

تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافق ویکور

عادل سپهر* - استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد
ابوالفضل بهنیا فر - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد
عباسعلی محمدیان - دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه یزد
ابوالفضل عبداللهی - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه خوارزمی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۰۳/۰۵

چکیده

ناپایداری‌های دامنه‌ای، از جمله پدیده‌های معمول در بیشتر مناطق کوهستانی ایران است. در این میان یکی از مخاطره‌آمیزترین این ناپایداری‌ها، زمین لغزش است. هدف از این پژوهش، تهیه نقشه حساسیت‌پذیری دامنه‌های شمالی بینالود به زمین لغزش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توافق ویکور است. ابتدا پس از تهیه نقشه پایه محدود مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدهی‌های میدانی، نقشه عوامل مؤثر در حساسیت‌پذیری حوضه به زمین لغزش شامل شیب، فاصله از گسل، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، لیتولوژی، نوع خاک و بارش در محیط GIS تهیه شد. سپس ضریب اهمیت هر کدام از معیارهای مذکور در وقوع زمین لغزش، به کمک الگوریتم سلسله‌مراتبی AHP به دست آمد که معیارهای شیب، لیتولوژی و طبقات ارتفاعی بیشترین ضریب اهمیت را کسب کردند. سپس بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی ویکور، درجه سودمندی و پیشیمانی انتخاب گزینه‌های برتر (زیرحوضه‌ها)، مشخص و در پایان با محاسبه میزان شاخص بهینه ویکور (Q)، زیرحوضه‌ها برحسب درجه حساسیت‌پذیری به زمین لغزش در سه کلاس کیفی حساسیت‌پذیری کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی و رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که زیرحوضه‌های گلمکان، اسجیل و اندرزی بیشترین حساسیت‌پذیری و زیرحوضه‌های خیرآباد، اقبال و چایش دارای کمترین حساسیت‌پذیری به وقوع زمین لغزش هستند.

کلیدواژه‌ها: زمین لغزش، حساسیت‌پذیری، الگوریتم بهینه‌سازی توافق ویکور، دامنه‌های شمالی بینالود.

مقدمه

مخاطرات محیطی^۱ اعم از مخاطرات با منشأ اتمسفری و مخاطرات با منشأ زمینی، چنانچه جوامع انسانی را دچار چالش‌های اقتصادی و جانی کنند، جنبهٔ بلیه^۲ به خود خواهند گرفت. مخاطرات زمینی که عمدتاً به صورت کاتاستروفیک روی می‌دهند، می‌توانند در مقیاس کوچک اما با شدت زیاد، خسارت‌های اقتصادی و جانی به همراه داشته باشند. حرکات دامنه‌ای، از جمله مهم‌ترین مخاطرات زمینی در مناطق مستعد وقوع این پدیده به‌شمار می‌روند. زمین‌لغزش^۳ که یکی از مهم‌ترین حرکات دامنه‌ای است و همواره در سراسر جهان موجب مرگ‌ومیر سالانهٔ هزاران نفر و خسارت‌های سنگین مالی و اقتصادی به مناطق مسکونی می‌شود، از دسته مخاطرات زمینی با فراوانی وقوع بالا در ایران است و آثار آن در بسیاری از دامنه‌های نیم خشک تا مرطوب مستعد کشور دیده می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده، نشان می‌دهد که تا اوایل سال ۱۳۸۷، وقوع حدود ۲۵۹۰ زمین‌لغزه در کشور موجب مرگ ۱۶۲ نفر، تخریب ۱۷۶ باب خانه، ایجاد خسارات مالی به میزان ۱۸۶۶ میلیارد ریال، تخریب ۶۷۶۳ هکتار جنگل، تخریب ۱۷۰ کیلومتر راه ارتباطی و ایجاد رسوب سالانه به حجم ۹۶۳۸۰۷ متر مکعب شده است (کاردان، ۱۳۸۶).

دهال و همکاران (۲۰۰۸)، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش‌ها را شامل زمین‌شناسی سنگ بستر، توپوگرافی، ارتفاع، عمق و نوع خاک، کاربری زمین و ساختار هیدروگرافی معرفی کرده‌اند. همچنین کرمی و رجبی (۱۳۸۸)، بارش‌های شدید، زمین‌لرزه و فعالیت‌های آتشفشانی را از دسته متغیرهای اتفاقی در وقوع زمین‌لغزش‌ها در ایران برشمرده‌اند.

توپوگرافی کوهستانی ایران، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، وضعیت متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، افزایش جمعیت و فشار بر منابع طبیعی و تغییر کاربری در دهه‌های اخیر، شرایط طبیعی برای بروز طیفی گسترده از زمین‌لغزش‌ها را در کشور فراهم کرده است.

تا کنون روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و برآورد شدت و ارزیابی این پدیده ارائه شده که به‌طور کلی در روش‌های کیفی، نیمه‌کمی و کمی دسته‌بندی می‌شوند (لی و جونز، ۲۰۰۴). روش‌های مبتنی بر همبستگی متغیرهای مؤثر در زمین‌لغزش، مانند رگرسیون دو متغیره، چندمتغیره^۴ و لجستیک^۵، از جمله روش‌های کمی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شمرده می‌شوند. همچنین الگوریتم‌های فازی^۶، شبکهٔ مصنوعی^۷، روش‌های رتبه‌ای و نارتبه‌ای^۸ و برنامه‌ریزی خطی^۹، امروزه در توسعهٔ روش‌های کمی و نیمه‌کمی، برای بهینه‌سازی روابط و انتخاب دقیق متغیرها کمک شایانی کرده‌اند.

1. Environmental Hazards
2. Disaster
3. Landslide
4. Multi Variable Regression
5. Logistic Regression
6. Fuzzy Algorithm
7. Neural Network
8. Ranking and outranking Methods
9. Linear Programming (LP)

در ارتباط با کاربرد روش‌های مذکور در پژوهش‌های انجام‌یافته در سایر کشورها طی سال‌های اخیر، می‌توان به کارهای داوالیلو^۱ و همکاران (۲۰۱۲)، رگمی^۲ و همکاران (۲۰۱۲)، پلکانی^۳ و همکاران (۲۰۱۳)، معتمدی و لیانگ^۴ (۲۰۱۳)، آگون^۵ (۲۰۱۲)، فلاچیزمو^۶ و همکاران (۲۰۱۳)، کاوزوگلو^۷ و همکاران (۲۰۱۳)، دیاپ و همکاران (۲۰۱۰) اشاره داشت.

آیالو و یاماگیشی^۸ (۲۰۰۵) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی، نقشه حساسیت به زمین لغزش را در کوه‌های کاکودا - یاهیکو در مرکز ژاپن تهیه کردند و اظهار داشتند که شبکه‌های جاده، نقش اساسی در تعیین و توزیع زمین لغزش‌ها ایفا می‌کنند.

کامک و همکاران^۹ (۲۰۰۶) با استفاده از تجزیه آماری چندمتغیره در مرکز اسلوونی، نشان دادند که شیب، سنگ‌شناسی و نوع پوشش، نقش مهمی در حساسیت زمین لغزش ایفا می‌کنند. در ایران نیز مطالعات متنوعی صورت گرفته است که در ادامه به چند پژوهش انجام یافته در سال‌های اخیر اشاره می‌شود.

