

بررسی ارتباط عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش در مدل آنتروپی شانون با دو ریکرد WOE و LNRF به منظور پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه آبخیز زیوه

عبدالعزیز حنیفی نیا - دانشجوی دکتری مدیریت حوضه‌های آبخیز، ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
هیراد عبقری* - دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۴/۲۸

چکیده

مستلزم برنامه‌ریزی، انجام اقدامات مناسب و زیربنای اصلی تهیه نقشه‌هایی با صحت و دقت بالا در مدیریت زمین لغزش‌ها، شناسایی مهمترین عوامل موثر می‌باشد. در این مطالعه هدف اصلی بررسی ارتباط بین عوامل موثر شناسایی شده با استفاده از مدل آنتروپی شانون و مقایسه آن با نتایج مدل‌های WOE و LNRF در حوضه آبخیز زیوه می‌باشد. بعد از ثبت تعداد ۱۶۷ زمین لغزش، مهمترین عوامل موثر با توجه به مطالعه پژوهش‌های قبلی از طریق مشاهدات و بازدیدهای مکرر صحرائی در سه طبقه شاخص‌های مورفومتری، عوامل محیطی و انسانی دسته‌بندی شدند. نقشه‌های عوامل محیطی و انسانی در محیط ArcGIS10.5 و نقشه شاخص‌های ژئومورفومتری در SAGA_GIS.6.4 از طریق مدل رقومی ارتفاعی با پیکسل سایز (۱۲/۵*۱۲/۵) تهیه شد. نتایج نشان داد که مهمترین عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش در مدل آنتروپی شانون به ترتیب فاصله از آبراهه، شاخص موقعیت توپوگرافی، فاصله از گسل و کاربری اراضی و کمترین اثر عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش به ترتیب شامل عوامل بارندگی، ارتفاع و فاکتور LS بوده است. در مدل‌های WOE و LNRF مهمترین عوامل موثر در رده‌های عوامل سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص خبسی توپوگرافی، فاصله از آبراهه و گسل بوده است. در نتیجه بین نتایج مدل آنتروپی شانون در شناسایی عوامل موثر با مدل‌های فوق می‌توان گفت که ارتباط خوبی وجود دارد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC نشان داد مدل آنتروپی شانون دارای عملکرد عالی و دو مدل WOE و LNRF دارای عملکرد خوب و خیلی خوب در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش‌ها می‌باشند. نتایج تحقیق حاضر در ارائه یک برنامه مدیریتی صحیح به جهت کمک به کاهش میزان خسارات و وقوع زمین لغزش‌ها می‌تواند بسیار کارآمد خواهد بود.

واژگان کلیدی: شاخص‌های مورفومتری، عوامل محیطی، GIS، منحنی ROC حوضه آبخیز زیوه.

مقدمه

حرکات توده‌ای بالاخص زمین لغزش‌ها نه تنها باعث تغییر در مورفولوژی زمین بلکه با ایجاد ناهمواری‌های نامناسب در رخدادهای بزرگ در سطح زمین سبب تهدیدات مالی که در برخی موارد تلفات جانی آبخیزنشینان و روستاییان را نیز به دنبال دارد. زمین لغزش‌ها به طور کلی پدیده‌های ژئومورفولوژیکی پیچیده‌ای هستند که هر ساله در سراسر جهان مردم خسارات‌های جانی و مالی زیادی را به سبب وقوع این پدیده متحمل می‌شوند. مدیریت خطرپذیری زمین لغزش‌ها با توجه به مجموعه‌ای از شرایط توپوگرافی، ژئومحیطی، هیدرولوژی و زمین‌شناسی به منظور کاهش تعداد رخداد بسیار حیاتی است (حنیفی‌نیا، ۱۳۹۸). انتخاب و شناسایی مهمترین عوامل موثر در رخداد لغزش‌ها یکی از مراحل ابتدایی و بسیار مهم می‌باشد. با توجه به این که رخداد پدیده زمین لغزش تحت تاثیر عوامل بسیار متعددی هست و در هر منطقه‌ای می‌تواند تحت شرایط مختلفی اتفاق بیافتد، بنابراین نمی‌توان در انتخاب تعداد عوامل دخیل در رخداد لغزش‌ها استاندارد مشخصی و معینی تعریف کرد. منتهی در اغلب مطالعات مربوط به مباحث زمین لغزش، متغیرهای مربوط به ویژگی‌های زمین (ارتفاع، شیب، و جهت)، ژئومورفولوژی (انحنای پلان، انحنای پروفیل و عمق دره)، زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی و فاصله از گسل‌ها)، هیدرولوژی (مرطوبی توپوگرافی و فاصله از رودخانه)، خاک (عمق خاک و نوع خاک)، فاصله از جاده و کاربری اراضی (تراکم جنگل، نوع کاربری زمین) به طور مکرر استفاده شده است (کاوازولا^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). تجزیه و تحلیل حساسیت زمین لغزش‌ها مستلزم در نظر گرفتن زمینه محیطی آن‌ها است. با توجه به اهمیت متغیرهای مکانی در مدیریت مخاطرات طبیعی، تعداد زیادی از محققین اثرات این عوامل را در مدل‌سازی خطر و حساسیت زمین لغزش بررسی کرده‌اند (چن^۲ و همکاران، ۲۰۱۸؛ سان^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). فرض اصلی در تجزیه و تحلیل پهنه‌بندی و حساسیت زمین لغزش‌ها این است که وقوع زمین لغزش‌ها در آینده تحت شرایطی مشابه با شرایط زمین لغزش‌های گذشته با احتمال رخداد بیشتر (وجود مناطق خطرپذیر) خواهند بود (اندرسون^۴ و همکاران، ۲۰۱۳؛ پناهی^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین پهنه‌بندی حساسیت و مدل‌سازی زمین لغزش‌ها می‌تواند در پیش‌بینی مناطق مستعد زمین لغزش، حمایت از برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای کاهش خطرات ناشی از زمین لغزش استفاده شود. با مرور مطالعات و پژوهش‌های انجام شده در زمینه مباحث پهنه‌بندی و حساسیت زمین لغزش‌ها، مدل‌ها را می‌توان به چهار دسته مدل‌های مبتنی بر نظر متخصص، مدل‌های آماری شامل مدل‌های آماری دو و چند متغیره، مدل‌های داده‌کاوی و مدل‌های ماشینی تقسیم‌بندی کرد. در مدل‌های مبتنی بر نظر کارشناس مانند مدل فرایند سلسله مراتبی، نتایج وزن متغیرهای پیش‌بینی شده به میزان تخصص، درک و آشنایی متخصصان با مدل‌های از این دسته و محدوده هدف یا زمینه مورد مطالعه دارد (میرونیدیس^۶ و همکاران، ۲۰۱۶؛ هانگ^۷ و همکاران، ۲۰۲۰). مدل‌های یادگیری ماشینی مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی هستند که بعلاوه توانایی بالایی این مدل‌ها در تجزیه و تحلیل داده‌ها، به طور فزاینده‌ای در مطالعات مربوط به ارزیابی حساسیت، خطر و پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (وارگس^۸ و همکاران، ۲۰۱۹). اگر چه افزایش پیچیدگی یک مدل در حالت خوشبینانه می‌تواند سبب افزایش عملکرد آن در پیش‌بینی مناطق مستعد لغزش بشود اما بعد از ایجاد حالت بهینه در مدل، افزایش داده‌ها موجب افزایش پیچیدگی و در نتیجه کاهش عملکرد مدل خواهد شد. نیازمند بودن این مدل‌ها به داده‌های زیاد و پیچیده بودن نسبت به سایر مدل‌ها می‌تواند از نقاط ضعف مدل‌های یادگیری ماشینی تلقی شود (هانگ و همکاران، ۲۰۲۰). در دسته سوم رویکرد حالت تخمین

1. Kavzoglu

2. Chen

3. Sun

4. Andersson-Skold

5. panahi

6. Myronidis

7. Huang

8. Vargas-Cuervo

توزیع همراه با خصوصیت داده محور بودن و تکرارهای زیاد در مدل‌های داده‌کاوی فرایند مدل‌سازی را تسهیل می‌کند. در نتیجه توانایی بالایی در شناسایی رفتار پدیده زمین‌لغزش دارند (حنیفی‌نیا و نظرنژاد، ۱۴۰۰). روش‌های داده‌کاوی به طور کلی به دو دسته توصیفی و پیش‌بینی تقسیم می‌شوند. در دسته‌ی اول توصیف خصوصیت داده‌ها در پایگاه داده مد نظر است در حالی که در گروه دوم سعی بر پیش‌بینی صحیح از داده‌های آتی و آزمایشی در دسترس از طریق مدل‌سازی می‌باشند (همتی، ۱۴۰۰). مدل‌های آماری (مانند رگرسیون لجستیک خطی، آنتروپی شانون و غیره)، اگر چه وجود فرضیات آماری در برخی موارد ممکن است قابلیت خوب این مدل‌ها در مطالعات مربوط به زمین‌لغزش را محدود کند. اما در اکثر موارد نتایج این مدل‌ها یک پیش‌بینی قوی را ارائه می‌کند. همچنین این مدل‌ها با ارائه دانش جدید از طریق مدل‌های ریاضی به همراه محاسبات مربوطه شناخته شده هستند (لوکچس^۱، ۲۰۲۱). در برخی از مطالعات قبلی، محققان تلاش‌هایی را برای مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف پیش‌بینی در زمینه حساسیت زمین‌لغزش‌ها انجام داده‌اند. جامعه علمی به طور مداوم در حال بررسی کارآمدی رویکردهای جدید برای شناسایی مناطق با خطر زیاد نسبت به وقوع زمین‌لغزش‌ها در سراسر جهان است. مطالعات زیادی در خصوص بررسی رویکرد مدل‌های مبتنی بر نظرات متخصصان (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۰؛ پورقاسمی و روسی^۲، ۲۰۱۷؛ مالک^۳ و همکاران، ۲۰۱۸؛ هی^۴ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سوچازا^۵ و همکاران، ۲۰۲۱)، مدل‌های آماری (حنیفی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۹؛ ایلدرمی و عبادی، ۱۴۰۰؛ ادیشن^۶ و همکاران، ۲۰۱۸؛ پریرا^۷ و همکاران، ۲۰۱۹؛ پناهی و همکاران، ۲۰۲۰؛ کونستانتینیو^۸ و همکاران، ۲۰۲۲)، مدل‌های داده‌کاوی (حنیفی‌نیا و نظرنژاد، ۱۴۰۰؛ نو^۹ و همکاران، ۲۰۲۰؛ اسلام^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱؛ مینو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۲) و مدل‌های یادگیری ماشین (حنیفی‌نیا، ۱۳۹۸؛ کرنژادی و همکاران، ۱۳۹۹؛ هی و همکاران، ۲۰۱۹؛ هانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ وانگ^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۱؛ پناهی و همکاران، ۲۰۲۲) انجام شده است. به علت تصادفی بودن و نبود حالت قطعیت در رخداد پدیده‌های طبیعی از جمله زمین‌لغزش‌ها، مسئله تعمیم نتایج حاصل از یک مطالعه به حوضه‌های دیگر (حوضه‌های معرف زوجی) را بسیار سخت می‌کند. همچنین نتایج حاصل از مدل‌ها در حوضه‌های آبخیز مختلف یکسان نخواهد بود. بنابراین استفاده از مدل‌های مختلف در خصوص پهنه‌بندی و حساسیت زمین‌لغزش ضرورت پیدا می‌کند.

