

آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر؛ به‌منظور مدیریت خطر و خسارت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار است.

ارزیابی ریسک زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار نیشابور، استان خراسان رضوی

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز بار نیشابور یکی از زیر حوزه‌های حوزه آبریز رودخانه بار است که در شمال شهرستان نیشابور قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی، حوزه آبخیز بار در محدوده طول جغرافیایی $58^{\circ} 35' 23''$ تا $58^{\circ} 52' 4''$ شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 26' 7''$ تا $36^{\circ} 28' 9''$ شمالی قرار دارد و در دامنه‌های جنوبی بینالود واقع شده است. برای انجام این مطالعه ابتدا از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و بازدید صحرایی اقدام به شناخت و جمع‌آوری عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شد. سپس؛ نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه با استفاده از لایه زمین‌لغزش‌های منطقه که توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی تهیه شده بود، استخراج و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و بازدیدهای میدانی اصلاح شد. جهت مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش از ۷۰ درصد نقاط لغزشی برای آموزش مدل و ۳۰ درصد داده‌های لغزشی به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد. سپس نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از ۱۴ پارامتر کلیدی و مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه به کمک روش یادگیری ماشین پیشینه آنتروپی (ME) تهیه شد و با استفاده از شاخص ROC صحت‌سنجی مدل، مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نقشه خسارت زمین‌لغزش با ترکیب نقشه‌های شدت خطر، عناصر در معرض خطر و درجه آسیب‌پذیری عناصر براساس معادله عمومی ریسک ($R = H \cdot E \cdot V$)، تهیه شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج، میزان مساحت سطح زیر نمودار شاخص ROC در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۵۴ به دست آمد، حاکی از قابلیت خیلی خوب مدل در پهنه‌بندی و تعیین مناطق مستعد خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار است. نتایج نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه نشان داد که، ۵۶/۹ درصد از حوزه آبخیز بار در کلاس زیاد و خیلی زیاد عناصر در معرض خطر واقع شدند. این در حالی است که ۱۷/۸ درصد از این حوضه در کلاس زیاد و خیلی زیاد آسیب‌پذیری خطر زمین‌لغزش قرار گرفتند. دلیل آن عدم وجود تأسیسات مهم، کارخانه‌های بزرگ، اتوبان، سازه‌های مهم و مجتمع تفریحی بزرگ در این حوضه هست. هم‌چنین نتایج نقشه پهنه‌بندی ریسک منطقه مورد مطالعه نشان داد که ۹/۱ درصد

علی دسترنج^۱، ابراهیم کریمی سنگجینی^۲، حمزه نور^۱
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۱
<https://doi.org/10.22034/18.67.4>

چکیده مبسوط مقدمه

هر ساله، زمین‌لغزش‌ها خسارات گسترده‌ای از لحاظ جانی و مالی را به همراه دارند که شامل تخریب جنگل‌ها، زمین‌های کشاورزی حاصلخیز، مناطق سکونت و شبکه‌های ارتباطی می‌شود. باتوجه‌به اینکه زمین‌لغزش‌ها نسبت به سایر بلایای طبیعی مدیریت‌پذیرتر هستند؛ لذا شناخت این پدیده در راستای جلوگیری از خسارات ناشی از آن از اهمیت زیادی برخوردار است. ازاین‌رو تحقیق حاضر به‌منظور ارزیابی خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه شدت خسارت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار نیشابور در استان خراسان رضوی انجام گرفت. 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. حوزه آبخیز بار در شمال غربی شهر نیشابور به دلیل شرایط زمین‌شناسی، اقلیمی و فعالیت‌های انسانی دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش است. ازاین‌رو ضرورت شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، خطرپذیری و ریسک زمین‌لغزش در این حوزه می‌تواند از خسارات مالی و جانی جلوگیری نماید. در این تحقیق سعی خواهد شد که به طور هم‌زمان مطالعات مربوط به خطر، عناصر در معرض خطر، آسیب‌پذیری عناصر ناشی از وقوع زمین‌لغزش و در نهایت خسارت (ریسک) زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار مورد مطالعه قرار بگیرد. در نتیجه هدف از این تحقیق ارزیابی خطر زمین‌لغزش و خسارت زمین‌لغزش با استفاده از شدت خطر، عناصر در معرض خطر و درجه

۱- استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد. نویسنده مسئول: Dastranj66@gmail.com

۲- 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

از حوزه آبخیز بار نیشابور معادل ۲۵۰۳ هکتار در کلاس زیاد و خیلی زیاد و ۷۷/۸ منطقه معادل ۲۱۴۵۰ هکتار در کلاس کم و خیلی کم خسارت واقع شدند. تفسیر نتایج نشان داد با توجه به وجود عناصر در معرض خطر در منطقه بیشتر منطقه دارای ریسک کم و خیلی کم است. این امر به تمرکز کارهای مدیریتی مانند عدم توسعه مناطق مسکونی، احداث و توسعه جاده‌ها، توسعه باغات، خطوط انتقال نیرو و ... در بخش‌های که دارای خسارت زیاد و خیلی زیاد هستند کمک می‌کند و باعث کاهش اتلاف وقت و هزینه می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه در حوزه آبخیز بار نیشابور در استان خراسان رضوی به عنوان یک حوضه مستعد وقوع زمین‌لغزش با مساحتی حدود ۲۷۶۴۳/۸ هکتار اقدام به پهنه‌بندی حساسیت، آسیب‌پذیری، ریسک زمین‌لغزش شد. شرایط طبیعی حوزه آبخیز بار نیشابور 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 ۷۳ مورد در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. در این تحقیق سعی شد از تمامی عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار نیشابور استفاده شود. با توجه به نقشه پهنه‌بندی ریسک منطقه مورد مطالعه، ۹/۱ درصد از حوزه آبخیز بار نیشابور در کلاس زیاد و خیلی زیاد و ۷۷/۸ منطقه در کلاس کم و خیلی کم خسارت واقع شدند. تفسیر نتایج تعداد زمین لغزش در هر کلاس ریسک نشان داد که ۴۱ عدد زمین لغزش‌های برداشت شده در کلاس ریسک کم و خیلی کم واقع شدند. در نتیجه با توجه به وجود عناصر در معرض خطر در منطقه بیشتر منطقه دارای ریسک کم و خیلی کم است. نتایج حاصل از این مطالعه به تمرکز کارهای مدیریتی در بخش‌هایی که دارای خسارت زیاد و خیلی هستند کمک می‌کند و باعث کاهش اتلاف وقت و هزینه می‌شود. کلیدواژه‌ها: پیشینه آنتروپی، آسیب‌پذیری، شاخص *ROC*، خسارت زمین‌لغزش

مقدمه

زمین‌لغزش پدیده‌ای خطرناک و فاجعه‌بار است که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی بر جوامع انسانی وارد می‌کند [۱، ۹، ۵]، لذا امروزه شناسایی راه‌حل‌های مناسب جهت تسکین، کنترل و کاهش خسارت ناشی از وقوع حوادث طبیعی، مورد توجه مراکز تحقیقاتی، دانشگاه‌ها و دستگاه‌های اجرایی است [۱۱، ۱۰]. برای دستیابی به کاهش خسارات ناشی از زمین‌لغزش برنامه‌ریزی کلی و اعمال مدیریت خطر زمین‌لغزش ضروری است؛ لکن می‌توان گفت که یکی از مهم‌ترین اقدامات در این رابطه شناخت مناطق دارای پتانسیل خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خسارت زمین‌لغزش در این گونه مناطق است. بنابراین ابتدا ارزیابی خسارت ناشی از زمین‌لغزش صورت گیرد تا بر اساس آن بتوان اقدامات و راهکارهای مدیریتی را ارائه