بیاتی خطیبی (۱۳۸۶) در پژوهشی به تعیین حساسیت بالقوه سطوح شیب‌دار به وقوع زمین لغزش در حوضه قرنقوچای، واقع در دامنه شرقی کوهستان سهند با استفاده از روش تعیین عامل ویژه پرداخت. نتایج وی نشان داد که محدوده خاکسترهای آتشفشانی و مارن‌ها که لغزش‌های بزرگ قدیمی نیز در گذشته روی آنها رخ داده، مساعدترین بستر را برای وقوع لغزش‌ها فراهم می‌کنند. همچنین در بخش‌هایی از حوضه مطالعاتی، کشت آبی همراه با آسفتگی شدید دامنه‌ها، به عمده‌ترین عامل تحریک‌کننده دامنه‌ها نسبت به وقوع لغزش‌ها تبدیل شده است.

محمدی و همکاران (۱۳۸۸) به اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین لغزش و تهیه نقشه خطر آن با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^{۱۰} در بخشی از حوضه آبخیز هراز پرداختند. نتایج نشان داد که سازندهای شمشک و پادگانه‌های آبرفتی، فاصله ۵۰۰ متری از جاده و ۴۰۰ متری از آبراهه، سوی شیب باختری، شیب ۱۵ تا ۵۰ درصد، ارتفاع ۱۰۵۵ تا ۲۱۰۰ متری و کاربری مسکونی و باغ - کشاورزی، بیشترین حساسیت را نسبت به زمین لغزش دارند.

موسوی خطیر و همکاران (۱۳۸۸)، نقشه حساسیت به وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز سجارود را با استفاده از رگرسیون لجستیک تهیه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که ۵۳ درصد از مساحت حوضه در منطقه با خطر بسیار کم، ۱۸/۳ درصد در منطقه کم‌خطر، ۲۱ درصد در منطقه با خطر متوسط و ۷/۷ درصد مساحت حوضه در منطقه پُرخطر قرار گرفته است.

1. J. G. Davalillo et al

2. Regmi et al

3. Pellicani et al

4. Motamedi and Liang

5. Akgun

6. Felicisimo et al

7. Kavzoglu et al

8. Ayalew & Yamagishi

9. Komac et al

10. Analytical Hierarchy Process (AHP)

زارع و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله‌مراتبی در حوضه آبخیز واز، به این نتیجه رسیدند که ۵۳/۳۴ درصد حوضه در کلاس خطر زیاد و ۲۰/۲۸ درصد در کلاس خطر خیلی زیاد قرار دارد که این امر نشان‌دهنده خطرپذیری بالای حوضه در برابر زمین‌لغزش است.

کریمی و همکاران (۱۳۹۰) نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام را با چهار روش ارزش اطلاعاتی^۱ (WINF)، تراکم سطح، تحلیل سلسله‌مراتبی سیستم‌ها و روش پیشنهادی گوپتا و جوشی^۲ (LNRF) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه کردند. نتایج نشان داد که روش ارزش اطلاعاتی نسبت به روش‌های دیگر، در تفکیک کلاس‌های خطر نتایج بهتری دارد. بنابراین آنها این روش را روش نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد کردند.

کریمی سنگچینی و همکاران (۱۳۹۱)، کارایی چهار مدل کمی و نیمه‌کمی، شامل روش‌های نیمه‌کمی AHP، ترکیب خطی وزنی (WLC)^۳ روش‌های کمی چندمتغیره گام‌به‌گام و لجستیک را در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه چهل‌چای استان گلستان مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل آماری دومتغیره وزن‌دهی با AHP با جمع کیفیت^۴ (QS) برابر ۳/۶۲۵ از کارایی بالاتری در مقایسه با سایر روش‌ها در پهنه‌بندی خطر برخوردار است. مدل‌های ترکیب خطی وزنی (WLC) با QS برابر ۲/۲۰۱۹، رگرسیون چندمتغیره لجستیک با QS ۱/۷۰۳ و رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام با QS برابر ۱/۶۲۷، به ترتیب در اولویت بعدی قرار گرفتند.

جوادی و همکاران (۱۳۹۱) کارایی روش‌های مورا، وارسون و رگرسیون چندمتغیره را در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز کن با یکدیگر مقایسه کردند. ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با بهره‌گیری از نمایه جمع کیفی (QS) و معیار ضریب همبستگی، حکایت از تناسب بیشتر نتایج مدل رگرسیون چندمتغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه داشت.

قهرمانی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، LNRF و FAHP^۵ در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز النگدره پرداختند که پس از مقایسه سه روش فوق، مدل به‌دست‌آمده از روش LNRF تطابق بیشتری با محیط مورد مطالعه نشان داد و به‌منزله مدل نهایی انتخاب شد.

روش‌های مبتنی بر نظریه مطلوبیت (UT)^۶ که مطلوبیت گزینه‌های مختلف را در چارچوب ماتریس تصمیم مقایسات و برپایه معیارهای ارزیابی بررسی می‌کنند، عمدتاً شامل روش‌های رتبه‌ای، نارته‌ای و بهینه‌سازی است. بسیاری از روش‌های برنامه‌ریزی خطی که به دنبال انتخاب گزینه‌های بهینه و اتخاذ تصمیم مناسب هستند نیز، به نوعی برپایه نظریه مطلوبیت عمل می‌کنند. بسیاری از پژوهش‌های انجام‌گرفته در ایران، به‌طور عمده روی روش‌های رتبه‌ای

1. Weight Information Nominal Factor
2. Landslide Nominal Risk Factor
3. Weight Linear Component
4. Quality Summation
5. Fuzzy Analytic Hierarchy Pro
6. Utility Theory (UT)