وجود عوامل مستعدکننده حوضه آبخیز برای رخداد زمین‌لغزش‌ها در حوضه آبخیز زیوه مانند برخی از خصوصیات هیدرولوژی (خصوصیات فیزیوگرافی مانند تراکم زهکشی بالا)، مسئله تکنیک (وجود گسل‌های فراوان)، توپوگرافی (داشتن آب و هوای نیمه‌مرطوب سرد به همراه شیب تند، وجود ناهمواری‌های زیاد)، زمین‌شناسی (آسیب‌پذیری بخش بزرگی از سازندهای زمین‌شناسی منطقه (آمیزه‌های افیولیتی و آهک‌های پلازیک) و عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی و چرای بی‌رویه و زودرس (کاهش تراکم پوشش گیاهی) سبب سیر صعودی رخداد و افزایش خسارات محسوس و غیرمحسوس در این محدوده شده است. در حال حاضر وقوع زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی و اساسی در این حوضه مطرح بوده که مردم با آن روبه‌رو هستند. به طور کلی زندگی عشایر و روستاییان دچار اختلال شده است زیرا

1. Lucchese

2. Pourghasemi & Rossi

3. Mallick

4. He

5. Sujatha

6. Aditian

7. Perera

8. Konstantinou

9. Nhu

10. Islam

11. Miao

12. Wang

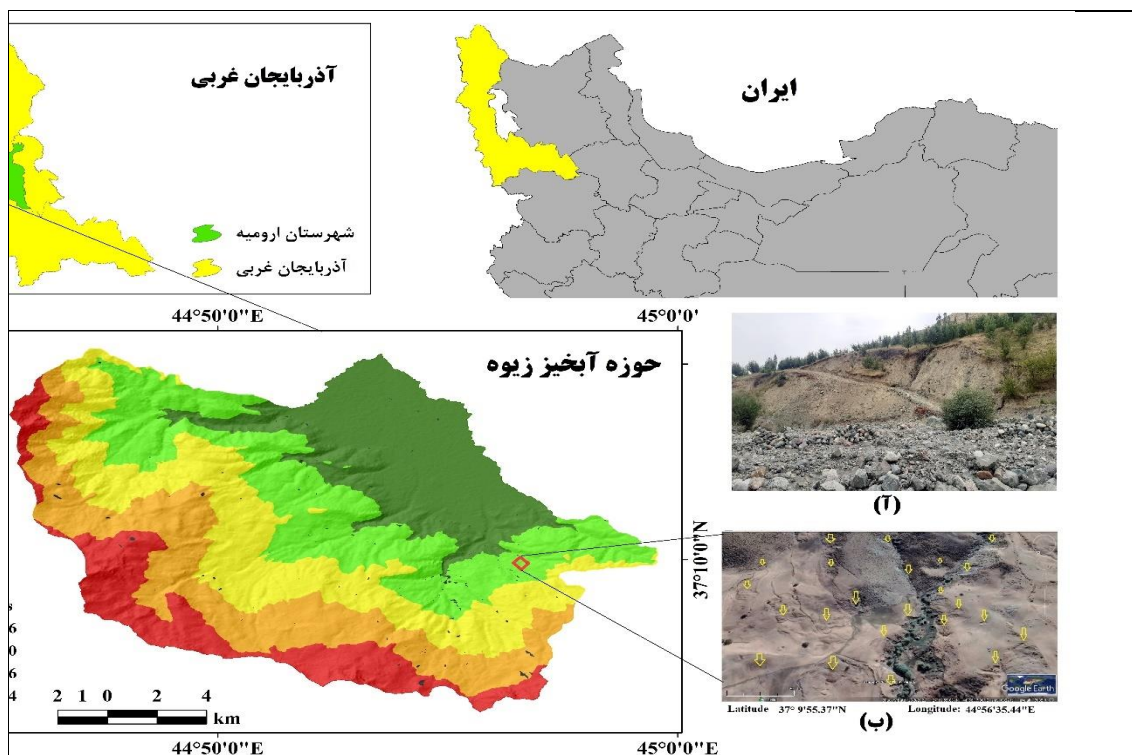
هر ساله مردم شاهد رخداد این پدیده در مراتع، مزارع کشاورزی و حتی باغات هستند که هزینه‌هایی بسیار زیادی را به لحاظ ترمیم مناطق آسیب دیده (جاده‌ها، ساخت مجدد جوی‌های آبیاری تخریب شده ناشی از وقوع زمین لغزش، لایه روبی مناطق پایین دست رخداد از رسوبات و در آخر جمع‌آوری سنگ و سنگریزه در مناطق کشاورزی اطراف رودخانه‌های اصلی این حوضه) متحمل می‌شوند. بر این اساس به شدت از رغبت روستاییان برای کسب و کار کشاورزی در مناطق آسیب دیده کاسته است. رخداد زمین لغزش‌های بزرگ برخی از زمین‌های کشاورزی را غیرقابل استفاده کرده، بنابراین هزینه برگشت آن به حالت اولیه بسیار زیاد است. در نتیجه برخی از آنان برای امرار معاش روی به تغییر کاربری اراضی و رهاسازی زمین‌های آسیب دیده و برخی از آنان با نگهداری دام مازاد روزگار می‌گذرانند. به علت کوهستانی بودن و تراکم بالای زهکشی انتظار می‌رود که عامل آبراهه یک عامل موثر در رخداد لغزش‌ها در این محدوده باشد. هر ساله این حوضه در بهار و پاییز شاهد رخداد سیلاب‌های کوچک و بزرگی هست که اگر همراه با رخداد لغزش‌های کنار رودخانه‌ای باشد، قدرت تخریب چندین برابر افزایش می‌یابد. بنابراین شناخت عوامل موثر و مناطق حساس به وقوع زمین لغزش در جهت انجام اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه ضرورت پیدا می‌کند.

هدف اصلی در پژوهش حاضر شناسایی عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش‌ها از طریق مدل آنتروپی شانون و بررسی این موضوع، که آیا بین نتایج حاصل از آنتروپی شانون با نتایج حاصل از دو رویکرد وزن شاهد و LNDR ارتباط وجود دارد یا خیر؟ در کنار آن، اهداف فرعی از جمله: پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش و ارزیابی مدل‌های فوق از طریق منحنی ROC نیز در حوضه آبخیز زیوه مد نظر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

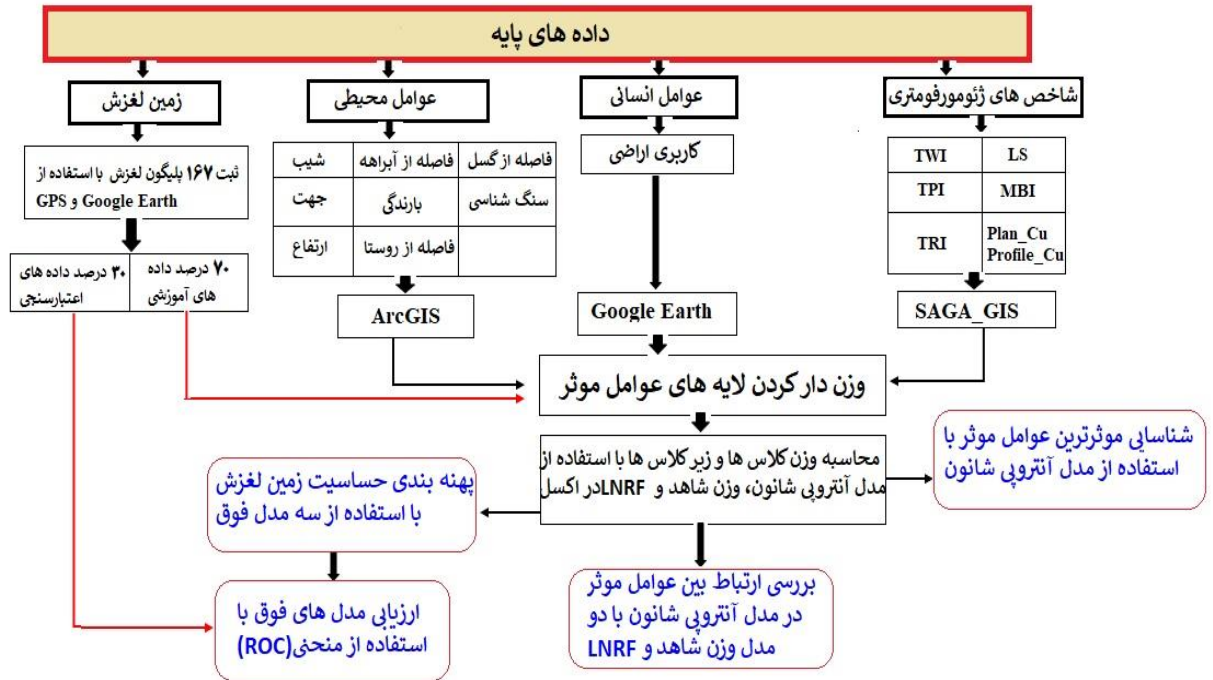
حوضه آبخیز زیوه با مساحتی بالغ بر ۲۱۶۸۶ هکتار در استان آذربایجان غربی، جنوب غربی شهرستان ارومیه و در بخش مرگور سیلوانه قرار گرفته است. این محدوده جزء حوضه‌های مرزی است که در ارتفاعات کوه دالانپر و بز سینا با دو کشور ترکیه و عراق مرز مشترک دارد. رودخانه خروجی از این حوضه تحت عنوان رودخانه چریک‌آباد شناخته می‌شود که بعد از پیوستن به رودخانه بزرگ باراندوزچای که یکی از سرشاخه اصلی آن حوضه مورد مطالعه می‌باشد. در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد. بنابراین به عنوان یک حوضه فرعی نقش بسیار موثری در تغذیه آب‌های دریاچه ارومیه دارد. این حوضه دارای ارتفاع میانه ۲۲۶۵ متر، حداقل ارتفاع ۱۵۰۰ متر، حداکثر ارتفاع ۳۴۷۹ متر و شیب متوسط ۱۶/۵ درجه می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه بر اساس آمار ایستگاه‌های مجاور حوضه برابر با ۳۹۵ میلی‌متر برآورد شده است. کوهستانی بودن حوضه مطالعاتی سبب شده که قسمت اعظم منطقه را مراتع و بخش‌های شمالی حوضه که نزدیک به روستاها و دارای زمین‌های مسطح و هموارتر است، دارای کاربری کشاورزی باشند. به لحاظ تقسیم بندی در زون‌های زمین‌شناسی، حوضه مورد مطالعه در زون سندج _ سیرجان قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه؛ (آ) نمونه از لغزش کنار رودخانه‌ای (ب) نمونه از مناطق بحرانی و مستعد لغزش

