

ارزیابی پتانسیل خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز شهرچای ارومیه

فریبا همتی* - گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران.
اکرم علیزاده - دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
صابر سید احمدی - کارشناسی ارشد آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ماکو، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

چکیده

ناپایداری‌های دامنه‌ای یکی از مخاطرات طبیعی مهم در مناطق کوهستانی است که می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر زندگی انسان‌ها و زیرساخت‌ها داشته باشد. ارزیابی دقیق این ناپایداری‌ها و شناسایی مناطق پرخطر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌های پیش‌بینی، نظیر رگرسیون لجستیک، می‌توانند به شناسایی عوامل مؤثر بر ناپایداری‌ها و تهیه نقشه‌های حساسیت کمک کنند. در این راستا، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پتانسیل خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک انجام شده است. در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۲۳ برای شناسایی نقاط ناپایدار استفاده شد و عوامل مؤثر بر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، همچون ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، لیتولوژی، پوشش گیاهی و پوشش زمین، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل رگرسیون لجستیک نشان داد که متغیرهای فاصله از جاده، جهت شیب، فاصله از گسل و نوع پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش احتمال وقوع ناپایداری‌ها هستند. شاخص‌های آماری ROC، Pseudo R Square و Chi Square دقت و اعتبار بالای مدل را تأیید کردند. نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه‌شده، مناطق با حساسیت‌های مختلف به ناپایداری‌های دامنه‌ای را شناسایی کرده و نتایج به‌دست‌آمده از مدل با داده‌های میدانی تطابق قابل توجهی نشان دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در حوضه آبریز شهرچای ارومیه، ناپایداری‌های دامنه‌ای عمدتاً شامل لغزش‌های سطحی و ریزش سنگ هستند که بیشترین رخداد را داشته‌اند. این امر به‌طور خاص در مناطقی با شیب‌های تند، نزدیکی به گسل‌ها و جاده‌ها، و در مناطق فاقد پوشش گیاهی مشاهده شد. مدل رگرسیون لجستیک به خوبی توانست عوامل مؤثر بر وقوع این ناپایداری‌ها را شناسایی کند و با تهیه نقشه‌های حساسیت، پهنه‌های پرخطر را برجسته سازد. از این‌رو، این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری مؤثر برای مدیریت مخاطرات طبیعی و کاهش خطرات ناشی از ناپایداری‌های دامنه‌ای در این حوضه و سایر مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: پتانسیل خطر، ناپایداری‌های دامنه‌ای، مدل رگرسیون لجستیک، شهرچای ارومیه.

مقدمه

فرآیندهای دامنه‌ای شامل حرکات توده‌ای و فرآیندهای ژئومورفیک هستند که به دلیل نیروی گرانشی، موجب جابجایی خاک، ماسه، سنگ و سایر مواد می‌شوند (دستروپ^۱، ۲۰۲۰). ناپایداری‌های دامنه‌ای، شامل حرکات توده‌ای، لغزش زمین و شکست شیب، از جمله خطرات طبیعی عمده در مناطق کوهستانی مانند هیمالیا در هند، شمال پاکستان و نپال محسوب می‌شوند. این ناپایداری‌ها عمدتاً به دلیل رویدادهای شدید آب و هوایی، شرایط خاص زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی بروز می‌کنند و می‌توانند آسیب‌های قابل توجهی به زیرساخت‌ها، اموال و زندگی انسان‌ها وارد سازند (خان و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ جمیر و همکاران^۳، ۲۰۲۲؛ کوک و همکاران^۴، ۲۰۲۲؛ چوهان و موکرچی^۵، ۲۰۲۳). فرآیندهای دامنه‌ای در ارومیه به دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی و اقلیمی این منطقه، خصوصیات منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند. بارش‌های فصلی و رواناب‌های سطحی باعث فرسایش شدید خاک در شیب‌ها شده و زمینه ساز وقوع حرکات توده‌ای در مناطق ناپایدار می‌شوند. خاک‌های کم‌عمق و پوشش گیاهی محدود، توانایی خاک در جلوگیری از فرسایش را کاهش داده و شیارها و آبراهه‌های جدیدی را در دامنه‌ها به وجود می‌آورند. رسوبات دامنه‌ای به‌طور معمول به شکل مخروط‌افکنه‌ها در بخش‌های هموارتر ته‌نشین می‌شوند، در حالی که فرآیندهای تخریبی موجب شکل‌گیری دره‌های V شکل و تراس‌های فرسایشی در امتداد آبراهه‌ها می‌شوند. این ویژگی‌ها نقش مهمی در شکل‌دهی چشم‌انداز طبیعی منطقه و فرسایش خاک و ناپایداری زمین در ارومیه ایفا می‌کنند.

مدل رگرسیون لجستیک به‌عنوان ابزاری مؤثر در ارزیابی و پیش‌بینی ناپایداری‌های دامنه‌ای عمل می‌کند و کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مهندسی عمران، مدیریت بحران و برنامه‌ریزی محیطی دارد. این مدل به‌طور موفقیت‌آمیزی برای شناسایی عوامل مؤثر بر پدیده‌هایی نظیر لغزش زمین به‌کار گرفته شده است. از آن برای شناسایی متغیرهای کلیدی مانند ارتفاع، شیب، بارندگی، کاربری اراضی و لیتولوژی که در وقوع زمین‌لغزش تأثیر دارند، استفاده شده است. با ترکیب سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل رگرسیون لجستیک، محققان توانسته‌اند به دقت‌های پیش‌بینی بالایی دست یابند، به‌طوری‌که این مدل تا به طوری که این مدل تا ۸۷/۳ درصد از پیکسل‌ها را در نقشه‌های احتمال لغزش به‌درستی طبقه‌بندی می‌کند (الزوبعی و طبره^۶، ۲۰۲۰؛ ایلدرومی، ۲۰۱۱؛ ریگل و همکاران^۷، ۲۰۲۰).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مدل‌های رگرسیون لجستیک ابزارهای مؤثری برای تحلیل خطرات زمین‌لغزش و ریزش سنگ در مناطق مختلف جغرافیایی هستند. در این راستا، متولی (۱۳۹۴) با استفاده از سه روش تحلیل رگرسیون لجستیک، رگرسیون چندمتغیره و تحلیل سلسله‌مراتبی به تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش رگرسیون لجستیک با شاخص مجموع کیفیت (QS) برابر با ۰/۲۶، به عنوان دقیق‌ترین روش در تفکیک‌پذیری پهنه‌های خطر زمین‌لغزش شناخته شده است. در رتبه‌های بعدی، روش‌های رگرسیون چندمتغیره و گامای فازی قرار گرفته‌اند. روستایی و خدایی (۱۳۹۵) پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را در منطقه سد مخزنی قلعه چای عجب شیر با استفاده از روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و رگرسیون لجستیک ارزیابی کردند. نتایج

^۱ Dastrup.^۲ Khan et al.^۳ Jamir et al.^۴ Cook et al.^۵ Chouhan & Mukherjee.^۶ Al Zawbaee & Tabra^۷ Riegel et al.

