

ارزیابی خطر ریسک زمین لغزش حوضه آبخیز طالقان رود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور

مژگان انتظاری^۱ - استادیار ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

فاطمه خدادادی - دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

اکبر رستمی - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۸ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱/۱۷

چکیده

ناپایداری‌های دامنه‌ای، از جمله پدیده‌های معمول در بیشتر مناطق کوهستانی ایران است. در این میان یکی از مخاطره‌آمیزترین ناپایداری‌ها، زمین لغزش است. هدف از این پژوهش، تهیه نقشه حساسیت پذیری در زیرحوضه‌های طالقان رود به زمین لغزش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور است. ابتدا پس از تهیه نقشه پایه محدودۀ مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی، نقشه عوامل مؤثر در حساسیت پذیری 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 هرکدام از معیارهای مذکور در وقوع زمین لغزش، به کمک الگوریتم سلسله مراتبی 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 پشیمانی انتخاب گزینه‌های برتر (زیرحوضه‌ها)، مشخص شد. در پایان با محاسبه میزان شاخص بهینه ویکور، برحسب درجه حساسیت پذیری به زمین لغزش، زیرحوضه‌ها در ۳ کلاس کیفی حساسیت پذیری کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد زیر حوضه‌های زیدشت ۱، ۲ و دونبولید از بیشترین حساسیت پذیری به وقوع زمین لغزش برخوردارند و حساسیت به وقوع زمین لغزش در زیر حوضه‌های شهرک، ناویزک و حسنجان حداقل است.

کلیدواژه‌ها: حساسیت پذیری، ناپایداری دامنه‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی، AHP، طالقان رود.

۱. 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 مخاطرات محیطی به شمار می‌روند. زمین‌لغزش که یکی از مهم‌ترین حرکات دامنه‌ای است و همواره در سراسر جهان موجب مرگ و میر سالانه 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.

لغزش عبارت است از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها. زمین‌لغزش از جمله مخاطرات طبیعی است که همه‌ساله خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه‌خیز به همراه دارد. از آنجاکه پیش‌بینی زمان رخداد زمین‌لغزش‌ها از توان علم و دانش فعلی بشر خارج می‌باشد، لذا با شناسایی مناطق حساس به زمین‌لغزش و رتبه‌بندی کردن آن می‌توان تا حدودی از خطر ناشی از بروز زمین‌لغزش جلوگیری نمود.

تاکنون روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و برآورد شدت و ارزیابی این پدیده ارائه شده که به‌طور کلی در روش‌های کیفی، نیمه کمی و کمی دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های مبتنی بر همبستگی متغیرهای مؤثر در زمین‌لغزش، مانند رگرسیون دو متغیره، چند متغیره و لجستیک، از جمله روش‌های کمی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شمرده می‌شوند (لیوجونز، ۲۰۰۴: ۱۵۰).

در ارتباط با کاربرد روش‌های مذکور، در پژوهش‌های انجام یافته در سایر کشورها طی سال‌های اخیر، می‌توان به کارهای پلیکانی و همکاران (۲۰۱۳: ۴)، معتمدی و لیانگ (۲۰۱۳: ۳۹۹)، کاوزوگلو و همکاران (۲۰۱۳: ۷)، فلاچیزمو و همکاران (۲۰۱۳: ۱۸۰)، آکون^۳ (۲۰۱۲: ۱۰۵)، داوالیلو^۴ و همکاران (۲۰۱۲: ۳۷۹)، رگمی^۵ و همکاران (۲۰۱۲: ۲)، دیاپ^۶ و همکاران (۲۰۱۰: ۲۹۰) اشاره داشت.

کامک و همکاران (۲۰۰۶: ۲۵) با استفاده از تجزیه آماری چند متغیره در مرکز اسلونی، نشان دادند که شیب، سنگ‌شناسی و نوع پوشش، نقش مهمی در حساسیت زمین‌لغزش ایفا می‌کنند.

1 Environmental Hazards

2 Disaster

3 Akgun

4 Davalillo

5 Regmi

6 Diop

آیالو^۱ و یاماگیشی^۲ (۲۰۰۵: ۴۴۰) 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.

در ایران نیز مطالعات متنوعی صورت گرفته، که به چند پژوهش انجام یافته در سال‌های اخیر اشاره می‌شود. فتوحی و کیایی (۱۳۹۳: ۱۱۷) در بررسی مدیریت بحران و ارزیابی ریسک شهر قاین بر اساس مدیریت ریسک به این نتیجه رسیدند که ۴۷/۴۴ درصد از محدوده مورد مطالعه دارای وضعیت با ریسک کم و ۲۶/۱۴ درصد دارای وضعیت با ریسک متوسط و ۲۶/۴ درصد در شرایط با ریسک بالا قرار دارد. سپهر و همکاران (۱۳۹۲: ۳۵)، پژوهشی با عنوان تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور انجام دادند و در آن خطر ریسک در زیر حوضه‌های مختلف را تعیین نموده‌اند.

خالدی و همکاران (۱۳۹۱: ۶۵)، عامل‌های مؤثر در رویداد زمین لغزش و پهنه‌بندی آن با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در محیط GIS را با مطالعه موردی حوضه آبخیز طالقان انجام دادند و نتیجه گرفتند که متغیر فاصله از گسل مهم‌ترین عامل مؤثر در رویداد زمین لغزش حوضه است.

زارع و همکاران (۱۳۹۰: ۲۰) در مطالعه پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله مراتبی 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 نشان دهنده خطر پذیری بالای حوضه در برابر زمین لغزش است.

موسوی خطیر و همکاران (۱۳۸۹: ۱۰۵)، 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، ۳/۱۸ درصد در منطقه کم خطر، ۲۱ درصد در منطقه با خطر متوسط و ۷/۷ درصد مساحت حوضه در منطقه پر خطر قرار گرفته است.

محمدی و همکاران (۱۳۸۸: ۳۰) به اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین لغزش و تهیه نقشه خطر آن با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و فرایند تحلیل سلسله مراتبی 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.

1 Ayalew

2 Yamagishi

بیاتی خطیبی (۱۳۸۶: ۵۳) در پژوهشی به تعیین حساسیت بالقوه سطوح شیب دار 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 آشفستگی شدید دامنه‌ها، به عمده‌ترین عامل تحریک کننده دامنه‌ها نسبت به وقوع لغزش‌ها تبدیل شده است.