روش جمع‌آوری داده‌ها و تهیه لایه‌های اطلاعاتی عوامل مؤثر

از طریق بازدیدهای میدانی گسترده ابتدا موقعیت زمین لغزش‌های رخ داده‌ای که امکان دسترسی برای ثبت آنان میسر بود، با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس (GPS) به صورت پلیگون برداشت شد. از تصاویر گوگل ارث (برای ثبت نقاطی که به علت توپوگرافی پرشیب منطقه دسترسی به آنان دشوار بود استفاده و در مجموع تعداد ۱۶۷ پلیگون لغزشی در منطقه شناسایی شد. با انجام مرور منابع داخلی و خارجی همراه با یادداشت عوامل تاثیر گذار در رخداد هر کدام از لغزش‌ها در حین برداشت نقاط لایه‌های اطلاعاتی ارتفاع حوضه، جهت شیب، درجه شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی به عنوان ۱۰ عامل محیطی و انسانی مؤثر بر وقوع زمین لغزش‌ها در نظر گرفته شدند. نقشه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک (۱۲/۵×۱۲/۵) متر از سایت دانشگاه آلاسکا دریافت و محدوده حوضه مورد مطالعه استخراج شد. از مدل رقومی ارتفاعی برای ایجاد لایه فاصله از آبراهه؛ گسل؛ روستا، درجه شیب و جهت شیب و ارتفاع حوضه در نرم‌افزار ArcGIS10.5 استفاده شد. نقشه کاربری اراضی از آرشیوی اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان غربی تهیه و با استفاده از تصاویر گوگل ارث اصلاح شد. لایه‌های اطلاعاتی گسل‌ها و سنگ‌شناسی منطقه از نقشه زمین‌شناسی برگه سیلوانه (۱:۱۰۰۰۰۰)، دانلود شده از سایت زمین‌شناسی کشور استخراج شد. از آنجا که حوضه مورد مطالعه فاقد ایستگاه هواشناسی و سینوپتیک بود از آمار ۱۳ ایستگاه اطراف حوضه نقشه بارندگی با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ ساده با در نظر گرفتن دوره آماری مشترک ۱۳۹۲-۱۳۶۸ تهیه شد.

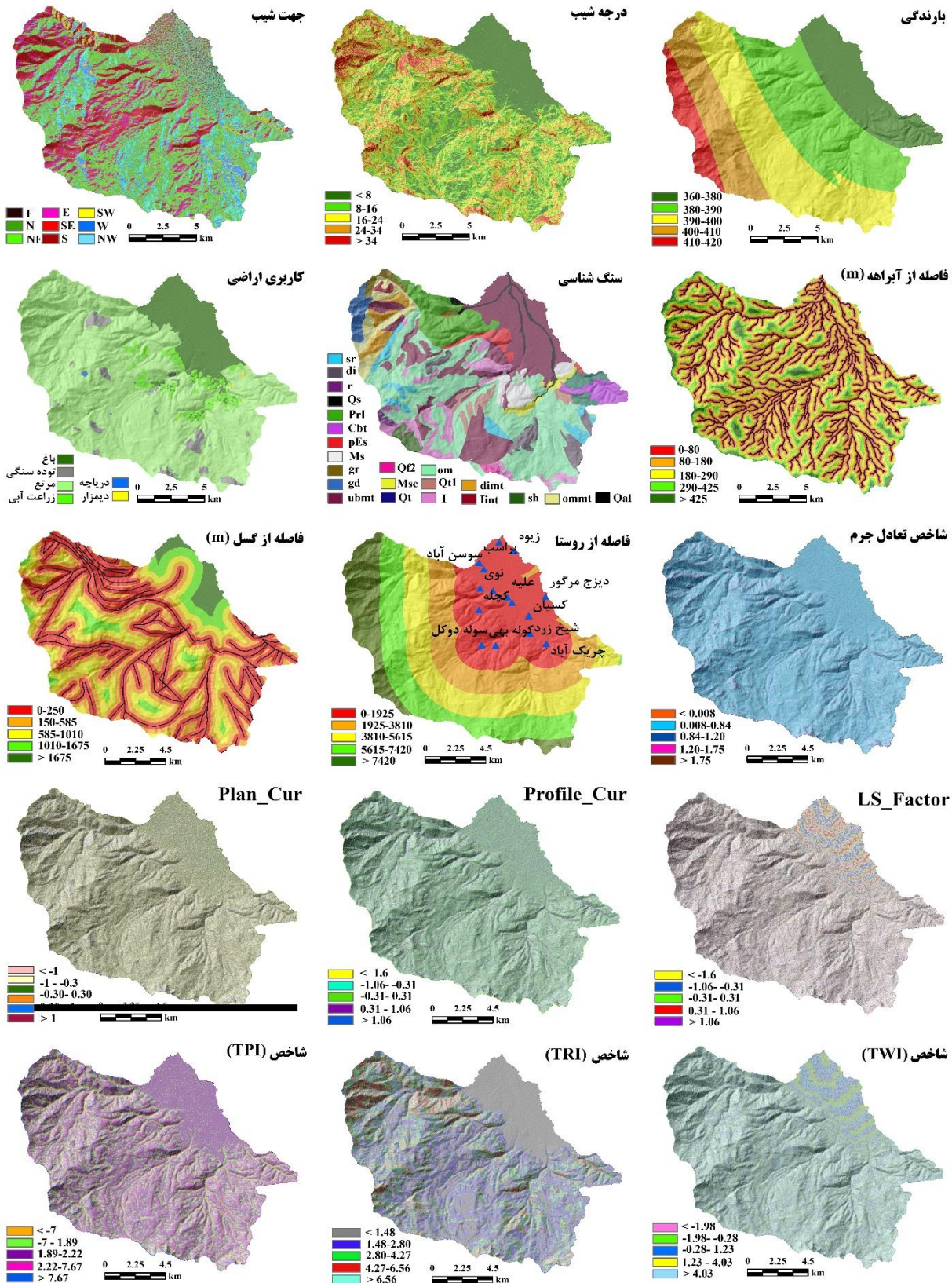


فلوچارت ۱: مراحل انجام تحقیق

همچنین در این حوضه از ۷ شاخص ژئومورفومتری نیز استفاده شد که مشخصات و توضیحات و روش انجام محاسبات این شاخص ها در جدول (۱) آورده شده است. از مدل رقومی ارتفاعی (۱۲/۵×۱۲/۵) متر برای تهیه این شاخص ها استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات و روابط شاخص‌های مورفومتری

شماره	شاخص	توضیحات	فرمول	محل انجام محاسبات
۱	TWI ^۱	شاخص رطوبت توپوگرافی ابزاری برای نشان دادن مناطقی است که جریان آب در آن انباشته می‌شود که اغلب دارای زمین اشباع شده فصلی و دائمی است. در مباحث مربوط به زمین‌لغزش در شناخت پیچیدگی ژئومورفیک از جمله الگوی ارتفاعات توپوگرافی (مناطق خشک) و پایین (مناطق تر) بسیار مفید است (سورنسن ^۲ و همکاران، ۲۰۰۶)	$TWI = Ln(A_s / \tan(\beta))$	SAGAGIS
۲	TPI ^۳	شاخص موقعیت توپوگرافی الگوریتمی است که به طور فزاینده‌ای برای اندازه‌گیری موقعیت‌های شیب توپوگرافی استفاده می‌شود. این شاخص ارتفاع هر سلول را نسبت به ارتفاع میانگین سلول‌های مجاور در یک پهنه مشخص مقایسه می‌نماید (دریو ^۴ و همکاران، ۲۰۱۳).	$TPI = Z_0 - \sum_{n=1} Z_{n/n}$	SAGAGIS
۳	LS ^۵	این فاکتور از طریق ترکیب طول و زاویه شیب بیشترین اثر را بر لایه‌های خاک دارد و به بررسی اثر فاکتورهای توپوگرافی بر فرسایش خاک می‌پردازد (عرب‌عامری و همکاران، ۱۳۹۷)	$LS = \left(\frac{A_s}{22,1}\right)^{0,6} \times \left(\frac{\sin}{0,0896}\right)^{1/3}$	SAGAGIS
۴	TRI ^۶	شاخص ناهمواری زمین پارامتری است که زبری سطح را از طریق در نظر گرفتن ارتفاعات مطلق در اطراف یک سلول شطرنجی مشخص، کمی می‌کند (ریلی ^۷ و همکاران، ۱۹۹۶)	$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd}$	SAGAGIS
۵	MBI ^۸	بیان کننده تعادل بین رسوب و رهاسازی توده یا حجم خاک در دامنه‌ها می‌باشد. شاخص‌های منفی مناطق دارای رسوب و مقادیر مثبت مناطق دارای حالت فرسایش بالا را نشان می‌دهد. مقادیر نزدیک به صفر بیان دارد که بین فرسایش و رسوب تعادل تعادل برقرار است (مولر ^۹ و همکاران، ۲۰۰۸)	$MBI = \begin{cases} f(TC) \times (1 - f(VDN)) \text{ for } (TC) < 0 \\ f(TC) \times (1 + f(S)) \times (1 + f(VDN)) \text{ for } (TC) > 0 \end{cases}$	SAGAGIS
۶	Plan Cu ^{۱۰}	تأثیر انحنای پلان بر فرآیندهای تخریب زمین، همگرایی یا واگرایی آب در جریان سرازیری است. این پارامتر یکی از عوامل اصلی کنترل هندسه مناطقی از سطح زمین است که در آن زمین لغزش رخ می‌دهد (نفسلی اعلو ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۰)	$Plan, Cu = -\frac{q^2 \times r - 2 \times p \times q \times s + p^2 \times t}{(\sqrt{1 + p^2 + q^2})^3}$	ArcGIS
۷	Profile Cu ^{۱۲}	انحنای پروفیل شتاب یا افت جریان را کنترل می‌کند و ممکن است بر حرکت رسوبات زمین‌لغزش تأثیر بگذارد. بر اساس این شاخص فرسایش در مقادیر منفی و رسوب گذاری در مقادیر مثبت انجام می‌گیرد. (سمیا و همکاران، ۲۰۱۸)	$Profile, Cu = -\frac{q^2 \times r + 2 \times p \times q \times r \times s + q^2 \times t}{(p^2 + q^2) \times (\sqrt{1 + p^2 + q^2})^3}$	ArcGIS