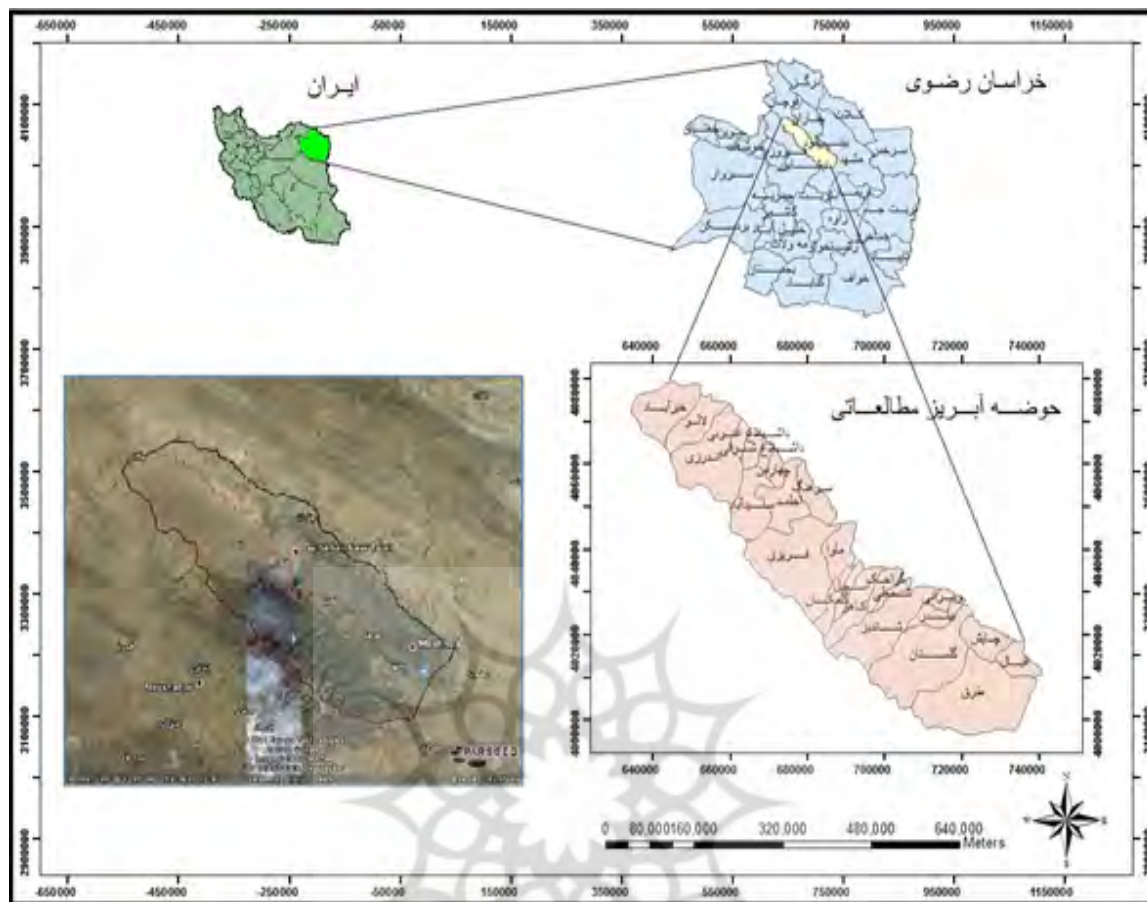
تصمیم‌گیری مانند AHP و روش‌های رتبه‌ای رگرسیون خطی متمرکز شده است که به برخی از کارهای انجام‌گرفته در سال‌های اخیر اشاره شد. اگرچه در ارتباط با استفاده از روش‌های نارته‌ای در مطالعه مخاطرات طبیعی، پژوهش‌های اندکی انجام‌گرفته است، اما در ارتباط با کاربرد روش‌های بهینه‌سازی توافقی و روش‌های نارته‌ای در بحث زمین‌لغزش در ایران و جهان، مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در این پژوهش، برای نخستین‌بار تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زیرحوضه‌های مورد مطالعه نسبت به وقوع پدیده زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور انجام شده است. روش ویکور یکی از روش‌های حل مسئله چندمعیاره است. در مسائلی با معیارهای نامتناسب و ناسازگار، به‌طوری که تصمیم‌گیرنده نیاز به راه‌حلی نزدیک به راه‌حل ایده‌آل دارد و تمام گزینه‌ها مطابق با معیارها مورد ارزیابی قرار گیرد، همچنین در شرایطی که فرد تصمیم‌گیرنده قادر به شناسایی و بیان برتری‌های یک مسئله در زمان شروع و طراحی آن نیست، این روش می‌تواند ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری باشد. هدف از این پژوهش تهیه نقشه حساسیت‌پذیری دامنه‌های شمالی بینالود در خراسان رضوی به‌وقوع زمین‌لغزش، با استفاده از روش بهینه‌سازی توافقی ویکور (VIKOR) بر پایه محاسبه حداکثر سودمندی و حداقل پشیمانی است. طبقه‌بندی حوضه برحسب استعداد و حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از روش بهینه‌سازی ویکور، برای نخستین‌بار است که در مطالعات مربوط به زمین‌لغزش دنبال می‌شود و نوآوری این پژوهش به‌شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مطالعاتی

گستره محدوده مورد مطالعه، دامنه‌های شمالی ارتفاعات زون بینالود در حوضه آبریز کشف‌رود با مساحت ۲۷۴۲/۹ کیلومترمربع است. این منطقه که بخش غربی حوضه بزرگ کشف‌رود را شامل می‌شود، در شمال شرق ایران و در استان خراسان رضوی قرار گرفته است. حد بالایی منطقه، خط‌الرأس بینالود و حد پایینی آن، مرز کوهستان و دشت (کنیک) است. محدوده مورد مطالعه بین مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. شکل ۱، موقعیت منطقه مطالعاتی را در ایران (استان خراسان رضوی) و روی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث نشان می‌دهد.

بلندترین نقطه ارتفاعی زون بینالود با نام کوه گودزد (کوه بینالود) ۳۱۷۰ متر ارتفاع دارد که محل تقسیم حوضه‌های آبریز بینالود شمالی و جنوبی است. حداقل ارتفاع در محدوده مورد مطالعه، ۹۶۷ متر از سطح دریا است که در زیرحوضه آبریز چایش واقع شده است. مهم‌ترین نقاط شهری که در داخل و پیرامون محدوده مطالعاتی واقع شده‌اند، شهرهای مشهد، چناران، طرقبه و شاندیز هستند. بر اساس تقسیمات هیدرولوژیکی، محدوده مطالعاتی از ۲۳ زیرحوضه آبریز تشکیل شده است که در شکل ۱ مشخص شده است.