بسیاری از پژوهش‌های انجام گرفته در ایران، به‌طور عمده روی روش‌های رتبه‌ای تصمیم‌گیری مانند AHP و روش‌های رتبه‌ای رگرسیون خطی متمرکز شده است که به برخی از کارهای انجام گرفته در سال‌های اخیر اشاره شد. اگرچه در ارتباط با استفاده از روش‌های نارته‌ای در مطالعه مخاطرات طبیعی، پژوهش‌های اندکی انجام گرفته است، اما در ارتباط با کاربرد روش‌های بهینه‌سازی توافقی و روش‌های نارته‌ای در بحث زمین‌لغزش در ایران و جهان، مطالعات اندکی صورت گرفته است.

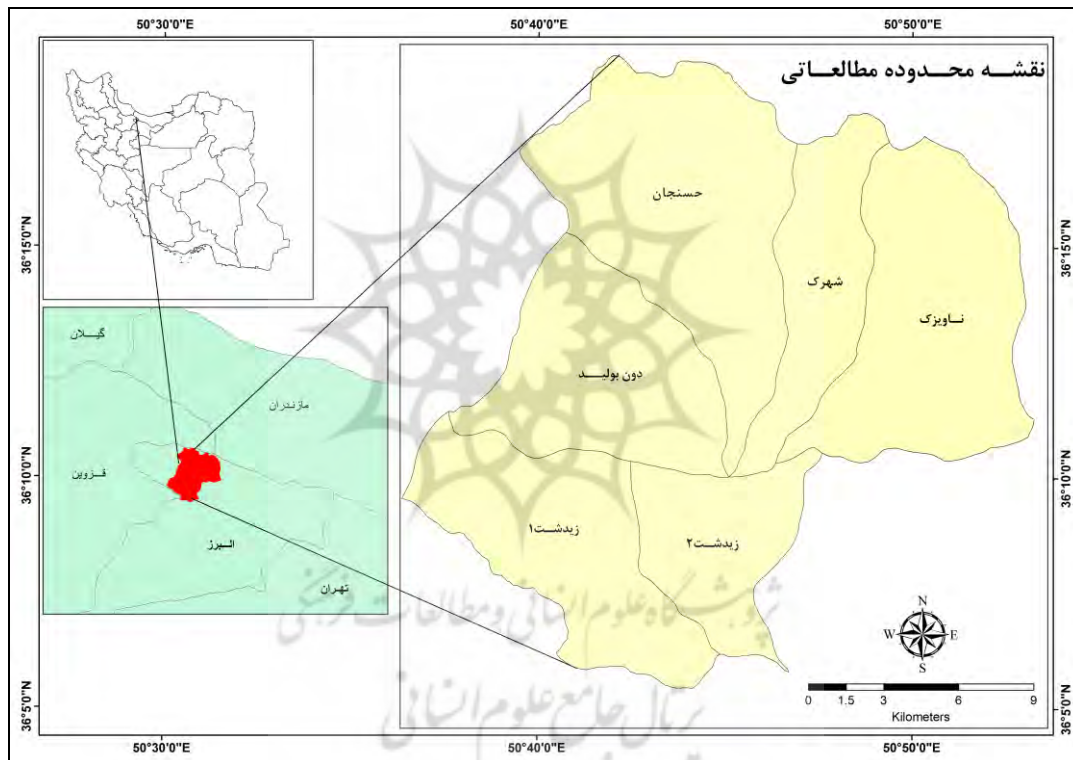
بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که عمده مطالعات انجام شده در زمینه پهنه‌بندی خطر لغزش، انجام گرفته و توجه کمتری به پهنه‌بندی ریسک لغزش شده است. در این پژوهش با استفاده از یکی از روش‌های نارته‌ای با عنوان روش بهینه‌سازی توافقی ویکور^۱ (VIKOR) که بر پایه محاسبه حداکثر سودمندی و حداقل پشیمانی است، نقشه حساسیت پذیری زیر حوضه‌های مورد مطالعه نسبت به وقوع پدیده زمین‌لغزش تهیه گردیده است. طبقه‌بندی حوضه برحسب استعداد و حساسیت پذیری زمین‌لغزش با استفاده از روش بهینه‌سازی ویکور، جزء موارد نخستین است که در مطالعات مربوط به زمین‌لغزش دنبال می‌شود و نوآوری این پژوهش به شمار می‌رود. روش ویکور یکی از روش‌های حل مسئله چند معیاره است؛ در مسائلی با معیارهای نامتناسب و ناسازگار، به‌طوری‌که تصمیم‌گیرنده نیاز به راه‌حلی نزدیک به راه‌حل ایده آل دارد و تمام گزینه‌ها مطابق با معیارها مورد ارزیابی قرارگیرد، 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.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز طالقان که یکی از زیر حوضه‌های مهم حوضه آبخیز سفیدرود به شمار می‌رود و در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان قزوین و در بخش شمال‌غربی در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از تهران واقع شده است. این حوضه بین دو عرض ۳۶ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۶ درجه ۱۹

1 Visekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (in Serbian) = Multi criteria optimization and compromise solution (in English)

دقیقه شمالی و بین دو طول جغرافیایی ۵۰ درجه، ۳۶ دقیقه تا ۵۰ درجه ۵۴ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). وسعت محدوده مورد مطالعه ۳۷۴/۹۲ کیلومترمربع می‌شود. ارتفاع متوسط حوضه ۲۳۰۷ متر از سطح دریا (ارتفاع حداکثر ۳۹۹۳ و حداقل ۱۶۹۳ متر) است. رودخانه طالقان در مرکز این حوضه از گردنه عسلک در غرب کندوان سرچشمه می‌گیرد و به سمت غرب در جریان است این رودخانه پس از دریافت شاخه‌ای پرآبی مانند رودهای علی‌زان - مهران خجیره حسنجون و اورازان و... طی چندین کیلومتر به رودخانه الموت می‌پیوندد و پس از آن با نام رودخانه شاهرود به دریاچه سد سفیدرود می‌ریزد. میانگین بارش سالانه حوضه آبخیز طالقان ۶۶۰/۴۱ میلی‌متر و دمای سالانه آن نیز ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لذا براساس طبقه‌بندی دومارتن آب‌وهوای حوضه طالقان در گروه نیمه‌مرطوب قرار می‌گیرد.