نشان داد که تحلیل شبکه عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون لجستیک دارد و عواملی مانند کاربری اراضی، طبقات ارتفاعی و جهت دامنه نقش مهمی در وقوع زمین لغزش دارند. منطقه به پنج گروه حساسیت تقسیم بندی شد و این مطالعه اهمیت روش های دقیق در ارزیابی خطر زمین لغزش را نشان داد. همتی و حجازی (۱۳۹۶) در تحقیق خود به پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز لواسانات با استفاده از رگرسیون لجستیک پرداختند. هشت عامل مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل، آبراهه، جاده و کاربری اراضی شناسایی شدند. نتایج نشان داد که مناطق با خطر بسیار بالا سهم قابل توجهی از مساحت منطقه را پوشش می دهند. کاربری اراضی به عنوان بهترین متغیر پیش بینی کننده احتمال وقوع زمین لغزش شناسایی شد. چپی و همکاران (۱۳۹۷) کارایی روش های رگرسیون لجستیک (LR) و بیزین رگرسیون لجستیک (BLR) را در تهیه نقشه پیش بینی مکانی حرکت های توده ای در استان کردستان مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری در دقت نقشه های پیش بینی بین دو روش وجود ندارد و روش BLR توانست ۳۳ درصد از مساحت استان را در گروه حساسیت زیاد و خیلی زیاد شناسایی کند، در حالی که در روش LR این مقدار حدود ۲۶ درصد بود. در پژوهش دیگر همتی و همکاران (۱۳۹۸)، محدوده گسل بناروان با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک برای تعیین مناطق خطر ناپایداری دامنه ای بررسی شد. این تحقیق با استفاده از بازدیدهای میدانی، نقشه های زمین شناسی و توپوگرافی، و مرور منابع قبلی، ۹ عامل مؤثر بر ناپایداری دامنه ای را در نرم افزار Idrisi تحلیل کرد. نتایج نشان داد که مناطق با خطر بسیار بالا کمترین درصد از مساحت منطقه را تشکیل می دهند. عامل ارتفاع با بیشترین ضریب، بهترین پیش بینی کننده وقوع ناپایداری دامنه ای بود، و بیشترین ناپایداری ها در ارتفاعات بالا و شیب ۲۳-۳۲ درجه رخ داده است. گلی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل های رگرسیون لجستیک و منطق فازی، نقشه شدت خطر زمین لغزش را برای حوضه قهرمانلو تهیه کردند. متغیرهای ۱۲ گانه شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، بارش و کاربری اراضی به عنوان عوامل مؤثر و ۲۸ زمین لغزش به عنوان متغیر وابسته به کار رفتند. نتایج نشان داد که حدود ۳ درصد از مساحت حوضه دارای پتانسیل زمین لغزش خیلی بالا و ۲/۱۱ درصد پتانسیل بالا دارند، در حالی که ۶۶/۵ درصد به دلیل ارتفاع زیاد و موقعیت غربی پتانسیل خیلی کم دارند. زمین لغزش ها شامل نوع انتقالی و چرخشی بودند. روستایی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و تحلیل ۱۴ فاکتور، ناپایداری دامنه ها در مسیر اتوبان تهران-شمال را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این روش برای پهنه بندی احتمال ناپایداری ها مناسب است و جاده سازی غیر اصولی نقش مهمی در ناپایداری دامنه ها دارد. برای کاهش خطرات، باید از تغییرات اکوسیستم و کاربری اراضی جلوگیری کرد و سازه ها با توجه به شرایط زمین شناسی و ژئومورفولوژیکی منطقه ساخته شوند. صدیقی و قاسمی (۱۴۰۲) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، ۹ عامل مؤثر در زمین لغزش های استان چهارمحال و بختیاری را تحلیل کرده اند. یافته های آنها نشان داد که جنس و شیب زمین، فاصله از جاده ها و میزان بارش از مهم ترین عوامل ایجاد زمین لغزش هستند. مدل رگرسیون لجستیک با دقت ۹/۹۰ درصد نتایج دقیقی ارائه داد و نشان داد که ۸/۱۳ درصد مساحت استان در معرض خطر شدید زمین لغزش قرار دارد. برای کاهش این خطرات، باید از تغییرات اکوسیستم و کاربری اراضی اجتناب کرد. سون و همکاران^۱ (۲۰۲۱) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و تحلیل ۱۸ عامل مؤثر، مدلی برای نقشه برداری مقاومت شیب های کوهستانی در برابر زمین لغزش های ناشی از بارندگی توسعه دادند. نتایج نشان داد که ۲۵/۰۶ درصد از منطقه مقاومت پایین دارد، اما ۸۳/۰۷ درصد از زمین لغزش های تاریخی در این مناطق رخ داده اند. بررسی منحنی ROC نیز دقت و پایداری بالای مدل را تأیید کرد. شارما و همکاران^۲ (۲۰۲۳) با استفاده از تکنولوژی های سنجش از دور، GIS و رگرسیون لجستیک، حساسیت به زمین لغزش در منطقه NH 58 هند را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل با دقت ۹۲ درصد مناطق حساس به

^۱ Sun et al.^۲ Sharma et al.

زمین‌لغزش را شناسایی می‌کند و اطلاعات مفیدی برای مدیریت اراضی ارائه می‌دهد. همچنین، مناطق نزدیک به برش‌های جاده به‌عنوان مناطق بسیار حساس شناسایی شدند. پیروتی اول (۱۳۹۲) در پژوهشی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز شهرچای ارومیه تا محل سد را انجام داد. وی ۹ عامل اصلی شامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، بارش، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، و فاصله از جاده را تحلیل و امتیازدهی کرد. نقشه‌نهایی پهنه‌بندی خطر در پنج کلاس (خیلی زیاد تا خیلی کم) تهیه شد و مشخص شد پهنه با خطر زیاد ۲۸/۷۸ درصد مساحت منطقه را شامل می‌شود. عامل لیتولوژی با وزن ۰/۳۱۲ به‌عنوان مؤثرترین معیار شناسایی شد.