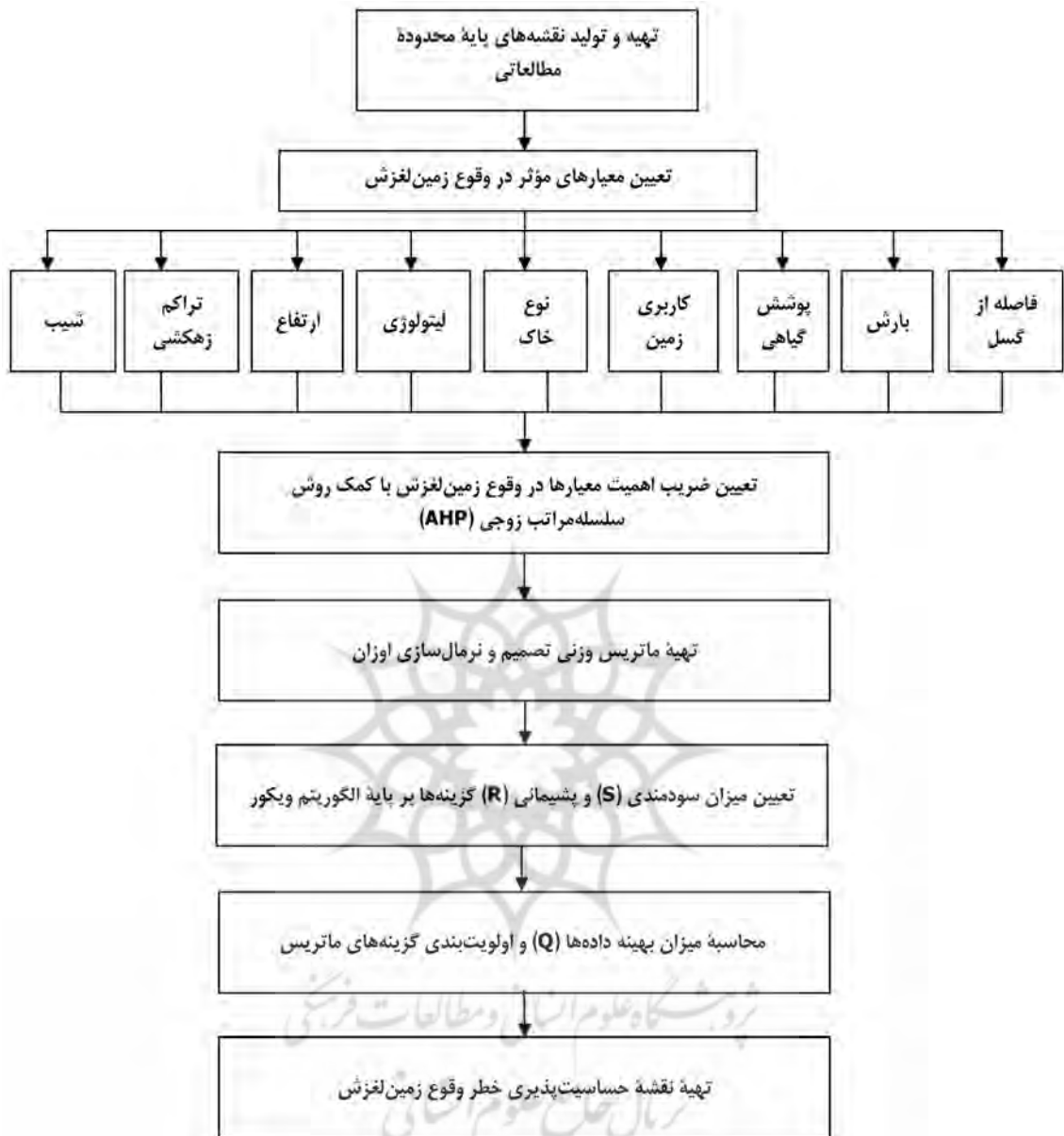


شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه در ارتفاعات بینالود شمالی و نسبت به شهرهای مشهد و چناران

روش کار

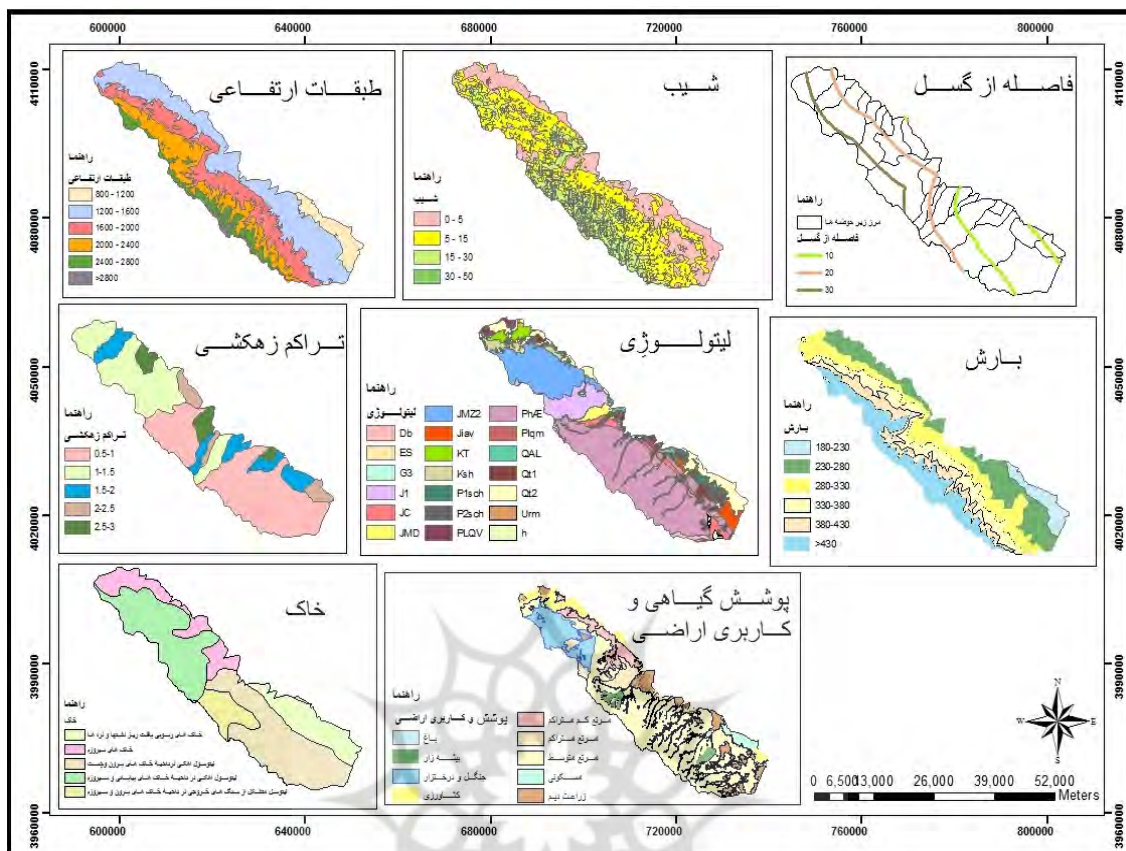
به منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش در حوضه‌های آبریز دامنه‌های شمالی بینالود، ابتدا پس از انجام عملیات میدانی و بازدید عملی و تهیه اطلاعات اولیه، مانند توپوگرافی (۱:۵۰۰۰۰۰)، زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰)، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای موجود، نقشه‌های پایه در محدوده مطالعاتی، شامل نقشه شیب، هیپسومتری و ژئومورفولوژی تهیه شد.

پس از تهیه اطلاعات و نقشه‌های پایه، پژوهش در دو مرحله انجام یافت. مرحله نخست را تعیین معیارهای اصلی مؤثر در استعداد مناطق به وقوع زمین لغزش و تهیه نقشه‌های معیارهای انتخابی مذکور تشکیل داده است. مرحله دوم، تعیین ضریب اهمیت معیارها و پیاده‌سازی الگوریتم ویکور برای رسیدن به نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش و طبقه‌بندی حوضه‌ها برحسب درجه حساسیت است. در شکل ۲، مراحل روش کار پژوهش حاضر نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار روش مطالعاتی انجام گرفته برای رسیدن به نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش

بنابراین ابتدا با توجه به شرایط منطقه، بازدیدهای میدانی و نظرات کارشناسی طی چندین مرحله، نه معیار اصلی در ارتباط با استعداد حوضه به زمین‌لغزش و نیز، مؤثر در وقوع پدیده مذکور در زیر حوضه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شد. پس از انتخاب معیارهای اصلی، در مرحله بعد نقشه‌های مربوط به هر کدام از معیارهای انتخابی برای وزن‌دهی و ارزیابی زیرحوضه‌ها در محیط GIS تهیه و ترسیم شد. شکل ۳، نقشه کیفی نه معیار انتخابی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش را در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد.



شکل ۳. نقشه کیفی نه معیار در نظر گرفته شده در استعداد و وقوع زمین لغزش حوضه بینالود

با توجه به اثر معیارها در وقوع زمین لغزش، معیارهای میزان پوشش گیاهی و فاصله از گسل دارای اثر کاهشی و هفت معیار دیگر دارای اثر افزایشی هستند. پس از تهیه نقشه معیارهای انتخابی، ضریب اهمیت معیارهای مذکور از نقطه نظر درجه اهمیت در وقوع زمین لغزش و حساسیت پذیری حوضه‌ها به این پدیده، به کمک الگوریتم سلسله‌مراتبی AHP تعیین شد. در جدول ۱، درجه اهمیت معیارهای انتخابی نشان داده شده است.

جدول ۱. درجه (ضریب) اهمیت معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش در حوضه مطالعاتی با کمک روش AHP

معیار	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
درجه (ضریب) اهمیت	۰/۰۲	۰/۳۰	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۲۲

گفتنی است که از بیان روش سلسله‌مراتبی AHP با توجه به مطالعات مختلف انجام شده در این مورد، پرهیز شده است. پس از تعیین ضریب اهمیت معیارها، ماتریس تصمیم اوزان برای انجام الگوریتم ویکور، براساس رابطه ۱ تهیه شد. همان‌طور که مشخص است، نه معیار در ارزیابی بیست‌وسه گزینه نقش دارند که معرف حوضه‌های آبریز منطقه مطالعاتی هستند.

$$D = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_9 \\ A_1 & \left[\begin{matrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{23} & \left[\begin{matrix} a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{matrix} \right] \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این پژوهش، به منظور وزن دهی گزینه‌ها بر اساس نقش هر معیار در گزینه مورد نظر (نقش هر عامل مؤثر در زمین لغزش زیرحوضه)، از بازه وزن دهی قطعی یک تا ده استفاده شده است؛ به گونه‌ای که وزن یک کمترین تأثیر و ده بالاترین تأثیر را در خطر زمین لغزش نشان می‌دهد.