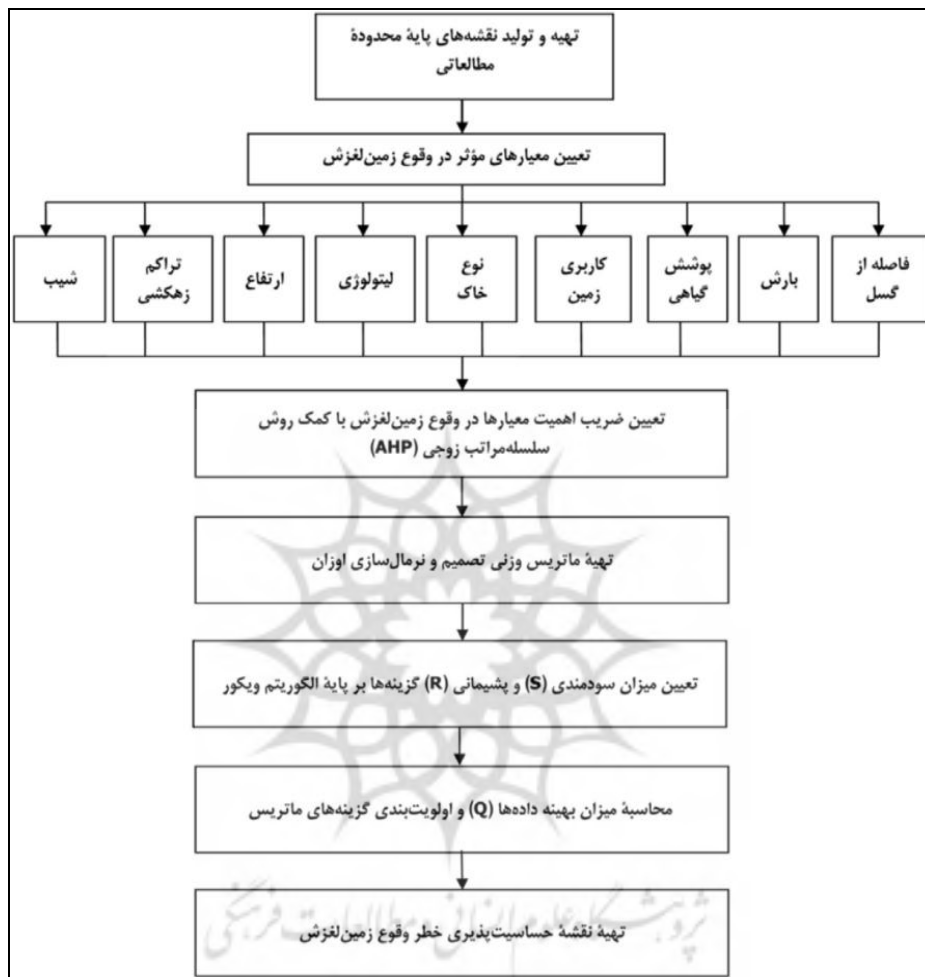


شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز طالقان رود

۳. مواد و روش‌ها

به‌منظور تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش در حوضه‌های آبخیز طالقان رود، پس از تهیه اطلاعات اولیه، مانند توپوگرافی (۱:۵۰۰۰۰)، زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰)، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای موجود، نقشه‌های پایه در محدوده مطالعاتی، شامل نقشه شیب، خاکشناسی و ژئومرفولوژی 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 حساسیت پذیری زمین لغزش و طبقه‌بندی حوضه‌ها برحسب درجه حساسیت است. شکل ۲ مراحل روش کار پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

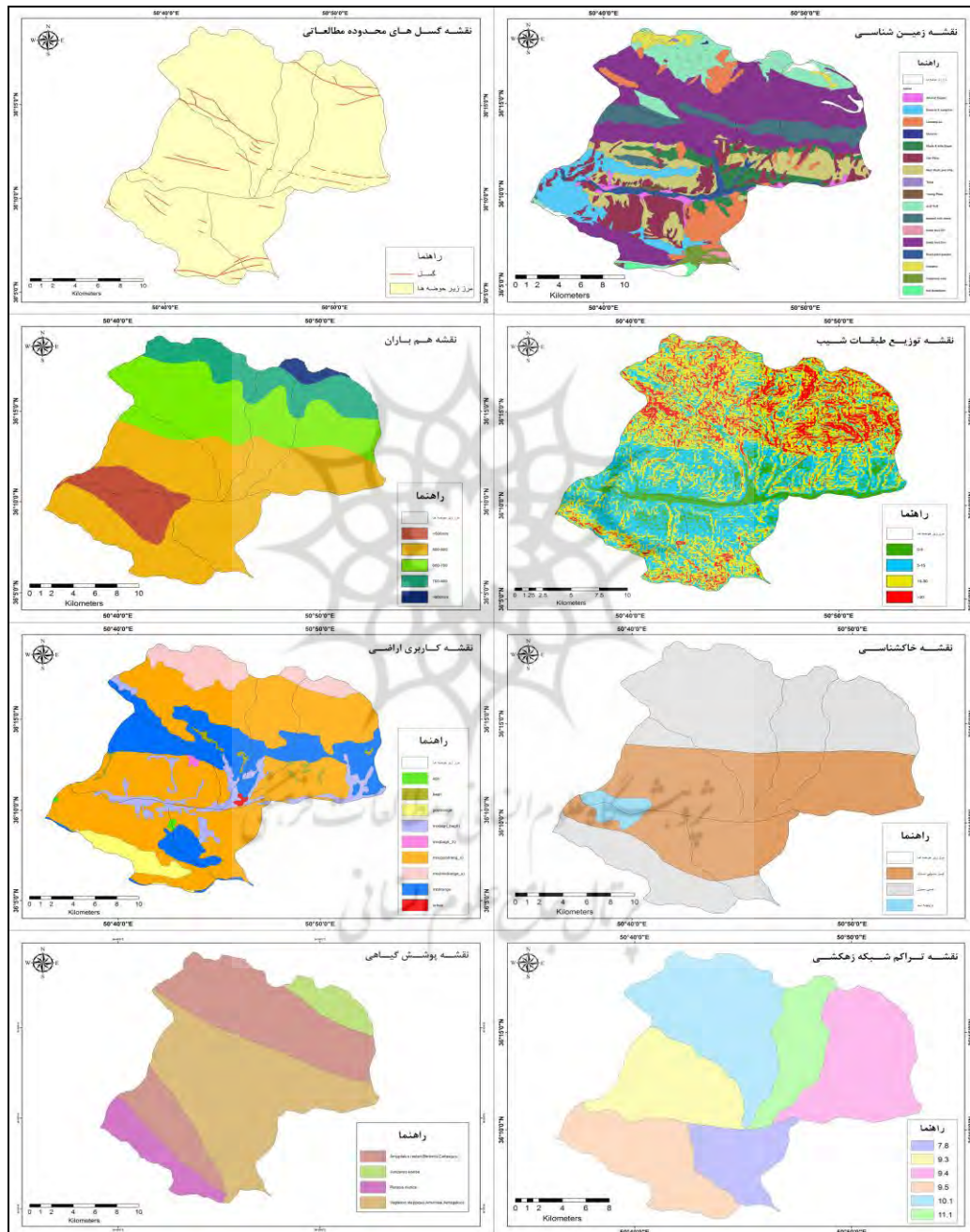


شکل ۲ نمودار روش مطالعاتی انجام گرفته برای رسیدن به نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش

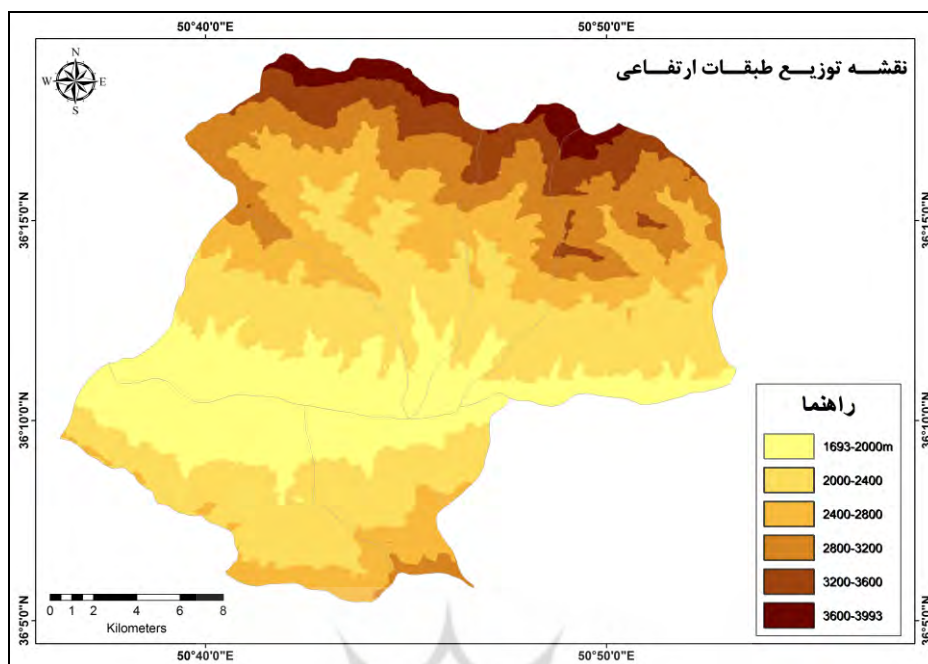
۴. بحث و نتایج

ابتدا با توجه به شرایط منطقه و نظرات کارشناسی طی چندین مرحله، نه معیار اصلی در ارتباط با استعداد حوضه به زمین لغزش 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 هرکدام از معیارهای انتخابی برای وزن دهی و ارزیابی زیرحوضه‌ها در محیط GIS تهیه و ترسیم شد. شکل ۳، نقشه کیفی نه معیار انتخابی مؤثر در وقوع زمین لغزش را در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد.

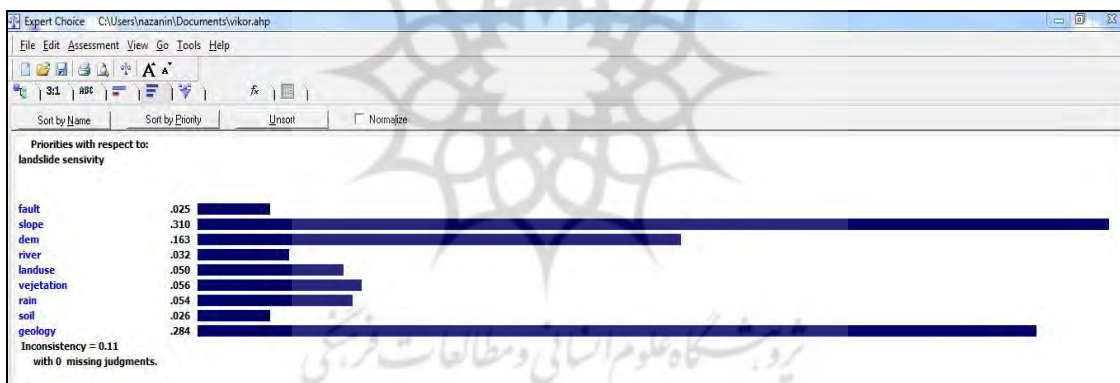
با توجه به اثر ۹ معیار فوق در وقوع زمین لغزش، معیارهای میزان پوشش گیاهی و فاصله از گسل، دارای اثر کاهشی و هفت معیار دیگر اثر افزایشی دارند. پس از تهیه نقشه معیارهای انتخابی، ضریب اهمیت معیارهای مذکور از دیدگاه درجه اهمیت در وقوع زمین لغزش و حساسیت پذیری حوضه‌ها به این پدیده، به کمک الگوریتم سلسله مراتبی AHP تعیین شد (شکل ۴). در جدول ۱، درجه اهمیت معیارهای انتخابی نشان داده شده است.



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



ادامه شکل ۳ نقشه کیفی نه معیار در نظر گرفته شده در استعداد و وقوع زمین لغزش حوضه طالقان رود



شکل ۴ تعیین ضریب اهمیت معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش با استفاده از نرم افزار Expert choice

جدول ۱ 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
ضریب اهمیت	۰/۰۲۵	۰/۳۱۰	۰/۱۶۳	۰/۰۳۲	۰/۰۵	۰/۰۵۶	۰/۰۵۴	۰/۰۲۶	۰/۲۸۴

مزیت مدل ویکور این است که ارزیابی همه معیارها به بررسی کارشناسی نیاز ندارد بلکه می توان از داده های خام استفاده می کرد. برای مثال در مورد پارامترهای شیب، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی و بارش

از متوسط مقادیر شیب، ارتفاع متوسط، تراکم زهکشی و بارش زیر حوضه، استفاده کرده و عیناً خود مقادیر متوسط را در ماتریس وارد کرد. البته معیارهای فاصله از گسل، کاربری و پوشش گیاهی، نوع خاک و لیتولوژی چون داده خام نداشتند از ۱ تا ۱۰ ارزیابی شدند.