نمود. تهیه نقشه وقوع زمین‌لغزش، ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت در نواحی کوهستانی است [۹]. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش گسترش پیدا کرده است و نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش با دقت قابل‌قبولی تهیه می‌شوند [۱۵، ۲۲]. مدل حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که در سال‌های اخیر به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. رجب‌زاده و همکاران [۱۸] در حوزه آبخیز خیابوچای در استان اردبیل، تیموری و همکاران [۲۱] در استان لرستان، جاویدان و همکاران [۱۰] در حوزه آبخیز گرگان‌رود، بابلی موخر [۳] در حوزه آبریز رودخانه خیرآباد، کرزادی و همکاران [۱۲]، پاندی و همکاران [۱۶]، کرکس [۱۳] در کشور رومانی، در پژوهش‌های خود از مدل پیشنه آنتروپی (ME) به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده کردند. معادله عمومی خسارت، سطح خسارت را به عنوان نتیجه درون بخشی خطر، عناصر در معرض خطر و آسیب‌پذیری عناصر نشان می‌دهد. خسارت زمین‌لغزش به طور ساده از دخالت سه فاکتور مرتبط به هم محاسبه می‌شود: احتمال وقوع زمین‌لغزش با یک بزرگی معین (پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش)، عناصر ارزش‌گذاری شده خسارت و آسیب‌پذیری (درجه مورد انتظار خسارت به وجود آمده از یک زمین‌لغزش با بزرگی مشخص). عناصر خسارت شامل راه‌ها و ساختمان‌ها و منبع آب و فعالیت‌های کشاورزی، شبکه‌های برق و تلفن هستند. خسارت به محتوای ساختمان‌ها و خسارت به خودروها در راه‌ها می‌تواند یک بخش بزرگی از خسارت را شامل شوند، اما تخمین این خسارت‌ها مشکل است و همچنین فاقد داده‌های کافی هستند. علاوه بر این خسارت به زندگی انسان‌ها (خسارت جانی) قابل تجزیه و تحلیل نیست [۱۱]. زیریره و همکاران [۲۲] در شمال لیبیون، پرتقال، انریکه و همکاران [۸] در کوانتامو کوبا، خانه‌ها، مدارس، قبرستان‌ها و جاده‌ها را به عنوان عناصر در معرض خطر انتخاب نمودند. کوه‌پیمای و همکاران [۱۴] در تحقیقی به ارزیابی پهنه‌های حساسیت و مدیریت ریسک زمین‌لغزش در حوزه آبخیز لتیان، پرداختند. نقشه خسارت با ترکیب نقشه‌های حساسیت، عناصر در معرض و آسیب‌پذیری عناصر بر اساس معادله ریسک تهیه شد. بر اساس ارزیابی پتانسیل خسارت در وضعیت موجود، حدود ۲۳ درصد از سطح حوزه آبخیز لتیان در کلاس‌های خسارت زیاد و خیلی زیاد واقع شده است. کرزادی و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای به ارزیابی استعداد، خطر ریسک و تهیه برنامه مدیریت راهبردی زمین‌لغزش برای حوزه آبخیز اوغان در استان گلستان پرداختند. نتایج ارزیابی خسارت ناشی از وقوع زمین‌لغزش در دوره بازگشت‌های ۱۰۰-۱ ساله بیانگر رابطه مستقیم خسارت وارده و دوره بازگشت داشته که به افزایش شدت وقوع در دوره بازگشت‌های بالا اشاره دارد. دیکشی و همکاران [۷] به ارزیابی ریسک ویژه زمین‌لغزش در Phuentsholing در کشور بوتان پرداختند. برای این منظور نقشه زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ تهیه شد.

سپس اقدام به تهیه لایه‌های مؤثر بر زمین‌لغزش شامل: زمین‌شناسی، شیب، ارتفاع، بارش، پوشش در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی شد. سپس با توجه به عناصر در معرض خط آسیب‌پذیری منطقه مشخص شد و نهایت نقشه ریسک زمین‌لغزش برای منطقه تهیه شد. نتایج نشان داد که ۴۴ درصد منطقه دارای ریسک خیلی کم و ۳/۲ درصد منطقه دارای ریسک خیلی زیاد هست.

در مجموع با بررسی منابع مختلف می‌توان چنین استنباط نمود که زمین‌لغزش فرایند پیچیده‌ای است که خطرات جانی و مالی فراوانی را به وجود می‌آورد. عوامل متعددی در بروز این پدیده نقش دارند که می‌بایست در هر منطقه پس از بررسی و شناسایی آن‌ها، اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش نمود. همچنین اکثر مطالعات انجام‌گرفته در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش هستند و کمتر به ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک ریالی زمین‌لغزش پرداخته شده است. در تحقیق حاضر علاوه بر پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک ریالی نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

حوزه آبخیز بار در شمال غربی شهر نیشابور به دلیل استقرار روستاهای متعدد و شهر بار که عمده فعالیت‌های آن‌ها کشاورزی، باغداری و دامداری است، نقش مهمی در تولیدات باغی و کشاورزی و تولیدات دامی در استان خراسان رضوی دارد. همچنین این حوزه به دلیل داشتن مراتع سرسبز و باغات پهناور، آبشار معروف بار و رودخانه بار دارای چشم‌اندازهای بسیار زیبایی هست و یکی از قطب‌های گردشگری استان خراسان رضوی محسوب می‌شود. این حوزه به دلیل شرایط زمین‌شناسی، اقلیمی و فعالیت‌های انسانی دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش است. از این رو ضرورت شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، خطرپذیری و ریسک زمین‌لغزش در این حوزه می‌تواند باعث کاهش خسارات مالی جانی در منطقه شود. در مجموع با بررسی منابع می‌توان چنین استنباط نمود که در ایران ارزیابی خطر و خسارت به طور هم‌زمان و متوالی خیلی صورت‌گرفته است و اکثر قریب به اتفاق مطالعات انجام‌گرفته در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش هستند. در این تحقیق سعی خواهد شد که به طور هم‌زمان مطالعات مربوط به خطر، عناصر در معرض خطر، آسیب‌پذیری عناصر ناشی از وقوع زمین‌لغزش و در نهایت خسارت (ریسک) زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار مورد مطالعه قرار بگیرد. در نتیجه هدف از این تحقیق ارزیابی خطر با مدل پیشینه آنتروپی و ارزیابی خسارت زمین‌لغزش با استفاده از شدت خطر، عناصر در معرض خطر و درجه آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر به منظور مدیریت خطر و خسارت در حوزه آبخیز بار نیشابور در استان خراسان رضوی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بار نیشابور با مساحت حدود ۲۷۶۴۴ هکتار یکی از زیر حوزه‌های حوزه آبریز رودخانه بار است که در شمال شهرستان

نیشابور قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی، حوزه آبخیز بار در محدوده طول جغرافیایی $58^{\circ} 35' 23''$ تا $58^{\circ} 52' 4''$ شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 28' 9''$ تا $36^{\circ} 26' 7''$ شمالی قرار دارد و در دامنه‌های جنوبی بینالود واقع شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. حوزه آبخیز بار بخشی از زیر زون ساختاری بینالود-آلاداغ است که در نتیجه تحولات زمین‌ساختی واقع در آن، انواع واحدهای سنگی و رسوبی دوران دوم و سوم زمین‌شناسی بر روی آن گسترش یافته است [۶].

