

تجزیه و تحلیل خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ANP و LR در محیط GIS (مطالعه موردی پهنه کسلی قوشاداغ-ارسباران در آذربایجان شرقی)

احد رنجبری - دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
موسی عابدینی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
داود مختاری - استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۸ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۳/۲۷

چکیده

زمین لرزه و زمین لغزش از زیان‌بارترین مخاطرات طبیعی هستند که همزادی و همبستگی زمانی و مکانی معناداری با یکدیگر دارند. مطالعه حاضر در پهنه لرزه‌ای متأثر از زمین لرزه ۱۳۹۱ ارسباران که تلفات جانی و مالی فراوانی داشت انجام پذیرفت. این زمین لرزه موجب افزایش ناپایداری دامنه‌ای و تبدیل فرآیندهای ژئومورفیک به عوامل مخاطره‌زا شده است. در این تحقیق، حساسیت زمین لغزش با استفاده از دو مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP) و رگرسیون لجستیک (LR) در سامانه کسلی قوشاداغ پهنه‌بندی گردید و مناسب‌ترین مدل معرفی شد. جهت این مطالعه از تصویر OLI ماهواره لندست ۸ و سنتینل 2a ۲۰۱۷ استفاده شد. ۱۴ فاکتور مؤثر در وقوع زمین لغزش (شیب، جهت دامنه، کاربری زمین، فاصله از گسل و رودخانه و جاده، طبقات ارتفاعی، لیتولوژی، اقلیم، بارندگی، خاک، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)، شاخص طول شیب (LS)، شاخص قدرت آبراهه‌ای (SPD)) در محیط GIS آماده شد و در محیط نرم‌افزار Super Decision وزن هر یک مشخص گردید و دوباره در ArcGIS نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی به دست آمد. در وقوع زمین لغزش‌ها، عامل فاصله از گسل و بارش بیشترین و کاربری زمین کمترین نقش را داشته‌اند. وقوع حدود ۶۲/۲ و ۷۱/۱ درصد لغزش‌ها در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به ترتیب در ANP و رگرسیون لجستیک، نشان‌دهنده دقت قابل قبول نقشه‌های پیش‌بینی شده برای زمین لغزش می‌باشد. نتایج ارزیابی صحت روشها با شاخص ROC، نشان داد که درصد مساحت زیر منحنی (AUC) نقشه‌ها، به ترتیب در مدل رگرسیون لجستیک ۸۵/۵۲ درصد و در مدل تحلیل شبکه ۸۱/۳۵ درصد با میزان خطای استاندارد ۰/۰۶۲ به دست آمدند که هر دو نشانگر قدرت پیش‌بینی خیلی خوب همراه با برتری نسبی مدل رگرسیون لجستیک می‌باشد. نتایج مطالعه نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای مناطق لرزه‌خیز از حرکات دامنه‌ای دارد و ضرورت شناسایی و پایش مخاطرات ژئومورفولوژیکی و مقایسه آنها در قبل و بعد از زلزله و اجرای عملیات محافظتی را بیشتر می‌کند.

واژگان کلیدی: فرآیند تحلیل شبکه‌ای، رگرسیون لجستیک، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، زلزله ارسباران (زلزله ورزقان-هر)، گسل قوشاداغ.

مقدمه

مخاطرات طبیعی به عنوان پدیده‌های تکرارشدنی و مخرب، همواره در طول دوران حیات کره زمین وجود داشته و پس از پیدایش بشر نیز خطری جدی برای انسان‌ها بوده است. زمین‌لرزه و زمین‌لغزش از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی هستند که همزادی و همبستگی زمانی و مکانی بسیار معناداری با همدیگر دارند. زمین‌لرزه‌ها به عنوان عامل اصلی ایجاد بسیاری از حرکت‌های توده‌ای مواد تشکیل دهنده زمین همچون، زمین لغزش‌ها، سنگ‌افت‌ها، بهمن‌ها و روانه‌ها محسوب می‌شوند (کیفر، ۱۹۸۴، بربریان، ۱۹۹۴ و پدرام، ۱۹۹۰، به نقل از: مختاری، ۱۳۸۵، ۵۷). زمین‌لغزش‌ها زندگی انسان‌ها را با تخریب محیط، منابع و دارایی آن‌ها با خطر جدی روبه‌رو می‌کنند (سانوی و همکاران، ۲۰۱۲، ۳۰)، خسارات مالی و جانی همراه با تخریب تأسیسات و افزایش هزینه‌ها را به دنبال دارند (داس و ساهو، ۲۰۱۰، ۶۲۸). سکونتگاه‌های انسانی و به‌خصوص زیستگاه‌های روستایی در پاره‌ای از مواقع به دلیل استقرار جبری در بسترهای واجد زیرساخت مخاطره‌آمیز طبیعی همچون فعالیت گسل‌ها و لرزش‌های حاصل از آن در معرض آسیب‌پذیری قرار دارند (مختاری، ۱۳۸۴، ۷۱). وقوع زمین‌لغزش اثرات زیادی را در مقیاس محلی و جهانی در اقتصاد داشته و همه‌ساله هزاران نفر در سرتاسر جهان زندگی‌شان را به خاطر زمین‌لغزش از دست می‌دهند (یالسنین و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۷۵). در ایران هم در بیشتر استان‌ها و هر سال موجب فرسایش و نابودی منابع خاک و تغییر شکل زمین می‌شود و به خانه‌ها و زیرساخت‌های اساسی، زمین‌های کشاورزی، اقتصاد و رفاه بشر آسیب می‌زند (پورقاسمی، ۲۰۱۸، ۱۷۸). روابط فضایی موجود بین منطقه وقوع زمین‌لغزش و عوامل مؤثر محیطی، عناصر کلیدی در بررسی حساسیت زمین‌لغزش است (ساموترا و همکاران، ۲۰۱۸، ۳۰۸). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شامل تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی این مناطق بر اساس درجه واقعی یا قابلیت مخاطره‌های ناشی از بروز زمین‌لغزش روی شیب دامنه‌هاست (شریعت‌جعفری، ۱۳۷۵، ۱۴۸). ارزیابی حساسیت و خطر زمین‌لغزش مهم‌ترین گام در تهیه نقشه زمین‌لغزش است (رجبی و همکاران، ۱۳۹۵، ۶۱). لذا شناخت مکانیزم و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مدیریت بحران نقش مهمی ایفا می‌کند (عابدینی و طولابی، ۲۰۱۸). به‌طور کلی پژوهش‌های موجود در رابطه با ارزیابی خطر زمین‌لغزش را از لحاظ رویکرد روش‌شناسی می‌توان در سه گروه غالب کمی، کیفی و نگرش هوش مصنوعی (AI) دسته‌بندی کرد. نگرش‌های کیفی بر مبنای داورهای ذهنی یک یا گروهی از متخصصین صورت می‌گیرد در حالی که نگرش‌های کمی بر مبنای قوانین سخت ریاضی صرف‌نظر از هرگونه سوگیری شخصی بنا شده‌اند. تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌توانند از دانش ذهنی یا تکنیک تطبیق الگو در مقابل حل مجموعه‌ای از معادلات ریاضی استفاده کنند. تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌طور وسیعی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم خبره و دیگر تکنیک‌های دانش پایه و قانون پایه را پوشش می‌دهند (نئوپان و پیانتاناکولچایی، ۲۰۰۶، ۲۸۱). با توجه به مطالب فوق و پژوهش‌های صورت‌گرفته برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش می‌توان از مدل‌هایی مثل رگرسیون لجستیک، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، فرآیند تحلیل شبکه (ANP)، شبکه عصبی مصنوعی، انواع مدل‌های دومتغیره آماری، مدل LNR، مدل منطق فازی و غیره استفاده کرد. تحقیقات اولیه در زمینه مدل‌سازی و پهنه‌بندی خطر حرکات توده‌ای با استفاده از GIS نیز توسط محققینی همچون چانگ، لاماس، شارما، پارس، کاسادل انجام شده است (کریشنا، ۱۹۹۹، ۱۵۴). پژوهش‌هایی که در خارج از کشور در مورد پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک

^۱ . Das & Sahoo

^۲ . Yalcin et al

^۳ . Samodra et al

^۴ . Neaupane & Piantanakulchai

^۵ . Krishna

انجام شده است عبارتند از: گریگوری و جان (۲۰۰۳)، چن و وانگ (۲۰۰۷)، داس و همکاران (۲۰۱۰)، پاردهان و لی (۲۰۱۰)، اتکینسون و ماساری (۲۰۱۱). در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی توسط: خامه‌چیان و همکاران، (۱۳۸۴)، (شیرزادی و همکاران، ۱۳۸۹)، (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸)، (طلایی و همکاران، ۱۳۸۸)، (روستایی و خدائی، ۱۳۹۵)، (عابدینی، ۱۳۹۳) انجام شده است. خالدی و همکاران (۱۳۹۱، ۶۷) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در محیط ArcGIS به شناسایی عوامل مؤثر در رویداد زمین‌لغزش و پهنه‌بندی میزان خطر این رویداد در حوضه طالقان پرداخته‌اند. متولی و همکاران (۱۳۸۸) وقوع زمین‌لغزش در حوضه واز را با استفاده از روش رگرسیون لجستیک بررسی نمودند. نتایج نشان داد لیتولوژی، فاصله از جاده و شیب نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش در منطقه دارند. عابدینی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک و AHP به شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی میزان خطر این رویداد در شهرستان بیجار استان کردستان پرداخته‌اند. لایه‌های اطلاعاتی به کار رفته در این تحقیق، شامل ارتفاع از سطح دریا، درجه شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، فاصله از عناصر خطی (گسل، جاده و رودخانه)، بارندگی، کاربری اراضی و ۱۴۴ پهنه لغزشی به‌عنوان متغیر مستقل می‌باشد. ایشان به این نتیجه رسیدند که مدل رگرسیون با صحت کلی ۸۴٪ نسبت به AHP از دقت بالایی برخوردار است. فتحی و همکاران (۱۳۹۴) با در نظر گرفتن ۱۷ پارامتر طبیعی و انسانی با استفاده از روش‌های فازی، تحلیل سلسله مراتبی و فرآیند تحلیل شبکه‌ای، به بررسی حساسیت منطقه سانگورچی نسبت به زمین‌لغزش پرداخته‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که ۷۶ درصد از منطقه به مناطق با حساسیت زیاد تعلق دارند و روش ANP را روش مناسبی برای تحلیل حساسیت زمین‌لغزش معرفی نموده‌اند. اکبری و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل تلفیقی فازی-فرآیند تحلیل شبکه‌ای به تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در حوضه فاروب رومان پرداختند. نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای این روش در مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش این حوضه بوده است. متخصصین ژئومورفولوژی تکتونیکی به‌ویژه شاخه مخاطرات آن لازم است آنالیز مقدماتی خطر^۱ (PHA) را به عنوان اولین گام در تحلیل ایمنی سامانه و طبقه‌بندی خطرات بالقوه فرآیندی و کارکردی زیرسامانه‌ها مدنظر قرار دهد و بر پایه ارزیابی و مستندسازی ریسک خطرات سامانه‌های پایه‌ریزی شده جدید یا تغییر یافته از طریق تحلیل و ارزیابی گروهی از خطرات عمومی تحت تاثیر قرار دهنده سامانه و ارایه پیشنهادات پایش خطرات عمل نماید (وینکولی^۲، ۱۹۹۴، ۶۲). در این نوشتار، خطر زمین‌لغزش مؤثر در آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها و اراضی به‌ویژه پس از زلزله ارسباران مورد ارزیابی و پهنه‌بندی قرار گرفته است. به‌طور کلی هدف از چنین مطالعه‌ای، پهنه‌بندی کردن مناطق پایدار و ناپایدار پهنه لرزه‌ای ارسباران (اصل پیشگیری بهتر از درمان) است که در کاهش آسیب‌پذیری منتج از برنامه‌ریزی محیطی و شهری مناسب می‌تواند اثرات مطلوبی بر جای گذارد. از سویی منطقه مورد مطالعه، پس از زلزله^۳ ۱۳۹۱، به سرعت در مسیر توسعه فیزیکی قرار دارد. از این رو، این نوشتار با بهره‌گیری از تجزیه و تحلیل عناصر مؤثر در وقوع مخاطرات دامنه‌ای با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه^۴ و مقایسه آن با مدل رگرسیون لجستیک^۴ به تحلیل کمی از مناطق پایدار و ناپایدار در این پهنه متأثر از زلزله بپردازد. گفتنی است تاکنون از این روش مقایسه‌ای به‌ویژه در مناطق متأثر از زلزله استفاده نشده است.

^۱. Preliminary Hazard Analysis

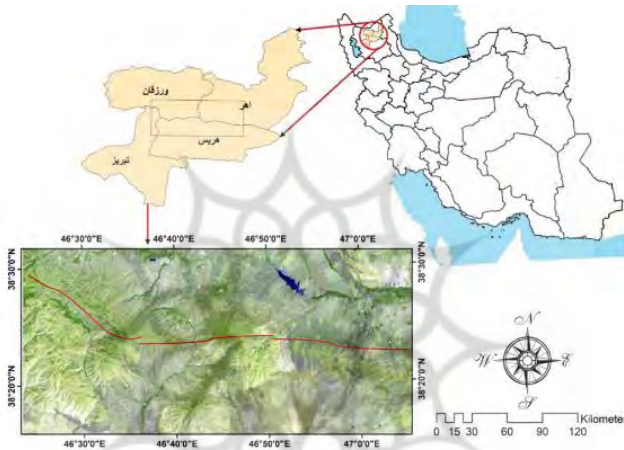
^۲. Vincoli

^۳. Analytic network process

^۴. Logistic Regression Model

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بخش عمده‌ای از سامانه گسلی قوشاداغ (شامل بخش‌هایی از شهرستان‌های اهر، ورزقان و هریس) واقع در استان آذربایجان شرقی را در بر می‌گیرد (شکل ۱). گستره مورد بررسی در بلوک ساختاری ارس (شمال باختری ایران) قرار گرفته است (بربریان و بیت ۱، ۱۹۹۹، ۱۲۲). این منطقه، در پهنه برخوردی میان صفحه‌های ایران، عربی و قفقاز جای داشته و درگیر جنبش‌های ناشی از برهم‌کنش این سه پهنه هست و از این نظر از ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی منحصربه‌فردی برخوردار است. رخداد زلزله‌های دوقلوی ویرانگر ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ با بزرگای ۶/۲ و ۶/۴ تلفات جانی و مالی بسیاری به دنبال داشت. این دو رخداد که تنها ۶ کیلومتر و ۱۱ دقیقه فاصله داشتند (دونر و همکاران ۲، ۲۰۱۵، ۷۹۱) موجبات بروز یا تشدید سایر مخاطرات ژئومورفولوژیکی از جمله حرکات دامنه‌ای را فراهم آورد که با موضوع مورد بحث این تحقیق نیز مرتبط می‌باشد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

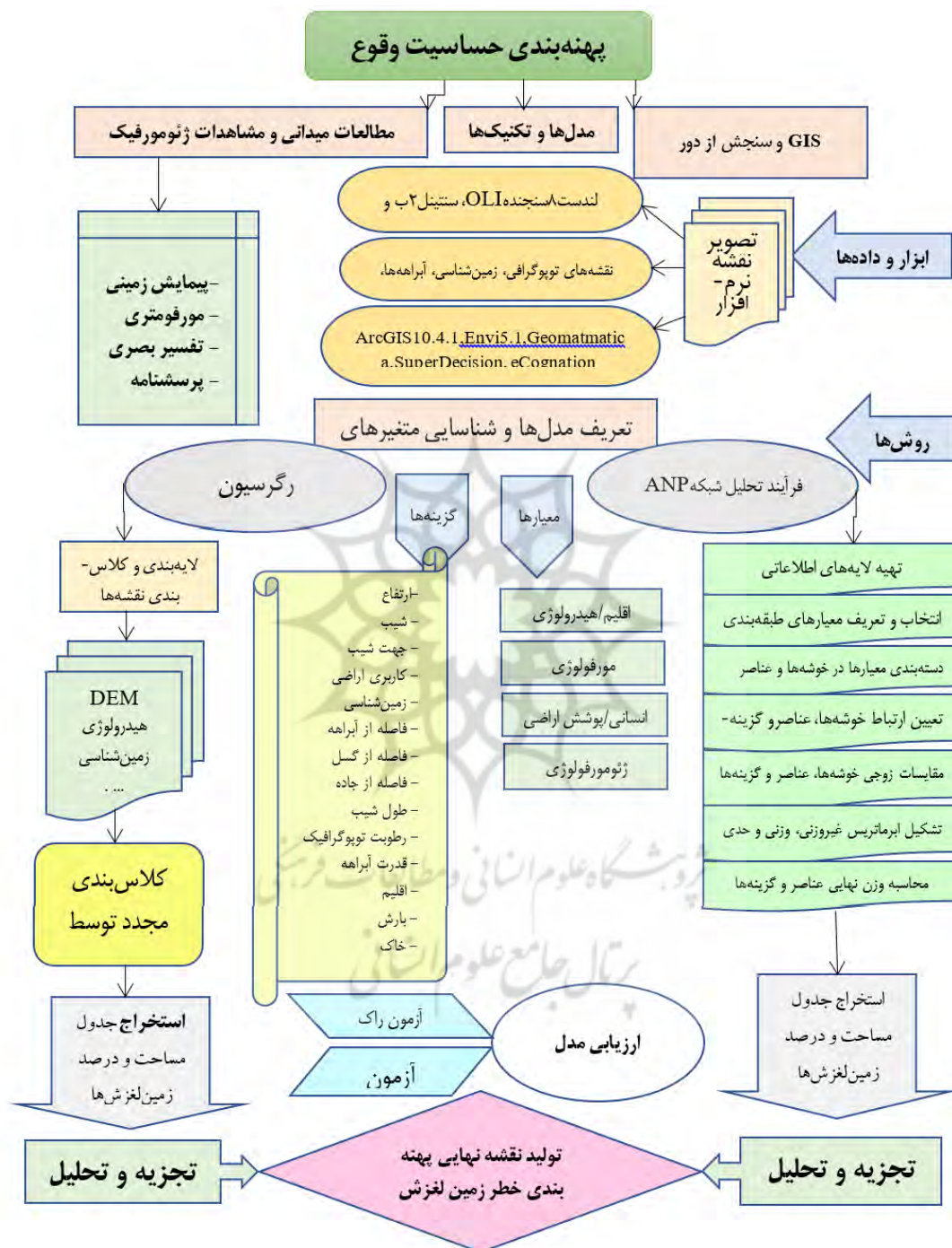
روش تحقیق

این پژوهش از نوع تحقیقات کاربردی-تجربی و از نظر روش، جزء تحقیقات توصیفی-تحلیلی با رویکرد مقایسه‌ای است. جهت اجرای مدل و تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش، جمع‌آوری و تهیه پایگاه داده از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش از مهم‌ترین مراحل تحقیق است بدین منظور در ابتدا به تعیین محدوده مورد نظر با لحاظ کردن فرم و فرآیندهای مخاطره-آمیز و با تأکید بر منطقه متأثر از زلزله ارسباران که تقریباً محدوده‌ای منطبق با شدت لرزه‌ای ۶ تا ۸ در بر می‌گیرد اقدام شد. سپس با استفاده از ۱۴ پارامتر (ارتفاع، اقلیم، بارش، جهت شیب، خاک، رطوبت توپوگرافیک (TWI)، زمین‌شناسی، شیب، طول شیب (LS)، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، قدرت آبراهه (SPI)، کاربری اراضی) عمل پهنه‌بندی زمین لغزش انجام شده است. در اولین گام به کمک نقشه‌های توپوگرافی، لایه مدل ارتفاعی منطقه (DEM) با اندازه پیکسل ۳۰ متری تهیه شد با داشتن این لایه با استفاده از عملگرهای مختلف موجود در بسته نرم‌افزاری GIS لایه‌هایی همچون شیب، جهت شیب و شبکه زهکشی که به صورت فاصله از رودخانه در مدل استفاده شده است، استخراج شدند. برای استخراج گسل‌ها، باند ۸ تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI با ردیف ۳۳ و گذر ۱۶۸، با باند پانکروماتیک آن (۱۵ متر) فیوژن شد. جهت مشاهده بهتر خطواره‌ها از فن‌های RGB، PCA، فیلترهای جهت‌دار و نسبت بانندی استفاده گردید سپس خطواره‌ها از تصاویر Pan Sharp شده در محیط نرم‌افزار ژئوماتیکا و با اعمال الگوریتم استخراج

۱. Berberian & Yeats

۲. Donner et al

خطواره ۱ استخراج و با پیمایش زمینی تطبیق گردید. از نرم‌افزار سوپر دسیژن هم برای محاسبه وزن گزینه‌ها استفاده شده است. هدف، ابزار، روش‌ها و فرایند پژوهش در روندنما به اختصار آورده شده است (شکل ۲).