در این پژوهش، به منظور وزن دهی گزینه‌ها بر اساس نقش هر معیار در گزینه مورد نظر، از بازه وزن‌دهی قطعی یک تا ده استفاده شده است؛ به گونه‌ای که وزن ۱ کمترین تأثیر و ۱۰ بالاترین تأثیر را در خطر زمین لغزش نشان می‌دهد.

پس از تعیین ضریب اهمیت معیارها، ماتریس تصمیم اوزان برای انجام الگوریتم ویکور، براساس رابطه ۱ تهیه شد. همان‌طور که مشخص است، نُه معیار در ارزیابی شش گزینه نقش دارند که معرف حوضه‌های آبریز هستند. جدول ۲ تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس پارامترهای مؤثر در زیر حوضه‌ها را نشان می‌دهد.

رابطه ۱:

$$D = \begin{bmatrix} C_1 & \dots & C_9 \\ A_1 & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_6 & a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

جدول ۲ ماتریس تصمیم‌گیری براساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش

معیار منطقه	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
حسینجان	۷	۲۲	۲۷۵۰	۱۰/۰۳	۴	۵	۶۵۶	۴	۴
شهرک	۳	۲۱	۲۶۴۵	۱۱/۱۰	۶	۷	۶۵۴	۴	۵
ناویزک	۸	۱۹	۲۵۶۶	۹/۴۴	۳	۴	۶۳۵	۵	۶
دونبولید	۵	۱۴	۲۰۸۷	۹/۳۳	۷	۶	۵۴۱	۷	۸
زیدشت ۱	۹	۱۴	۲۱۱۰	۹/۵۷	۲	۳	۵۰۹	۵	۶
زیدشت ۲	۶	۱۳	۲۱۸۷	۷/۸۰	۴	۵	۵۴۱	۶	۷

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.

رابطه ۲:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

جدول ۳ مقادیر نرمال شده اوزان گزینه‌ها (زیرحوضه‌ها) براساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش

معیار منطقه	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
حسنجان	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۲۷
شهرک	۰/۱۸	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۳۰	۰/۳۳
ناویزک	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۴۰
دونولید	۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۵۴	۰/۵۳
زیدشت ۱	۰/۵۵	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۴۰
زیدشت ۲	۰/۳۶	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۴۶

بعد از نرمال‌سازی و تهیه ماتریس نرمال وزنی (جدول ۳)، برای به دست آوردن مقادیر سودمندی و پیشیمانی بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ویکور، مراحل زیر روی ماتریس وزنی نرمال انجام گرفت.

وزن‌دار کردن ماتریس نرمال

جهت وزن‌دار کردن، مقادیر ماتریس نرمال هر یک از گزینه‌ها بر وزن معیارها (که قبلاً از روش‌های دیگر به دست آمده بود) ضرب می‌گردد (جدول ۴).

جدول ۴ وزن‌دار کردن مقادیر نرمال شده اوزان گزینه‌ها براساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش

معیار منطقه	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
ضریب AHP	۰/۰۲۵	۰/۳۱۰	۰/۱۶۳	۰/۰۳۲	۰/۰۵	۰/۰۵۶	۰/۰۵۴	۰/۰۲۶	۰/۲۸۴
حسنجان	۰/۰۱۱	۰/۱۵۸	۰/۰۷۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۰۸	۰/۰۷۷
شهرک	۰/۰۰۵	۰/۱۴۹	۰/۰۷۲	۰/۰۱۵	۰/۰۲۶	۰/۰۳۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸	۰/۰۹۴
ناویزک	۰/۰۱۳	۰/۱۳۶	۰/۰۷۰	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۳	۰/۰۱۰	۰/۱۱۴
دونولید	۰/۰۰۸	۰/۰۹۹	۰/۰۵۷	۰/۰۱۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲۶	۰/۰۲۰	۰/۰۱۴	۰/۱۵۱
زیدشت ۱	۰/۰۱۴	۰/۰۹۹	۰/۰۵۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۰	۰/۱۱۶
زیدشت ۲	۰/۰۰۹	۰/۰۹۳	۰/۰۶۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۸	۰/۰۵۱	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲	۰/۱۳۱

تعیین مقادیر بالاترین و پایین‌ترین ارزش ماتریس نرمال وزنی

بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عدد هر ستون تعیین می‌گردد.

در اینجا منظور از بزرگ‌ترین عدد، یعنی عددی که بیشترین ارزش مثبت را داراست و کوچک‌ترین، یعنی بیشترین ارزش منفی. پس اگر معیار ما از نوع منفی باشد، بزرگ‌ترین عدد برعکس می‌شود یعنی می‌شود کمترین مقدار و کوچک‌ترین می‌شود بیشترین مقدار و بالعکس.

رابطه ۳:

$$f_i^* = \max_j f_{ij}; \quad f_i^- = \min_j f_{ij}$$

جدول ۵ بیشترین و کمترین مقادیر نرمال شده هر یک از معیارها

معیار	لیتولوژی	نوع خاک	بارش	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	تراکم زهکشی	طبقات ارتفاعی	شیب	فاصله از گسل
f_j^*	۰/۱۵۱	۰/۰۱۴	۰/۰۲۵	۰/۰۵۱	۰/۰۳۱	۰/۰۱۵	۰/۰۷۵	۰/۱۵۸	۰/۰۱۴
f_j^-	۰/۰۷۷	۰/۰۰۸	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۵۷	۰/۰۹۳	۰/۰۰۵
$f_j^* - f_j^-$	۰/۰۷۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۳۸	۰/۰۲۲	۰/۰۰۴	۰/۰۱۸	۰/۰۶۵	۰/۰۰۹

محاسبه مقدار سودمندی و تأسّف معیارها

در این مرحله با توجه به مقادیر مثبت و منفی محاسبه شده در مرحله قبل، فاصله هر گزینه از راه حل ایده آل و سپس حاصل جمع آن‌ها برای ارزش نهایی براساس رابطه ۴ محاسبه شد. به بیانی در این مرحله سودمندی^۱ و پشیمانی^۲ حاصل از انتخاب یک گزینه، به منزله رتبه برتر محاسبه می‌شود. مقادیر حداقل برای هر دو مقدار معرف کمترین فاصله از راه حل ایده آل (گزینه برتر) است که کمترین پشیمانی و بیشترین سودمندی را به همراه دارد.