با توجه به توسعه زیرساخت‌ها و افزایش جمعیت در مناطق کوهستانی حوضه آبریز شهرچای ارومیه، ارزیابی دقیق پتانسیل خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای ضروری است. این ارزیابی به برنامه‌ریزان و مدیران بحران کمک می‌کند تا مناطق پرخطر را شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه مؤثری اتخاذ کنند تا از بروز خسارات احتمالی جلوگیری شود. با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه ناپایداری‌های دامنه‌ای، هنوز نیاز به مدل‌های دقیق‌تر و پیش‌بینی‌های بهتر برای مناطق خاصی مانند حوضه آبریز شهرچای ارومیه احساس می‌شود. در این تحقیق، از مدل رگرسیون لجستیک به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای تحلیل داده‌های محیطی و زمین‌شناسی استفاده شده است. این مدل به دلیل دقت و قابلیت‌های بالایش می‌تواند روابط پیچیده میان متغیرهای مختلف را تحلیل کند و امکان تهیه نقشه‌های حساسیت برای مناطق پرخطر را فراهم آورد (آیالو و یاماگیشی^۱، ۲۰۰۵). همچنین، با ترکیب سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و رگرسیون لجستیک، محققان توانسته‌اند به دقت‌های پیش‌بینی بالایی دست یابند که می‌تواند به بهبود مدیریت بحران و کاهش خطرات ناپایداری‌های دامنه‌ای در این حوضه کمک کند. همچنین، با ترکیب سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و رگرسیون لجستیک، محققان توانسته‌اند به دقت‌های پیش‌بینی بالایی دست یابند. این دقت بالا می‌تواند به بهبود مدیریت بحران و کاهش خطرات ناپایداری‌های دامنه‌ای در این حوضه کمک کند. با استفاده از این ابزارها و مدل‌های پیشرفته، می‌توان به طور دقیق‌تر و کارآمدتر مناطق پرخطر را شناسایی کرد و برای کاهش خطرات اقدامات مناسبی انجام داد.

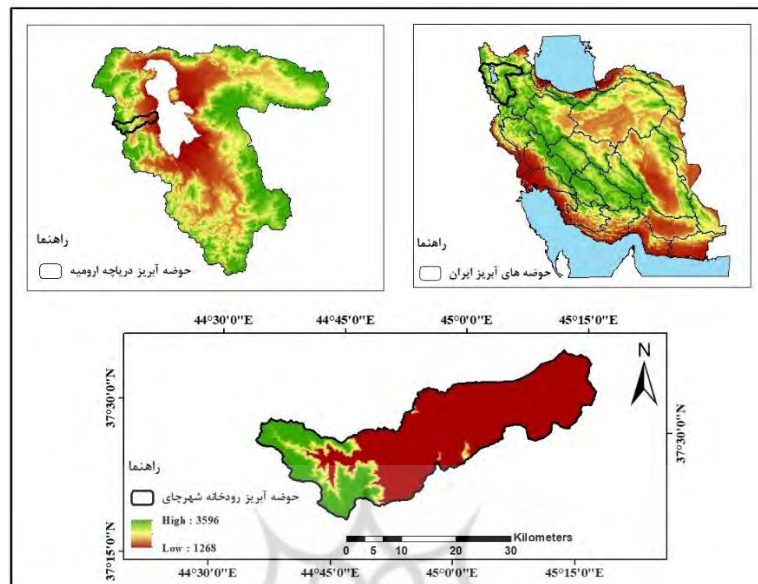
معرفی منطقه

حوضه آبریز شهرچای ارومیه در شمال غربی ایران و در استان آذربایجان غربی واقع شده است و در فاصله ۱۲ کیلومتری جنوب غربی شهر ارومیه قرار دارد. این حوضه با مختصات جغرافیایی طول بین ۴۴ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۱۷ دقیقه و عرض بین ۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۵ دقیقه، یکی از حوضه‌های آبی مهم منطقه محسوب می‌شود که مسئول تأمین آب شرب، کشاورزی و مصارف صنعتی شهر ارومیه و نواحی اطراف آن است (شکل ۱). رودخانه شهرچای از ارتفاعات کوهستانی مجاور سرچشمه گرفته و پس از عبور از تپه‌ها و دره‌های متعدد، به سمت جنوب جریان می‌یابد و مسیر پرشیب خود را طی می‌کند. این حوضه شامل مناطق کوهستانی و دامنه‌هایی با پوشش گیاهی طبیعی است که به حفظ منابع آبی و اکوسیستم منطقه کمک می‌کند.

از نظر تکتونیکی، وجود گسل‌های مهمی مانند گسل دریاچه ارومیه، گسل‌های شمال و جنوب سلماس، خطواره ارومیه، گسل اشنویه و گسل کوه شهیدان در این منطقه احتمال وقوع زلزله را افزایش می‌دهد و وجود این شبکه گسل‌های فعال و زلزله‌زا نشان‌دهنده وضعیت تکتونیکی حساس منطقه است. علاوه بر این، فرسایش خاک و فرآیندهای دامنه‌ای به دلیل شیب‌های تند و شرایط زمین‌شناسی خاص، از دیگر چالش‌های عمده حوضه شهرچای به شمار می‌روند. در سال‌های اخیر، کاهش میزان بارندگی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی باعث وارد آمدن فشار بر منابع آب این منطقه شده است،

^۱ Ayalew & Yamagishi.

به‌طوری که سطح آب رودخانه و منابع زیرزمینی کاهش یافته و مشکلاتی را در تأمین آب برای مصارف مختلف ایجاد کرده است.



شکل ۱: نقشه حوزه آبریز شهرچای ارومیه و موقعیت آن در حوزه‌های آبریز ایران

روش تحقیق

در این مطالعه، با توجه به اهمیت بررسی عوامل مؤثر در وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، مراحل تحقیق به‌طور دقیق و سیستماتیک انجام گرفته است. این مراحل شامل گردآوری اطلاعات، تهیه و تحلیل داده‌ها و اعتبارسنجی نتایج می‌باشد. در ادامه، به توضیح هر یک از این مراحل پرداخته می‌شود.