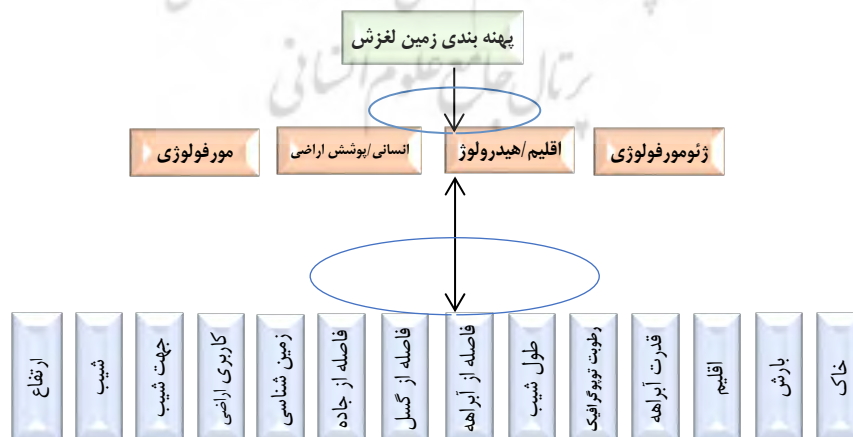
شکل ۲: فلوجارت یا روندنمای روش تحقیق و ابزارهای مورد استفاده

بررسی عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش‌های یک منطقه از موارد اساسی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش‌ها به‌شمار می‌رود. پهنه‌بندی با استفاده از بهترین عوامل از دقت بیشتری برخوردار بوده و نتیجه کار پهنه‌بندی مناسب و مفید خواهد بود. اگر عوامل به درستی شناسایی شوند ارزیابی و تجزیه و تحلیل هر کدام از آنها آسان‌تر بوده و می‌توان آنها را بر حسب تأثیری که دارند، اولویت‌بندی کرد. اولین قدم، شناسایی و تحدید منطقه مورد مطالعه بود که در راستای هدف کلی از تحلیل نقش رفتار زمین‌ساختی پهنه گسلی در ایجاد مخاطرات ژئومورفیک، محدوده متأثر از زلزله با شدت ۶ تا ۸ انتخاب گردید؛ از آنجا که عامل موثر در زمین لغزش‌های مورد مطالعه ما و در راستای هدفمان، به صورت فرضیه‌ای از پیش تعیین شده عامل زلزله تعریف شده است لذا به منظور راستی‌آزمایی فرضیه، الزاماً هر پهنه لغزشی که مورد شناسایی قرار گرفته، با تصاویر هوایی قبل از زلزله سال ۱۳۹۱ شمسی برابر با ۲۰۱۲ میلادی، مقابله و مقایسه شده است. سپس برای بالابردن ضریب اطمینان، از ساکنان محلی و افراد بومی از طریق روش مصاحبه، بازه زمانی رخداد لغزش را به قبل و بعد از زلزله پرسش و طبقه‌بندی نموده است و در صورت تعارض، مبنای قضاوت را بر مشاهدات میدانی و وجود پارامترهایی همچون تازه بودن زخم‌های لغزش، نبود یا کمبود پوشش گیاهی و ... گذاشته است. نتایج حاصل، نشان از همبستگی قوی بین دو روش شناسایی و در نتیجه اطمینان بالای طبقه‌بندی داشته است. در اینجا چگونگی کار با این دو روش به اختصار معرفی می‌شوند:

الف) فرآیند تحلیل شبکه

مدل فرآیند تحلیل شبکه شکل گسترده‌ای از مدل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی است، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰ معرفی شد. فرض اصلی این روش وجود استقلال زیر معیارها با هم است (ساعتی، ۲۰۰۵، ۲۱۰). در پژوهش حاضر یک مدل شبکه‌ای سه لایه متشکل از لایه‌های هدف، معیارها و گزینه‌ها با توجه به مسأله تحقیق طراحی و سازماندهی شد. شبکه مورد نظر از مراحل زیر تشکیل شده بود: مرحله اول، هدف و موضوع مورد مطالعه بود و بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش به عنوان هدف این مطالعه انتخاب گردید. مرحله دوم معیارهای تحقیق را شامل می‌شود که

دربرگیرنده فاکتورهای تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش‌های منطقه می‌باشد. مرحله سوم هم انتخاب کلاس‌ها یا گزینه‌های مورد نظر براساس طبقات خطر در یک خوشه جداگانه طراحی گردیدند ایجاد ارتباط بین عناصر و خوشه‌ها در تحقیق حاضر براساس تکنیک دیماتل ۱ از طریق پرسشنامه انجام شد. شکل (۳) مدل طراحی شده تحلیل شبکه را نشان می‌دهد.

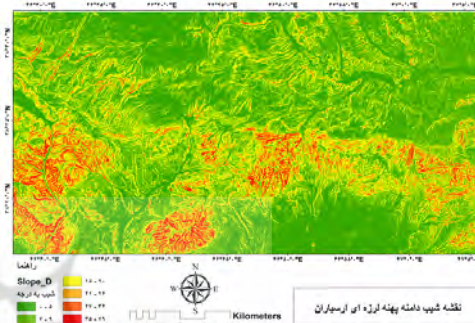
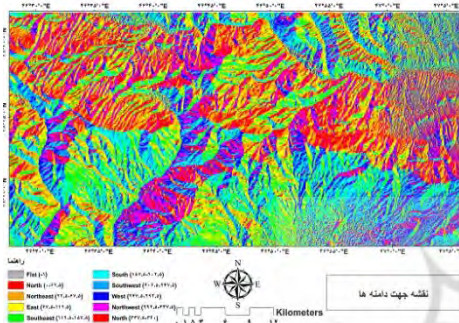


شکل ۳: نمودار معیارها و زیر معیارهای ارزیابی پتانسیل زمین لغزش‌های پهنه لزه‌ای ارسباران

در پهنه‌بندی زمین‌لغزش دو عامل بسیار اهمیت دارد؛ ۱) رتبه‌بندی و تعیین ضریب تأثیر پارامترهای مستعد کننده وقوع زمین‌لغزش (۲) تعیین سطح تأثیر کلاس‌های هر پارامتر در وقوع زمین‌لغزش (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۵، ۱۵۰).

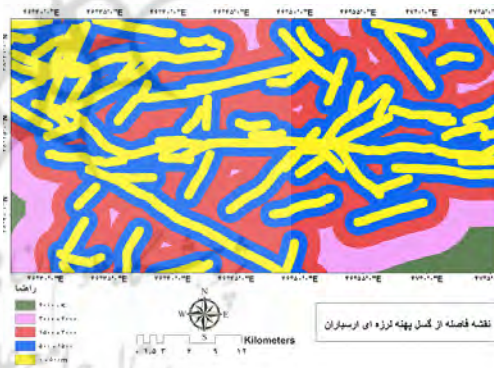
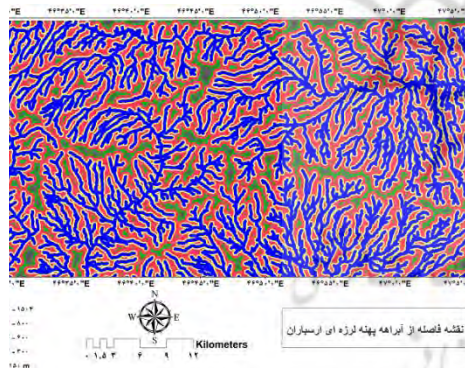
بحث و یافته‌های تحقیق

در این پژوهش برای انجام پهنه‌بندی زمین‌لغزش، از ۱۴ عامل مؤثر در زمین‌لغزش شامل: ارتفاع، اقلیم، بارش، جهت شیب، خاک، رطوبت توپوگرافیک (TWI)، زمین‌شناسی، شیب، طول شیب (LS)، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، قدرت آبراهه (SPI) و کاربری اراضی، لایه‌های اطلاعاتی تهیه گردید (شکل‌های ۴ تا ۱۵).