رابطه ۴:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-}; \quad R_j = \max_i \left[w_i \cdot \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right]$$

f^* = بزرگ‌ترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون

f_{ij} = عدد گزینه مورد نظر برای هر معیار در ماتریس نرمال وزنی

f^- = کوچک‌ترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون

W = ضریب AHP

طبیعتاً برای گزینه به ازای هر معیار یک شاخص مطلوبیت به دست می‌آید که مجموع آن‌ها شاخص نهایی S_j گزینه را مشخص می‌کند. بزرگ‌ترین S_j هر گزینه به ازای هر معیار، شاخص نارضایتی (R_j) آن گزینه می‌باشد. برترین و بدترین رتبه براساس ارزش S_j و R_j به دست می‌آید. (جدول شماره ۶)

1 Utility measure

2 Regret measure

جدول ۶ شاخص مطلوبیت (Sj) و شاخص نارضایتی (Rj)

منطقه	معیار	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی	Sj	Rj
حسنجان	۰/۰۰۸	۰	۰	۰	۰/۰۱۶	۰/۰۳۲	۰/۰۴۳	۰/۰۰۹	۰/۰۲۶	۰/۲۸۴	۰/۴۱۸	۰/۲۸۴
شهرک	۰/۰۲۵	۰/۰۴۳	۰/۰۲۷	۰	۰	۰/۰۱۱	۰/۰۲۹	۰	۰/۰۲۶	۰/۲۱۸	۰/۳۷۹	۰/۲۱۸
ناویزک	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۴۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۴۱	۰/۰۱۷	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۱۱۴	۰/۳۷۶	۰/۱۱۴
دونبولید	۰/۰۱۷	۰/۲۸۱	۰/۱۶۳	۰/۰۲۴	۰	۰	۰/۰۵۰	۰/۰۴۵	۰	۰	۰/۵۸۰	۰/۲۸۱
زیدشت ۱	۰	۰/۲۸۱	۰/۱۴۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۵	۰/۰۵۶	۰/۰۵۴	۰/۰۱۷	۰/۱۱۶	۰/۷۳۵	۰/۱۱۶
زیدشت ۲	۰/۰۱۷	۰/۳۱۰	۰/۱۳۶	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	۰/۰۲۹	۰	۰/۰۴۵	۰/۰۰۸	۰/۱۳۴	۰/۷۱۱	۰/۱۳۴

محاسبه شاخص ویکور (Q) و رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

در نهایت پس از محاسبه مقادیر سودمندی و پشیمانی شاخص ویکور (Q) برای هر گزینه (زیرحوضه مطالعاتی) به صورت مجزا و براساس رابطه ۵ محاسبه شد (جدول ۶).
رابطه ۵:

$$Q_j = v \cdot \frac{S_j - S^-}{S^* - S^-} + (1-v) \cdot \frac{R_j - R^-}{R^* - R^-}$$

= عدد ثابت ۰/۵

Sj = مجموع مقدار S برای هر گزینه
S⁻ = بزرگ‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه
S^{*} = کوچک‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه
Rj = مقدار R برای هر گزینه
R⁻ = بزرگ‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه
R^{*} = کوچک‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه

گزینه

جدول ۶ مقادیر شاخص ویکور در زیر حوضه‌های منطقه مطالعاتی طالقان رود

زیر حوضه	Q	زیر حوضه	Q
حسنجان	۰/۵۰۷	دونبولید	۰/۲۸۹
شهرک	۰/۷۳۱	زیدشت ۱	۰/۰۷۴
ناویزک	1	زیدشت ۲	۰/۰۳۳

در این مرحله بر اساس مقادیر Q محاسبه شده در گام قبل، گزینه‌ها رتبه‌بندی و تصمیم بهینه در ارتباط با انتخاب گزینه برتر (حساسیت‌پذیری بالاتر به زمین‌لغزش) انجام گرفت؛ به گونه‌ای که در این مرحله مقادیر S و R در سه گروه برای هر گزینه تعیین و مشخص شد. در نهایت گزینه‌های که در هر سه گروه مناسب شناخته شد، با عنوان گزینه برتر انتخاب شد (جدول ۷).

جدول ۷ رتبه‌بندی مقادیر Q، R و S بر ای زیر حوضه‌های مطالعاتی طالقان رود

رتبه	Q	رتبه	R	رتبه	S	منطقه (زیر حوضه)
۴	۰/۵۰۷	۲	۰/۲۸۴	۴	۰/۴۱۸	حسنجان
۵	۰/۷۳۱	۵	۰/۲۱۸	۵	۰/۳۷۹	شهرک
۶	۱	۶	۰/۱۱۴	۶	۰/۳۷۶	ناویزک
۳	۰/۱۸۹	۴	۰/۲۸۱	۳	۰/۵۸۰	دونولید
۲	۰/۰۷۴	۳	۰/۲۸۱	۱	۰/۷۳۵	زیدشت ۱
۱	۰/۰۳۳	۱	۰/۳۱۰	۲	۰/۷۱۱	زیدشت ۲

رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر Q

پس از تعیین رتبه Q و دسته‌بندی مقادیر R و S برای تهیه نقشه حساسیت پذیری زیر حوضه‌های مطالعاتی به زمین لغزش بر پایه مقادیر شاخص بهینه‌سازی ویکور (Q)، مناطق در سه کلاس کیفی حساسیت پذیری کم، متوسط و حساسیت پذیری زیاد طبقه‌بندی شدند (جدول ۸). در نهایت بر اساس طبقات حساسیت و مقادیر کمی Q، نقشه حساسیت پذیری منطقه مطالعاتی به زمین لغزش در محیط GIS تهیه شد (شکل ۵).

جدول ۸ کلاس‌بندی کمی و کیفی درجه حساسیت پذیری زمین لغزش

مقدار کمی ویکور (Q)	کلاس (طبقه)	درجه حساسیت پذیری
> 0.6	I	کم
$0.2 \leq 0.6$	II	متوسط
< 0.2	III	زیاد

۴-۱. یافته‌های پژوهش

از بین نه عامل مؤثر در حساسیت پذیری 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 زمین لغزش هستند. پس از محاسبه مجموع اوزان معیارها با اثر افزایشی برای هر زیر حوضه مطالعاتی، مشخص شد که زیر حوضه‌های زیدشت ۱، ۲ و دونولید بیشترین مقدار و زیر حوضه‌های شهرک، ناویزک و حسنجان دارای کمترین مقدار هستند؛ به عبارت دیگر زیر حوضه‌های زیدشت ۱، ۲ و دونولید از بیشترین حساسیت پذیری به وقوع زمین لغزش برخوردارند. حساسیت به وقوع زمین لغزش در زیر حوضه‌های شهرک، ناویزک و حسنجان حداقل است.