جمع‌آوری اطلاعات: ابتدا اطلاعات لازم از منابع مختلف گردآوری شد. این منابع شامل مرور ادبیات تحقیق، داده‌های آنلاین و داده‌های سازمانی بودند. داده‌های آنلاین شامل تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، تصاویر ماهواره‌ای لندست-۹ (۲۰۲۳) و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت پیکسلی ۱۰*۱۰ متر از سایت USGS می‌باشند. منابع سازمانی نیز شامل نقشه‌های زمین‌شناسی ارومیه، اشنویه، سیلوانا و سرو با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی و نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری بودند.

تهیه نقشه توزیع نقاط ناپایداری: در این مرحله، نقشه‌ای از توزیع نقاط ناپایداری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۲۳ (باند ۶) که دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است، تهیه شد. سپس پراکندگی این نقاط نسبت به ۹ عامل کلیدی مؤثر در وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای ارزیابی گردید. این عوامل شامل طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، نوع سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بودند.

کدگذاری عوامل مؤثر: هر یک از عوامل مؤثر بر اساس تحلیل حساسیت به ناپایداری‌های دامنه‌ای و با استفاده از داده‌های میدانی و مطالعات قبلی کدگذاری شدند. عوامل مختلف با امتیازهای ۱ تا ۵ ارزیابی شدند، به‌طوری که امتیاز ۵ به طبقات با بیشترین حساسیت به ناپایداری‌های دامنه‌ای اختصاص یافت. این امتیازدهی بر اساس تجربیات نگارندگان صورت گرفت که تأثیر هر عامل را بر احتمال وقوع ناپایداری‌ها در مناطق مختلف حوزه تعیین می‌کند.

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی: با استفاده از لایه‌های مختلف، نقشه‌های پهنه‌بندی و بانک اطلاعاتی نهایی تهیه شدند. داده‌های مکانی شامل تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و نقشه‌های زمین‌شناسی به نرم‌افزار GIS وارد شدند. همچنین، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۲۳ و مدل رقومی ارتفاعی نیز به نرم‌افزار اضافه گردید. با استفاده از ابزارهای Slope و Aspect در بخش Spatial Analyst نرم‌افزار ArcGIS، نقشه‌های شیب و جهت شیب از مدل رقومی

ارتفاعی استخراج شدند. نقشه طبقات ارتفاعی از DEM تولید و سپس طبقه‌بندی شد. همچنین، نقشه‌های فاصله از گسل‌ها، رودخانه‌ها و جاده‌ها با استفاده از ابزار Euclidean Distance در نرم‌افزار GIS ایجاد شدند. نقشه‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی از منابع سازمانی و آنلاین تأمین شده و در نرم‌افزار GIS وارد و به‌روزرسانی شدند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص NDVI در نرم‌افزار Envi 5.3، نقشه پوشش گیاهی منطقه تهیه گردید.

اجرای مدل رگرسیون لجستیک و تحلیل نتایج: پس از تهیه لایه‌ها، این داده‌ها به نرم‌افزار IDRISI وارد شدند و مدل رگرسیون لجستیک بر روی آن‌ها اجرا گردید. سپس با استفاده از متغیرهای طبیعی و انسانی و تحلیل داده‌ها در این نرم‌افزار، نتایج نهایی استخراج گردید.

مقایسه و اعتبارسنجی نتایج: در پایان، نتایج تحلیل‌ها با داده‌های میدانی مقایسه و اعتبارسنجی شدند تا دقت و صحت نتایج تحقیق تأیید و تضمین گردد.

مدل رگرسیون لجستیک

مدل رگرسیون لجستیک^۱ یکی از روش‌های آماری پیشرفته برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته باینری (دو حالتی) است که این متغیرها تنها دو حالت ممکن دارند: صفر و ی (مانند وقوع یا عدم وقوع یک پدیده‌ی مانند ناپایداری‌های دامنه‌ای). این مدل برای توصیف رابطه غیرخطی میان یک یا چند متغیر مستقل و یک متغیر وابسته باینری استفاده می‌شود. در این روش، رابطه بین متغیرها به‌طور خطی نیست بلکه به صورت یک منحنی S شکل یا لجستیک است. در مدل رگرسیون لجستیک، برآوردها و تخمین‌ها در بازه‌ای از صفر تا یک قرار دارند، به‌طوری‌که مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده احتمال وقوع کمتر و مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده احتمال وقوع بیشتر هستند (رحیمی، ۱۳۹۰). مزیت استفاده از مدل رگرسیون لجستیک نسبت به سایر روش‌های آماری چند متغیره مانند تحلیل رگرسیون چندگانه و تحلیل تشخیصی این است که متغیر وابسته می‌تواند تنها دو مقدار ممکن داشته باشد: یکی نشان‌دهنده احتمال وقوع یک حادثه و دیگری نشان‌دهنده عدم وقوع آن (دای و لی، ۲۰۰۲).

در این پژوهش، از مدل رگرسیون لجستیک برای تحلیل ارتباط فضایی میان رویداد فرآیندهای دامنه‌ای و عوامل مؤثر بر این رویدادها استفاده شده است. معادله (۱) شکل عمومی مدل رگرسیون لجستیک را نشان می‌دهد:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \quad \text{معادله (۱)}$$

که در آن P احتمال رویداد حادثه (در این پژوهش فرآیندهای دامنه‌ای) و Z پارامتر یا فاکتور خطی است و از رابطه (۲) بدست می‌آید، e نیز عدد ثابت ۲/۷۱۸ می‌باشد.

$$Z = \logit(p) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = C_0 + C_1X_1 + \dots + C_nX_n \quad \text{معادله (۲)}$$

که C0 عرض از مبدأ یا ضریب ثابت مدل، و X1, X2, ..., Xn ضرایب مربوط به متغیرهای مستقل، C1, C2, ..., Cn هستند.

با تغییر در مقدار Z از $-\infty$ تا $+\infty$ احتمال وقوع فرآیندهای دامنه‌ای (P) به صورت S از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. هر چه عدد به یک نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع فرآیندهای دامنه‌ای بیشتر و هر چه عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع آن کمتر خواهد بود (چو و همکاران، ۲۰۰۴). استفاده از مدل رگرسیون لجستیک برای شناسایی عوامل مؤثر در وقوع فرآیندهای

^۱ Regression Logistic.

^۲ Dai & Lee.

^۳ Chau & et al.