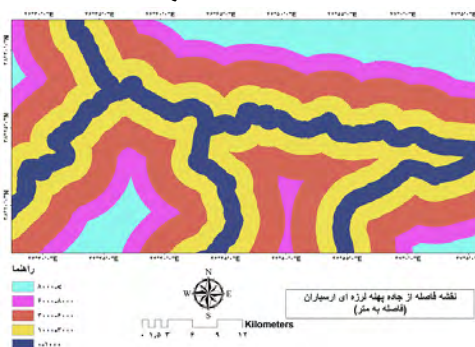
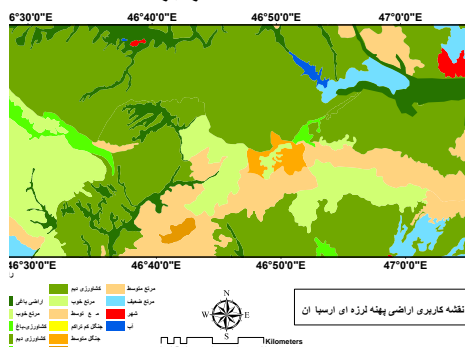
شکل ۵: نقشه جهت دامنه‌ها

شکل ۴: نقشه شیب دامنه‌ها



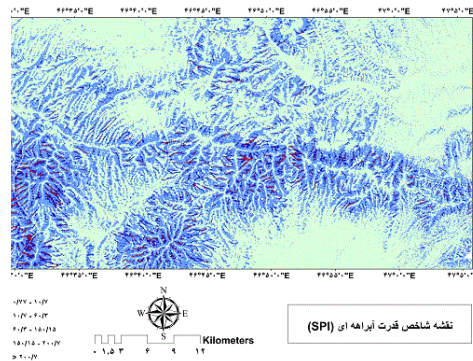
شکل ۶: نقشه فاصله از آبراهه‌ها

شکل ۷: نقشه فاصله از گسل

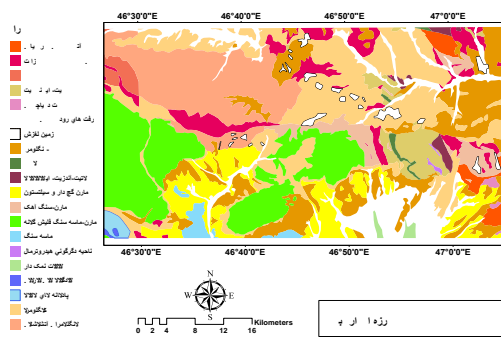


شکل ۸: نقشه کاربری اراضی

شکل ۹: نقشه فاصله از جاده



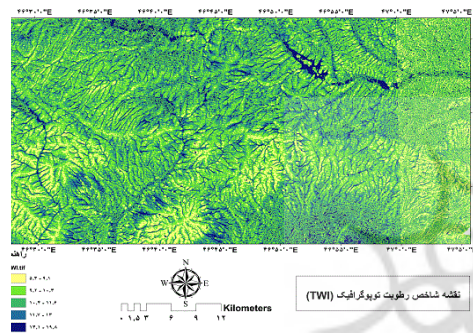
نقشه شاخص قدرت آبراهه ای (SPI)



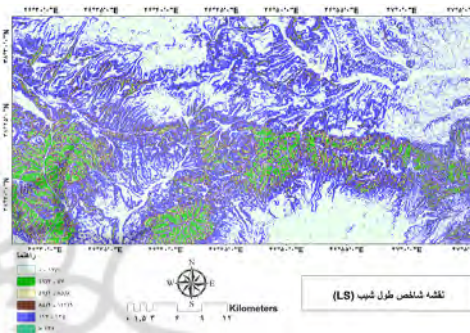
رزه ابره

شکل ۱۱: نقشه شاخص قدرت آبراهه‌ای (SPI)

شکل ۱۰: نقشه ساختار لیتولوژی منطقه مورد مطالعه



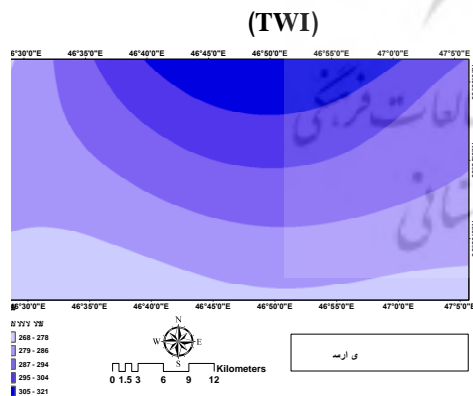
نقشه شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)



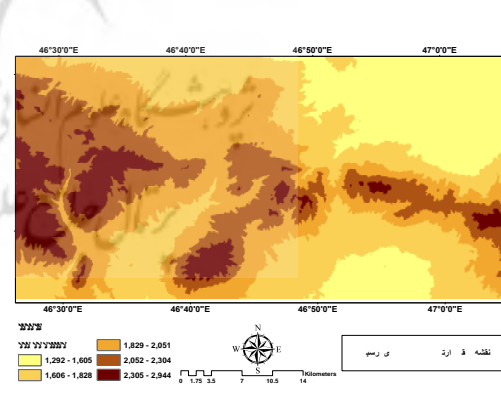
نقشه شاخص طول شیب (LS)

شکل ۱۳: نقشه شاخص رطوبت توپوگرافیک

شکل ۱۲: نقشه شاخص طول شیب (LS)



نقشه شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)



نقشه طبقات ارتفاعی (DEM)

شکل ۱۵: نقشه بارش

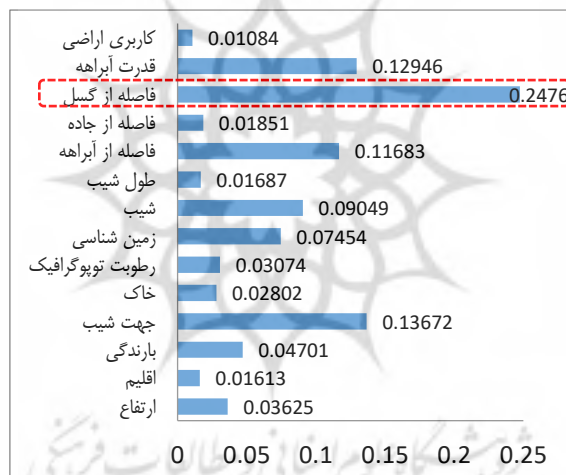
شکل ۱۴: نقشه طبقات ارتفاعی (DEM)

پس از تهیه نقشه‌های معیار و گزینه‌ها، به منظور بررسی حساسیت زمین لغزش، از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای و رگرسیون لجستیک استفاده گردید. به منظور اجرای فرایند تحلیل شبکه، لایه‌های مربوط به معیارها در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد سپس در محیط نرم‌افزار سوپر دسیژن مدل اصلی فرایند تحلیل شبکه بر اساس پرسش‌نامه‌های تکمیل شده توسط متخصصین این امر طراحی گردید. میزان ناسازگاری ۰/۰۵۵ بدست آمد که مطلوب بود. این میزان از خطا با توجه به انبوهی قضاوت‌ها قابل قبول می‌باشد. پس از مقایسه زوجی عناصر و انجام محاسبات طولانی، ضریب و ارزش نهایی هر عنصر و

جدول ۳: سوپرما تریس حد (خروجی نرم افزار Super Decision)

هدف	ب	ض	ا	ب	ا	ب	ا	ب	ا	ب	ا	ب	ا	ب	ا	ب	ا	ب	ا
قدرت آبراهه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فاصله از لایه فاصله ز	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
طول شیب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
شیب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زمین شناسی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
رطوبت توپوگرافیک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
خاک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جهت شیب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بارندگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اقلیم	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ارتفاع	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کاربری اراضی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
قدرت آبراهه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فاصله از جاده	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فاصله از آبراهه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
طول شیب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
شیب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زمین شناسی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
رطوبت توپوگرافیک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
خاک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جهت شیب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بارندگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اقلیم	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ارتفاع	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کاربری اراضی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

شکل (۱۷) ضرایب استخراج شده از مدل تحلیل شبکه و نتیجه اهمیت کلاس‌ها را بر اساس اولویت و اهمیت آن‌ها از نظر خطر وقوع زمین لغزش نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: ضرایب استخراج شده از مدل تحلیل شبکه

بر اساس نتایج به دست آمده لایه فاصله از گسل با ۰/۲۴۸ و جهت شیب با ۰/۱۳۷ بیشترین ضریب تأثیر را در پهنه‌بندی پتانسیل زمین لغزش دارند. در مقابل کاربری اراضی با ۰/۰۱۱ و اقلیم با ۰/۰۱۶ کمترین ضریب تأثیر را دارا هستند (جدول ۴).

جدول ۴: جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها بر اساس تحلیل شبکه

Alternatives	Total	Normal	Ideal	Ranking	Raw
ارتفاع	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶۲۲۸	۰/۱۴۵۹۹۷	۸	۰/۰۱۸۱۱۴
اقلیم	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶۱۲۶	۰/۰۶۴۹۸۶	۱۳	۰/۰۰۸۰۶۳
بارش	۰/۰۴۷	۰/۰۴۶۹۷۷	۰/۱۸۹۳۱۷	۷	۰/۰۲۳۴۸۹
جهت شیب	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۳۶۵۵۵	۰/۵۵۰۳۰۹	۲	۰/۰۶۸۲۷۷
خاک	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷۹۹۹	۰/۱۱۲۸۳۵	۱۰	۰/۰۱۳۹۹۹
رطوبت توپوگرافیک	۰/۰۳۱	۰/۰۳۰۷۲۶	۰/۱۲۳۸۲۳	۹	۰/۰۱۵۳۶۳
لیتولوژی	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴۳۷۶	۰/۲۹۹۷۳۲	۶	۰/۰۳۷۱۸۸
شیب	۰/۰۹۱	۰/۰۹۰۵۸۷	۰/۳۶۵۰۶۰	۵	۰/۰۴۵۲۹۳
طول شیب	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶۸۵۷	۰/۰۶۷۹۳۲	۱۲	۰/۰۰۸۴۲۸