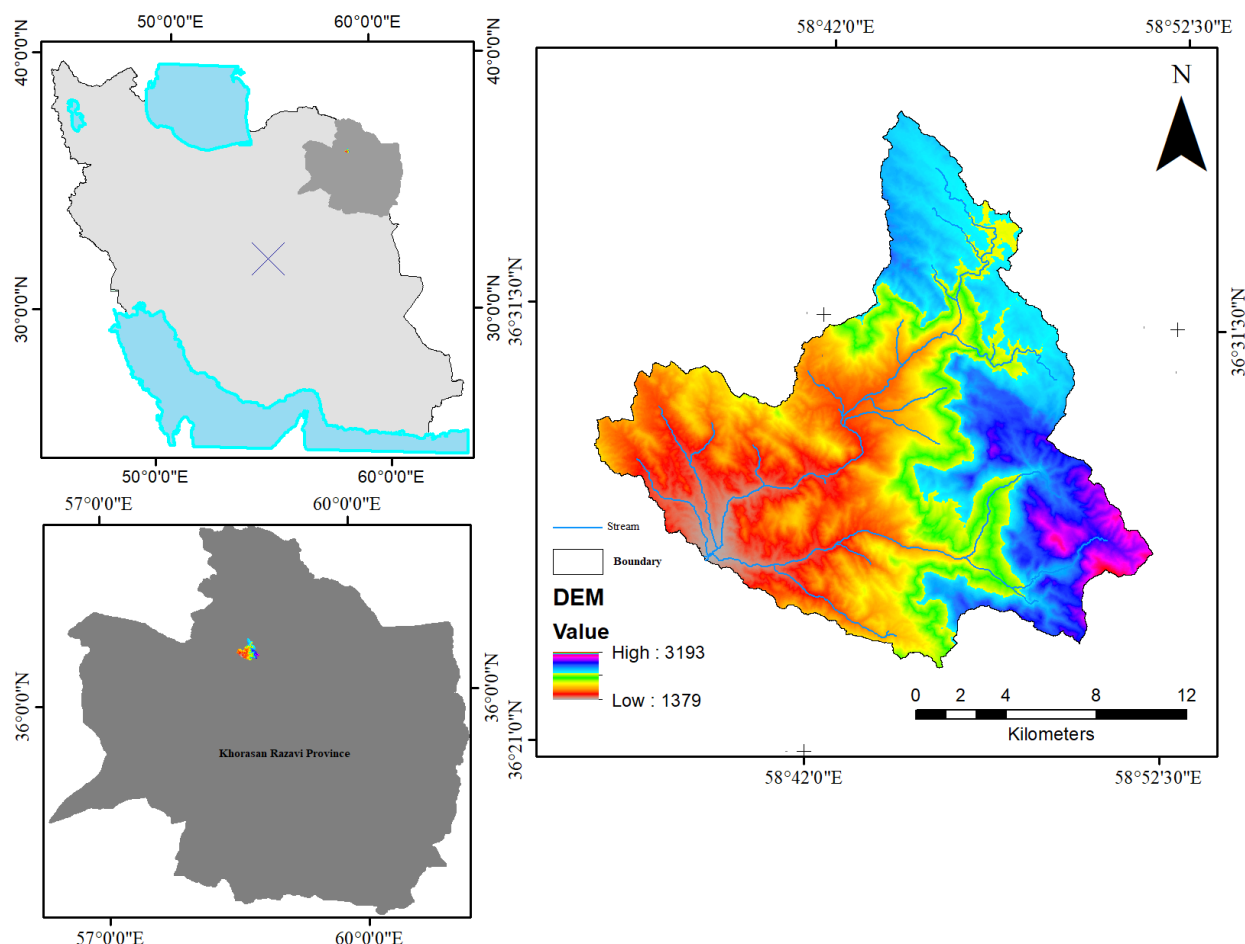
روش تحقیق

در این پژوهش به منظور ارزیابی خطر و ریسک زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار در استان خراسان رضوی ابتدا از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و بازدید صحرایی اقدام به شناخت و جمع‌آوری عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شد و سپس لایه‌های اطلاعاتی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تهیه شد. در ادامه با استفاده از مدل یادگیری حداکثر آنتروپی (ME) نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش تهیه شد. سپس به منظور ارزیابی عملکرد این مدل از منحنی مشخصه عملکرد نسبی (ROC)، استفاده شد. در ادامه لایه اطلاعاتی عناصر در معرض خطر شامل مناطق مسکونی (تیپ‌های ویلایی و روستایی)، جاده‌های ارتباطی (تیپ‌های آسفالت و خاکی)، کاربری اراضی (تیپ‌های جنگل، مرتع و زراعت)، شبکه‌های برق و تلفن آماده‌سازی شد. سپس آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر محاسبه شد. در نهایت با به‌کارگیری معادله ریسک وارنر اقدام به تخمین ریسک زمین‌لغزش در منطقه مورد تحقیق شد.

- تهیه لایه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

اولین مرحله مطالعه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش شناخت و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به عواملی است که در وقوع زمین‌لغزش‌ها نقش مؤثری دارند. بر اساس مرور منابع گسترده، بازدیدهای میدانی و بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌های منطقه شامل 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 انحنا سطح، کاربری اراضی، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و خطوط هم‌بارش به‌عنوان عوامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، شناسایی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. لایه اطلاعاتی مربوط به این عوامل در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی

1. Warnes
2. Curvature Index



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز بار، استان خراسان رضوی
Fig1. Geographical location of Bar Watershed, Khorasan Razavi Province

که در این رابطه برای سنجده TM باند مادون قرمز (pNIR) باند چهار و باند قرمز (pRED) باند سه است. نقشه آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه از نقشه توپوگرافی منطقه استخراج شد. نقشه جاده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth تهیه شده و سپس با استفاده از الگوریتم Euclidean Distance در محیط ArcGIS10.8، نقشه فاصله از جاده و آبراهه تهیه شدند. نقشه گسل منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، شیت نیشابور و اخلمد استخراج شد. سپس با استفاده از الگوریتم Euclidean Distance در محیط ArcGIS10.8، نقشه فاصله از گسل تهیه شد. شاخص توان آبراهه (SPI) از معادله ۲ و با استفاده از دستور Stream Power در محیط نرم‌افزار SAGA، تهیه شد [۲]:

$$SPI = A_s \tan \beta \quad (2)$$
 که در آن A_s : مساحت حوزه و $\tan \beta$: مقدار شیب منطقه در هر پیکسل هست. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، از معادله ۳ به دست می‌آید [۲]:

$$TWI = \ln \alpha / \tan \beta \quad (3)$$

(GIS) تهیه شد که در ادامه توضیحات مرتبط ارائه شده است. نقشه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای ALOS POLSAR تهیه شده است. سپس نقشه عوامل شیب، درجه شیب، انحنای دامنه از نقشه DEM منطقه در محیط ArcGIS 10.8 و SAGA-GIS استخراج و تهیه شدند. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نیشابور و اخلمد با شماره شیت ۷۷۶۲ و ۷۷۶۳ (تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی) استخراج شد. نقشه بارش نیز با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی (نیشابور، محمد نیشابور، بار و بوژان) که داخل و نزدیک به منطقه مورد مطالعه واقع شدند، با استفاده از روش میانابی IDW استخراج شد. نقشه کاربری منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه کاربری اراضی استان خراسان رضوی از اداره کل منابع طبیعی خراسان رضوی تهیه و استخراج شد. سپس از طریق بازدید میدانی و بخصوص از طریق تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، اصلاح شد. همچنین شاخص NDVI با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در محیط Google Earth engine، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد [۱۵].

$$NDVI = (\rho NIR - \rho RED) / (\rho NIR + \rho RED) \quad (1)$$

که در آن α : زهکش شیب بالاست در واحد طول و β : شیب منطقه‌ای هست.
شاخص طول شیب (LS). این شاخص از معادله ۴ محاسبه می‌شود [۴]:

$$STI = \left(\frac{As}{22/13} \right)^{0/6} \left(\frac{\sin \beta}{0/0896} \right)^{1/3} \quad (4)$$

که در آن As : مساحت حوضه آبخیز و β : گرادیان شیب بر حسب درجه است. نقشه این لایه در محیط SAGA-GIS، تهیه شد. شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI): شاخص TPI طبق معادله ۵ به دست می‌آید [۴]:

$$TPI = Z_0 - \sum_{n=1} Z_{n/n} \quad (5)$$

که Z_0 = ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n = ارتفاع از شبکه و n = تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی.

شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) از معادله ۶ محاسبه می‌شود:
 $TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 Z_{Md}}$ (۶)
 P = تعداد پیکسل اطراف، Z_{Md} = میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل است. این شاخص در محیط SAGA-GIS تهیه شد.

- تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش در حوزه آبخیز بار

یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی خطر زمین لغزش، شناسایی و تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌های موجود حوزه است. بدین منظور ابتدا با استفاده از نقشه زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه که توسط اداره کل منابع طبیعی استان خراسان رضوی که با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ در سال ۱۳۸۲، تهیه شده بود، استخراج شد. سپس از طریق انجام بازدید میدانی در حوضه، استفاده از اطلاعات محلی و دستگاه GPS و همچنین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth اقدام به اصلاح این نقشه شد و در نهایت نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها به صورت نقطه‌ای تهیه شد. در مجموع در منطقه مطالعاتی ۷۳ مورد لغزش ثبت شد.

- ارزیابی خطر زمین لغزش

در این تحقیق از روش یادگیری ماشین حداکثر آنتروپی (ME) برای ارزیابی خطر زمین لغزش استفاده شد. روش حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بلایی در زمینه‌های مختلف محیطی دارد [۱۷]. 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 نیاز به نقاط عدم حضور نیست؛ بلکه از یک سری عوامل تأثیرگذار (عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش) و همچنین نقاط حضور آن پدیده (نقاط لغزشی برای مدل‌سازی) استفاده می‌کند. به منظور استفاده از این مدل ابتدا متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش) و متغیرهای وابسته (نقاط وقوع زمین لغزش)، به فرمت مورد نظر تبدیل و وارد

محیط نرم‌افزار MaxENT، شد. سپس داده‌های زمین لغزش برای آموزش مدل (۷۰ درصد نقاط لغزشی برداشت شده)، به منظور واسنجی مدل استفاده شد. در نهایت نقشه نهایی حساسیت زمین لغزش بر اساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در پنج کلاس استعداد (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) پهنه‌بندی شد. صحت مدل با استفاده از مساحت زیر نمودار (AUC) منحنی شاخص ROC بررسی و ارزیابی شد [۱۲].

- نقشه عناصر در معرض خطر

با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و توپوگرافی و با فهرست‌برداری از عناصر در معرض خطر در هر واحد از نقشه کلاس خطر، عناصر مورد نظر شناخته و نقشه عناصر در معرض خطر تهیه شد. عناصر در معرض خطر در این تحقیق شامل مناطق مسکونی (تیپ‌های ویلاهی و روستایی)، جاده‌های ارتباطی (تیپ‌های آسفالت و خاکی)، کارگاه‌های شیلات، مکان‌های توریستی، مساجد، بانک‌ها، خانه‌های بهداشت، شبکه‌های انتقال برق و گاز، منابع آب و فعالیت‌های کشاورزی و مراتع هستند. در نهایت بر اساس عناصر در معرض خطر بر اساس تعداد نوع عناصر در واحد پلیگون به طبقات خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند (جدول ۱).