شکل ۲: نقشه عوامل مؤثر بر زمین لغزش در حوضه آبخیز زیوه

معرفی مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه

مدل آنتروپی شانون

کاربرد تئوری اطلاعات، که از ترمودینامیک در سال ۱۹۴۸ (تسانگاراتوس^۱ و همکاران، ۲۰۱۶) نشأت گرفت، امروزه در رشته‌ها و زمینه‌های متنوع به صورت کاربردی استفاده می‌شود. در نظریه اطلاعات، آنتروپی معیار کمی بی‌نظمی، بی‌ثباتی، عدم تعادل و عدم قطعیت سیستم است و می‌تواند روند توسعه یک سیستم مشخص را پیش‌بینی کند (لطفی^۲ و همکاران، ۲۰۱۰). آنتروپی شانون معمولاً مقدار اطلاعات مورد انتظار محصور شده در یک پدیده را نشان می‌دهد. در حال حاضر به طور گسترده‌ای برای تعیین شاخص وزنی در مخاطرات طبیعی و در ارزیابی یکپارچه فرآیندهای طبیعی-محیطی مانند جریان سیل، خشکسالی، حرکات توده‌ای بالاخص زمین‌لغزش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۱). در مورد زمین‌لغزش‌ها آنتروپی شانون عدم تشابه یا تنوع در محیط را اندازه‌گیری و پتانسیل هر عامل را در ایجاد زمین‌لغزش را مشخص می‌کند. هرچه میزان جواب آنتروپی در خصوص عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش بیشتر باشد اثر آن عامل بیشتر خواهد بود. مزیت استفاده از این مدل به عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر بسزایی در شناسایی عوامل مؤثر و میزان تأثیرگذاری آنها نسبت به مدل‌های آماری دومتغیره و احتمالاتی نظیر بیزین دارد. زیرا در مدل‌های ذکر شده تعیین میزان خطر با استفاده از تمامی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش وزن یکسانی دارند و چنان‌چه یکی از عوامل تأثیر بیشتری داشته باشد، میزان اثر آن نادیده گرفته می‌شود. برای ایجاد مقایسات مناسب بین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، آنتروپی شانون از طریق روابط (۸-۲) محاسبه می‌گردد.

$$FR = \frac{A_i}{A_{cl}} \quad (۲) \quad V_{ji} = I_j FR \quad (۶)$$

$$E_{ji} = \frac{FR}{\sum_{j=1}^m FR} \quad (۳) \quad H_j = - \sum_{i=1}^{S_j} E_{ji} \times \log_2 E_{ji}, j = 1, \dots, n \quad (۷)$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j, S_j - \text{number of classes} \quad (۴) \quad V_j = \sum_{i=1}^m V_{ji}, m \text{ number of landslide} \quad (۸)$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}} \quad I = (0 - 1), j = 1, \dots, n \quad (۵)$$

FR نسبت فراوانی هر طبقه، E_{ji} ارزش آنتروپی هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن، H_j و H_{jmax} به ترتیب مقادیر آنتروپی و بیشینه آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات، V_{ji} درجه انحراف عدم اطمینان و V_j وزن نهایی هر عامل می‌باشد.

مدل فاکتور اسمی خطر لغزش LNRF

این مدل تحت عنوان مدل گوپتا و جوشی نیز شناخته شده است. این روش یک روش نیمه کمی است به صورت فزاینده‌ای به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از مطالعات میدانی و بررسی متغیرهای مؤثر در یک پدیده مثل وقوع زمین‌لغزش‌ها استفاده می‌شود. مهمترین عوامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش‌ها بر اساس این مدل سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، طبقات ارتفاعی، درجه شیب، جهت شیب، میزان بارندگی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، شاخص پستی و بلندی و طول شیب می‌باشد (عبادی و همکاران، ۱۳۹۸) مزیت استفاده از این مدل در بحث زمین‌لغزش‌ها این است که این مدل در مناطق دارای ارتفاعات بالا و کوهستانی در تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش نتایج خیلی خوبی را ارائه می‌کند (گوپتا و جوشی ۱۹۹۰^۳). در این مدل، $(LNRF > 1)$ نشان می‌دهد که رده ویژه آن عامل ژئومحیطی نسبت به میانگین مستعد

¹ Tsangaratos

² Lotfi

³ Gupta and Joshi

لغزش است (جدول ۳-۵). مقدار کمتر از یک ($LNRf < 1$) به این معنی است که گروه خاص ژئومحیطی با شیب‌های پایدارتر و دارای رخداد زمین لغزش‌های کمتر می‌باشد. (اسلامی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). با استفاده از سطح لغزش‌های رخ داده در هر یک از واحدهای همگن از نظر مقادیر عوامل مؤثر در زمین لغزش و تقسیم آن بر سطح میانگین وقوع زمین لغزش در کل واحدها اقدام به تعیین شاخص میزان خطر وقوع زمین لغزش می‌شود. در نهایت، طبقات بر اساس دامنه تغییرات مدل $LNRf$ به سه سطح کم (صفر)، متوسط و زیاد وزن دهی می‌شود. با جمع جبری نقشه‌های وزنی، نقشه ناپایداری دامنه، حوضه بر اساس میزان خطرپذیری به درجات مختلف ناپایداری خیلی کم تا خیلی زیاد براساس جدول (۲) پهنه‌بندی می‌گردد. مدل $LNRf$ از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. برای اجرای این مدل ابتدا از نرم افزار Arc GIS جهت وزن دهی به این عوامل و سپس محاسبات در محیط اکسل انجام گرفت.

$$LNRf = \frac{A}{B} \quad \text{یا} \quad LNRf = \frac{N \text{pix}(Si)}{\frac{[\sum_{i=1}^n N \text{pix}(Si)]}{n}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، A = مساحت زمین لغزش در هر واحد، و B = میانگین مساحت زمین لغزش در کل واحد است. $N \text{pix}(Si)$ فراوانی لغزش در هر یک از واحدهای لایه عاملی و فراوانی کل لغزش بر اساس پیکسل؛ $N \text{pix}(Ni)$ فراوانی کل هر واحد از لایه عامل و فراوانی کل حوضه بر اساس پیکسل.

جدول ۲: تعیین مقادیر وزنی بر اساس وسعت زمین لغزش‌ها در مدل $LNRf$

ردیف	دامنه تغییرات $LNRf$	وزن طبقات	میزان ناپایداری
۱	$LNRf < ۰/۶۷$	۰	کم
۲	$۰/۶۷ < LNRf < ۱/۳$	۱	متوسط
۳	$LNRf < ۱/۳$	۲	زیاد

مدل وزن شاهد (WOE)

مدل وزن شاهد یک روش داده محور است که به عنوان یکی از مدل‌های نظریه بی‌زین در قالب لگاریتم خطی شناخته شده است که از احتمال قبلی و خلفی بهره می‌گیرد (رگمی^۲ و همکاران، ۲۰۱۰). این روش از فرضیات ذهنی برای تعیین عوامل ایجادکننده اجتناب می‌کند. روش وزن شاهد در ابتدا برای شناسایی و کشف ذخایر معدنی توسعه یافت که اخیراً به علت محبوبیت و دقت بالای این روش نسبت به سایر روش‌های کمی به طور گسترده برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش استفاده می‌شود (دینگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). روش WOE بر این فرض استوار است که "گذشته کلید آینده است". بنابراین فرض بر این است که عواملی که در گذشته در رخداد لغزش‌ها اثر داشته‌اند، در آینده هم بر روی رخداد آنان اثر خواهند گذاشت. همچنین فرض بر این است که ترکیبی از عوامل ایجادکننده ممکن است منجر به ایجاد زمین لغزش‌های گذشته در منطقه مورد مطالعه فعلی شود و به طور مشروط مستقل از یکدیگر در رخداد زمین لغزش‌ها اثر گذارند

1. Eslami

2. Regmi

3. Ding

(بتر و رحمتی^۱، ۲۰۲۱). بنابراین از زمین‌لغزش‌های گذشته برای وزن دهی به عوامل ایجاد کننده که عمدتاً در رخداد زمین‌لغزش نقش دارند، استفاده شد. روش WoE بر اساس وجود (W+) یا عدم وجود (W-) زمین‌لغزش‌ها در منطقه، وزنی را به هر کلاس از عوامل ایجاد کننده یک زمین‌لغزش اختصاص می‌دهد. این روش یک همبستگی بین وزن مثبت (W+) هنگامی که رویداد رخ می‌دهد و وزن منفی (W-) زمانی که رویداد رخ نمی‌دهد، است و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$W^+ = \log_e \frac{P\{B|D\}}{P\{\bar{B}|D\}} \quad W^- = \log_e \frac{P\{\bar{B}|\bar{D}\}}{P\{B|\bar{D}\}}$$

رابطه (۱۰، ۱۱)

که در آن P احتمال، B وجود یک کلاس مورد نظر از عامل ایجاد کننده زمین لغزش، \bar{B} عدم وجود یک کلاس مطلوب از عامل ایجاد لغزش، D وجود زمین لغزش و \bar{D} عدم وجود یک زمین لغزش است. مقدار C که برآیند وزن‌های مثبت و منفی است به وسیله رابطه (۱۴) شناخته می‌شود. وزن نهایی هر عامل از نسبت مقدار استاندارد شده C به انحراف معیار استاندارد آن به S(C) مشهور است از رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد. که برای محاسبه آن نیاز داریم مقدار S^2W^+ و S^2W^- به ترتیب واریانس (W+) و (W-) وزن‌های مثبت و منفی هستند و از رابطه (۱۰ و ۱۱) قابل محاسبه می‌باشد. در این مدل مقدار بیشتر نشان‌دهنده کلاس دارای وزن بیشتر است.

$$S^2W^+ = \frac{1}{N\{B \cap A\}} + \frac{1}{B \cap \bar{A}} \quad (12) \quad C = [(W^+ - W^-)] \quad (14)$$

$$S^2W^- = \frac{1}{N\{\bar{B} \cap A\}} + \frac{1}{\bar{B} \cap \bar{A}} \quad (12) \quad S(C) = \sqrt{S^2W^- + S^2W^+} \quad (15)$$

$$W_{Final} = C/S(C) \quad (16)$$

اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش

برای تهیه نقشه دقیق از پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش‌ها و یافتن بهترین مدل مناسب، اعمال روش اعتبارسنجی ضروری است. اعتبار نقشه حساسیت زمین لغزش با محاسبه (ROC) و از طریق سطح زیر منحنی (AUC) و ۳۰ درصد زمین لغزش مشاهده‌ای و انتخاب شده برای ارزیابی مدل‌ها در دسته‌های مختلف حساسیت انجام شد (ماگلیولو^۲ و همکاران، ۲۰۰۸). ناحیه زیر منحنی (AUC)، کیفیت مدل (توانایی آن در پیش بینی وقوع یا عدم وقوع یک رویداد) را نشان می‌دهد. مقدار AUC نزدیک به ۱ نشان دهنده دقت بالا و مقدار AUC نزدیک به ۰/۵ و پایین تر از آن نشان‌دهنده عدم دقت است (سمیا^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). در این مطالعه اعتبارسنجی مدل‌ها در نرم‌افزار SPSS26 انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تعیین مهمترین عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش و ارتباط آن با زیر عامل‌های موثر در دو مدل WOE و LNRF نشان داد که مدل آنتروپی شانون در ارتباط با شناسایی مهمترین عوامل موثر در رخداد لغزش‌ها و پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه آبخیز زیوه بسیار موثر عمل کرده است. بر اساس نتایج حاصل از مدل آنتروپی شانون عوامل شاخص موقعیت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و کاربری اراضی بیشترین تاثیر را بر وقوع زمین‌لغزش‌ها و کمترین اثر مربوط به عوامل بارندگی سالانه، انحنای پروفیل و ارتفاع بوده است. بررسی وزن زیر کلاس‌ها بر اساس فراوانی