فاصله از آبراهه	۰/۱۱۷	۰/۱۱۶۷۳۴	۰/۴۷۰۳۹۲	۴	۰/۰۵۸۳۶۲
فاصله از جاده	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸۵۰۰	۰/۰۷۴۵۵۳	۱۱	۰/۰۰۹۲۵۰
فاصله از گسل	۰/۲۴۸	۰/۲۴۸۱۴۲	۱	۱	۰/۱۲۴۰۷۱
قدرت آبراهه	۰/۱۲۹	۰/۱۲۹۳۷۳	۰/۵۲۱۳۶۶	۳	۰/۰۶۴۶۸۶
کاربری اراضی	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰۸۳۱	۰/۰۴۳۶۴۷	۱۴	۰/۰۰۵۴۱۵

رگرسیون لجستیک

در پژوهش حاضر، از مدل رگرسیون لجستیک به منظور تحلیل ارتباط فضایی بین رویداد زمین‌لغزش و عوامل مؤثر در این رویداد استفاده می‌شود؛ نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر در زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه که متغیرهای مستقل در رویداد زمین‌لغزش هستند، وارد نرم‌افزار ادریسی سلوا شد و برای اجرای مدل رگرسیون لجستیک مورد پردازش قرار گرفتند، بر این اساس لایه‌های گسل‌ها، رودخانه و جاده که در ابتدا به صورت لایه وکتوری بودند به لایه رستر تبدیل شده سپس تابع Distance برای آنها اجرا گردید تا لایه‌های فاصله از گسل، رودخانه و جاده به دست آمد. لایه‌های کاربری اراضی و لیتولوژی نیز از لایه وکتوری به رستری تبدیل شدند. برای آنها تابع ASSIGN/Edit تعریف شد در این قسمت وزن هر کلاس بر اساس درصد تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر کلاس معین گردید. درصد تراکم زمین‌لغزش‌ها از نسبت مساحت زمین‌لغزش‌ها در هر کلاس به مساحت کل زمین‌لغزش‌ها بدست آمد. برای این منظور از تابع Statistics Zonal در محیط ArcGIS استفاده شد. در ادامه لایه‌های شیب، جهت دامنه و طبقات ارتفاعی توسط تابع Reclassify به صورت مجدد کلاس‌بندی گردید. لایه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه نیز توسط تابع Calculator Image به صورت نقشه باینری ۰ و ۱ تبدیل گردید. بدین معنی که پیکسل‌های لغزشی بر روی نقشه مزبور با عدد ۱ (وجود لغزش) پیکسل‌های غیر لغزشی با عدد ۰ (عدم وجود لغزش) نشان داده شد. نهایتاً پس از ورود داده‌ها به مدل آماری رگرسیون لجستیک با استفاده از پارامترهای مؤثر در نرم‌افزار ادریسی سلوا، ضرایب مدل مطابق جدول (۵) استخراج شده و پس از محاسبات لازم به صورت مقایسه‌ای با نتایج مدل ANP در جدول (۶) ارائه شده است. در جداول ۷ و ۸ نیز نتایج پهنه‌بندی هر دو روش همراه با مساحت و درصد لغزش‌های رخ داده مقایسه شده‌اند. برای بررسی این مدل از تست $Square\ Chi$, $Square\ R\ Pseudo$, ROC استفاده شده است. معادله رگرسیون:

$$\text{Final Landslide Logit} = -17/1436 + (\text{رطوبت توپوگرافیک} * 0/2178) + (\text{قدرت آبراهه} * 0/2615) + (\text{شیب} * 0/2276) + (\text{فاصله از جاده} * 0/6073) + (\text{فاصله از رودخانه} * 0/2482) + (\text{بارش} * 1/1973) + (\text{طول شیب} * 0/1756) + (\text{کاربری اراضی} * 0/1836) + (\text{فاصله از گسل} * 0/431) + (\text{شیب} * 0/1756) + (\text{لیتولوژی} * 0/3917) + (\text{طول شیب} * 0/1756) + (\text{بارش} * 1/1973) + (\text{فاصله از رودخانه} * 0/2482) + (\text{فاصله از جاده} * 0/6073) + (\text{شیب} * 0/2276) + (\text{شاخص قدرت آبراهه} * 0/2615) + (\text{شاخص رطوبت توپوگرافیک} * 0/2178) + (\text{طبقات ارتفاعی} * 0/5487) + (\text{خاک} * 0/2636) + (\text{ارتفاع} * 0/5487) + (\text{اقلیم} * 0/4875) + (\text{جهت شیب} * 0/3488) + (\text{خاک} * 0/2636)$$

جدول ۵: ضرایب حاصل از مدل رگرسیون لجستیک

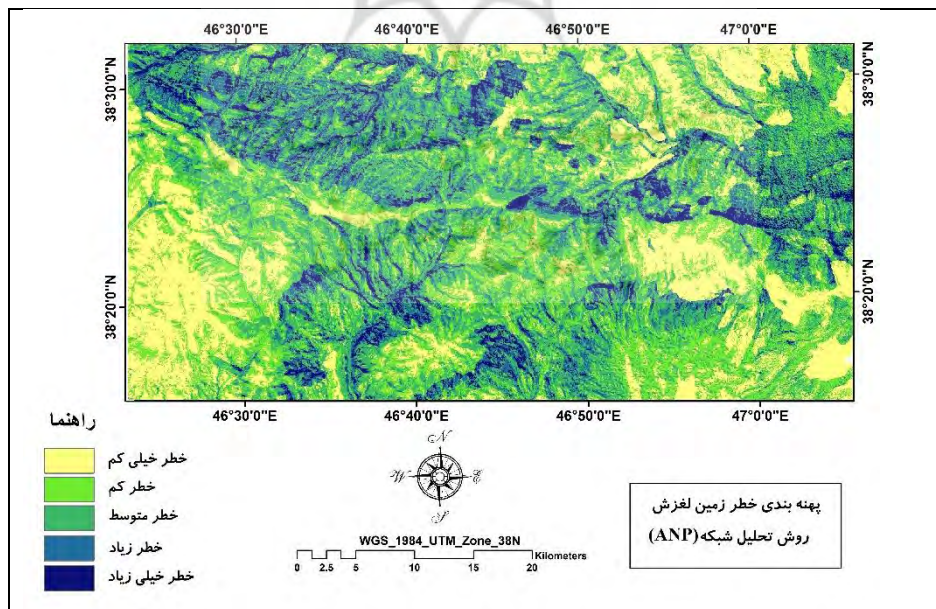
متغیرهای مستقل	ضرایب
عدد ثابت	-۱۷/۱۴۳۶
اقلیم	-۰/۴۸۷۵
جهت شیب	-۰/۳۴۸۸
فاصله از گسل	-۰/۴۳۱
کاربری اراضی	۰/۱۸۳۶
لیتولوژی	۰/۳۹۱۷
طول شیب	۰/۱۷۵۶
بارش	۱/۱۹۷۳
فاصله از رودخانه	۰/۲۴۸۲
فاصله از جاده	۰/۶۰۷۳
شیب	۰/۲۲۷۶
شاخص قدرت آبراهه	۰/۲۶۱۵
شاخص رطوبت توپوگرافیک	۰/۲۱۷۸
طبقات ارتفاعی	۰/۵۴۸۷
خاک	۰/۲۶۳۶

جدول ۶: مقایسه مساحت و درصد کلاس‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش به روش ANP و رگرسیون لجستیک

روش رگرسیون لجستیک		روش تحلیل شبکه (ANP)		کلاس
درصد مساحت	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت	مساحت (کیلومترمربع)	
۲۰/۸۳۵۱	۳۹۳/۲۸۴۱	۲۲/۲۸۶۰	۴۲۰/۶۷۲۱	خطر خیلی کم
۲۶/۵۵۹۴	۵۰۱/۳۳۶۶	۲۵/۵۹۰۳	۴۸۳/۰۴۳۴	خطر کم
۲۹/۱۰۰۵	۵۴۹/۳۰۲۹	۳۲/۲۳۷۸	۶۰۸/۵۲۲۰	خطر متوسط
۱۷/۶۷۶۶	۳۳۳/۶۶۴۲	۱۳/۴۱۶۵	۲۵۳/۲۴۹۵	خطر زیاد
۵/۸۲۸۳	۱۱۰/۰۱۶۰	۶/۴۶۹۴	۱۲۲/۱۱۶۷	خطر خیلی زیاد
۱۰۰	۱۸۸۷/۶۰۳۸	۱۰۰	۱۸۸۷/۶۰۳۸	مجموع

جدول ۷: مساحت کلاس‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش و درصد زمین لغزش‌های رخ داده در روش تحلیل شبکه ANP

روش تحلیل شبکه			کلاس
درصد مساحت پهنه‌بندی	مساحت زمین لغزش‌های رخ داده به کیلومترمربع	مساحت زمین لغزش‌های رخ داده به درصد	
۲۲/۲۸۶۰	۰/۳۱	۴/۲۵۸۲	خطر خیلی کم
۲۵/۵۹۰۳	۰/۸۸۲۵	۱۲/۱۲۲۳	خطر کم
۳۲/۲۳۷۸	۱/۵۶۲۵	۲۱/۴۶۲۹	خطر متوسط
۱۳/۴۱۶۵	۱/۸۹۷۵	۲۶/۰۶۴۶	خطر زیاد
۶/۴۶۹۴	۲/۶۳۷۵	۳۶/۰۹۲۰	خطر خیلی زیاد
۱۰۰	۷/۲۸	۱۰۰	مجموع