پس از انجام وزن دهی و تهیه ماتریس وزنی، مقادیر ماتریس با استفاده از رابطه ۲ نرمال شدند. جدول ۲، مقادیر نرمال شده یا به گفته‌ای ماتریس وزنی نرمال شده را نشان می‌دهد.

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۲}$$

جدول ۲. مقادیر نرمال شده اوزان گزینه‌ها (زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی) بر اساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش

منطقه	طبقات	شیب	لیتولوژی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	خاک	فاصله از گسل
طرق	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵
گلستان	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰	۰/۰۵	۰/۰۵
شاندیز	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴
کاهو	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۴
اسجیل	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴
گلمکان	۰/۰۵۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۲
فریزی	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲
اخلمد	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴
سیدآباد	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲
لالو	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۲
خیرآباد	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲
اندرزی	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲
بیلدر	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۵
سرهنگ	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴
ماوا	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴
شمعلی	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۵
ویرانی	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۵
گراخک	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵
داشبلاغ غربی	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴
داشبلاغ شرقی	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۴
چهارمن	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴
چایش	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۵
اقبال	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۴

بعد از نرمال‌سازی و تهیه ماتریس نرمال وزنی (جدول ۳)، مقادیر سودمندی و پشیمانی براساس الگوریتم بهینه‌سازی ویکور تعیین و انجام گرفت. به همین دلیل برای اعمال الگوریتم ویکور، مراحل زیر روی ماتریس وزنی نرمال تهیه‌شده از مرحله قبل (جدول ۲) انجام شد.

تعیین مقدار مثبت و منفی ایده‌آل

بهترین و بدترین مقدار که به ترتیب f_j^* و f_j^- نامیده می‌شوند، از بین بیشترین و کمترین مقادیر نرمال‌شده برای هر معیار مطابق رابطه ۳ و ۴ به دست آمد.

$$f_j^* = \text{Max } f_{ij} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$f_j^- = \text{Min } f_{ij} \quad , \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{رابطه ۴})$$

این مقادیر برای منطقه مورد مطالعه به قرار جدول ۳ است.

جدول ۳. بیشترین و کمترین مقادیر نرمال‌شده هر یک از معیارها

معیار	طبقات ارتفاعی	شیب	لیتولوژی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	خاک	فاصله از گسل
f_j^*	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲
f_j^-	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۵

محاسبه مقدار سودمندی و تأسف معیارها

در این مرحله با توجه به مقادیر مثبت و منفی محاسبه‌شده در مرحله قبل، فاصله هر گزینه از راه حل ایده‌آل و سپس حاصل جمع آنها برای ارزش نهایی بر اساس روابط ۵ و ۶ محاسبه شد. به بیانی در این مرحله سودمندی^۱ و پشیمانی^۲ حاصل از انتخاب یک گزینه، به‌منزله رتبه برتر محاسبه می‌شود. مقادیر حداقل برای هر دو مقدار معرف کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل (گزینه برتر) است که کمترین پشیمانی و بیشترین سودمندی را به‌همراه دارد.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$R_i = \text{Max}_j [w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)] \quad (\text{رابطه ۶})$$

برترین رتبه بر اساس ارزش S_i و بدترین رتبه بر اساس ارزش R_i به دست می‌آید.

محاسبه شاخص ویکور Q_i

در نهایت پس از محاسبه مقادیر سودمندی و پشیمانی شاخص ویکور (Q_i) برای هر گزینه (زیرحوضه مطالعاتی) به صورت مجزا و براساس رابطه ۷ محاسبه شد.

$$Q_i = v \left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] + (1 - v) \left[\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right] \quad \text{(رابطه ۷)}$$

در این رابطه: $S^* = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^* = \min_i R_i$ و $R^- = \max_i R_i$ معرف تعداد گزینه‌ها (بیست و سه زیرحوضه مطالعاتی) است. برای مثال، S^- معرف بزرگترین عدد شاخص سودمندی برای هر گزینه دوم است. v وزن استراتژی اکثریت موافق معیار یا حداکثر مطلوبیت گروهی است. بنابراین هنگامی که مقدار v بزرگتر از $0/5$ باشد شاخص Q_i منجر به اکثریت موافق می‌شود و هنگامی که مقدار آن کمتر از $0/5$ می‌شود، شاخص Q_i بیانگر نگرش منفی اکثریت است، به طور کلی وقتی مقدار v برابر $0/5$ است، بیانگر نگرش توافقی متخصصان ارزیابی است. در این مقاله مقدار $v = 0/5$ در نظر گرفته شده است.

$$\left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] \quad \text{بیانگر موافقت اکثریت برای نسبت نام است.}$$

$$\left[\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right] \quad \text{بیانگر مخالفت اکثریت برای نسبت نام است.}$$

رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر Q_i

در این مرحله بر اساس مقادیر Q_i محاسبه شده در گام قبل، گزینه‌ها رتبه‌بندی و تصمیم بهینه در ارتباط با انتخاب گزینه برتر (حساسیت‌پذیری بالاتر به زمین لغزش) انجام گرفت؛ به گونه‌ای که در این مرحله مقادیر R ، S و Q در سه گروه برای هر گزینه تعیین و مشخص شد. در نهایت گزینه‌ای که در هر سه گروه مناسب شناخته شد، با عنوان گزینه برتر انتخاب شد. ترتیب قرارگیری گزینه‌ها با توجه به کاهش مقادیر R ، S و Q است. گفتنی است که در گروه Q گزینه‌ای که بتواند دو شرط زیر را برآورده کند، گزینه برتر انتخاب می‌شود:

الف) شرط ۱: اگر $A^{(1)}$ و $A^{(2)}$ به ترتیب اولین و دومین گزینه برتر در گروه Q و n ، بیانگر تعداد گزینه‌ها (بیست و سه زیرحوضه) باشند و رابطه ۸ برقرار باشد.

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq \frac{1}{n-1} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

ب) شرط ۲: گزینه $A^{(1)}$ باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S رتبه برتر شناخته شود.

زمانی که شرط اول برقرار نباشد، مجموعه‌ای از گزینه‌ها به صورت زیر انتخاب می‌شوند که گزینه‌های برتر هستند:

$$A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)} = \text{گزینه‌های برتر}$$

بیشترین مقدار M با توجه به رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < \frac{1}{n-1} \quad (\text{رابطه ۹})$$

زمانی که شرط دوم برقرار نباشد، دو گزینه $A^{(1)}$ و $A^{(2)}$ گزینه‌های منتخب برتر هستند.

جدول ۴ مقادیر گروه‌های سه‌گانه Q , R , و S را برای بیست‌وسه زیرحوضه مطالعاتی (گزینه‌ها) نشان می‌دهد.