¹. Batar&Rahmati

². Magliulo

³. Samia

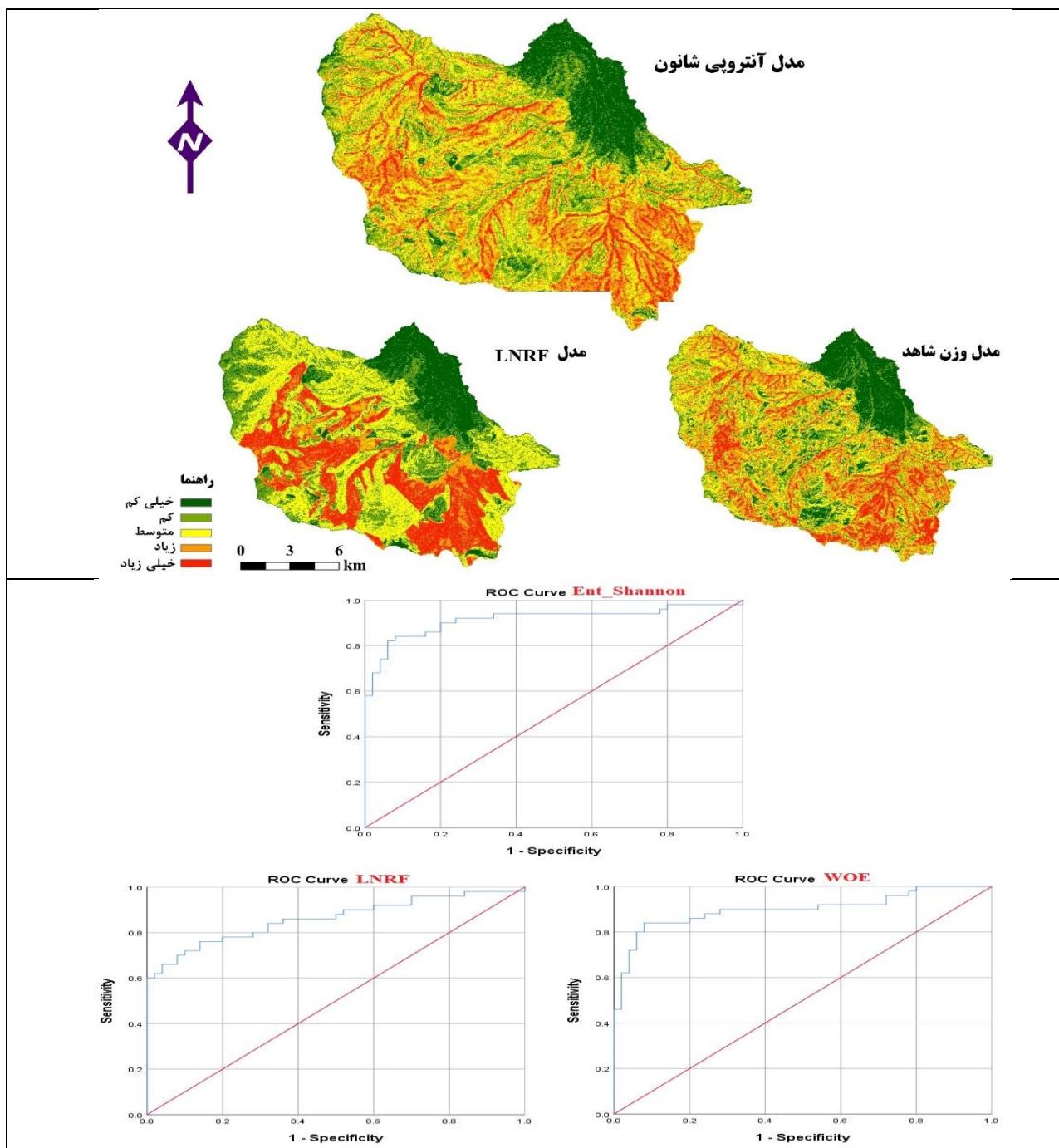
اثر هر زیر عامل برای هر لایه اطلاعاتی بیان کننده بیشترین اثر از عامل زمین شناسی، کاربری اراضی و سپس در رده‌های بعدی عامل فاصله از آبراهه: گسل و کاربری اراضی برای مدل WOE و سپس LNR F می‌باشد. بنابراین بین وزن‌های مؤثر شناسایی شده از زیر عامل‌ها در مدل‌های فوق یک ارتباط نسبتاً خوبی برقرار است. ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی و حساسیت زمین لغزش با استفاده از منحنی ROC نشان می‌دهد که مدل آنتروپی شانون با مقدار سطح زیر منحنی (AUC = ۰/۹۱۵) به لحاظ کیفی دارای عملکرد عالی و دو مدل WOE و LNR F به ترتیب با سطح زیر منحنی (AUC = ۰/۸۹۹) و (AUC = ۰/۸۶۰) دارای عملکرد خوب در تعیین مناطق حساس به زمین لغزش بوده‌اند.

جدول ۳: وزن عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین لغزش در روش‌های آنتروپی شانون، WOE و LNR F در آبخیز زیوه

عامل	طبقه	مساحت لغزش هر رده	مساحت رده	LNR F	WOE	رده مدل آنتروپی شانون	آنتروپی شانون
انحنای سطح	< -۱	۵/۶۰	۱۱۵۴/۴۸	-۰/۳۲۴	۰/۶۹۲	-۰/۲۷۲	۰/۱۳۸
	-۱ - -۰/۳۰	۱۵/۲۳	۵۲۳۷/۸۷	۱/۴۹۳	۰/۴۱۲	-۰/۲۰۵	
	-۰/۳۰ - ۰/۳۰	۱۷/۸۷	۸۷۶۱/۷۴	۱/۷۵۲	۰/۱۵۵	-۰/۰۶۸	
	۰/۳۰ - ۱	۹/۹۸	۵۳۶۰/۷۲	-۰/۹۷۹	-۰/۰۱۱	-۰/۰۲۵	
انحنای پروفیل	< -۱/۰۶	۳/۳۱	۱۱۴۷/۹۶	-۰/۳۲۴	۰/۱۸۳	-۰/۰۳۶	۰/۰۳۶
	-۱/۰۶ - -۰/۳۱	۱۰/۹۰	۵۵۴۵/۹۸	۱/۰۶۹	۰/۰۴۵	-۰/۰۲۵	
	-۰/۳۱ - ۰/۳۱	۱۷/۰۳۱	۸۲۱۶	۱/۶۶۹	۰/۱۶۰	-۰/۰۲۶	
	۰/۳۰ - ۱/۰۶	۱۴/۴۳	۵۵۸۵/۶۲	۱/۴۱۵	۰/۳۰۷	-۰/۰۳۳	
شاخص موقعیت توپوگرافی	< -۷	۱/۱۸	-۰/۲۲۵	-۰/۲۳۵	۰/۱۰۲	-۰/۴۶۹	۰/۱۹۴۷
	-۷ - -۱/۸۹	۰/۲۰۶	-۰/۰۴۱	-۰/۰۴۱	۰/۰۱۷	-۰/۲۲۴	
	-۱/۸۹ - ۲/۲۲	۱/۱۸۷	-۰/۲۳۶	-۰/۲۳۶	۰/۱۰۲	-۰/۱۰۱	
	۲/۲۲ - ۷/۶۷	۱/۶۵۳	-۰/۳۲۹	-۰/۳۲۹	۰/۱۴۳	-۰/۰۹۳	
شاخص خیسی توپوگرافی	< -۱/۹۸	۱۰/۷۰۳	۱۴۷۶/۸۲۸	-۰/۲۱۱	-۰/۰۱	-۰/۰۵۳	۰/۰۶۳
	-۱/۹۸ - -۰/۲۸	۱۷/۳۶	۵۰۰۴/۸۹	-۰/۸۰۲	۰/۱۲۶	-۰/۰۵۵	
	-۰/۲۸ - ۱/۲۳	۱۴/۳۷۵	۹۱۶۵/۶۱	۱/۰۶۳	۰/۲۲۵	-۰/۰۵۹	
	۱/۲۳ - ۴/۰۳	۶/۹۵۳	۴۸۱۷/۷۸	-۰/۴۰۹	۰/۰۲۹	-۰/۱۴۱	
شاخص ناهمواری زمین	< ۱/۴۸	۴/۶۳	۶۶۷۳/۴۸	-۰/۴۶۲	-۰/۶۹۵	-۰/۰۲۸	۰/۱۲۸
	۱/۴۸ - ۲/۸	۱۵/۰۱۵	۶۸۶۴/۵۶	۱/۵۰۱	۰/۲۶۰	-۰/۰۸۸	
	۲/۸ - ۴/۲۷	۱۸/۲۳۴	۵۱۸۶/۳۲	۱/۸۲۳	۰/۶۳۸	-۰/۱۴۱	
	۴/۲۷ - ۶/۵۶	۹/۸۷۵	۲۵۵۳/۵۱	-۰/۹۸۷	۰/۴۰۱	-۰/۱۵۶	
فاکتور LS	< ۸/۵۸	۸/۸۷۴	۲۰۰۹/۲۸	-۰/۸۷	۰/۷۲۵	-۰/۰۵۶	۰/۰۶۰
	۸/۵۸ - ۱۸/۵۸	۸/۰۷۵	۱۷۵۶/۶۴	-۰/۷۹۱	۰/۷۴۰	-۰/۰۵۸	
	۱۸/۵۸ - ۲۸/۵۸	۹/۷۹۱	۱۸۱۹/۶۴	-۰/۹۵۹	۰/۹۴۸	-۰/۰۶۸	
	۲۸/۵۸ - ۳۷/۶۷	۹/۸۵۰	۲۱۳۲/۴۳	-۰/۹۶۵	۰/۷۹۴	-۰/۰۵۸	
	> ۶/۵۶	۱۴/۴۰۶	۳۱۲۰/۳۶	۱/۴۱۲	۰/۸۵۴	-۰/۰۵۸	