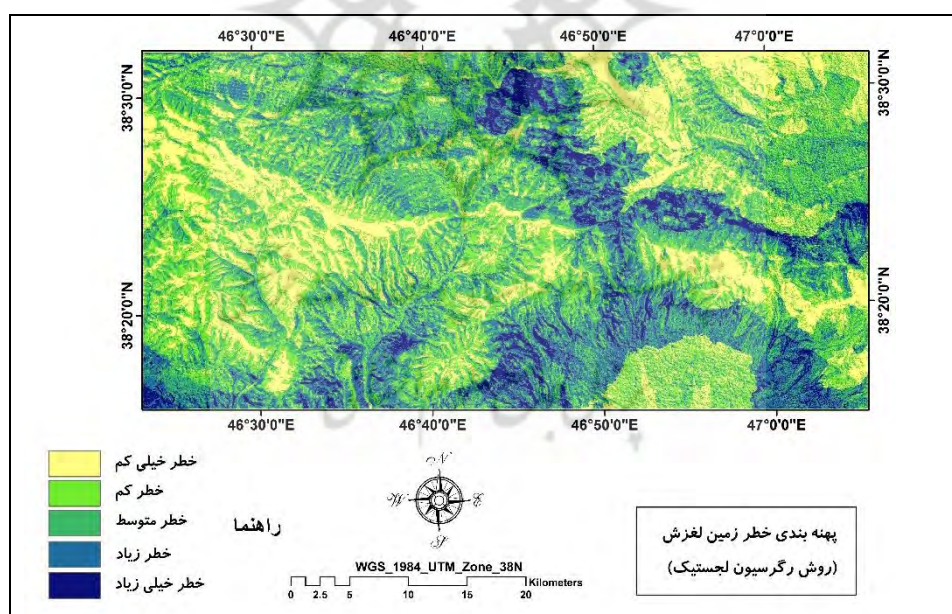
شکل ۱۸: پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل شبکه (ANP)

در مدل حاضر که با استفاده از رگرسیون لجستیک انجام گرفت، عامل بارش با بیشترین ضریب بهترین متغیر پیش‌بینی‌کننده احتمال وقوع زمین لغزش در منطقه به شمار می‌رود و پس از آن به ترتیب فاصله از گسل، فاصله از جاده و ارتفاع بیشترین ضرایب را به خود اختصاص داده‌اند و عوامل طول شیب و کاربری به‌عنوان کم‌اثرترین متغیر مستقل در رویداد زمین لغزش

منطقه مورد مطالعه مطرح است. پس از انجام پهنه‌بندی، درصد پهنه‌های لغزشی در هر کلاس محاسبه شد نتیجه نشان داد که مناطقی که با خطر خیلی زیاد پهنه‌بندی شده‌اند بیشترین درصد از میزان مساحت زمین لغزش‌های رخ داده را به خود اختصاص داده‌اند. این پهنه‌ها عمدتاً دارای بارش نسبی زیاد، نزدیک گسل و جاده‌های اصلی تبریز-اهر بعد از گردنه گوئجه‌بئل و اهر-ورزقان در دامنه‌های رو به شمال و شمال غربی و در مجاورت رومرکز زلزله‌های با بزرگای $6/4$ و $6/2$ سال هستند. جدول (۸) درصد پهنه‌های لغزشی در هر کلاس را در منطقه مورد نظر نشان می‌دهد.

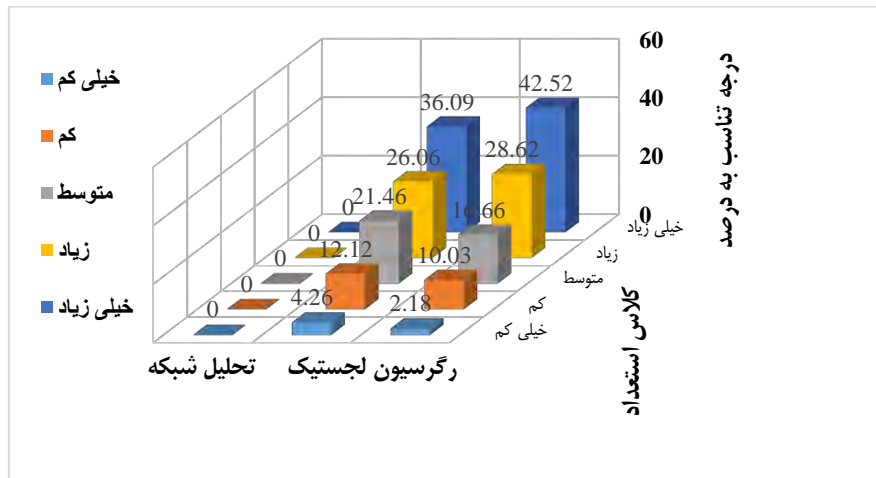
جدول ۸: مساحت کلاس‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش و درصد زمین لغزش‌های رخ داده در روش رگرسیون لجستیک

روش رگرسیون لجستیک			
کلاس	درصد مساحت پهنه‌بندی	مساحت زمین لغزش‌های رخ داده به کیلومتر مربع	مساحت زمین لغزش‌های رخ داده به درصد
خطر خیلی کم	۲۰/۸۳۵۱	۰/۱۵۸۴	۲/۱۷۵۸
خطر کم	۲۶/۵۵۹۴	۰/۷۳۰۲	۱۰/۰۳۰۲
خطر متوسط	۲۹/۱۰۰۵	۱/۲۱۲۵	۱۶/۶۵۵۲
خطر زیاد	۱۷/۶۷۶۶	۲/۰۸۳۵	۲۸/۶۱۹۵
خطر خیلی زیاد	۵/۸۲۸۳	۳/۰۹۵۴	۴۲/۵۱۹۲
مجموع	۱۰۰	۷/۲۸	۱۰۰



شکل ۱۹: پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک

نتایج حاصل از مدل از طریق قطع دادن نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها با نقشه پهنه‌بندی به صورت درجه تناسب مدل با پراکنش زمین لغزش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۲۰). مقدار خطای نسبی بر اساس مجموع کلاس‌های مستعد خطر خیلی پایین و پایین به دست آمد، درحالی‌که مقدار موفقیت نسبی مدل، از مجموع کلاس‌های مستعد خطر زیاد و خیلی زیاد حاصل شد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار خطای نسبی برابر با $13/5065\%$ و بالاترین میزان موفقیت نسبی برابر با $83/20\%$ است.



شکل ۲۰: مقایسه درجه تناسب بین نتایج رگرسیون لجستیک و تحلیل شبکه با نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها

ارزیابی مدل

آزمون کی دو: یک آزمون معتبر و معمولی برای رگرسیون لجستیک است از اختلاف بین $-2\ln(L)$ برای مدل بهترین برازش و $-2\ln(L_0)$ برای فرضیه صفر است، به دست می‌آید. چنانچه این آماره در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار باشد $\chi^2 > 14.1$ فرضیه صفر (H_0) رد می‌شود. مقدار شاخص کی دو نیز برابر $34.03/4.60$ گردید که با توجه به اینکه مقدار آن بسیار بیشتر از مقدار آستانه تعیین شده است در نتیجه فرض صفر بودن تمام ضرایب نیز رد می‌گردد.

آزمون راک^۲: منحنی راک یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه‌ی خصوصیات تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (ون وسترن، ۲۰۰۲، ۸). در منحنی راک ایده‌آل ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است (ناندی و شکور^۳، ۲۰۰۹). چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین زند مقدار AUC آن ۰/۵ است و زمانی که منحنی راک، سطح زیر منحنی برابر با یک داشته باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده، است. همبستگی کمی-کیفی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت زیر است: (۰/۹-۱ عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵-۰/۶ ضعیف) (زو و همکاران^۴، ۲۰۰۹، ۳۴۵؛ یشیل‌نچار^۵، ۲۰۰۵، ۲۳۷). نتایج تحلیل منحنی راک برای مدل رگرسیون لجستیک نشان داد که نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده در منطقه مورد مطالعه با سطح زیر منحنی 0.855250 دارای قدرت پیش‌بینی خیلی خوب می‌باشد. شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب منحنی ROC را در روش‌های LR و ANP نشان می‌دهد.

۱. Chi Square

۲. ROC

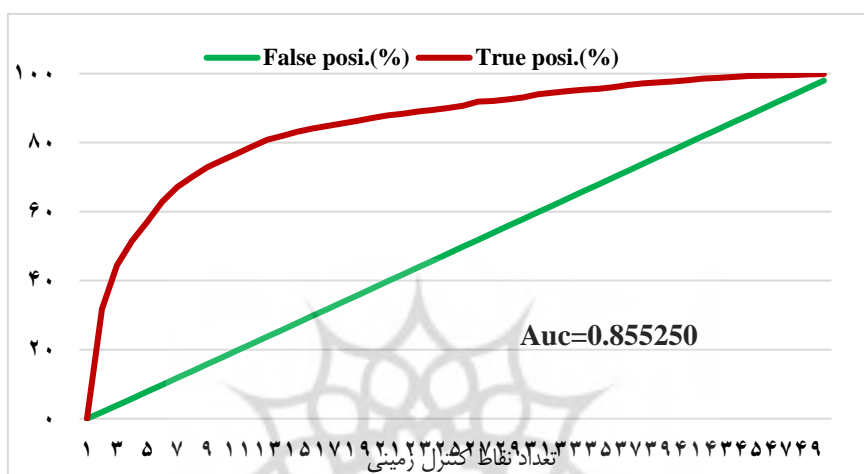
۳. Nandi & Shakoore

۴. Zhu et al

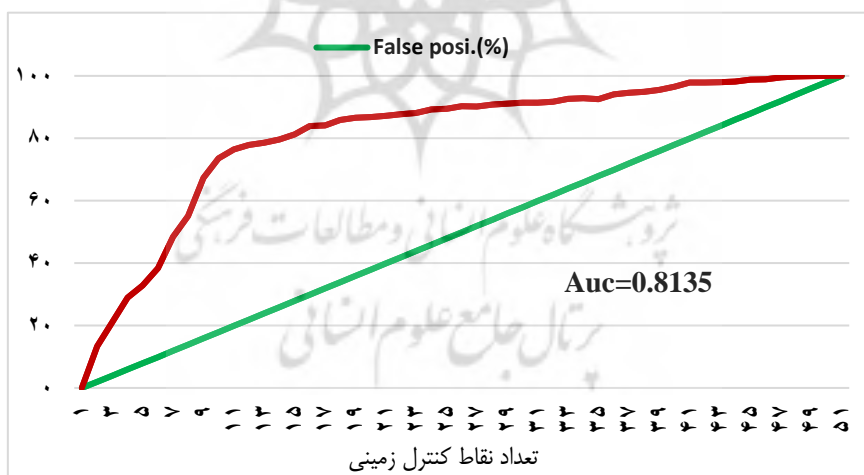
۵. Yesilnacar

آزمون **(PR2) Pseudo R Square**:
 $PR2 = 1 - \frac{\ln(L)}{\ln(L_0)}$ رابطه (۳)