نتایج بررسی گروه‌بندی شاخص ویکور (Q)، سودمندی (S) و پشیمانی (R) نشان داد که زیر حوضه زیدشت ۲ در حوضه آبریز مطالعاتی، دارای بالاترین درجه حساسیت نسبت به وقوع زمین لغزش است. مطالعه نقشه‌های

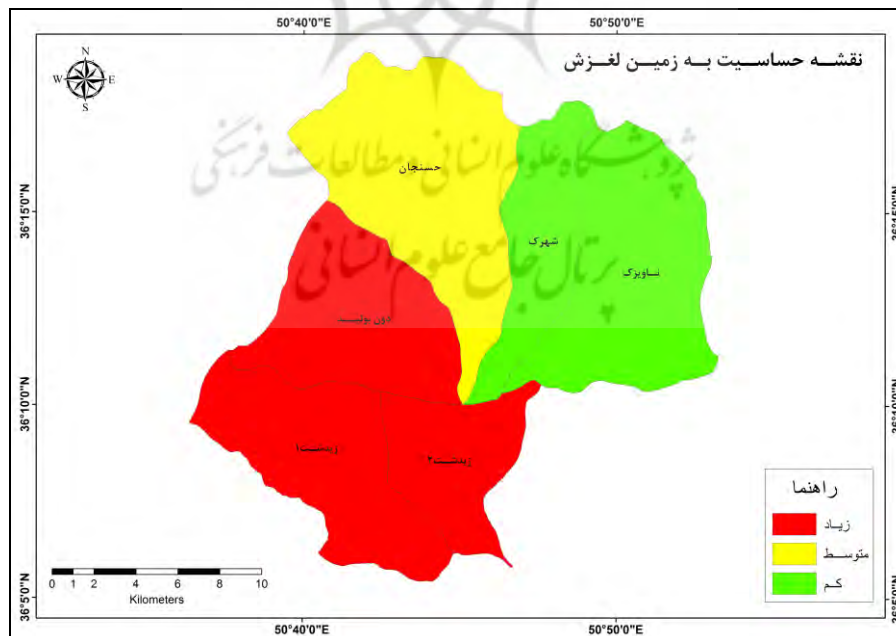
معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش این حوضه نشان می‌دهد که نزدیکی به گسل و تراکم بالای زهکشی، زمینه استعداد حوضه زیدشت ۲ را نسبت به زمین لغزش فراهم کرده است. همچنین پس از حوضه زیدشت ۲، زیر حوضه‌های زیدشت ۱ و دون بولید، به ترتیب با مقادیر شاخص ویکور $Q = 0/074$ و $Q = 0/189$ ، از استعداد زیاد یا درجه حساسیت پذیری بالا نسبت به وقوع زمین لغزش برخوردارند. همان‌طور که نمودار تغییرات کمی شاخص ویکور (Q) در شکل ۵ نشان می‌دهد، توان و استعداد یا به بیانی، حساسیت حوضه به زمین لغزش با افزایش میزان Q کاهش می‌یابد. با این وصف، همان‌طور که در روند افزایشی شاخص ویکور مشخص است، حوضه ناویزک 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 تهیه شده عوامل ارزیابی، مشخص می‌کند که علت این امر به وضعیت خاک و نوع لیتولوژی 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 ناویزک، تنها حدود ۱۰ درصد از مساحت حوضه در شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه قرار دارد، در حالی که در حوضه زیدشت ۱ و ۲، بیش از ۳۵ درصد مساحت حوضه در شیب‌های ۵ تا ۱۵ و ۲۰ درصد در شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه واقع شده است. به گفته‌ای در حدود ۵۵ درصد حوضه را محدوده شیب‌های بحرانی تشکیل می‌دهد و این امر، یکی از عوامل اصلی در حساسیت و استعداد بالای این حوضه در مقابل حساسیت پذیری پایین حوضه ناویزک است. نتایج این یافته‌ها با نتایج بهنیافر و همکاران (۱۳۸۸) و سپهر و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی دارد.

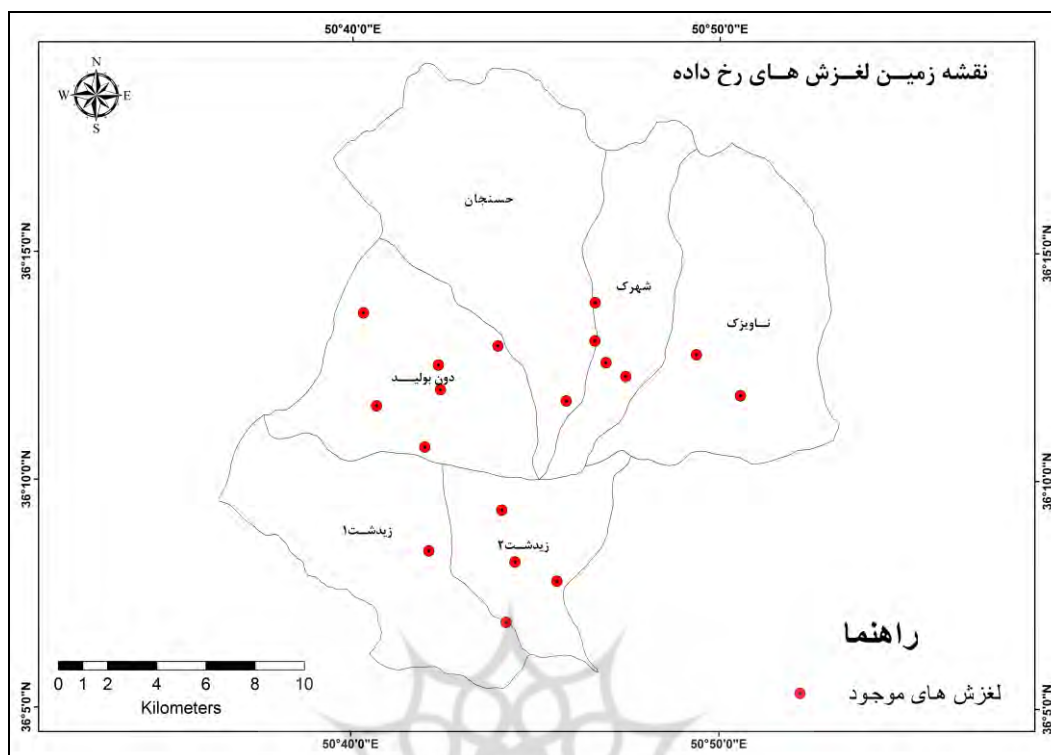
با توجه به نقشه حساسیت پذیری زیر حوضه‌های طالقان رود (شکل ۶) کمتر از ۴۰ درصد از مساحت حوضه مطالعاتی را زیر حوضه‌هایی با حساسیت پذیری پایین یا استعداد کم نسبت به وقوع زمین لغزش تشکیل می‌دهند، آنچه به شرایط توپوگرافی مناسب، پوشش گیاهی و شرایط هیدروژئومورفیک این مناطق در بالا بردن توان این زیر حوضه‌ها در برابر زمین لغزش مربوط می‌شود. در مقابل حدود ۶۰ درصد از مساحت حوضه را زیر حوضه‌هایی با شرایط حساس پذیری بالا و متوسط نسبت به وقوع زمین لغزش احاطه کرده‌اند. زیر حوضه‌هایی چون زیدشت ۱، ۲ و دونبولید با داشتن استعداد بالا در زمین لغزش، از آنجاکه مناطق مسکونی و روستایی را در دل خود جای داده‌اند، به مدیریت و توجه بیشتری در مدیریت بحران و ریسک زمین لغزش نیاز دارند. متأسفانه، تغییرات شدید کاربری اراضی و نابودی پوشش گیاهی در سال‌های اخیر که به دنبال توسعه مناطق گردشگری و تفرجگاه شخصی ایجاد شده است، این حوضه‌ها را به کانون‌های بحرانی زمین لغزش در حوضه طالقان رود تبدیل کرده است. 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.