							> ۳۷/۶۷	
							< -۰/۰۱	
۰/۱۱۶	۰	۰	۰	۰/۰۱۵	۰	۰	۰	شاخص تبادل جرم
	-۰/۱۹۱	-۰/۶۴۸	۴/۱۵	۱۷۲۶۷/۶	۴۲/۳	۴۲/۳	--۰/۰۱ --۰/۸۴	
	-۰/۱۳۹	-۰/۱۲۵	۰/۴۹	۲۸۰۲	۵	۵	-۰/۸۴ - ۱/۲۰	
	-۰/۱۸۷	۰/۰۶۵	-۰/۳۶	۱۵۱۶/۳	۳/۶۴۰	۳/۶۴۰	۱/۲۰ - ۱/۷۵	
	-۰/۰۶۲	-۰/۱۲۹	۰/۰۱	۹۷/۰۳	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	> ۱/۷۵	
۰/۱۲۳	-۰/۰۵۵	-۰/۱۹۶	۰/۰۳	۲۴۰/۳۴	۰/۲۰۳	۰/۲۰۳	فلات	جهت
	-۰/۲۰۷	۰/۴۹۱	۲/۶۵۵	۷۴۲۴/۷۳	۱۵/۰۴	۱۵/۰۴	شمال	
	-۰/۱۵۵	۰/۲۰۵	۱/۹۷۴	۴۶۷۱/۹۶	۱۱/۱۸	۱۱/۱۸	شمال شرق	
	-۰/۱۲۹	-۰/۰۲۲	۱/۱۸	۳۳۶۹/۷۶	۶/۶۸	۶/۶۸	شرق	
	-۰/۰۵۵	-۰/۵۰۰	۰/۳۳	۲۱۹۲/۴۰	۱/۱۸۵	۱/۱۸۵	جنوب شرق	
	-۰/۰۳۰	-۰/۴۷۵	۰/۱	۱۱۱۸/۹۵	-۰/۵۴	-۰/۵۴	جنوب	
	-۰/۰۴۸	-۰/۳۷۰	۰/۱۱	۸۳۷/۶۲	۰/۶۲۵	۰/۶۲۵	جنوب غرب	
	-۰/۲۰۹	۰/۳۱۲	-۰/۸۳۸	۱۴۷۸/۶۴	۴/۷۵	۴/۷۵	غرب	
-۰/۲۱۵	۰/۴۷۵	۱/۷۸۱	۳۰۴۸/۵۷	۱۰/۱	۱۰/۱	شمال غرب		
۰/۰۳۷	-۰/۰۲۴	-۰/۱۹۶	-۰/۶۹۵	۴۵۶۷/۱۷	۷/۰۹	۷/۰۹	۱۵۰۰-۱۸۲۱	ارتفاع
	-۰/۰۴۸	۰/۴۵۶	۱/۵۳۹	۵۱۴۰/۶۲	۱۵/۷	۱۵/۷	۱۸۲۱-۲۱۷۹	
	۰/۰۲	-۰/۳۰۷	۰/۶۴	۴۸۸۹/۷۳	۶/۵۳	۶/۵۳	۲۱۷۹-۲۵۰۶	
	-۰/۰۵۲	۰/۵۳۷	۱/۴۳۵	۴۳۶۶/۷۶	۱۴/۶۴	۱۴/۶۴	۲۵۰۶-۲۸۴۴	
	-۰/۰۴۰	۰/۱۹۵	-۰/۶۸۹	۲۷۱۸/۷۱	۷/۰۳	۷/۰۳	> ۲۸۴۴	
۰/۱۸۸	۰/۳۰	۰/۱۹۴	-۰/۲۳۴	۹۳۹۴/۷۱	۳۰/۶۸	۳۰/۶۸	۰-۲۵۰	فاصله از گسل
	-۰/۳۰۶	۰/۱۸۷	-۰/۲۸۷	۶۱۶۴/۴۶	۱۳/۸۱	۱۳/۸۱	۲۵۰-۵۸۵	
	۰/۱۹	-۰/۲۹۵	-۰/۱۷۷	۳۷۰۳/۵۴	۵/۱۵	۵/۱۵	۵۸۵-۱۰۱۰	
	-۰/۰۷۸	-۰/۵۴۰	-۰/۲۹۹	۱۶۶۷/۷	۰/۹۵۳	۰/۹۵۳	۱۰۱۰-۱۶۷۵	
	-۰/۰۶۵	-۰/۳۹۲	۰	۷۵۲/۵۷	۰/۳۹۰	۰/۳۹۰	> ۱۶۷۵	
۰/۱۹۵	-۰/۳۰۰	۰/۴۶۳	۲/۲۳۳	۶۸۸۸/۱	۲۲/۷۸۱	۲۲/۷۸۱	۰-۸۰	فاصله از آبراهه
	-۰/۱۴۰	۰/۱۳۷	۱/۰۰۱	۶۶۰۲/۳۱	۱۰/۲۱۸	۱۰/۲۱۸	۸۰-۱۸۰	
	۰/۱۸	۰/۰۲۶	-۰/۹۰۵	۴۶۳۱/۵	۹/۲۳۴	۹/۲۳۴	۱۸۰-۲۹۰	
	-۰/۲۷۲	۰/۳۴۵	-۰/۷۸۱	۲۶۴۸/۰۹	۷/۹۶۸	۷/۹۶۸	۲۹۰-۴۲۵	
	-۰/۰۷۹	۰/۳۵۵	-۰/۰۷۸	۹۱۳	۰/۷۹۶	۰/۷۹۶	> ۴۲۵	
۰/۰۷۵	-۰/۰۴۸	-۰/۱۷	-۰/۹۲۸	۶۲۶۶/۷۹	۹/۴۶	۹/۴۶	۰-۱۹۲۵	فاصله از روستا
	۰/۱	۰/۴۷۵	۱/۲۹۱	۴۱۵۶/۲۱	۱۳/۱۷	۱۳/۱۷	۱۹۲۵-۳۸۱۰	
	-۰/۰۴۸	-۰/۰۱۸	-۰/۶۶۱	۴۳۸۷/۵۴	۶/۷۵	۶/۷۵	۳۸۱۰-۵۶۱۵	
	-۰/۱۳۷	۰/۶۹۶	۱/۷۸۶	۴۲۱۱/۳۴	۱۸/۲۱	۱۸/۲۱	۵۶۱۵-۷۴۲۰	
	-۰/۰۴۱	-۰/۳۴۸	-۰/۳۳۲	۲۶۶۱/۱	۳/۳۹	۳/۳۹	> ۷۴۲۰	
۰/۰۳۳	-۰/۰۱۲	-۰/۱۲۴	-۰/۲۹۸	۳۷۵۶/۴	۳/۰۴	۳/۰۴	۳۶۰-۳۸۰	بارندگی
	-۰/۰۵۱	۰/۳۳۶	۲/۰۸۹	۶۵۲۰/۸۷	۲۱/۳۱	۲۱/۳۱	۳۸۰-۳۹۰	
	-۰/۰۴۵	-۰/۲۴۱	۱/۸۹	۶۶۶۹/۳۵	۱۹/۲۸	۱۹/۲۸	۳۹۰-۴۰۰	
	-۰/۰۲۱	۰/۶۵۵	-۰/۴۴۵	۳۳۴۲/۵	۴/۵۳	۴/۵۳	۴۰۰-۴۱۰	
	-۰/۰۳۱	۰/۷۱۹	-۰/۲۷۷	۱۳۹۶/۹۳	۲/۸۲۸	۲/۸۲۸	۴۱۰-۴۲۰	
۰/۱۱۶	-۰/۰۲۵	-۰/۷۵۲	-۰/۱۱۴	-۰/۱۱۴	۰/۴۷۹	۱۲-۰	شیب	
	-۰/۰۸۳	۰/۰۴۷	-۰/۲۶۲	-۰/۲۶۲	۰/۱۰۳	۲۴-۱۲		

	۰/۱۲۸	۰/۵۵۴	۰/۳۹۰	۰/۳۹۰	۱/۶۳۷	۲۶-۲۴	
	۰/۲۱۸	۰/۷۰۲	۰/۲۳۲	۰/۲۳۲	۰/۹۷۶	۴۸-۳۶	
	۰/۱۲۲	۰/۱۹۲	.	.	.	>۴۸	
	.	۰,۰۰۵	.	۳۷/۸۴	.	Qs	
	۰/۰۷۳	-۰/۴۲۱	۰/۶۶	۱۵۷۲/۶۴	۱/۴۶	PrL	
	۰/۰۱۶	-۰/۳۴۲	۰/۰۵	۵۲۷/۴۳	۰/۱۰۹	Cbt	
	۰/۳۳۵	۰/۳۶۱	۰/۷۶	۳۴۷/۲۶	۱/۶۸	pEs	
	۰/۰۷	-۰/۳۰۴	۰/۲۷	۶۶۱/۷۹	۰/۵۹۳	Ms	
	۰/۱۴۶	-۰/۰۶۷	۰/۲۲	۲۶۱/۰۹	۰/۴۸۴	gr	
	.	۰/۰۶	.	۴۱۷/۳۴	.	gd	
	۰/۰۴۲	-۰/۷۷	۱/۲۲	۵۰۷۵/۶۴	۲/۷	ubmt	
	۰/۱۳۵	-۰/۱۰۴	۰/۳۱	۴۰۰/۶۷	۰/۶۸۷	PC-Cs	
	۰/۳۰۱	۰/۲۱۴	۰/۴۷	۲۶۹/۶۰	۱/۰۳	Msc	
	.	.	.	۱/۲۸	.	Qt	
	۰/۳۷۲	۰/۴۳۶	۱۴/۰۲	۶۵۷۸/۸۷	۳۱/۰۷	om	
۰/۱۱۹	۰/۱۱۶	-۰/۱۵۳	۰/۲۹	۴۳۶/۹۲	۰/۶۴	Qt1	
	۰/۰۶	-۰/۴۷	۰/۵۱	۱۵۱۲/۹۳	۱/۱۴	I	
	.	۰/۰۱	.	۷۱/۲۱	.	Qf2	
	۰/۲۶	۰/۲۳۹	۱/۱۵	۷۷۵/۰۶	۲/۵۴	sr	سنگ
	۰/۳۸۱	۰/۵۶۸	۱/۶۲	۷۴۲/۶۴	۳/۵۹	di	شناسی
	.	۰/۰۱۲	.	۸۶/۸۱	.	r	
	۰/۱۲	-۰/۱۵۳	۰/۳۴	۴۹۵/۲۱	۰/۷۵	dimt	
	.	۰/۰۱	.	۷۶/۱۲۵	.	lint	
	.	۰/۰۳۴	.	۲۳۹/۴۲	.	sh	
	۰/۲۱۶	۰/۱۰۱	۰/۹۹	۸۲۱/۵۳	۲/۲۰	ommt	
	۰/۰۷۰	-۰/۲۱۹	۰/۱۳	۳۱۸/۷۹	۰/۲۸۱	Qal	
	۰/۳۶۱	۰/۷۷۶	۵/۱۷	۱۶۹۲۶/۸۸	۴۳/۹۵	مرتع	
	۰/۲۳۳	-۰/۱۶۸	۰/۵۹۵	۳۰۱۷/۹۸	۵/۰۶	باغ	
	.	۰/۰۰۴	۰/۲۳۳۳	۹۷۸/۸۱	۱/۹۸	زراعت	
۰/۱۴۶	۰/۲۸۲	.	.	۷۰۰/۳۴	.	توده سنگی	کاربری
	.	.	.	۳۳/۲۹	.	دیم رها شده	اراضی
	.	.	.	۲۴/۹۳	.	پهنه آبی	