جدول ۱- کلاس‌های عناصر در معرض خطر در حوضه [۱۲].

Table 1. Classes of elements at risk in the basin [12]

Row	Classes	طبقات کیفی Quality classes	تعداد نوع عناصر در واحد پلیگون The number of types of elements per polygon unit
1	I	خیلی کم Very Low	0-1
2	II	کم Low	2
3	III	متوسط Moderate	3
4	IV	زیاد High	4
5	V	خیلی زیاد Very High	5

- آسیب‌پذیری عناصر

در این مطالعه جهت ارزیابی آسیب‌پذیری عناصر از معادله سالدیوار سالی و انیشتن [۱۱] استفاده می‌شود (معادله ۷):
 $V = LM \cdot PM$ (۷)

که در آن V آسیب‌پذیری عوامل، LM ضریب کاربری و PM ضریب جمعیتی هست. جهت محاسبه مقادیر PM از مقادیر پیشنهاد شده توسط سالدیوار سالی و انیشتن [۲۰] استفاده می‌شود. ضرایب جمعیتی برای ارزیابی عوامل آسیب‌پذیری در جدول (۲) ارائه شده است. اما به منظور محاسبه ضریب کاربری پس از مشخص شدن کلاس و شناسایی عناصر در هر واحد از نقشه خطر، کلاس‌های آسیب‌پذیری عناصر با توجه به اینکه در چه کلاسی از شدت خطر

(PM) و نقشه ضریب کاربری (LM) با ضرب این دو نقشه، نقشه آسیب‌پذیری عناصر تهیه شده و بر اساس استاندارد کلاس و عدد آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر به طبقات خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌شود (۴).

جدول ۲- ضرایب جمعیتی برای ارزیابی عوامل آسیب‌پذیری [۱۲].
Table 2. Populations Modulus for evaluating vulnerability

[12] factors		
ضریب Coefficient	جمعیت (نفر) Population	Row
0.75	0-1000	1
0.8	1000-2000	2
0.85	2000-3000	3
0.9	3000-4000	4
0.95	4000-5000	5
1	>5000	6

قرار دارند و با استفاده از امتیازات کارشناسی و بررسی شرایط حوضه مورد مطالعه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تعیین شد. پس از مشخص شدن اهمیت هر یک از زیرمعیارهای هر شاخص بر اساس نظرات کارشناسی، بر اساس اولویت هر زیرمعیار در شاخص طبقات نقشه خطر با ضرایب ۱، ۲، ۳ و ۴ مشخص شدند (به عنوان مثال عنصر جاده که دارای سه حالت مالرو، خاکی و آسفالت است اگر بر اساس نظر کارشناسان به ترتیب جاده آسفالت، جاده خاکی و مالرو اولویت بندی بشوند، طبقات نقشه خطر شامل این پارامترها به ترتیب در ضریب ۳، ۲ و یک ضرب می‌شود). برای محاسبه امتیاز آسیب‌پذیری عناصر، وجود خطر و شرایط هر یک از عناصر از لحاظ اقتصادی و اکولوژیکی حائز اهمیت است. عناصری که در کلاس خطر بالاتری قرار دارند از اهمیت و امتیاز آسیب‌پذیری بیشتری برخوردار هستند. امتیاز صفات عناصر در معرض خطر به منظور آسیب‌پذیری عناصر در جدول (۳) آمده است. بعد از تهیه نقشه ضریب جمعیتی

جدول ۳- امتیاز صفات عناصر در معرض خطر
Table 3. Points of attributes of elements at risk

عدد آسیب Vulnerability number	عوامل Factors	عناصر Elements
1-5	جاده مالرو، بدون زیرسازی و با افزایش کلاس خطر با ضریب ۱ افزایش می‌یابد. The road without infrastructure increases by a factor of 1 as the risk class increases.	جاده Road
1-10	جاده خاکی، دارای زیرسازی و با افزایش کلاس خطر با ضریب ۲ افزایش می‌یابد. The dirt road has infrastructure and increases by a factor of 2 with the increase of the risk class.	
1-15	جاده آسفالت، دارای زیرسازی و با افزایش کلاس خطر با ضریب ۳ افزایش می‌یابد. Asphalt road, with infrastructure, increases by a factor of 3 as the risk class increases.	
1-10	مناطق مسکونی روستایی، با افزایش کلاس خطر با ضریب ۲ افزایش می‌یابد. Rural residential areas increase by a factor of 2 as the risk class increases	اماکن مسکونی Residential Area
1-15	مناطق مسکونی شهری، با افزایش کلاس خطر با ضریب ۳ افزایش می‌یابد. Urban residential areas increase by a factor of 3 as the risk class increases.	
1-20	مناطق توریستی، مساجد، کارگاه شیلات، پست بانک، مدرسه، خانه بهداشت، با افزایش کلاس خطر با ضریب ۴ افزایش می‌یابد. Tourist areas, mosques, fishing workshop, post bank, school, health center, increases by a factor of 4 with the increase of the risk class.	
1-10	چشمه، با افزایش شدت خطر با ضریب ۲ افزایش می‌یابد. The source increases by a factor of 2 as the severity of the risk increases.	منابع آب Water Sources
1-10	آبراهه (رتبه ۲ به بالا)، و با افزایش شدت خطر با ضریب ۲ افزایش می‌یابد. Waterway (rank 2 and above), and increases by a factor of 2 as the severity of the risk increases.	
1-15	استخر کشاورزی، با افزایش شدت خطر با ضریب ۳ افزایش می‌یابد. The agricultural pool increases by a factor of 3 with increasing risk intensity.	
1-15	شبکه انتقال گاز یا برق، با افزایش کلاس خطر با ضریب ۳ افزایش می‌یابد. The gas or electricity transmission network increases by a factor of 3 when the risk class increases.	شبکه‌های انتقال انرژی Energy transfer networks
1-10	مراعات و جنگل‌ها، با افزایش شدت خطر با ضریب ۲ افزایش می‌یابد. Pasture and forests increase by a factor of 2 with increasing risk intensity.	کاربری اراضی Landuse
1-10	اراضی کشاورزی دیم، با افزایش شدت خطر با ضریب ۲ افزایش می‌یابد. Rainfed agricultural lands increase by a factor of 2 with the increase in risk intensity.	
1-15	اراضی کشاورزی آبی، با افزایش شدت خطر با ضریب ۳ افزایش می‌یابد. The irrigated agricultural land increases by a factor of 3 with the increase in the severity of the risk.	
1-20	اراضی باغی، با افزایش شدت خطر با ضریب ۴ افزایش می‌یابد. Garden lands increase by a factor of 4 with the increase of risk intensity.	

Table 4. Class standard and vulnerability number of elements at risk [12]

کلاس آسیب‌پذیری Vulnerability Class	طبقات کیفی Quality Class	عدد آسیب‌پذیری Vulnerability Class
I	خیلی کم Very Low	0-15
II	کم Low	16-30
III	متوسط Moderate	31-45
IV	زیاد High	46-60
V	خیلی زیاد Very High	61-85

-تحلیل و تخمین ریسک زمین‌لغزش

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی خسارت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار از معادله وارنر [۲۱] ($R = H \cdot E \cdot V$) استفاده شد. باتوجه به این معادله ($R = S \sum EV$)، به سه نقشه حساسیت (S^1)، نقشه عناصر در معرض خطر (E^2) و نقشه آسیب‌پذیری (V^3) نیاز است. ازاین‌رو به‌منظور پهنه‌بندی نقشه خسارت یا ریسک ابتدا عناصر در معرض خطر شناسایی سپس با اعمال درجه آسیب‌پذیری هر عنصر، عدد ریسک زمین‌لغزش از معادله عمومی ریسک محاسبه و در پنج کلاس طبقه‌بندی شد.