جدول ۴. رتبه‌بندی مقادیر Q , R , و S برای زیرحوضه‌های مطالعاتی حوضه آبریز بینالود شمالی

رتبه	Q	رتبه	R	رتبه	S	منطقه
۲۳	۱	۱	۰/۳۰	۱	۰/۷۷	چاپش
۲۲	۰/۹۷	۲	۰/۳۰	۲	۰/۷۳	اقبال
۲۱	۰/۹۲	۳	۰/۳۰	۳	۰/۶۶	خیرآباد
۲۰	۰/۹۱	۴	۰/۳۰	۴	۰/۶۵	لالو
۱۹	۰/۸۳	۵	۰/۳۰	۵	۰/۵۵	بیلدر
۱۸	۰/۸۰	۶	۰/۳۰	۶	۰/۵۰	ماوا
۱۷	۰/۶۱	۷	۰/۲۲	۷	۰/۴۶	ویرانی
۱۴	۰/۳۷	۱۰	۰/۰۹	۱۰	۰/۴۶	سرهنگ
۱۵	۰/۳۷	۹	۰/۱۵	۹	۰/۳۲	شاندیز
۱۳	۰/۳۶	۱۱	۰/۰۹	۱۱	۰/۴۴	دا - شرقی
۱۲	۰/۳۴	۱۲	۰/۰۹	۱۲	۰/۴۱	دا - غربی
۱۶	۰/۳۳	۸	۰/۱۵	۸	۰/۲۶	فریزی
۱۱	۰/۲۹	۱۳	۰/۰۹	۱۳	۰/۳۴	چهارمن
۹	۰/۲۵	۱۵	۰/۰۸	۱۵	۰/۳۱	اخلمد
۶	۰/۲۱	۱۸	۰/۰۸	۱۸	۰/۲۸	گلستان
۵	۰/۱۹	۱۹	۰/۰۸	۱۹	۰/۲۶	طرق
۱۰	۰/۱۹	۱۴	۰/۰۹	۱۴	۰/۲۲	کاهو
۴	۰/۱۹	۲۰	۰/۰۸	۲۰	۰/۲۵	شمعلی
۳	۰/۱۸	۲۱	۰/۰۸	۲۱	۰/۲۳	گراخک
۸	۰/۱۱	۱۶	۰/۰۸	۱۶	۰/۱۳	سیدآباد
۷	۰/۱۱	۱۷	۰/۰۸	۱۷	۰/۱۳	اندرزی
۲	۰/۰۰۹	۲۲	۰/۰۴	۲۲	۰/۱۰	اسجیل
۱	۰/۰۰۷	۲۳	۰/۰۴	۲۳	۰/۰۹	گلمکان

همان‌گونه که بیان شد، ترتیب قرارگیری گزینه‌ها با توجه به کاهش مقادیر Q، R و S است؛ به طوری که کمترین مقدار Q که در آخرین ردیف ترتیب‌بندی جدول شماره ۴ جای گرفته است، بالاترین رتبه ارزیابی از حیث حساسیت‌پذیری به زمین‌لغزش را خواهد داشت.

با توجه به مقادیر R، S و Q در جدول ۴، گزینه‌ها در سه گروه مرتب شدند و در نهایت گزینه‌ای که در هر سه گروه گزینه برتر شناخته شده است، به‌عنوان برترین گزینه انتخاب شد.

پس از تعیین رتبه Q و دسته‌بندی مقادیر R و S برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زیرحوضه‌های مطالعاتی به زمین‌لغزش برپایه مقادیر شاخص بهینه‌سازی ویکور (Q)، مناطق در سه کلاس کیفی حساسیت‌پذیری کم، متوسط و حساسیت‌پذیری زیاد طبقه‌بندی شدند (جدول ۵). در نهایت براساس طبقات حساسیت و مقادیر کمی Q، نقشه حساسیت‌پذیری منطقه مطالعاتی به زمین‌لغزش در محیط GIS تهیه شد.

جدول ۵. کلاس‌بندی کمی و کیفی درجه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش

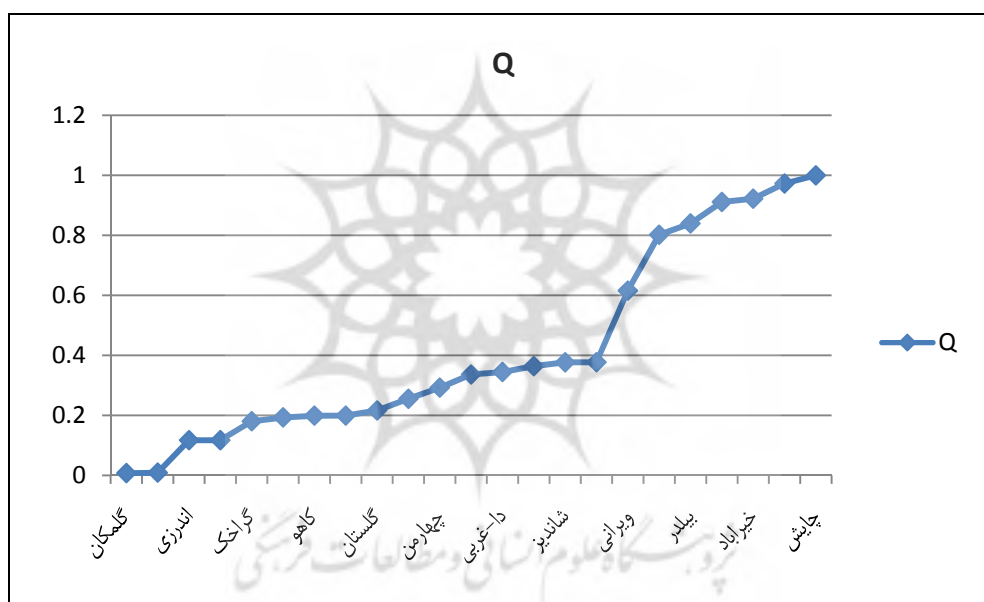
مقدار کمی ویکور (Q)	کلاس (طبقه)	درجه حساسیت‌پذیری
> 0.6	I	کم
$0.2 - 0.6$	II	متوسط
< 0.2	III	زیاد

یافته‌های پژوهش

از بین نه عامل مؤثر در حساسیت‌پذیری حوضه به لغزش، هفت معیار (شیب، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، بارش، نوع خاک و لیتولوژی) دارای اثر فزاینده و دو معیار (فاصله از گسل و پوشش گیاهی) دارای اثر کاهنده در استعداد حوضه به زمین‌لغزش هستند. پس از محاسبه مجموع اوزان معیارها با اثر افزایشی برای هر زیرحوضه مطالعاتی، مشخص شد که زیرحوضه‌های اسجیل، گلکان، اخمد و اندرزی، بیشترین مقدار و زیرحوضه‌های خیرآباد، چایش و اقبال دارای کمترین مقدار هستند. به‌گفته‌ای زیرحوضه‌های اسجیل، گلکان، اخمد و اندرزی از بیشترین حساسیت‌پذیری به وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در زیرحوضه‌های خیرآباد، چایش و اقبال حداقل است.