دامنه‌ای به دو حالت حضور و عدم حضور این رویداد می‌پردازد. بنابراین، به پهنه‌های لغزشی عدد یک و به پهنه‌هایی که زمین لغزش در آن‌ها رخ نداده است، عدد صفر اختصاص داده می‌شود (آیالا و همکاران^۱، ۲۰۰۵). برای ارزیابی صحت مدل آماری استفاده‌شده، از آزمون‌های مختلفی استفاده گردیده است که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: آزمون‌های اعتبارسنجی مدل رگرسیون لجستیک

آزمون	توضیحات	رفرنس
Chi Square	آزمون کی دو یکی از آزمون‌های استاندارد و معمول برای ارزیابی رگرسیون لجستیک است. این آزمون از اختلاف بین $2Ln(L)$ برای بهترین برازش مدل و $2Ln(LO)$ برای فرضیه صفر استفاده می‌کند. اگر این آماره در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار باشد ($Chi Square > 14.1$)، فرضیه صفر (H_0) رد می‌شود.	متولی، ۱۳۹۱
(PR2) Pseudo R Squar	مقدار PR_2 نشان می‌دهد که مدل لجستیک چقدر موفق است در برازش مجموعه داده‌ها. در واقع، PR_2 با مقدار ۱ بیان‌گر برازش کامل مدل است. اگر این مقدار صفر باشد، این نشان‌دهنده عدم وجود رابطه‌ی معنی‌دار بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته است. همچنین، اگر مقدار PR_2 بیشتر از 0.2 باشد، این نشان‌دهنده برازش نسبتاً خوب مدل است. $1 - Ln(L) / Ln(LO) = PR_2$	منارد ^۲ ، ۲۰۰۲ و آیالا و همکاران، ۲۰۰۵
ROC	یک معیار دیگر که بسیار آسان برای تفسیر است، توجه به این نکته است که چگونه مدل می‌تواند متغیر وابسته را به خوبی پیش‌بینی کند. در این زمینه، نرم‌افزار ادریسی از معیار ROC برای مقایسه یک نقشه بولین (وجود یا عدم وجود فرآیند دامنه‌ای) با نقشه احتمال استفاده می‌کند. مقدار ROC در بازه از 0.5 تا 1 قرار دارد، که 1 نشان‌دهنده تطابق کامل و 0.5 نشان‌دهنده تطابق اتفاقی است.	متولی، ۱۳۹۱

بحث و یافته‌ها

بررسی ارتباط عوامل تأثیرگذار بر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای

نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای اطلاعات جامعی درباره موقعیت، نوع و میزان خسارات ناشی از این پدیده‌ها در یک ناحیه خاص ارائه می‌دهد. ون وستن^۳ و همکاران (۲۰۰۸) بر اهمیت این نقشه‌ها در شناسایی مناطق بحرانی و بهبود برنامه‌ریزی برای مدیریت خطر تأکید کرده‌اند. این ناپایداری‌ها معمولاً به صورت گسترده یا به شکل نقاط مشخص ظاهر می‌شوند و با استفاده از تصاویر هوایی با وضوح بالا یا تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی هستند.

در این پژوهش، نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۲۳ (باند حرارتی ۶) تهیه شده است. این تصاویر، به دلیل وضوح مناسب و دسترسی رایگان، به عنوان داده‌های اصلی برای شناسایی و تحلیل این ناپایداری‌ها انتخاب شدند. فرایند تحلیل شامل پردازش اولیه داده‌ها، شناسایی نواحی ناپایدار و تهیه نقشه پراکنش بود.

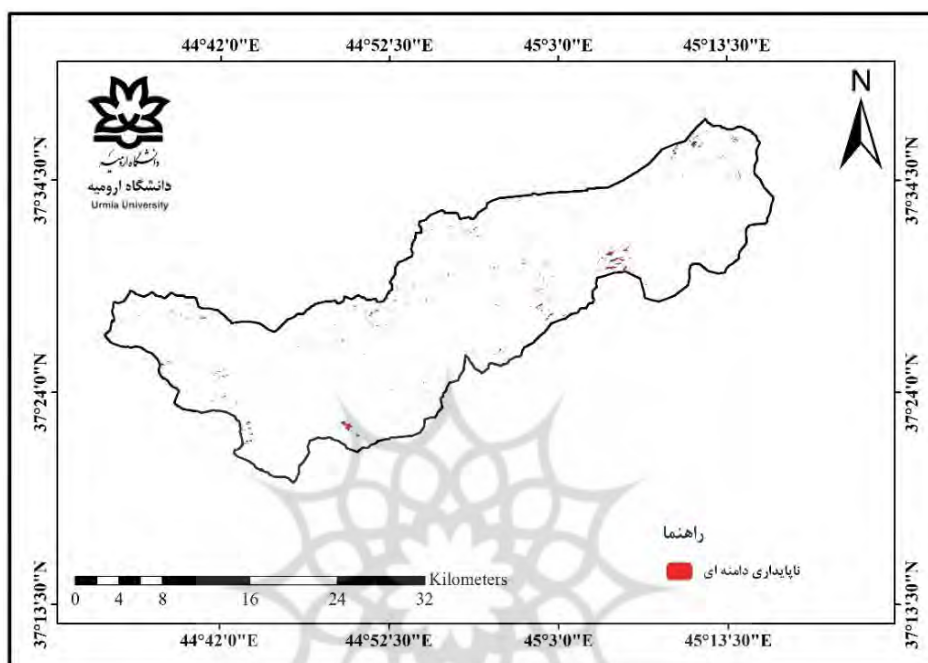
پس از تهیه نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای (که شامل حرکات و تغییرات ناخواسته سطح زمین مانند لغزش‌ها، ریزش‌ها و جریان‌های سطحی در شیب‌ها می‌شود)، مساحت این ناپایداری‌ها با استفاده از نرم‌افزار Idrisi و ابزار Image Calculator محاسبه شد. نتایج نشان داد که مساحت ناپایداری‌ها حدود $42/4$ کیلومتر مربع است که معادل

^۱ Ayalew et al.

^۲ Menard.

^۳ Van Westen.

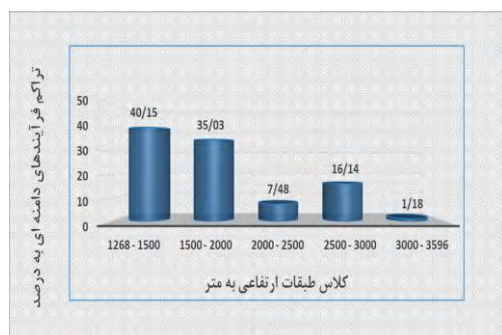
۰/۶۱ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه است. در ادامه، شکل ۲ توزیع این ناپایداری‌ها را در زیرحوضه‌های مختلف منطقه نمایش می‌دهد. این نقشه به عنوان مبنای تحلیل‌های بعدی برای شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع ناپایداری‌ها و ارزیابی خطر در این ناحیه به کار گرفته شد.