جدول ۵- استاندارد کلاس و عدد ریسک زمین‌لغزش در حوزه بار

Table 5. Class standard and landslide risk number in the Bar

کلاس ریسک Risk Class	طبقات کیفی Quality Class	عدد ریسک Risk Number
I	خیلی کم Very Low	0-25
II	کم Low	26-50
III	متوسط Moderate	51-75
IV	زیاد High	76-100
V	خیلی زیاد Very High	101-125

جدول ۶- توزیع فراوانی کلاس‌های خطر زمین‌لغزش با روش مدل حداکثر آنتروپی حوزه آبخیز بار

Table 6. Frequency distribution of landslide risk classes by maximum entropy model method of Bar watershed

کلاس خطر	Quality Class	مساحت Area(ha)	درصد مساحت Percentage	تعداد زمین‌لغزش Number of Landslid	مساحت زمین‌لغزش در هر طبقه Landslide area per Class(m ²)
1	خیلی کم Very Low	7301.7	26.5	5	781.25
2	کم Low	7004.1	25.3	9	1406.25
3	متوسط Moderate	5396	19.5	13	2031.25
4	زیاد High	4237.5	15.3	19	2968.25
5	خیلی زیاد Very High	3704.1	13.3	27	4218.75
Total		27643.8	100	73	11406.25

1. Susceptibility
2. Element at risk
3. Vulnerability

نتایج

پراکنش زمین‌لغزش حوضه

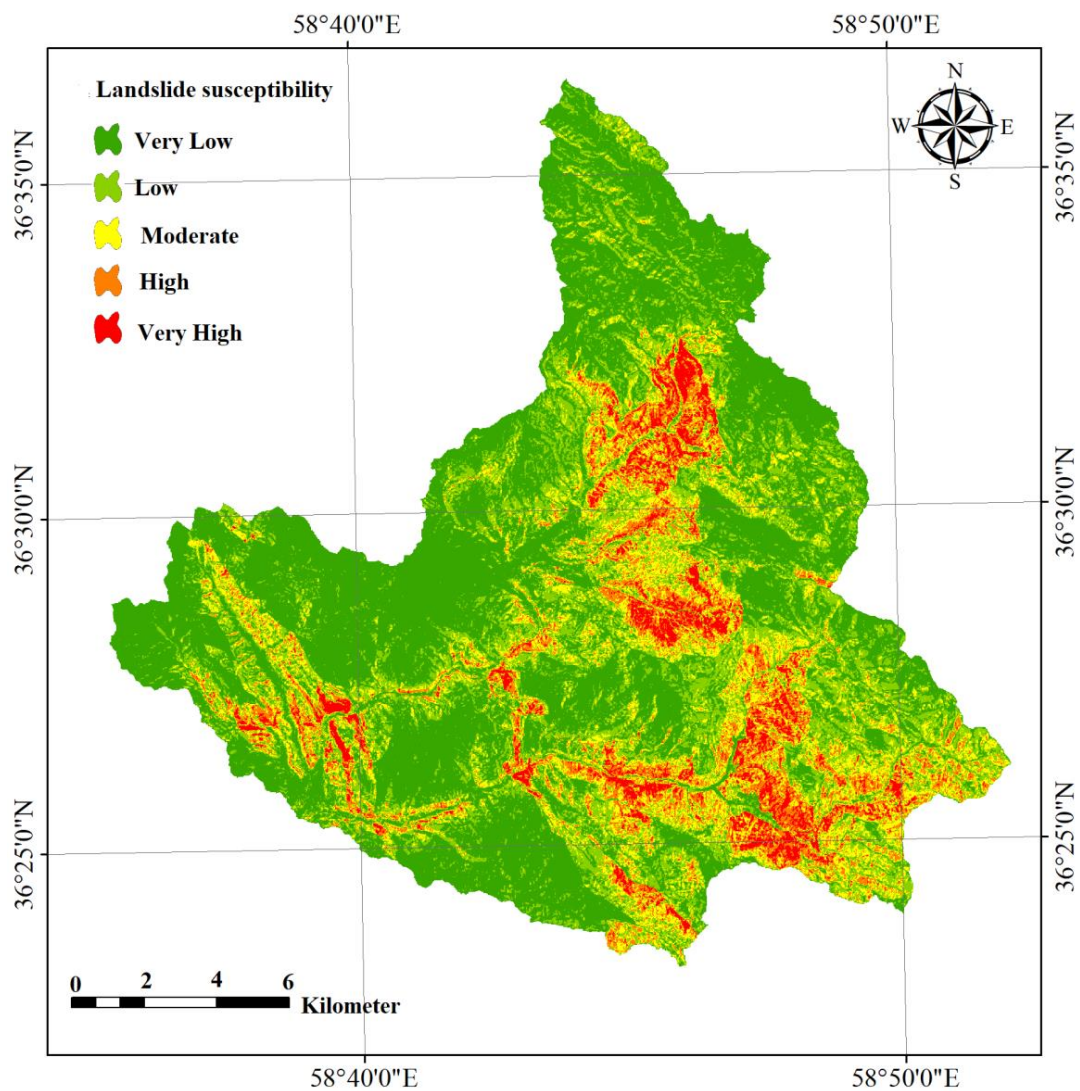
۷۳ مورد لغزش در منطقه مورد مطالعه ثبت شد. جهت مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش از ۷۰ درصد نقاط لغزشی برای آموزش مدل و ۳۰ درصد داده‌های لغزشی به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

- شدت خطر زمین‌لغزش حوضه با مدل حداکثر آنتروپی و ارزیابی دقت مدل

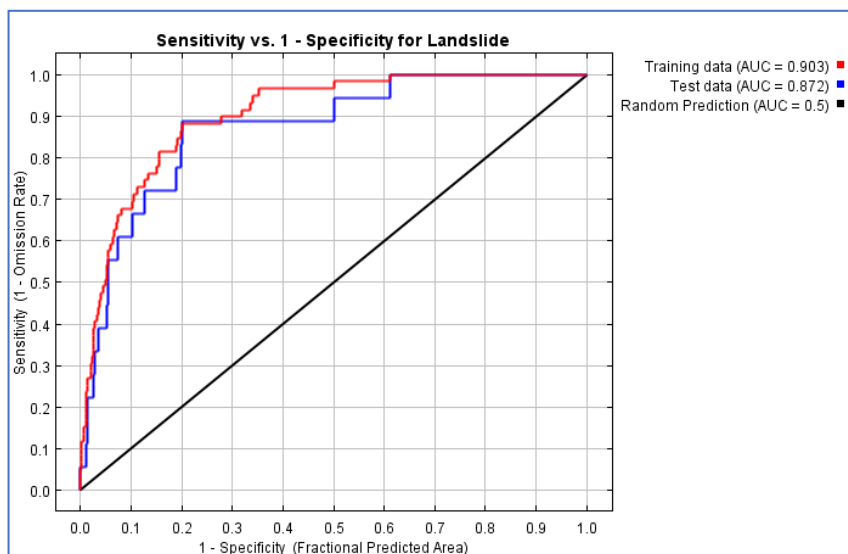
پس از تهیه اطلاعات مربوط به شاخص‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه نقشه شدت خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی انجام گرفت. پس از تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی، نقشه حاصله با استفاده از نقاط عطف (شکست طبیعی) منحنی تجمعی فراوانی پیکسل‌ها به پنج کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۲). جدول ۶ توزیع فراوانی کلاس‌های خطر زمین‌لغزش با روش مدل حداکثر آنتروپی حوزه آبخیز بار را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ۱۳ درصد مساحت منطقه دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد و ۷۳ درصد دارای حساسیت کم و خیلی کم و ۱۴ درصد منطقه دارای حساسیت متوسط است. همچنین نتایج ارزیابی دقت مدل با استفاده از شاخص ROC در شکل ۳ نشان داده شده است. بر این اساس مدل در مرحله آموزش دقت ۹۰/۳ درصد (عالی) و در مرحله اعتبارسنجی دقت ۸۷/۲ درصد (خیلی خوب) را داشت.

نقشه عناصر در معرض خطر زمین‌لغزش

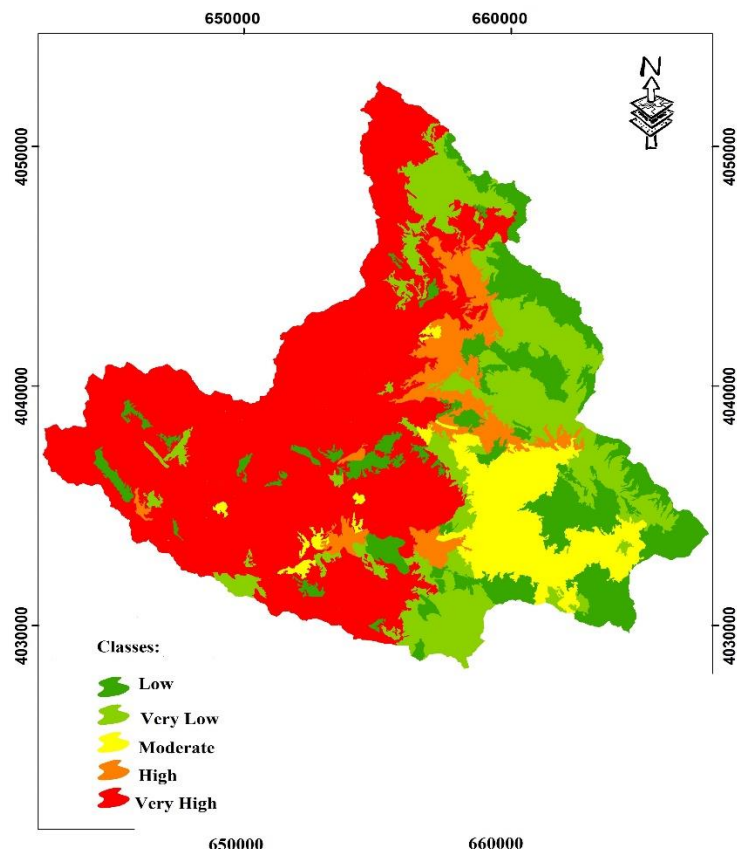
با استفاده از نقشه کاربری اراضی، سطح مراتع و جنگل‌ها، اراضی کشاورزی، تعداد چشمه‌ها، مساجد، کارگاه‌های شیلات، پست‌بانک، تعداد و نوع اماکن مسکونی، شبکه برق و گاز، طول جاده‌ها و آبراهه‌ها، نقشه خطر در ۲۱۰ واحد پلیگونی ادغام شد و به نقشه عناصر در معرض خطر تبدیل شد (شکل ۴).