نتایج بررسی گروه‌بندی شاخص ویکور (Q)، سودمندی (S) و پشیمانی (R) نشان داد که زیرحوضه گلکان در حوضه آبریز مطالعاتی، دارای بالاترین درجه حساسیت نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. مطالعه نقشه‌های معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش این حوضه نشان می‌دهد که نزدیکی به گسل و میزان بارش، زمینه استعداد حوضه گلکان را نسبت به زمین‌لغزش فراهم کرده است. همچنین پس از حوضه گلکان، زیرحوضه‌های اسجیل و اندرزی، به‌ترتیب با مقادیر شاخص ویکور $Q = 0.09$ و $Q = 0.1$ ، از استعداد زیاد یا درجه حساسیت‌پذیری بالا نسبت به وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. همان‌طور که نمودار تغییرات کمی شاخص ویکور (Q) در شکل ۴ نشان می‌دهد، توان و استعداد یا به بیانی، حساسیت حوضه به زمین‌لغزش با افزایش میزان Q کاهش می‌یابد. با این وصف، همان‌طور که در روند افزایشی شاخص ویکور مشخص است، حوضه چایش با حداکثر شاخص بهینه‌سازی (Q) و حداکثر فاصله از مقدار ایده‌آل، دارای پایین‌ترین

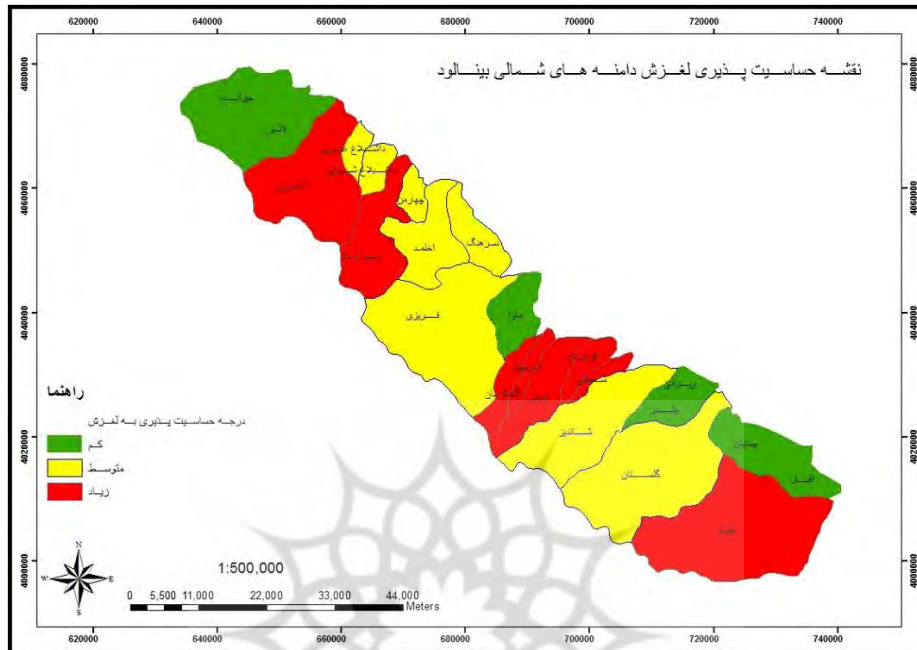
درجه حساسیت یا استعداد نسبت به وقوع زمین لغزش است. بررسی نقشه‌های تهیه‌شده عوامل ارزیابی، مشخص می‌کند که علت این امر به وضعیت خاک و درجه شیب این حوضه برمی‌گردد که زمینه بروز زمین لغزش را کاهش داده است. مطالعات انجام شده میدانی نشان داد که طبقات شیب ۵ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ درجه، شیب‌های بحرانی برای وقوع زمین لغزش‌ها و افزایش درجه حساسیت حوضه هستند. در حوضه چایش، تنها حدود ۵ درصد از مساحت حوضه در شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه قرار دارد، در حالی که در حوضه گلمکان، بیش از ۳۵ درصد مساحت حوضه در شیب‌های ۵ تا ۱۵ و همین مقدار درصد در شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه واقع شده است. به‌گفته‌ای در حدود ۷۰ درصد حوضه را محدوده شیب‌های بحرانی تشکیل می‌دهد و این امر، یکی از عوامل اصلی در حساسیت و استعداد بالای این حوضه در مقابل حساسیت‌پذیری پایین حوضه چایش است. نتایج این یافته‌ها با نتایج بهنیافر و همکاران (۱۳۸۸) همخوانی دارد.



شکل ۴. رتبه‌بندی مناطق بر اساس حساسیت به لغزش

با توجه به نقشه حساسیت‌پذیری دامنه‌های شمالی بینالود که در شکل ۵ نشان داده شده است، تنها کمتر از ۲۵ درصد از مساحت حوضه مطالعاتی را زیر حوضه‌هایی با حساسیت‌پذیری پایین یا استعداد کم نسبت به وقوع زمین لغزش تشکیل می‌دهند، آنچه به شرایط توپوگرافی مناسب، پوشش گیاهی و شرایط هیدروژئومورفیک این مناطق در بالا بردن توان این زیرحوضه‌ها در برابر زمین لغزش مربوط می‌شود (شکل ۵). در مقابل در حدود ۷۵ درصد از مساحت حوضه را زیرحوضه‌هایی با شرایط حساس‌پذیری بالا و متوسط نسبت به وقوع زمین لغزش احاطه کرده‌اند. زیرحوضه‌هایی چون طوق، گلمکان و کاهو با داشتن استعداد بالا در زمین لغزش، از آنجاکه مناطق مسکونی و روستایی را در دل خود جای داده‌اند، نیاز به مدیریت و توجه بیشتری در مدیریت بحران و ریسک زمین لغزش دارند. متأسفانه، تغییرات شدید کاربری اراضی و نابودی پوشش گیاهی در سال‌های اخیر که به دنبال شهرنشینی و توسعه مناطق گردشگری ایجاد شده است، این حوضه‌ها را به کانون‌های بحرانی زمین لغزش در حوضه بینالود تبدیل کرده است (شکل ۶).

حفظ پوشش گیاهی، جلوگیری از تغییرات کاربری اراضی، روش‌های بازسازی و افزایش توان رطوبتی خاک و تثبیت شیب در دامنه‌های حساسیت‌پذیر حوضه مطالعاتی توصیه می‌شود.



شکل ۵. نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش دامنه‌های شمالی بینالود



شکل ۶. تحریک دامنه‌ها از طریق توسعه ساخت‌وسازها در دامنه‌های شمالی بینالود

بحث و نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌ها به‌طور ساده از عملکرد نیروی گرانش زمین بر دامنه‌ها ناشی می‌شوند و تا زمانی که مقاومت توده‌سنگ یا خاک مساوی یا بزرگتر از نیروی گرانش باشد، نیروها در حال تعادل هستند و حرکتی رخ نمی‌دهد. به‌دیگر سخن، زمین‌لغزش را می‌توان نمود تغییر تعادلی سطوح شیب‌دار، به‌دنبال اغتشاشات محیطی وارد بر ژئوسیستم تلقی کرد. پایداری و حفظ شرایط تعادلی در برابر این نیروی وارده، به اکولوژی و ساختار هیدروژئومورفولوژیکی سطوح برمی‌گردد. در این پژوهش برای نخستین‌بار از روش بهینه‌سازی توافقی ویکور، برای بررسی و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری مناطق به زمین‌لغزش استفاده شد. این پژوهش در دامنه‌های شمالی ارتفاعات بینالود در خراسان رضوی انجام یافته است. پس از بررسی‌های میدانی و انتخاب معیارهای مؤثر در حساسیت دامنه‌ها به زمین‌لغزش، الگوریتم ویکور برای بررسی درجه حساسیت‌پذیری مناطق به زمین‌لغزش انجام و مشخص شد که زیرحوضه گلمکان در حوضه آبریز مطالعاتی، دارای بالاترین درجه حساسیت نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. همچنین حوضه چایش با حداکثر شاخص بهینه‌سازی (Q) و حداکثر فاصله از مقدار ایده‌آل، دارای پایین‌ترین درجه حساسیت یا استعداد نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. بررسی نقشه حساسیت‌پذیری حوضه به زمین‌لغزش و بازدهی‌های میدانی، مؤید کارایی مناسب الگوریتم ویکور در رتبه‌بندی و درجه استعداد حوضه‌ها به زمین‌لغزش بود. نتایج این پژوهش و روش پیشنهادی استفاده شده، می‌تواند در مطالعات بعدی راه‌گشا و نیز، مورد ارزیابی و مقایسه با سایر روش‌های برآورد حساسیت زمین‌لغزش قرار گیرد.

