world and amongst such troubling natural hazards landslides are the awful types of greatest recurrent occurrences all everywhere the world. Every year, landslides have affected huge damages of life and stuff, concluded the damages of forests, fruitful cultivated land, habitation area, and network communication in addition to tourist adverts. Additionally, alteration of the earth surface is also responsible for devastating landslides. Iran has confronted numerous categories of natural threats and disasters, for example severe soil erosion concluded gully expansion, vulgar floods, and disturbing landslides. So, because of the numerous occurrences of landslides and huge financial damages have develop national disasters of Iran. The landslide event in Iran has caused about 500 billion financial damages. Landslide susceptibility assessment be able to assistance the planners for final management of environmental squalor and natural resources from delicate damages and eventually development of economic action of this watershed area. The planned methods use both the capability thoughts and ground fact at the like time. This could be taken as a brand-new methodology toward landslide zoning difficulties. The goal of the study is to zonate the hazard of landslide occurrence using maximum entropy (ME) algorithm and compare the effectiveness of this method in locating the sensitivity of landslide occurrence in Karganeh Watershed, Lorestan Province.

Materials and Methods:

Karganeh Watershed is located between 33° 25′ 12″ to 33° 37′ 12″ latitude and 48° 23′ 59″ to 48° 44′ 24″ longitude, occupying about 294.2 sq km in the Lorestan Province, west of Iran. This watershed is one of the main sub basins of Karkheh River. One of the most important phases of landslide susceptibility assessment is to identify and prepare a distribution map of current landslides in the watershed. This map was prepared via assembly the information associated with landslides or via analyzing the data from

1- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Khorramabad, Iran.
2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Mashhhad. Iran.
3- Assistant Professor, Forests and Rangelands Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran
4- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
5- Research Assistant of Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Khorramabad, Iran.

remote sensing and GIS techniques. On behalf of this goal, the distribution map layer of landslides in the watershed was prepared and separated into two sets for model training (70%) and model validation (30%) randomly. Also, 16 causes disturbing the happening of landslides in this watershed were selected permitting to the review of sources and the usage of principal component analysis (PCA), Tolerance and VIF tests. Digital layers of effective factors in geographic information system were equipped. In the next step, the landslide risk map was equipped based on the maximum entropy machine (ME) method. So that evaluate the accurateness of the modeling and compare the efficiency of the method, the index of the area under the virtual performance recognition curve (ROC) was used. Established on the fallouts of the maximum likelihood diagram, geological, land use and slope are the best significant factors inducing the event of landslides in Karganeh Watershed.

Results and Discussion:

Landslide inventory map indicated that there are 95 scattered landslides in the Karganeh Watershed. Exaggerated total area through landslide is 635 ha (2.23% of the watershed area). Based on the results of the PCA index, the KMO coefficient was calculated as 0.61, which confirms the necessary correlation between the input variables to perform principal component analysis. Among the 19 components as the number of variables investigated in landslide risk assessment, considering the eigenvalue higher than one, the number of the first two main components was investigated. The results showed that these two main components express nearly 67% of the changes. After investigation, slope, slope direction, elevation classes, geology, distance from the river, distance from the road, distance from the fault, river power index (SPI), topographic moisture index (TWI) and slope length index (LS), topographic position index (TPI), topographic roughness index (TRI) and vector roughness measurement index (VRM), land use, distance from the village, and rainfall were selected as the most effective factors of landslide occurrence in the Karganeh Watershed. According to the Kappa index diagram, geological indicators, land use, slope, topographic roughness index (TRI), slope length and slope direction are the most important influencing parameters. The area under the curve (AUC) based on the relative performance detection curve indicates good accuracy (AUC=0.787) in the validation stage. Permitting to the results of the maximum entropy method, about 28% of the Karganeh Watershed is in the high and very high hazard class of landslide happening.

Conclusion:

In this study, it was tried to use all effective factors in order to evaluate landslide susceptibility in Karganeh Watershed. Principal component analysis (PCA), tolerance and VIF were used to determine the relationship between the factors influencing the occurrence of landslides and to determine the most effective factors. It is the carrying capacity of the waterway. It actually determines the effect of topography on erosion. The longer the slope is, the higher the sediment carrying capacity is, and the condition of landslides on the side of the waterway increases. An increase in the topographic roughness index (TRI) indicates uplift and nontectonic activity. Changing the rangeland to rain fed farming and road construction is completed severely in Karganeh Watershed throughout recent years and led to awarding great role of human factors on landslide in comparing other factors. Based on the results obtained from this model, 50.4% of the area of the basin is in the very low and low sensitivity class, 21.6% is in the medium sensitivity class, and 28% is in the high and very high sensitivity regional level. An increase in this index leads to more surface roughness and an increase in slope, which makes landslides more prone to occur.The implementation of

landslide management programs based on the results of this research on the Karganeh Watershed can explain the difficulties of domain instability.

Key words: Maximum entropy, Landslide hazard, ROC index, Landslide management.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO) for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author

Authors' contribution

Ebrahim Karimi Sangchini: Writing - Original draft preparation
Ali Dastranj: Resources, Software, Manuscript editing
Seyed Hossein Arami: Formal analysis and investigation
Samad Shadfar: Visualization, Supervision
Iraj Vayskarami: Conceptualization, methodology