در این رابطه، PR2 مساوی با ۱ نشان‌دهنده برازش کامل مدل و برابر با صفر نشان‌دهنده عدم رابطه متغیرهای مستقل با متغیر وابسته می‌باشد. اگر مقدار PR2 بزرگتر از ۰/۲ باشد نشان‌دهنده برازش نسبتاً خوب مدل است (آیالو، ۲۰۰۵). نظر به این که در این تحقیق مقدار شاخص PR2 برابر ۰/۳۳۴۶ به دست آمد و مقدار آن بزرگتر از آستانه ۰/۲ می‌باشد، این مدل برازش قابل قبولی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱: منحنی Roc و سطح زیر منحنی مربوط به دقت نقشه حساسیت پهنه‌بندی زمین لغزش به روش رگرسیون لجستیک

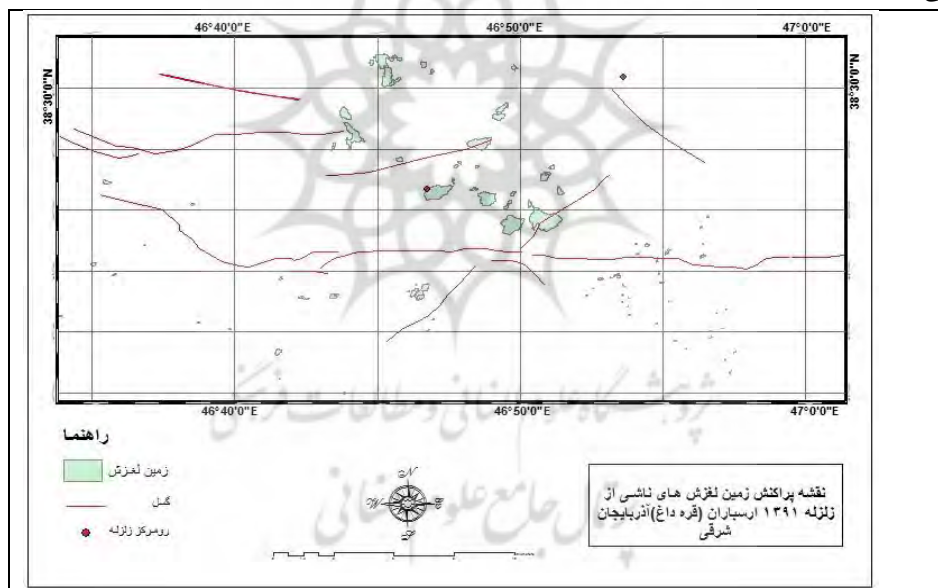


شکل ۲۲: منحنی Roc و سطح زیر منحنی مربوط به دقت نقشه حساسیت پهنه‌بندی زمین لغزش به تحلیل شبکه در منطقه مطالعه

لرزه خیزی و زمین لغزش

در ایران نیز مانند بسیاری از نقاط دیگر جهان، فاجعه‌آمیزترین و دلخراش‌ترین زمین لغزش‌ها با زلزله‌های شدید تحریک و آغاز می‌شوند. زمین لغزش‌های تحریک شده توسط زلزله، علاوه بر ایجاد تلفات و خسارات مستقیم، از طریق وارد ساختن خسارت به شریان‌های حیاتی به ویژه راه‌های ارتباطی و خطوط برق و ایجاد تأخیر در امدادرسانی می‌توانند تلفات و خسارات ناشی از زلزله را نیز شدیداً افزایش دهند. تأثیر زلزله بر ناپایداری شیب‌ها تنها به اعمال نیروهای اینرسی اضافی در توده سنگ خلاصه نمی‌شود. همچنین وجود فعالیت‌های زمین‌ساختی و گسل‌خوردگی‌های ناشی از زلزله در درازمدت در یک

منطقه، شرایط را برای ایجاد شکستگی‌های عمومی، کاهش مقاومت و افزایش مقدار آب که خود موجب ایجاد ناپایداری شیب‌ها می‌شود فراهم می‌سازد. وقوع یک زلزله شدید نه تنها زمین لغزش‌های زیادی را به طور همزمان تحریک می‌کند بلکه تا سال‌ها بعد نیز اثر خود را به صورت افزایش تعداد زمین لغزش‌ها در منطقه بر جای می‌گذارد. در ارزیابی دیگر و در پیمایشی به منظور تطبیق گسل‌ها و دگرریختی‌های ناشی از زلزله، هم‌زمان موقعیت بیشتر زمین-لغزش‌های رخ داده در منطقه نیز توسط دستگاه جی‌پی‌اس ثبت شد و سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (IRS) و گوگل ارث برای مدل‌سازی استخراج شدند (شکل ۲۳). برای اینکه نقشه‌های بدست آمده از مدل‌ها را از نظر دقت پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار دهیم حدود ۴۰ درصد از زمین لغزش رخ داده پس از زلزله و استفاده نشده در مدل‌سازی را با نقشه‌های طبقه‌بندی زمین لغزش روی هم گذاری کرده و درصد پراکنش فضایی آنها را در هر کدام از طبقات بدست آوردیم. نتیجه این روی هم گذاری در مدل ANP نشان داد با اینکه تنها ۵/۶ درصد از کل منطقه در کلاس با حساسیت خیلی زیاد قرار گرفته در حدود ۱/۳۶ درصد از زمین لغزش‌های در نظر گرفته شده برای ارزیابی در این طبقه قرار گرفته است. این نتایج برای مدل رگرسیون لجستیک بهتر و به ترتیب ۵/۸ و ۴۲/۵ درصد برآورد شده است. در حالت کلی حدود ۲/۶۲ درصد از این زمین لغزش‌ها در مدل ANP و حدود ۱/۷۱ درصد در روش رگرسیون لجستیک در دو کلاس با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است که این امر نشانگر دقت قابل قبول نقشه‌های پیش‌بینی شده برای زمین لغزش به ویژه روش رگرسیون لجستیک می‌باشد.



شکل ۲۳: نقشه پراکنش زمین لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۹۱ ارسباران آذربایجان شرقی

نتیجه گیری

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش یکی از مهم‌ترین مراحل مدیریت خطر به‌ویژه در علم مخاطرات ژئومورفولوژی و از ضروریات آمایش سرزمین و مدیریت منابع طبیعی است و این مهم در مناطق لرزه‌خیز از آن جهت اهمیت بیشتری می‌یابد که تکانه‌های ناشی از زلزله، در کنار سایر عوامل مسبب، پتانسیل حرکات دامنه‌ای را بالا می‌برد نوعی همزادی به‌وجود می‌آورد و زمینه را برای ناپایداری‌های آتی نیز فراهم می‌کند. هدف از پژوهش حاضر علاوه بر مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش در پهنه متأثر از زلزله ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ ارسباران با استفاده از روش تحلیل شبکه (ANP)، بررسی قابلیت و توانایی این مدل در مقایسه با روشی دیگر نیز بوده است. لذا فاکتورهای مؤثر در زمین لغزش شناسایی و در محیط نرم‌افزار Super Decision وزن هر کدام از فاکتورها مشخص گردید. سپس وزن‌های به‌دست آمده در محیط نرم‌افزار ArcGIS اعمال و به نقشه نهایی پهنه‌بندی زمین لغزش تبدیل شدند. براین اساس از میان چهارده فاکتور مؤثر در رخداد زمین لغزش‌های

منطقه، فاصله از گسل مؤثرترین فاکتور مشترک دو مدل (ANP) و (LR) و بیشترین ضریب تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش داشته‌است درحالی‌که کاربری زمین در هر دو مدل، کمترین ضریب را به دست آورده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت حرایم گسل‌های اصلی به ویژه گسل‌های قوشاداغ و گویجه‌بئل و حدفاصل رومرکزهای زمین‌لرزه‌های دوقلوی ارسباران و نیز دامنه‌های شمالی و شمال‌شرقی از حساسیت ناپایداری بیشتری برخوردارند. نقشه حاصل از اجرای مدل، حساسیت وقوع زمین‌لغزش را در ۵ کلاس با حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی کرده است. کلاس‌های خطر خیلی زیاد و زیاد به ترتیب ۶/۵ و ۱۳/۴ درصد از مساحت منطقه را مستعد خطر زمین‌لغزش نشان داده است. این نتایج با مدل اجرا شده در روش رگرسیون لجستیک نیز که به ترتیب ۵/۸ و ۱۷/۷ در صد منطقه را شامل می‌شود همبستگی و همخوانی بالایی را نشان می‌دهد. وقوع حدود ۶۲/۲ و ۷۱/۱ درصد لغزش‌ها در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به ترتیب در ANP و رگرسیون لجستیک، نشان‌دهنده دقت قابل قبول نقشه‌های پیش‌بینی شده برای زمین‌لغزش می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده دقت روش‌های ANP و LR، در بررسی زمین‌لغزش در محدوده متأثر از زلزله ارسباران می‌باشد. از آنجاکه روش ANP، سامانمند با وابستگی‌ها برخورد می‌کند یعنی تمام وابستگی‌های بیرونی و درونی میان عناصر و خوشه‌ها را برای تحلیل در نظر می‌گیرد، اما سایر روش‌ها این روابط را کمتر در نظر می‌گیرند. بنابراین همان‌طور که نتایج مطالعه محققانی چون: مقیمی و همکاران (۱۳۹۲)، روستایی و خدائی (۱۳۹۵)، پیش‌نماز احمدی و همکاران (۱۳۹۷)، قشلاقی و همکاران (۲۰۱۷) و ... بر مناسب بودن مدل تحلیل شبکه و بررسی‌های خالدی و همکاران (۱۳۹۱)، شیرزادی و همکاران (۱۳۹۴)، مهدویفر و همکاران (۲۰۱۶) و ... بر ارجحیت روش رگرسیون لجستیک تأکید دارند، استفاده از این روش‌ها در کنار هم و مقایسه آن‌ها با توجه به وابستگی‌های مسائل زمین‌لغزش جهت شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش می‌تواند بسیار سودمند باشد. همانگونه که مطرح شد این روش‌ها، نتایج قابل قبولی را در تحلیل حساسیت به وقوع زمین‌لغزش داشته است. بیشترین تراکم زمین‌لغزش‌ها، حتی لغزش‌های قدیمی در حدفاصل دو رومرکز زلزله‌های با بزرگای ۶/۴ و ۶/۲ سال ۱۳۹۱ اتفاقی نبوده و نشان‌دهنده سابقه لرزه‌خیزی و فعالیت بالای تکتونیکی منطقه می‌باشد.