منابع

- بهینانفر، الف؛ قنبرزاده، ه؛ منصورى دانشور، م. ر. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ناپایداری دامنه‌ای به روش‌های AHP و احتمال در حوضه آبریز رودخانه کنگ، دامنه‌های شمالی بینالود، مجله علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، سال نهم، شماره ۲۷، صص. ۷۸-۵۵.
- بیاتی خطیبی، م. (۱۳۸۶). تعیین حساسیت بالقوه سطوح شیب‌دار در حوضه‌های کوهستانی نسبت به وقوع زمین‌لغزش‌ها با استفاده از روش تعیین عامل ویژه، مطالعه موردی: حوضه قرنقوچای واقع در دامنه شرقی کوهستان سهند (آذربایجان شرقی)، فصلنامه مدرس علوم انسانی، سال یازدهم، شماره ۴، صص. ۵۵-۲۹.
- جوادی، م. ر؛ طهرانی پور، ه؛ غلامی، ش. ع؛ فتاحی اردکانی، م. ع. (۱۳۹۱). مقایسه روش‌های مورا وارسون و رگرسیون چندمتغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز کن، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، سال سوم، شماره ۵، صص. ۱۰۴-۹۲.
- زارع، م؛ احمدی، ح؛ غلامی، ش. (۱۳۹۰). پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های عامل اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله‌مراتبی در حوضه آبخیز واز، مجله علمی - پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال پنجم، شماره ۱۷، صص. ۲۲-۱۵.
- شادفر، ص؛ یمانی، م؛ نمکی، م. (۱۳۹۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و LNRF در حوضه چالکرو، مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، سال سوم، شماره ۱، صص. ۴۷-۴۰.

- قنبرزاده، ه.، بهینانفر، الف. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش‌ها در ارتفاعات حوضه آبریز کال شور شهرستان نیشابور، مجله علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، سال نهم، شماره ۲۸، صص. ۱۲۳-۱۰۳.
- قهرمانی، ن.؛ خاشعی سیوکی، ع.؛ دخیلی، ر. (۱۳۹۱). بررسی روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، LNRF، FAHP در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز النگ دره)، مجله سنجش از دور و GIS ایران، سال چهارم، شماره ۱، صص. ۶۵-۷۹.
- کریمی، ف.؛ رجیبی، م. (۱۳۸۸). بررسی خطر زمین‌لغزش و تحلیل ریسک‌پذیری آن در نواحی روستایی، مطالعه موردی: دامنه شمالی توده کوهستانی سهند، جغرافیا (نشریه علمی - پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، سال ششم، شماره ۱۸ و ۱۹، صص. ۱۵۴-۱۳۹.
- کریمی سنگچینی، الف.؛ اونق، م.؛ سعدالدین، الف. (۱۳۹۱). مقایسه کارایی چهار مدل کمی و نیمه‌کمی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چهل چای، استان گلستان، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، سال نوزدهم، شماره اول، صص. ۱۹۶-۱۸۳.
- کریمی، ح.؛ نادری، ف.؛ مرشدی، الف.؛ نیک سرشت، م. (۱۳۹۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چرداول با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال هفتم، شماره ۴، صص. ۳۳۲-۳۱۹.
- کاردان، ر. (۱۳۸۶). گزارش فهرست زمین‌لغزش‌های کشور، گروه مطالعات امور زمین‌لغزش‌های سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور.
- محمدی، م.؛ مرادی، ح. ر.؛ فیض‌نیا، س.؛ پورقاسمی، ح. ر. (۱۳۸۸). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و تهیه نقشه خطر آن با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز هراز)، مجله علوم زمین، سال نوزدهم، شماره ۷۴، صص. ۳۲-۲۷.
- موسوی خطیر، س. ز.؛ کاویان، ع. الف.؛ سلیمانی، ک. (۱۳۸۹). تهیه نقشه حساسیت به‌وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سجاورد با استفاده از رگرسیون لجستیک، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال چهاردهم، شماره ۵۳، صص. ۹۹-۱۱۱.
- Akgun, A., 2012, A Comparison of Landslide Susceptibility Maps Produced by Logistic Regression, Multi-Criteria Decision, and Likelihood Ratio Methods: A Case Study at İzmir, Turkey, *Landslide*, Vol. 9, No. 1, PP. 93-106.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., Kano, T., 2005, **Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-Based Susceptibility Mapping with Comparisons of Results from Two Methods and Verifications**, *Engineering Geology*, Vol. 81, No.4, PP. 432-445.
- Dahal, R. K., Hasegava, Sh., Nonoura, A., Yamanka, M., Dhakal, S., Pauudyal, P., 2008, **Predictive Modeling of Rainfall-Induced Landslide Hazard in the Lesser Himalaya of Nepal Based on Weights of Evidence**, *Geomorphology*, Vol. 102, No. 3-4, PP. 496-510.
- Davalillo, J.G., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T., Álvarez-Fernández, I., 2012, **DinSAR Analysis of ALOS PALSAR Images for the Assessment of Very Slow Landslides: the Tena Valley Case Study**, *Landslide*, DOI 10.1007/S10346-012-0379-8.
- Diop, S., Forbes, C., Chiliza, G.S., 2010, **Landslide Inventorization and Susceptibility Mapping in South Africa**, *Landslide*, Vol. 7, No. 2, PP. 207-210.

- Felicísimo, A., Cuartero, A., Remondo, J., Quirós, E., 2013, **Mapping Landslide Susceptibility with Logistic Regression, Multiple Adaptive Regression Splines, Classification and Regression Trees, and Maximum Entropy Methods: A Comparative Study**, Journal of Landslide, Vol. 10, No. 2, PP.175-189.
- Kavzoglu, T., Kutlug Sahin, E., Colkesen, E., 2013, **Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis, Support Vector Machines, and Logistic Regression**, Landslide, DOI 10.1007/S10346-013-0391-7.
- Komac, M., 2006, **A Landslide Susceptibility Model Using the Analytical Hierarchy Process Method and Multivariate Statistics in Perialpine, Slovenia**, Geomorphology, Vol. 74, No. 1-4, PP. 17-28.
- Lee, E. M. and Jones. D. K. C., 2004, **Landslide Risk Assessment**, Thomas Telford, London.
- Motamedi, M., Liang, R.Y., 2013, **Probabilistic Landslide Hazard Assessment Using Copula Modeling Technique**, Journal of Landslide, DOI 10.1007/S10346-013-0399-Z.
- Pellicani, R., Van Westen, C. J., Spilotro, G., 2013, **Assessing Landslide Exposure in Areas with Limited Landslide Information**, Landslide, DOI 10.1007/S10346-013-0386-4.
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., McDonald, E.V., Vitek, J.D., 2012, **A Comparison of Logistic Regression-Based Models of Susceptibility to Landslides in Western Colorado, USA**, Landslide, DOI 10.1007/S10346-012-0380-2.