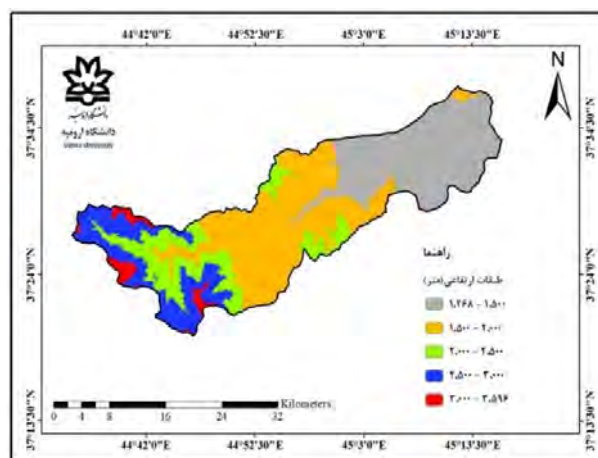
شکل ۲: نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای در منطقه مورد مطالعه

طبقات ارتفاعی

برای تهیه نقشه طبقات ارتفاعی منطقه، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شد. این مدل با توجه به دامنه ارتفاعی منطقه، از ۱۲۶۸ متر در نقطه خروجی حوضه تا ۳۵۹۶ متر در بلندترین نقطه، به پنج کلاس تقسیم گردید (شکل ۳). تغییرات ارتفاعی در این منطقه تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی، از جمله میزان و نوع بارش (بارش برف یا باران)، تعداد روزهای یخبندان، شیب زمین و شرایط زیست‌محیطی دارند. بررسی پراکندگی ناپایداری‌های دامنه‌ای نسبت به طبقات ارتفاعی نشان داد که بیشترین میزان ناپایداری‌ها در ارتفاعات ۱۲۶۸ تا ۲۰۰۰ متر (کلاس‌های ۱ و ۲) رخ داده است (شکل ۴). این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع، وقوع ناپایداری‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به عواملی مانند افزایش پوشش گیاهی در ارتفاعات بالاتر مرتبط باشد، زیرا پوشش گیاهی متراکم‌تر نقش مهمی در تثبیت خاک و کاهش احتمال لغزش ایفا می‌کند. علاوه بر این، در ارتفاعات بالاتر، شیب زمین معمولاً ملایم‌تر است و فعالیت‌های انسانی کمتر مشاهده می‌شود، که این موارد نیز به کاهش ناپایداری‌ها کمک می‌کنند. با این حال، بررسی دقیق‌تر نقش شیب در این ارتفاعات ضروری است، زیرا در برخی مناطق کوهستانی، شیب‌های تند نیز ممکن است پایدار باشند.



شکل ۴: نمودار درصد تراکم ناپایداری های دامنه ای در کلاس های طبقات ارتفاعی

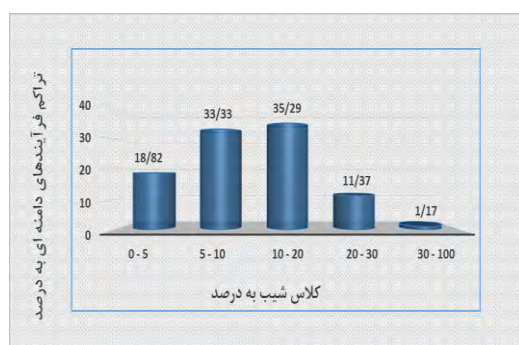


شکل ۳: نقشه طبقات ارتفاعی در حوضه مورد مطالعه

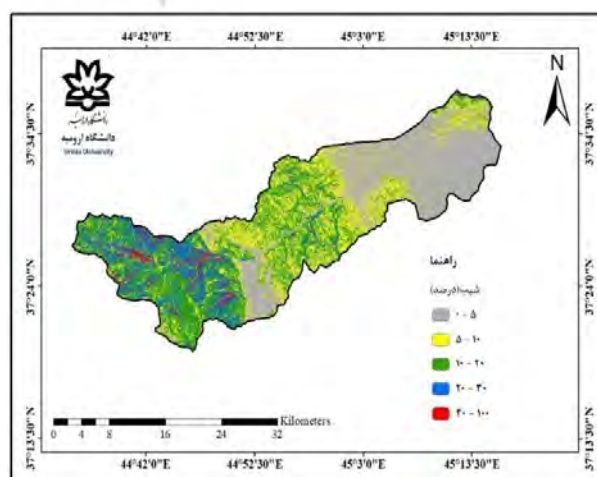
شیب

شیب دامنه، همراه با عواملی مانند سنگ شناسی، بارندگی و زمین لرزه، از مهم ترین پارامترها در مدل های پهنه بندی خطر زمین لغزش به شمار می رود. با افزایش شیب، نیروی وزن مؤثر در راستای دامنه افزایش می یابد و در شرایطی که پارامترهای مقاومتی ثابت باشند، احتمال وقوع ناپایداری به طور غیرخطی افزایش می کند. از این رو، شیب به عنوان یکی از عوامل کلیدی در افزایش پتانسیل ناپایداری دامنه ها در نظر گرفته می شود. در مدل های پهنه بندی خطر زمین لغزش، شیب اغلب به عنوان یک عامل اصلی استفاده می شود. با این حال، اثرگذاری آن به ترکیب با سایر پارامترها مانند نوع خاک، ساختار زمین شناسی، و رطوبت بستگی دارد. در برخی مناطق خاص زمین شناسی، اهمیت شیب در ناپایداری بیشتر نمایان می شود (معماریان و سیارپور، ۱۳۸۵).

برای تحلیل ارتباط شیب با ناپایداری، لایه شیب منطقه به پنج کلاس مختلف تقسیم شد. توزیع شیب در حوضه مورد مطالعه بر اساس این طبقه بندی انجام شد (شکل ۵). نتایج تحلیل ها نشان داد که بیشترین ناپایداری ها در شیب های ۵ تا ۲۰ درصد رخ داده اند (شکل ۶). این محدوده به دلیل ترکیب عوامل مانند فرسایش پذیری بالا و تأثیرگذاری فعالیت های انسانی، به طور قابل توجهی در معرض ناپایداری های دامنه ای قرار دارد. این یافته ها نشان می دهند که تحلیل دقیق تر شیب در ارتباط با سایر عوامل محیطی و انسانی، می تواند به بهبود پیش بینی و مدیریت خطر زمین لغزش کمک کند.