شکل ۲- نقشه حساسیت وقوع زمین لغزش حوزه آبخیز بار با استفاده از روش بیشینه آنتروپی
Fig 2. Landslide susceptibility map of Bar watershed using maximum entropy method



شکل ۳- منحنی ROC و مقدار AUC برای ارزیابی عملکرد مدل بیشینه آنتروپی
Fig 3. ROC curve and AUC value for maximum entropy model performance evaluation



شکل ۴- نقشه کلاس عناصر در معرض خطر زمین لغزش حوزه آبخیز بار
Fig 4. Map of elements at risk class of landslides in Bar watershed

جدول ۷- توزیع فراوانی کلاس‌های عناصر در معرض خطر زمین لغزش حوزه آبخیز بار

Table 7. Frequency distribution of element classes at risk of landslides in Bar watershed

درصد مساحت Area Percentage	مساحت (ha) Area	تعداد عنصر Element Number	طبقات کیفی Quality Class	کلاس عناصر Elements Class
15.6	4299.68	≤ 1	خیلی کم Very Low	1
17.9	4929.64	2	کم Low	2
9.6	2653.48	3	متوسط Moderate	3
6.4	1770.7	4	زیاد High	4
50.5	13916.58	5	خیلی زیاد Very High	5
100	27643.8		Total	

– آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر

در حوزه کوهستانی بار تأسیسات مهم صنعتی، اتوبان و کارخانه‌های مهمی وجود ندارد. راه‌های ارتباطی، اراضی کشاورزی و باغی و اماکن گردشگری، طرح‌های شیلات، مساجد، پست‌بانک، مدارس و خانه‌های بهداشت نسبت به عناصر ذکر شده از اهمیت بالاتری برخوردارند. شکل ۵ تا ۸ وزن ارزش نوع کاربری به‌منظور

محاسبه آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر با استفاده از روش AHP می‌دهد. شکل ۹ نقشه کلاس آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر زمین لغزش حوزه آبخیز بار را نشان می‌دهد. همچنین مساحت و درصد مساحت طبقات آسیب‌پذیری در جدول ۸، نمایش داده شده است.



شکل ۵- وزن ارزش نوع جاده با استفاده از AHP به منظور محاسبه آسیب پذیری عنصر جاده (ضریب ناسازگاری: ۰)

Fig 5. Road type value weighting using AHP in order to calculate the vulnerability of the road element (Inconsistency:0.00)



شکل ۶- وزن ارزش نوع کاربری اراضی با استفاده از AHP به منظور محاسبه آسیب پذیری عنصر کاربری (ضریب ناسازگاری: ۰/۰۰۳۹)

Fig6. The weight of the land use type value using AHP in order to calculate the vulnerability of the landuse element

(Inconsistency:0.0039)



شکل ۷- وزن ارزش نوع مناطق مسکونی با استفاده از AHP به منظور محاسبه آسیب پذیری عنصر مناطق مسکونی (ضریب ناسازگاری: ۰/۰۰۵۲)

Fig7. The weight of the value of the type of residential areas using AHP in order to calculate the vulnerability of the

(Inconsistency:0.00052)



شکل ۸- وزن ارزش نوع منابع آب با استفاده از AHP به منظور محاسبه آسیب پذیری عنصر منابع آب (ضریب ناسازگاری: ۰)

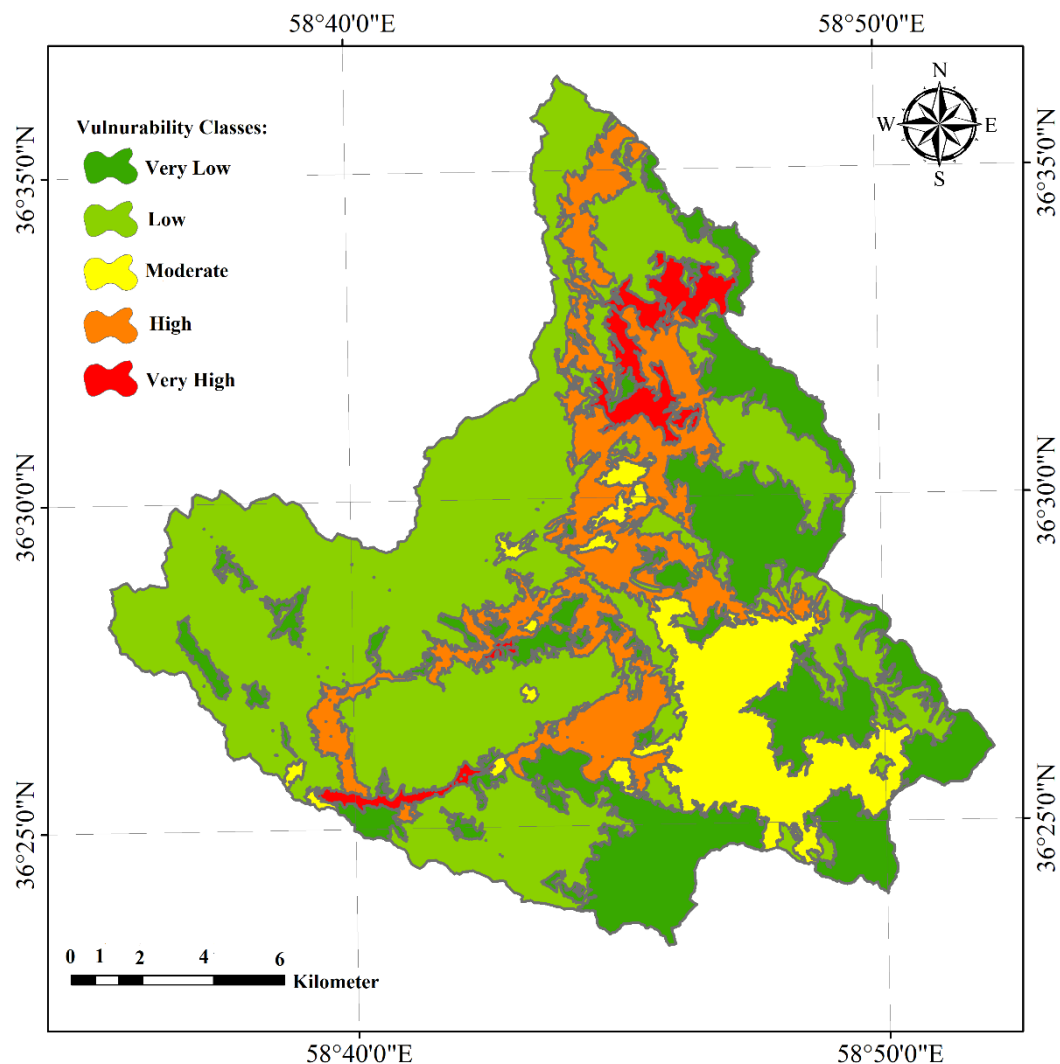
Fig 8. Weighting the value of the type of water resources using AHP in order to calculate the vulnerability of the element of

water resources (Inconsistency:0.00)

جدول ۸- توزیع فراوانی کلاس های آسیب پذیری عناصر در معرض خطر زمین لغزش حوزه آبخیز بار

Table 8. Frequency distribution of vulnerability classes of elements at risk of landslides in Bar watershed

درصد مساحت Percentage	مساحت (ha) Area	عدد آسیب پذیری Vulnerability	طبقات کیفی Quality Class	کلاس آسیب پذیری عناصر Vulnerability Class
22.2	6106.68	0-25	خیلی کم Very Low	1
49.8	13741.62	26-50	کم Low	2
10.2	2801.25	51-75	متوسط Moderate	3
14.5	3996.82	76-100	زیاد High	4
3.3	914.19	101-125	خیلی زیاد Very High	5
100	27643.8		Total	