۵. نتیجه گیری

زمین لغزش‌ها به‌طور ساده از عملکرد نیروی گرانش زمین بر دامنه‌ها ناشی می‌شوند و تا زمانی که مقاومت توده سنگ یا خاک مساوی یا بزرگ‌تر از نیروی گرانش باشد، نیروها در حال تعادل هستند و حرکتی رخ نمی‌دهد. به‌دیگر سخن، زمین لغزش را می‌توان نمود تغییر تعادلی سطوح شیب دار، به دنبال اغتشاشات محیطی وارد بر ژئوسیستم تلقی کرد. پایداری و حفظ شرایط تعادلی در برابر این نیروی وارده، به اکولوژی و ساختار هیدروژئومورفولوژیکی سطوح بر می‌گردد. این پژوهش جز موارد اولیه‌ای است که در آن از روش بهینه‌سازی توافقی ویکور، برای بررسی و تهیه نقشه حساسیت پذیری مناطق به زمین لغزش استفاده شد. پس از بررسی‌های میدانی و انتخاب معیارهای مؤثر در حساسیت دامنه‌ها به زمین لغزش، الگوریتم ویکور برای بررسی درجه حساسیت پذیری مناطق به زمین لغزش انجام و مشخص شد که زیر حوضه زیدشت ۲ در حوضه آبریز مطالعاتی، دارای بالاترین درجه حساسیت نسبت به وقوع زمین لغزش است. همچنین حوضه ناویزک با حداکثر شاخص بهینه‌سازی (Q) و حداکثر فاصله از مقدار ایده آل، دارای پایین‌ترین درجه حساسیت یا استعداد نسبت به وقوع زمین لغزش است. بررسی نقشه حساسیت‌پذیری حوضه طالقان رود به زمین لغزش و بازدیدهای میدانی، مؤید کارایی مناسب الگوریتم ویکور در رتبه‌بندی و درجه استعداد حوضه‌ها به زمین لغزش بود. با نگاهی به شکل ۶ مشاهده می‌شود که بیش از ۶۷٪ لغزش‌های رخ داده (پایگاه داده‌های علوم زمین، ۱۳۹۳) با محدوده ریسک زیاد حاصل از این پژوهش، تطابق دارد. نتایج این پژوهش و روش پیشنهادی استفاده شده، می‌تواند در مطالعات بعدی راهگشا و مورد ارزیابی و مقایسه با سایر روش‌های برآورد حساسیت زمین لغزش قرار گیرد.



شکل ۵ نقشه حساسیت به زمین لغزش در حوضه آبخیز طالقان رود



شکل ۶ نقشه مهم ترین زمین لغزش های رخ داده در حوضه آبخیز طالقان رود

کتابنامه

- بهنیا نگر، الف؛ قنبرزاده، ه؛ منصورى دانشور، م. ر؛ ۱۳۸۸. پهنه بندی خطر زمین لغزش 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 زمین لغزش‌ها با استفاده از روش تعیین عامل ویژه، مطالعه موردی: حوضه قرنقوچای واقع در دامنه شرقی کوهستان سهند. فصلنامه مدرس علوم انسانی. سال یازدهم. شماره ۴. صص. ۵۵ - ۲۹.
- زارع، م؛ احمدی، ح؛ غلامی، ش؛ ۱۳۹۰. پهنه بندی و ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های عامل اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله مراتبی در حوضه آبخیز واز. مجله علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال پنجم. شماره ۱۷. صص. ۲۲ - ۱۵.
- فتوحی، ص؛ کیایی، س؛ ۱۳۹۳. مدیریت بحران و ارزیابی ریسک شهر قاین بر اساس مدیریت ریسک. فصل نامه برنامه ریزی محیطی. سال چهارم. شماره ۱۴. صص ۱۰۳-۱۲۰.

سپهر، ع؛ بهنیا، ا؛ محمدیان، ع؛ عبدالحی، ا؛ ۱۳۹۲. تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال دوم. شماره ۱. صص ۱۹-۳۶

محمدی، م؛ مرادی، ح. ر؛ فیض نیا، س؛ پورقاسمی، ح. ر؛ ۱۳۸۸. اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین لغزش و تهیه نقشه خطر آن با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: 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 به وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز سجارود با استفاده از رگرسیون لجستیک. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. سال چهاردهم. شماره ۵۳. صص ۱۱۱ - ۹۹.

Akgun, A. (2012). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: A case study at zmir, Turkey. *Landslide*, 9(1), 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*, 81(4), 432-445.

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*, 11(2), 225-246.

Diop, S., Forbes, C., & Chiliza, G.S. (2010). Landslide inventorization and susceptibility mapping in South Africa. *Landslide*, 7(2), 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*, 10(2), 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*, 11(3), 425-439. 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*, 74(1-4), 17-28.

Lee, E.M., & Jones, D.K.C. (2004). *Landslide risk assessment*. London: Thomas Telford.

Pellicani, R., Van Westen, C.J., & Spilotro, G. (2013). Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information. *Landslide*, 11(3), 463-480.

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*, 11(2), 247-262.