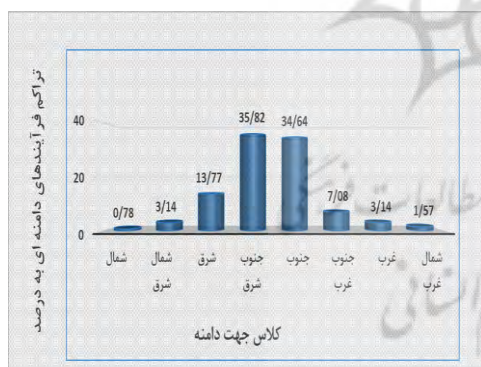
شکل ۶: نمودار درصد تراکم ناپایداری دامنه ای در کلاس های شیب



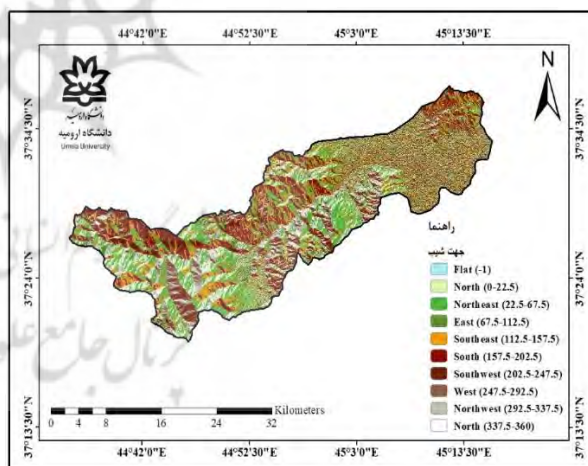
شکل ۵: نقشه شیب در حوضه مورد مطالعه

جهت شیب

نقشه جهت شیب منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) در هشت طبقه مختلف تهیه شد (شکل ۷). جهت شیب یکی از عوامل کلیدی در ناپایداری‌های دامنه‌ای است، زیرا تفاوت‌های دمایی و شرایط رطوبتی در دامنه‌های مختلف نقش مهمی در پایداری زمین ایفا می‌کنند. دامنه‌های پشت به آفتاب (شمالی) معمولاً به دلیل دریافت کمتر تابش خورشید، رطوبت بیشتری دارند و چرخه‌های مکرر انجماد و ذوب در آن‌ها رخ می‌دهد. این شرایط می‌تواند موجب تضعیف ساختار خاک و افزایش ناپایداری شود. در مقابل، دامنه‌های رو به آفتاب (جنوبی) به دلیل تابش بیشتر و تبخیر بالاتر، معمولاً خاک خشک‌تری دارند. با این حال، تغییرات دمایی شدید در این دامنه‌ها ممکن است به کاهش مقاومت خاک و افزایش حساسیت به ناپایداری منجر شود. این اثرات در مناطق برف‌گیر، جایی که دما به‌طور مکرر از نقطه انجماد عبور می‌کند، برجسته‌تر هستند. در مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، توجه به این عامل در کنار سایر پارامترهای محیطی ضروری است (معماریان و سیارپور، ۱۳۸۵). نتایج بررسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند که بیشترین حساسیت ناپایداری‌های دامنه‌ای در جهت‌های جنوب و جنوب شرقی مشاهده شده است (شکل ۸). این موضوع احتمالاً به ترکیبی از شرایط توپوگرافی و اقلیمی منطقه بازمی‌گردد. دامنه‌های جنوبی به دلیل دریافت بیشتر تابش خورشید، تبخیر بالایی دارند که می‌تواند شرایط سطحی خاک را بی‌ثبات کند. در عین حال، رطوبت موجود در دامنه‌های شمالی نیز به دلیل چرخه‌های متوالی انجماد و ذوب، نقش مهمی در کاهش مقاومت خاک ایفا می‌کند. این نتایج تأکید می‌کنند که جهت شیب، به‌عنوان یک عامل محیطی مهم، باید در کنار سایر پارامترهای مرتبط مانند نوع خاک، شیب و ساختار زمین‌شناسی در مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۸: نمودار در صد تراکم ناپایداری‌های دامنه‌ای در کلاس‌های جهت شیب



شکل ۷: نقشه جهت شیب در حوضه مورد مطالعه

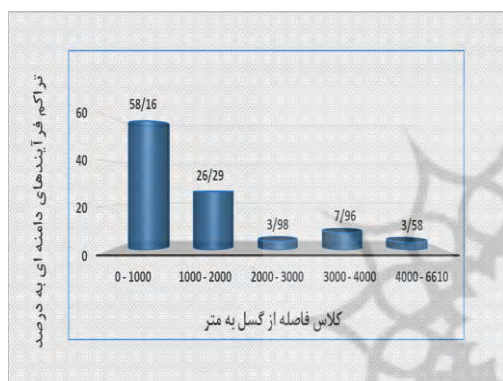
فاصله از گسل

با افزایش فاصله از گسل‌های اصلی، تأثیر زمین‌لرزه‌ها بر ساختار زمین کاهش یافته و احتمال وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای به‌طور قابل‌توجهی کمتر می‌شود. به همین دلیل، فاصله از گسل‌ها یکی از عوامل کلیدی در پیش‌بینی وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای محسوب می‌شود.

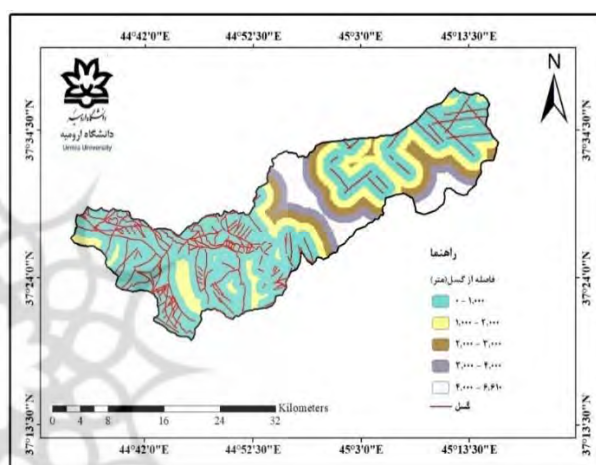
برای تهیه نقشه گسل‌های منطقه، از فایل‌های رقومی گسل‌های موجود در نقشه زمین‌شناسی استفاده شد. سپس با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل فضایی (Distance analysis)، نقشه فاصله از گسل‌ها در پنج کلاس مختلف طبقه‌بندی