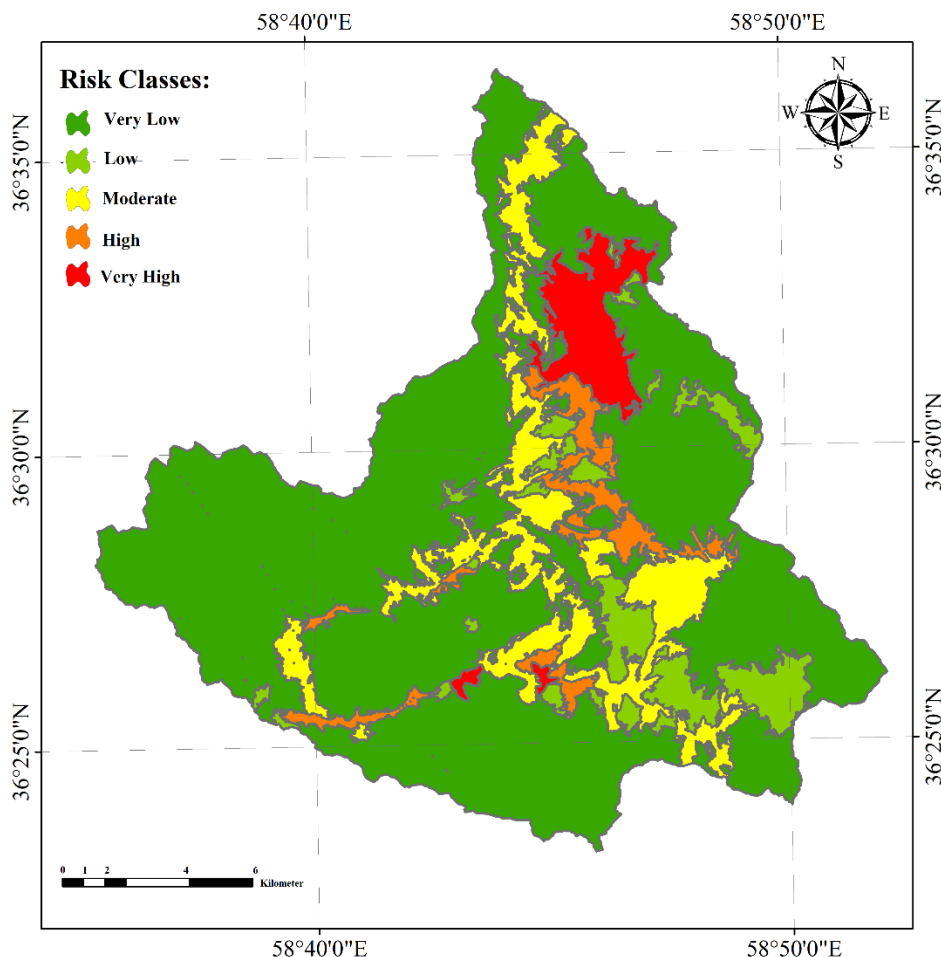
شکل ۹- نقشه کلاس آسیب پذیری عناصر در معرض خطر زمین لغزش حوزه آبخیز بار
Fig 9. Vulnerability class map of elements at risk of landslides in Bar watershed

جدول ۹- توزیع فراوانی کلاس های ریسک زمین لغزش حوزه آبخیز بار
Table 9. Frequency distribution of landslide risk classes in Bar watershed

کلاس ریسک	طبقات کیفی	عدد خسارت	مساحت (ha)	درصد مساحت	تعداد زمین لغزش	مساحت زمین لغزش در هر طبقه
Risk Class	Quality Class	Damage number	Area	Percentage	Number of Landslid	Landslide area per Class(ha)
1	خیلی کم VeryLow	0-6	19487.83	70.7	31	4843.75
2	کم Low	7-12	1962.5	7.1	10	1562.5
3	متوسط Moderate	13-30	1607.24	13.1	16	2500
4	زیاد High	31-72	1226.93	4.5	6	937.5
5	خیلی زیاد Very High	73-150	1276.23	4.6	10	1562.5
	Total		27643.8	100	73	11406.25

جدول ۹، مساحت و درصد مساحت طبقات ریسک در منطقه تحقیق را نشان می دهد.

- خسارت (ریسک) زمین لغزش
با استفاده از معادله عمومی عدد ریسک محاسبه و در ۵ کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی شد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نقشه ریسک (خسارت) زمین لغزش حوزه آبخیز بار

Fig10. Landslide risk map of Bar watershed

همکاران [۱۸] کارایی الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی حساسیت پذیری زمین لغزش های کم عمق در حوزه آبخیز خیابوچای در استان اردبیل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیش بینی عملکرد مدل سازی با الگوریتم حداکثر آنتروپی بسیار بهتر از دیگر مدل ها مانند رگرسیون لجستیک است. کرکس [۱۳] با استفاده از روش حداکثر آنتروپی و هفت پارامتر مؤثر بر وقوع زمین لغزش به ارزیابی حساسیت زمین لغزش در رومانی پرداختند. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC نشان داد که $AUC=0.84$ ، مدل عملکرد بسیار خوبی در ارزیابی حساسیت وقوع زمین لغزش دارد. همان طور که ملاحظه می شود نتایج این مطالعات با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد و تأییدکننده دقت مناسب مدل حداکثر آنتروپی در پهنه بندی خطر زمین لغزش هستند.

به منظور تهیه نقشه عناصر در معرض خطر پنج عامل جاده، اماکن مسکونی، چشمه، اماکن عمرانی کشاورزی، کاربری اراضی و خطوط برق و گاز به عنوان عوامل اصلی در معرض خطر انتخاب شدند. ۵۶/۹ درصد از حوزه آبخیز بار در کلاس زیاد و خیلی زیاد عناصر در معرض خطر واقع شدند. این در حالی است که ۱۷/۸ درصد از

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق مدل حداکثر آنتروپی با ۱۴ عامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش جهت پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در حوزه آبخیز بار نیشابور انتخاب شدند. جهت مدل سازی خطر زمین لغزش از ۷۰ درصد نقاط لغزشی برای آموزش مدل و ۳۰ داده های لغزشی به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده از این مدل ۵۱/۸ درصد مساحت سطح حوضه در کلاس حساسیت خیلی کم و کم، ۱۹/۵ درصد در کلاس حساسیت متوسط و ۲۸/۶ سطح منطقه داری حساسیت زیاد و خیلی زیاد، قرار گرفته است. همچنین میزان مساحت سطح زیر نمودار شاخص ROC در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۵۴ به دست آمد، حاکی از قابلیت خیلی خوب مدل در پهنه بندی و تعیین مناطق مستعد خطر زمین لغزش در حوزه آبخیز بار است. با نتایج تیموری و همکاران [۱۹] که با استفاده از روش حداکثر آنتروپی در استان لرستان اقدام به پهنه بندی حساسیت زمین لغزش کردند، همخوانی دارد. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که سطح زیر منحنی (AUC) بر اساس منحنی ROC نشان دهنده دقت عالی ($AUC=0.79$) در مرحله آموزش و خیلی خوب ($AUC=0.83$) در مرحله اعتبارسنجی مدل بود. در پژوهشی دیگر رجب زاده و

1. Abedini, A., Esmaceli L, Pasban, A., Elnaz Piroozi. (2023). Investigation and landslide risk zoning in Nirchai basin using ANP model, Journal of Environmental Science Studies, 8(1), 5987-6002. (In Persian).
2. Azim Pour Moghadam, M., (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.
3. Babolimoakher, H., Shirani, K., Alireza Taghian, (2019). Assessment of Landslide Susceptibility Zoning Map Using Confidence Factor-Logistic Regression Hybrid Method By Means of Geomorphometric Indices, Quantitative Geomorphological Researches, 7(3), 91-116. (In Persian).
4. Babolimoakher, H. (2022). Spatial Analysis of Landslides in Relation to Active Tectonics Based on Morphotectonic Indices in Kheirabad River Basin, Watershed Management Research, 35(136), 96-113. (In Persian).
5. Chen, W., He, B., Zhang, L., & Nover, D. (2016). Developing an integrated 2D and 3D WebGIS-based platform for effective landslide hazard management. International Journal of Disaster Risk Reduction, 20, 26-38.
6. Dastranj, A., Noor, H., Farzaneh Vakili, (2024). Landslide Susceptibility Mapping Using Machine Learning Algorithms and Prioritization of Factors Affecting the Occurrence of Landslides, Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 17(63), 71-83. (In Persian).
7. Dikshit, A., Sarkar, R., Pradhan, B., Acharya, S., & Alamri, A. M. (2020). Spatial landslide risk assessment at Phuentsholing, Bhutan. Geosciences, 10(4), 131.
8. Enrique, A., Castellanos, A., Van Westen, C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. Geomorphology, 94: 453-466.
9. Ghasemiyan, B., Abedini, M. (2018). Landslide Susceptibility assessment using Support vector machine algorithm (Case Study: Kamyaran County, Kurdistan province), quantitative geomorphological researches, 6(3), 15-36.
10. Javidan N., Kavian, A., Sajad Rajabi, Pourghasemi, H., Christian Conoscenti, Zeinab Jafarian, (2022). Identification the most important predictors in landslide susceptibility mapping using Maximum Entropy Model, Journal of Watershed Engineering and

این حوزه در کلاس زیاد و خیلی زیاد آسیب‌پذیری خطر زمین‌لغزش قرار گرفتند. دلیل آن عدم وجود تأسیسات مهم، کارخانه‌های بزرگ، اتوبان، سازه‌های مهم و مجتمع تفریحی بزرگ در این حوزه هست. در این تحقیق به‌منظور ارزیابی خسارت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار ابتدا عناصر در معرض خطر شناسایی سپس با اعمال درجه آسیب‌پذیری هر عنصر، عدد ریسک زمین‌لغزش از معادله عمومی ریسک بدست آمد.