شکل ۴: نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش و منحنی ROC

جدول ۳ بیان‌کننده میزان مساحت هر رده لغزش، میزان مساحت لغزش‌ها و همچنین مساحت لغزش‌ها و کل حوضه است که با استفاده از روابط ۱۶-۲ برای هر کدام از مدل‌های آنتروپی شانون، وزن شاهد و LNRF وزن عوامل موثر انتخاب شده بدست آمده است. مدل آنتروپی شانون مستقیماً وزن عوامل موثر را محاسبه می‌کند، در حالی که دو مدل وزن شاهد و LNRF تنها وزن زیرعامل‌ها را در اختیار فرد محقق قرار می‌دهند. بنابراین در این پژوهش به بررسی ارتباط این عوامل با زیرعامل‌های تعیین شده در مدل‌های فوق پرداخته شد. عوامل انتخاب شده در این تحقیق با توجه کامل به هر رخداد لغزشی در حوضه و این که چه عاملی بر روی آن اثر گذاشته و همچنین با در نظر گرفتن همه جنبه‌های جانبی که می‌تواند

اثر گذاشته باشد، انتخاب شدند. بنابراین این مورد از صرف زمان و هزینه‌هایی مانند تعداد بازدیدهای بیشتر جلوگیری و مهمترین عوامل در نظر گرفته شدند. اصلی ترین چالش برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش‌ها در هر مطالعه‌ای انتخاب یک مدل مناسب که بتواند رابطه ما بین عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش را به خوبی تفسیر کند، می‌باشد. علت انتخاب مدل‌های آماری استفاده شده برای این مطالعه اولاً ایجاد یک رابطه دارای همبستگی بالا در بین عوامل مختلف دخیل در رخداد لغزش‌ها، دوماً چون این مدل‌ها از طریق نمونه‌های بدست آمده از یک جامعه بزرگ عمل پیش‌بینی و اندازه‌گیری را انجام می‌دهند، بنابراین از قابلیت تعمیم بالایی برخوردار می‌باشند (چامبرس و هستی^۱، ۲۰۱۷) و سومین دلیل نتایج خیلی خوب مدل‌های آماری فوق در مطالعات قبلی مربوط به رخداد زمین لغزش‌ها (ایلدرمی و عبادی، ۱۴۰۰؛ ادیشن و همکاران، ۲۰۱۸؛ پیرا و همکاران، ۲۰۱۹؛ پناهی و همکاران، ۲۰۲۰؛ کونستانینیو و همکاران، ۲۰۲۲) می‌باشد. یکی از چالش‌های اساسی در تحقیقات مربوط به زمین لغزش شناسایی و انتخاب مدل‌هایی است که به لحاظ معادلات، ساختار و عملکرد تقریباً بهم نزدیک و متعادل باشند. این کار نیاز به یک کاربر خبره در زمینه مدلسازی دارد. هر چند هیچگاه به طور یقین نمی‌توان گفت که در خصوص انتخاب مدل‌ها در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش یکسری مدل‌ها مانند مدل‌های داده‌کاوی بر مدل‌های آماری ارجحیت دارند. زیرا در شرایط مختلف ممکن است مدل‌های آماری بر مدل‌های داده‌کاوی ارجحیت داشته باشند. در تحقیق پناهی و همکاران (۲۰۲۲) مدل وزن شاهد در دسته مدل‌های داده‌کاوی طبقه‌بندی شده است. در اغلب تحقیقات انجام شده در جهت مقایسه بین مدل‌های آماری و داده‌کاوی نتایج بیان‌کننده ارجحیت مدل‌های داده‌کاوی بر مدل‌های آماری در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش‌ها می‌باشد. اگر در تحقیق حاضر بپذیریم که بر اساس پژوهش پناهی و همکاران، (۲۰۲۲) مدل وزن شاهد در دسته مدل‌های داده‌کاوی طبقه‌بندی می‌شود، در این تحقیق با ارزیابی مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC نتایج نشان داد که مدل آماری آنتروپی شانون بر مدل داده‌کاوی WOE ارجحیت دارد. همچنین با بررسی وزن هریک از زیرعوامل‌های موثر در وقوع زمین لغزش‌ها و تطبیق آن با واقعیت و نقشه نهایی پهنه‌بندی شده مشخص شد که مدل برتر با مدل داده‌کاوی WOE نسبت به مدل هم دسته خود یعنی مدل LNRNF در شناسایی زیرعوامل‌های موثر بر اساس فراوانی رخداد در هر رده بهتر بوده است. بنابراین توجه به انتخاب مدل‌هایی با خصوصیات مشابه در شناسایی و ایجاد یک نقشه مطمئن از پهنه‌بندی مناطق دارای حساسیت بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در مدل آنتروپی شانون عوامل فاصله از آبراهه، شاخص موقعیت توپوگرافی، فاصله از گسل‌ها و کاربری اراضی به عنوان مهمترین عوامل موثر در رخداد زمین لغزش‌ها شناسایی شدند. در سایر مدل‌ها سه زیر عامل آمیزه‌های افیولیتی و آهک‌های پلاژیک از عامل سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و فاصله ۸۰-۰ از آبراهه بیشترین اثر را بر وقوع زمین لغزش‌ها داشته‌اند. بر اساس بازدیدهای میدانی، نقشه ادغام شده موقعیت قرارگیری زمین لغزش‌ها و نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش‌ها (شکل ۳) می‌توان دریافت که عامل آبرهه، گسل و کاربری اراضی نقش بسیار موثری را در رخداد لغزش‌ها داشته‌اند. از آن جا که دو مدل WOE و LNRNF وزن هر زیر عامل را در رخداد لغزش‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهند. در نقشه زمین‌شناسی زیر عامل آمیزه‌های افیولیتی و آهک‌های پلاژیک به تنهایی حدود ۴۰ درصد حوضه را به خود اختصاص داده است. در این حالت طبیعی است که وزن این زیرعوامل در وقوع زمین لغزش‌ها افزایش پیدا کند. در بررسی وزن این زیرعوامل در مدل برتر نیز این مورد تایید می‌گردد. منتهی در حالت کلی بر اساس مدل آنتروپی شانون و وزن نهایی این عامل در رده بعدی عوامل موثر قرار می‌گیرد. بر اساس جدول فراوانی تجمعی پیکسل‌ها حدود ۳۵ از منطقه مورد مطالعه برای مدل برتر در رده خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است.

¹. Chambers & Hastie

جدول ۳: جدول فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در سه مدل آنتروپی شانون، WOE و LNRF

رده	آنتروپی شانون (%)	وزن شاهد (%)	LNRF (%)
خیلی کم	۱۲/۲	۱۵/۳	۱۷/۳
کم	۲۳/۳	۱۸/۸	۲۳/۱
متوسط	۲۹/۳	۲۶/۹۵	۳۰/۲
زیاد	۲۵/۱	۲۵/۵۵	۱۰/۸
خیلی زیاد	۱۰/۱	۱۳/۴	۱۸/۶

نتیجه‌گیری

هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی ارتباط عوامل و زیرعامل‌های موثر در رخداد زمین‌لغزش‌ها بوده است. بر اساس مدل برتر (آنتروپی شانون) شاخص موقعیت توپوگرافی، عوامل فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و کاربری اراضی بیشترین اثر را بر رخداد زمین‌لغزش‌ها داشته‌اند. در حالی که در حالت مقایسه اثر وزن زیر عامل‌ها با استفاده از دو مدل وزن شاهد و مدل فاکتور اسمی بیشتری زیرعامل که در رخداد لغزش‌ها اثر گذاشته‌اند مربوط به عامل سنگ‌شناسی می‌باشد. نتایج نشان داد که بین دو مدل آنتروپی شانون و WOE و سپس با مدل LNRF در شناسایی عوامل موثر بر اساس وزن زیر عامل‌ها ارتباط خوبی برقرار شده است. حوضه مورد مطالعه بنا بر نتایج بدست آمده از مدل‌های استفاده شده در این مطالعه یکی از مناطق بسیار بحرانی به لحاظ وجود مناطق حساس به وقوع پدیده زمین‌لغزش می‌باشد. از آن جا که در این حوضه رخداد زمین‌لغزش‌ها تحت تاثیر هرسه عوامل محیطی، انسانی و شاخص‌های مورفومتری می‌باشد. بنابراین میزان خسارات و به طبع آن مناطق دارای حساسیت بالا نیز بیشتر شده است. در این حوضه، آبخیز نشینان با مشکلات بسیار زیادی از جمله مسئله امرار معاش رو به رو هستند. به علت افزایش جمعیت و روی آوردن به تغییرات کاربری و نگهداشتن دام مازاد بر ظرفیت مراتع، روز به روز تعداد این لغزش‌ها افزوده می‌گردد. تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری منطقه مورد مطالعه با هدف ارائه برنامه‌های کوتاه مدت (جلوگیری از رخداد بیشتر) و بلند مدت (ترمیم مناطق آسیب دیده) می‌باشد. اگر هدف اتخاذ برنامه‌هایی هست که در کوتاه مدت بتواند وقوع زمین‌لغزش‌ها را به حداقل برساند باید شناسایی موثرترین عوامل موثر و مناطق دارای حساسیت بیشتر از طریق مدلسازی به وسیله مدل‌های دارای دقت و صحت بیشتر در اولویت برنامه‌های مربوط به پیشگیری و کنترل رخداد زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. این کار می‌تواند تا حدودی مدیریت دامنه‌های ناپایدار در منطقه مورد مطالعه را تسهیل کند. منتهی در کنار آن می‌توان با اتخاذ یک برنامه‌های مدیریتی طولانی مدت از جمله ایجاد کارخانه‌های تقاضای میوه‌جات به علت وجود باغات زیاد و مسئله مهمتر از این نزدیکی و هم مرز بودن این حوضه با دو کشور عراق و ترکیه است که ایجاد یک بازارچه مرزی می‌تواند سبب افزایش درآمد خانوار و از رغبت آنان به انجام کارهای سخت از جمله افزایش دام و کار در اراضی کشاورزی دارای شیب زیاد و کوهستانی به شدت خواهد کاست. دارا بودن شرایط اجرای طرح‌هایی از جمله احداث نیروگاه برق با اشتغال و سرمایه‌گذاری تعدادی از افراد و شرکت‌های خصوصی در این منطقه می‌تواند منبع درآمد خوبی باشد. این حوضه و به طور کلی این منطقه، یکی از مکان‌های توریستی است که به واسطه وجود آبشارها، کوه‌ها و دریاچه‌های بکر همراه با هوای پاک (اکسیژن نزدیک به ۱۰۰ درصد) سالانه گردشگران بسیار زیادی را از سراسر جهان به خود جلب می‌کند. به واسطه وجود پتانسیل‌های بسیار خوب منطقه و حوضه برای اجرای انواع طرح‌های اشاره شده در بالا، اگر یک برنامه‌ریزی منسجم و دقیق از طرف مسئولین زیربط انجام گیرد به شدت بر تعداد رخداد لغزش‌های که آبخیز نشینان سبب رخداد آنان هستند کاسته خواهد شد. در این حوضه نقش عوامل طبیعی نسبت به عوامل انسانی بیشتر بوده است در نتیجه حوضه ذاتا به رخداد زمین‌لغزش‌ها حساس می‌باشد. بنابراین با کنترل لغزش‌های ناشی از فعالیت‌های آبخیز نشینان تا حدودی می‌توان به کنترل رخداد سایر لغزش‌ها نیز کمک کرد. زیرا در اغلب

موارد پیشگیری و کنترل مناطق مستعد زمین لغزش ناشی از عوامل طبیعی امکان پذیر نبوده و یا کار آسانی نخواهد بود و در صورت امکان، می تواند بسیار پرهزینه می باشد.