منابع

- پیش‌نماز احمدی، مجید؛ محمدزاده، کیوان؛ ثقفی، مهدی، ۱۳۹۷، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش و خطرپذیری سکونتگاه‌های روستایی در زیرحوضه رودبار با روش تحلیل شبکه (ANP)، **پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی**، سال هفتم، شماره ۱، زمستان، صص ۲۱۱-۲۲۵.
- حسین‌زاده، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ منصوری، عادل؛ میرباقری، بابک؛ خضری، سعید، ۱۳۸۸، پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، **فصلنامه زمین‌شناسی ایران**، سال سوم، شماره ۱۱، پاییز، صص ۲۷-۳۷.
- رجبی، معصومه؛ ولی‌زاده کامران، خلیل؛ عابدی قشلاقی، حسین، ۱۳۹۵، ارزیابی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از فرایند تحلیل شبکه و شبکه عصبی مصنوعی، مطالعه موردی: حوضه آذرشهرچای، **پژوهش ژئومورفولوژی کمی**، سال پنجم، شماره ۱، صص ۶۰-۷۴.
- روستایی، شهرام؛ خدائی، لیلا، ۱۳۹۵، ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سد، مطالعه موردی: سد قلعه‌چای، **پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی**، سال پنجم، شماره ۳، زمستان، صص ۶۸-۸۰.
- شریعت جعفری، ح. ۱۳۷۵، زمین‌لغزش، مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی، چاپ اول، انتشارات سازه، تهران.
- شیرزادی، عطاله؛ سلیمانی، کریم؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ چپی، کاران، ۱۳۸۹، مقایسه مدل‌های رگرسیون لجستیک و نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر ریزش سنگ، نشریه مرتع و آبخیزداری، **مجله منابع طبیعی ایران**، دوره ۶۳، شماره ۴، صص ۴۸۹-۵۰۲.

- عابدینی، موسی؛ قاسمیان، بهاره؛ شیرزادی، عطا...، ۱۳۹۳، مدل‌سازی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک مطالعه موردی: استان کردستان، شهرستان بیجار، **جغرافیا و توسعه**، شماره ۳۷، زمستان، ص ۸۵-۱۰۲.
- عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ فتحی، محمدحسین، ۱۳۹۵، پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز-ANP (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهرچای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان)، **پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی**، سال پنجم، شماره ۱، تابستان، صص ۱۴۲-۱۵۹.
- فتحی، محمدحسین؛ بهشتی جاوید، ابراهیم و عابدینی، موسی، ۱۳۹۴، پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی. **جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی**، ۲۶ (۳)، صص ۴۹-۶۰.
- طلائی، رضا، صمداف، سردار؛ شعاعی، ضیالالدین؛ شریعت جعفری، محسن. ۱۳۸۸، مدل‌سازی و پیش‌بینی وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک در منطقه هشتجین (جنوب استان اردبیل)، ششمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- متولی، صدرالدین، اسماعیلی، رضا، حسین‌زاده، محمدمهدی، ۱۳۸۸، تعیین حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز واز (استان مازندران)، **فصل‌نامه جغرافیای طبیعی**، صص ۷۳-۸۴.
- مختاری، داود، ۱۳۸۵، جایگاه ژئومورفولوژی در ارزیابی بلایای طبیعی و مقابله با آن‌ها در ایران، **فصل‌نامه جغرافیایی سرزمین**، سال سوم، شماره ۹، بهار، صص ۵۱-۶۵.
- مختاری، داود، ۱۳۸۴، آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی از فعالیت گسل و ضرورت جابجایی آنها (نمونه موردی: روستاهای واقع در امتداد گسل شمالی میشو)، **پژوهش‌های جغرافیایی**، سال ۱، شماره ۵۱، صص ۷۱-۸۶.
- مقیمی، ابراهیم؛ یمانی، مجتبی؛ رحیمی هرآبادی، سعید، ۱۳۹۲، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در شهر رودبار با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه، **پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی**، شماره ۴، بهار، صص ۱۰۳-۱۱۸.
- *Abedini, M., Tulabi, S., (2018). Assessing LNR, FR, and AHP models in landslide susceptibility mapping index: a comparative study of Nojian watershed in Lorestan province, Iran, Environmental Earth Sciences (2018) 77:405. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7524-1>*
- *Abedini, M., Ghasemyan, B., Rezaei Mogaddam, M. H. (2017). Landslide susceptibility mapping in Bijar city, Kurdistan Province, Iran: a comparative study by logistic regression and AHP models, Environ Earth Sci (2017) 76:308, DOI 10.1007/s12665-017-6502-3.*
- *Atkinson, P., Massari, R (2011). Logistic modeling susceptibility to land sliding in the Apennines, Italy Geomorphology. Vol.130.*
- *Ayalew. L. Yamagishi. H. Marui. H & Kanno. 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, 432– 445.*
- *Berberian, M. & Yeats, R. S., (1999). Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 120–139.*
- *Chen, Zhaohua. Wang, Jinfei, (2007). Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada. Geomorphology, Vol.42.*
- *Das, I., S. Sahoo, C. Van Westen, A. Stein and R. Hack. (2010). Landslide Susceptibility Assessment Using Logistic Regression and its Comparison with a rock Mass Classification System, along a Road Section in the Northern Himalayas (India), Geomorphology, 114: 627-637.*
- *Donner, S., Ghods, A., Krüger, F., Rößler, D., Landgraf, A., Balato, P., (2015), 11 August 2012: Regional Seismic Moment Tensors and a Seismotectonic Interpretation, Bulletin of the Seismological Society of America, 105 (2A): 791-807.*

- Gheshlaghi, H. A., & Feizizadeh, B. (2017). *An integrated approach of analytical network process and fuzzy based spatial decision making systems applied to landslide risk mapping. Journal of African Earth Sciences, 133, 15-24.*
- Gregory C. Ohlmacher, John C. Davis (2003). *Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. Geomorphology, Vol 69.*
- Khaledi, S., derafshi, K., Mehrjunejad, A., Gharachahi, S., Khaledi, S. (2012). *Assessment of the landslide effective factors and zonation of this event using logistic regression in the GIS environment (Case Study Taleghan Watershed). Journal of Geography and Environmental Hazards. No 1, 65-82.*
- Krishna, H.(1999). *Landslide hazard zonation mapping using remote sensing &GIS, geomorphology, 21, 153-163.*
- Lee, H., Lee, S., & Park, Y. (2009). *Selection of technology acquisition mode using the analytic network process. Mathematical and Computer Modeling, 49(5), 1274- 1282.*
- MahdaviFar, M., Askari, F., Memarian, P., Seyedimorad, M. (2016). *Earthquake-Induced Rock Fall Hazard Zonation of Varzeghan-Ahar Region in Northwest Iran: A Comparison of Quantitative and Qualitative Approaches, JSEE, Vol. 18, No. 2,*
- Nandi, A. & Shakoor, A., (2009). *A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. Engineering Geology, V. 110, p. 11–20.*
- Neaupane KM, Piantanakulchai M. (2006). *Analytic network process model for landslide hazard zonation. Engineering Geology, 85(3): 281-294.*
- Parthian, B., Lee, S. (2010). *Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: bad propagation artificial neural networks and comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling. Geomorphology, Vol. 25.*
- Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2018). *Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision?. CATENA, 162, 177-192.*
- Saaty Thomas L. (2005), *Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks, RWS Publications, p 352.*
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytical Hierarchy Process. McGraw Hill. New York.*
- Samodra, G., Chen, G., Sartohadi, J., & Kasama, K. (2015). *Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta, Java. Geomorphology.*
- Sanwei H., Peng P., Lan D., Haijun W., Jiping L. (2012). *Application of kernel based Fisher discriminant analysis is to map landslide Susceptibility in the Qinggan River Delta, Three Gorges, China, Geomorphology 171, 30–41.*
- Vincoli, Jeffrey W, 1994, *Basic guide to system safety, Michigan, Van Nostrand-Reinhold, 194P.*
- Yalcin, A., S. Reis, A.A. Aydinoglu and T. Yomralioglu. 2011. *A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics & logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. Geomorphology, 85: 274-287.*
- Yesilnacar, E.K., (2005). *The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey, Ph.D Thesis. Department of Geomatics the University of Melbourne, 423p.*
- Zhu, C., Wang. X., (2009). *Landslide susceptibility mapping: A comparison of information and weights-of evidence methods in Three Gorges Area. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, IEEE DOI 10.1109/ESIAT.2009. No.187, PP.342-346.*