باتوجه به نقشه پهنه‌بندی ریسک منطقه مورد مطالعه، ۹/۱ درصد از حوزه آبخیز بار نیشابور معادل ۲۵۰۳ هکتار در کلاس زیاد و خیلی زیاد و ۷۷/۸ منطقه معادل ۲۱۴۵۰ هکتار در کلاس کم و خیلی کم خسارت واقع شدند. تفسیر نتایج تعداد زمین‌لغزش در هر کلاس ریسک نشان داد که ۴۱ عدد زمین‌لغزش‌های برداشت شده در کلاس ریسک کم و خیلی کم واقع شدند. در نتیجه با توجه به وجود عناصر در معرض خطر در منطقه بیشتر منطقه دارای ریسک کم و خیلی کم بوده است. نتایج این مطالعه کمک شایانی به مسئولین و تصمیم‌گیران بخش‌های مختلف به‌منظور انتخاب مکان‌های مناسب برای توسعه مناطق مسکونی، صنعتی، خطوط انتقال نیرو، کانال‌های انتقال آب و احداث جاده و دیگر امکانات رفاهی و ... می‌تواند داشته باشد. به‌منظور مدیریت ریسک در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت، آسیب‌پذیری و ریسک زمین‌لغزش در تصمیم‌گیری‌های آمایش سرزمین مورد توجه قرار بگیرد همچنین پیشنهاد می‌شود پهنه‌بندی نقشه‌های حساسیت، خطر و ریسک زمین‌لغزش بر اساس سناریوهای تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی در آینده صورت گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله با همکاری اداره کل آبخیزداری و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، انجام شده است. مؤلفین برخورد لازم می‌دانند تا از همکاری این اداره در کلیه مراحل اجرای طرح صمیمانه سپاسگزاری نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی 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.

مشارکت نویسندگان

علی دسترنج: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
ابراهیم کریمی سنگچین: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج
حمزه نور: بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

17. Park, N. W. (2015). Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, 73(3), 937-949.
18. Rajabzadeh, F., Ghiasi, S., 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.
19. Teimouri, T, 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.
20. Saldivar-Sali, A., & Einstein, H. H. (2007). A landslide risk rating system for Baguio, Philippines. *Engineering Geology*, 91(2), 85-99.
21. Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: A review of Principles and Practice, UNESCO, France, 63p.
22. Zezere JL., Garcia RAC., Oliveria SC. And Reis E: Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*. 2008: 94: 467–495
- Management, 14(3), 332-346. (In Persian).
11. Karimi Sangchini, E. M. Ownegh, A. Sadoddin, (2013). Assessment of landslide hazard, risk in Chehel - Chay Watershed, Golestan Province, Iran, *Watershed Management Research*, 26(98), 74. (In Persian).
12. Kornjadi, 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 Rangeland and Watershed Management. Gorgan, Iran.
13. Kerekes, A. H., Poszet, S. L., & 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.
14. Kuh Pima, 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.
15. Mohammadyari, F., Mirsanjari, M., Zarandian, (2019). Monitoring of vegetation changes in Karaj watershed using NDVI index and gradient analysis, *Journal of Rs and Gis for natural Resources*, 9(4), 55-72. (In Persian).
16. Pandey, V. K., Pourghasemi, H. R., & 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.

Landslide Risk Assessment in Bar Neyshabur Watershed, Razavi Khorasan Province

Ali Dastranj^{*1}, Ebrahim Karimi Sangchini², Hamzeh Noor³

Received: 21-07-2024 Accepted: 11-9 -2024

Abstract

Introduction

Every year, landslides cause extensive human and financial losses, including the destruction of forests, fertile agricultural lands, residential areas, and communication networks. Considering that landslides are more manageable than other natural disasters; therefore, it is very important to know this phenomenon in order to prevent damages caused by it. Therefore, the present research was carried out in order to assess the risk of landslides and prepare a map of the severity of landslide damage in Bar watershed in Razavi Khorasan province. Landslide susceptibility assessment can help planners in the final management of environmental pollution and natural resources in preventing possible damages and ultimately developing economic activities in the watershed. The Bar watershed in the northwest of Neyshabur city has the potential of landslides due to geological conditions, climate and human activities. Therefore, the need to identify areas prone to landslides, vulnerability and risk of landslides in this area can have positive effects on the life and economy of the people of the region. In this research, it will be tried to simultaneously study the risk, elements at risk, the vulnerability of elements due to the occurrence of landslides and finally the damage (risk) of landslides in the Bar watershed. As a result, the purpose of this research is to assess the risk of landslides and landslide damage using the severity of the risk, the elements at risk and the degree of vulnerability of the elements at risk, it is for the purpose of risk and damage management in the watershed area.

Materials and Methods

Bar Neyshabur watershed is one of the sub-watersheds of the Bar River watershed, which is located in the north of Neyshabur city. In terms of geographical location, Bar watershed is located in the range of 58°23'35" to 58°4'52"E and 36°28'9" to 36°7'N latitude and is located in the southern slopes of Binalud. In order to carry out this study, first, through library studies and field visits, the factors affecting the occurrence of landslides were identified and collected. The distribution map of landslides in the region was prepared with the help of the data provided by the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Razavi Khorasan Province and modified using Google Earth satellite images and field visits. Then, 14 key and effective parameters on the occurrence of landslides in the region were selected. Next, the landslide risk map was prepared using the maximum entropy (ME) machine learning method, and then, the accuracy of the model was evaluated using the ROC index.

1. Assistant Professor (corresponding author), Soil Conservation and Watershed Management Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Mashhad. Iran. Email: Dastranj66@gmail.com

2. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Khorramabad, Iran.

3. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Mashhad. Iran

In order to model the risk of landslides, 70% of landslide points were used to train the model and 30% of landslide data were used to validate the model. Next, the information layer of the elements at risk and the degree of vulnerability of the elements were extracted. Finally, the landslide damage map was prepared by combining maps of risk intensity, elements at risk and degree of vulnerability of elements based on the general equation of risk.

Results and discussions

Based on the results, the amount of surface area under the ROC index diagram in the validation stage was 0.854, which indicates the very good capability of the model in zoning and determining landslide prone areas in the Bar watershed. The results of the vulnerability map of the studied area showed that 56.9% of the Bar watershed were in the class of high and very high elements at risk. Meanwhile, 17.8% of this basin was placed in the high and very high class of landslide risk vulnerability. The reason is the absence of important facilities, large factories, highways, important structures and large recreational complexes in this basin. Also, the results of the risk zoning map of the studied area showed that 9.1% of the Neyshabur watershed, equivalent to 2503 hectares in the high and very high class, and 77.8% of the area, equivalent to 21450 hectares, were damaged in the low and very low class. The interpretation of the results showed that due to the presence of elements at risk in the region, most of the region has low and very low risk. This helps to focus the management work in the sectors that have a lot of damage and reduces the waste of time and money.

Conclusion

In this study, sensitivity, vulnerability, and risk of landslides were zoned in the Bar Neyshabur watershed in Razavi Khorasan province as a landslide-prone basin with an area of about 27,643.8 hectares. The natural conditions of the Bar Neyshabur watershed, such as geology, uneven conditions, geomorphology and tectonics, as well as human aggravating factors such as land use change and rural roads, have created a suitable platform for the occurrence of landslides, and a total of 73 cases were identified in the study area. In this research, it was tried to use all the effective factors in the landslide susceptibility assessment in the Neyshabur Bar watershed. According to the risk zoning map of the studied area, 9.1% of the Neyshabur watershed was damaged in the high and very high class and 77.8% of the area was in the low and very low class. The interpretation of the results of the number of landslides in each risk class showed that 41 landslides were found in the low and very low risk class. As a result, due to the presence of elements at risk in the region, most of the region has low risk and very low risk. The results of this study help to focus management work in the sectors that have a lot of damage and reduce the waste of time and money.

Key words: *Maximum entropy, Vulnerability, ROC index, Landslide hazard.*

Acknowledgement

This article was done in cooperation with the General Directorate of Watershed Management and Natural Resources of Razavi Khorasan Province. The authors of this paper consider it necessary to express their sincere gratitude for the cooperation of this department in all stages of project implementation.



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

Ali Dastranj: Writing - original draft preparation, Software

Ebrahim Karimi Sangchini: Resources, Manuscript editing and investigation

Hamzeh Noor: Conceptualization, methodology