منابع

- ایلدرمی، ع.، عبادی، فواد. ۱۴۰۰. ارزیابی کارایی مدل های پهنه بندی خطر زمین لغزش حوضه آبخیز سد کردستان، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۸۳-۶۴.
- حنیفی نیا، ع.ع. ۱۳۹۸. پهنه بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل های داده کاوی و آماری چند متغییره در حوضه آبخیز چریک آباد ارومیه. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه.
- حنیفی نیا، ع.ع.، نظرزاد، ح.، نجفی. س.، کرنزادی، آ. ۱۳۹۹. اولویت بندی عامل های مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی حساسیت آن در آبخیز چریک آباد ارومیه با استفاده از مدل آنتروپی شانون. پژوهش های آبخیزداری، دوره ۳۳، شماره ۴، صص ۳۲-۴۸.
- حنیفی نیا، ع.ع.، نظرزاد، ح. ۱۴۰۰. اثر شاخص های مورفومتری در بهبود کارایی مدل های داده کاوی به منظور پهنه بندی حساسیت زمین لغزش حوضه آبخیز چریک آباد ارومیه. جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۰، شماره ۴، صص ۴۷-۶۸.
- عابدینی، م.، پیروزی، ا.، شکرزاده، ا. ۱۴۰۰. ارزیابی و پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه ی موردی: شهرستان نیر)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۴، صص ۱۳۶-۱۵۵.
- کرنزادی، آ.، اونق، م.، پورقاسمی، ح.ر.، بهره مند، ع.ر.، معتمدی، م. ۱۳۹۹. پیش بینی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل های ترکیبی فاصله ماهالانوبیس و یادگیری ماشین (مطالعه موردی: حوضه آبخیز اوغان، استان گلستان)، پژوهش های دانش زمین، دوره ۱۱، شماره ۲، صص ۱-۱۸.
- همتی، ف. ۱۴۰۰. بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز آبگلال (استان خوزستان) با استفاده از مدل فازی. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۴، صص ۷۳-۸۵.
- Aditian, A., Kubota, T., & Shinohara, Y. (2018). Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. *Geomorphology*, 318, 101-111
- Andersson-Sköld, Y., Bergman, R., Johansson, M., Persson, E., & Nyberg, L. (2013). Landslide risk management—A brief overview and example from Sweden of current situation and climate change. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 3, 44-61.
- Batar, A. K., & Watanabe, T. (2021). Landslide susceptibility mapping and assessment using geospatial platforms and weights of evidence (WoE) method in the Indian Himalayan Region: recent developments, gaps, and future directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 114.
- Chambers, J. M., & Hastie, T. J. (2017). *Statistical models. In Statistical models in S (pp. 13-44)*. Routledge.
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., & Shahabi, H. (2018). Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling. *Science of the total environment*, 644, 1006-1018.
- De Reu, J.; Bourgeois, J.; Bats, M.; Zwertaeagher, A.; Gelorini, V.; De Smedt, P.; Chu, W.; Antrop, M.; De Maeyer, P.; Finke, P.; et al. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology* 2013, 186, 29-49.

- Ding, Q.; Chen, W.; Hong, H. Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping. *Geocarto Int.* 2017, 32, 619–639.
- Eslami, M., Shadfar, S., Mohammadi-Torkashvand, A., & Pazira, E. (2019). Assessment of density area and LNRF models in landslide hazard zonation (case study: Alamout watershed, Qazvin Province, Iran). *Acta Ecologica Sinica*, 39(2), 173-180.
- Gupta, R.P. and Joshi. B.C. (1990) Landslide hazard zoning using the GIS approach- A case study from the Ramganga catchment, Himalayas. *Engineering Geology*, 28(1):119-131.
- He, H., Hu, D., Sun, Q., Zhu, L., & Liu, Y. (2019). A landslide susceptibility assessment method based on GIS technology and an AHP-weighted information content method: A case study of southern Anhui, China. *ISPRS international journal of geo-information*, 8(6), 266.
- He, Q., Shahabi, H., Shirzadi, A., Li, S., Chen, W., Wang, N., ... & Ahmad, B. B. (2019). Landslide spatial modelling using novel bivariate statistical based Naïve Bayes, RBF Classifier, and RBF Network machine learning algorithms. *Science of the total environment*, 663, 1-15.
- Huang, F., Cao, Z., Guo, J., Jiang, S. H., Li, S., & Guo, Z. (2020). Comparisons of heuristic, general statistical and machine learning models for landslide susceptibility prediction and mapping. *Catena*, 191, 104580
- Islam, A. R. M. T., Saha, A., Ghose, B., Pal, S. C., Chowdhuri, I., & Mallick, J. (2021). Landslide susceptibility modeling in a complex mountainous region of Sikkim Himalaya using new hybrid data mining approach. *Geocarto International*, 1-26.
- Kavzoglu T, Kutlug Sahin E, Colkesen I, (2015). An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district, ORIGINAL PAPER 76:471–496.
- Konstantinou, K. I., Ayu Rahmalia, D., Nurfitriana, I., & Ichihara, M. (2022). Fast Identification of Volcanic Tremor and Lahar Signals during the 2009 Redoubt Eruption Using Permutation Entropy and Supervised Machine Learning. *Seismological Society of America*, 93(1), 435-443.
- Lotfi, F.H.; Fallahnejad, R. Imprecise Shannon's entropy and multi attribute decision making. *Entropy* 2010,12, 53–62.
- Lucchese, L. V., de Oliveira GG, Pedrollo OC. (2021). Investigation of the influence of nonoccurrence sampling on landslide susceptibility assessment using Artificial Neural Networks, *Catena* 198: 105067.
- Magliulo, P.; Di, L.A.; Russo, F.; Zelano, A. Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: A case study in southern Italy. *Nat Hazards* 2008, 47, 411.
- Mallick, J., Singh, R. K., AlAwadh, M. A., Islam, S., Khan, R. A., & Qureshi, M. N. (2018). GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 77(7), 1-25.
- Miao, F., Xie, X., Wu, Y., & Zhao, F. (2022). Data Mining and Deep Learning for Predicting the Displacement of “Step-like” Landslides. *Sensors*, 22(2), 481.
- Möller, M., Koschitzki, T., Hartmann, K. J., & Jahn, R. (2012). Plausibility test of conceptual soil maps using relief parameters. *Catena*, 88(1), 57-67.
- Myronidis, D., Papageorgiou, C., & Theophanous, S. (2016). Landslide susceptibility mapping based on landslide history and analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 81(1), 245-263.

- Nefeslioglu, H. A., Sezer, E. B. R. U., Gokceoglu, C., Bozkir, A. S., & Duman, T. Y. (2010). Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010.
- Nhu, V. H., Janizadeh, S., Avand, M., Chen, W., Farzin, M., Omidvar, E., ... & Lee, S. (2020). Gis-based gully erosion susceptibility mapping: A comparison of computational ensemble data mining models. *Applied Sciences*, 10(6), 2039.
- Panahi, M., Gayen, A., Pourghasemi, H. R., Rezaie, F., & Lee, S. (2020). Spatial prediction of landslide susceptibility using hybrid support vector regression (SVR) and the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with various metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, 741, 139937.
- Panahi, M., Rahmati, O., Rezaie, F., Lee, S., Mohammadi, F., & Conoscenti, C. (2022). Application of the group method of data handling (GMDH) approach for landslide susceptibility zonation using readily available spatial covariates. *Catena*, 208, 105779.
- Perera, E. N. C., Jayawardana, D. T., Jayasinghe, P., & Ranagalage, M. (2019). Landslide vulnerability assessment based on entropy method: A case study from Kegalle district, Sri Lanka. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1635-1649
- Pourghasemi, H. R., & Rossi, M. (2017). Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1), 609-633.
- Regmi, N. R., J. R. Giardino and J. D. Vitek. 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA, *Geomorphology* 115: 172-187.
- Riley, S. J., DeGloria, S. D. & Elliot, R. (1999): A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. – *Intermountain Journal of Sciences* 5: 23–27.
- Samia, J.; Temme, A.; Bregt, A.K.; Wallinga, J.; Stuiver, J.; Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Rossi, M. Implementing landslide path dependency in landslide susceptibility modelling. *Landslides* 2018, 15, 2129–2144.
- Sørensen, R., Zinko, U. & Seibert, J. (2006): On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. – *Hydrology and Earth System Sciences* 10: 101–112.
- Sujatha, E. R. (2021). An integrated landslide susceptibility model to assess landslides along linear infrastructure for environmental management. *Environmental Earth Sciences*, 80(12), 1-15.
- Sun, X., Chen, J., Bao, Y., Han, X., Zhan, J., & Peng, W. (2018). Landslide susceptibility mapping using logistic regression analysis along the Jinsha river and its tributaries close to Derong and Deqin County, southwestern China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11), 438.
- Tsangaratos, P.; Ilia, I. Combining fuzzy logic and information theory for producing a landslide susceptibility model. In *Proceedings of the 14th International Congress of the Geological Society of Greece, Thessaloniki, Greece, 25–27 May 2016; Volume 50, pp. 34–46.*
- Vargas-Cuervo, G., Rotigliano, E., & Conoscenti, C. (2019). Prediction of debris-avalanches and-flows triggered by a tropical storm by using a stochastic approach: An application to the events occurred in Mocoa (Colombia) on 1 April 2017. *Geomorphology*, 339, 31-43
- Wang, F.; Cao, Y.; Liu, M. Risk Early-Warning method for natural disasters based on integration of entropy and DEA model. *Appl. Math.* 2011, 2, 23–32.
- Wang, H., Zhang, L., Yin, K., Luo, H., & Li, J. (2021). Landslide identification using machine learning. *Geoscience Frontiers*, 12(1), 351-364.