و تهیه گردید (شکل ۹). این نقشه به منظور تحلیل تأثیر فاصله از گسل بر پراکندگی ناپایداری ها در نواحی مختلف مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج نشان داد که بیشترین ناپایداری ها در فاصله ۰ تا ۱۰۰۰ متری از گسل ها رخ داده اند. این الگو به طور مستقیم با تأثیرات زمین شناسی ناشی از فعالیت های گسل ها مرتبط است. گسل ها با ایجاد شکستگی و خرد شدگی در سنگ ها، افزایش نفوذپذیری و تغییر در شیب و جهت گیری لایه های سنگی، شرایطی فراهم می کنند که مقاومت مکانیکی سنگ ها کاهش یافته و احتمال نفوذ آب به درون دامنه ها افزایش یابد. همچنین، تغییرات در تعادل نیروی برشی و نیروی مقاوم در دامنه ها ناشی از جابه جایی گسل ها، می تواند خطر ناپایداری را تشدید کند (صبوری، ۱۴۰۲). این یافته ها نشان می دهند که مناطق نزدیک به گسل ها به دلیل این ویژگی ها مستعد ناپایداری های دامنه ای هستند.



شکل ۱۰: نمودار درصد تراکم ناپایداری های دامنه ای در کلاس های فاصله از گسل



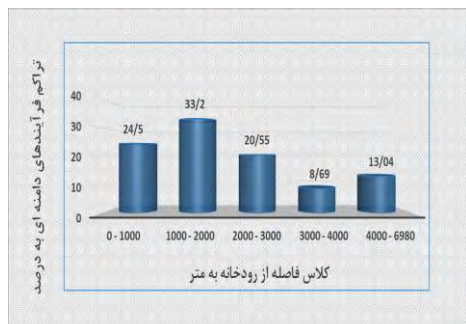
شکل ۹: نقشه فاصل از گسل در حوضه مورد مطالعه

فاصله از رودخانه

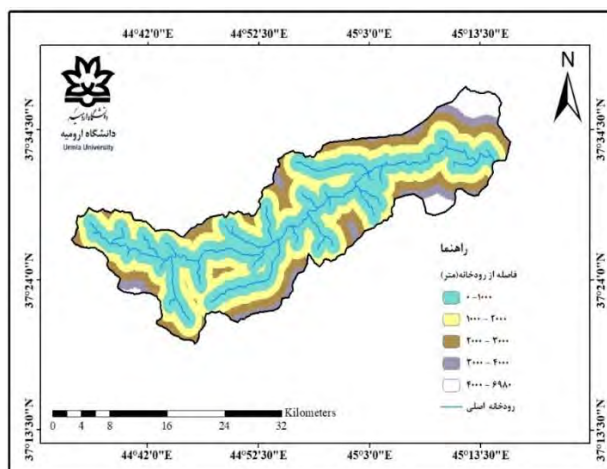
نقشه فاصله از رودخانه ها در پنج طبقه فاصله ای تهیه شد (شکل ۱۱). این طبقه بندی با استفاده از ابزارهای تحلیل فضایی بر اساس فواصل مشخص از شبکه رودخانه ای منطقه انجام گرفت.

تحلیل نتایج نشان داد که ۸۷/۲۵ درصد از ناپایداری های دامنه ای در فاصله ۰ تا ۳۰۰۰ متری از رودخانه ها رخ داده اند. این ناپایداری ها عمدتاً در دامنه های مجاور رودخانه مشاهده شده و در سه طبقه نخست، که فاصله کمتری از رودخانه دارند، به طور قابل توجهی بیشتر هستند (شکل ۱۲).

دلیل اصلی این امر فرسایش کنار رودخانه ای است که با تغییر در ویژگی های فیزیکی زمین، از جمله کاهش استحکام خاک و تغییر در تعادل شیب دامنه، منجر به افزایش ناپایداری می شود. جریان آب رودخانه با کنده شدن لایه های سطحی خاک، پیوستگی آن ها را کاهش داده و شرایط مساعدی برای وقوع لغزش و سایر ناپایداری های دامنه ای ایجاد می کند. علاوه بر این، فرسایش می تواند باعث تضعیف پایه دامنه ها و افزایش تنش های برشی شود (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۶).



شکل ۱۲: نمودار درصد تراکم ناپایداری‌های دامنه‌ای در کلاس‌های فاصله از رودخانه

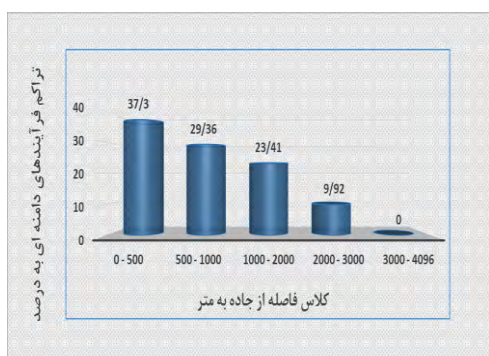


شکل ۱۱: نقشه فاصل از رودخانه در حوضه مورد مطالعه

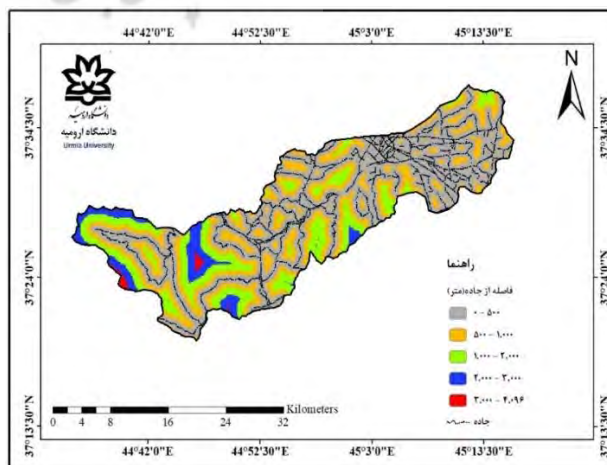
فاصله از جاده

برای تحلیل رابطه بین فاصله از جاده و وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، لایه‌ای پنج طبقه‌ای بر اساس فاصله از جاده تهیه شد (شکل ۱۳).

نتایج نشان داد که بیش از ۹۰ درصد ناپایداری‌های دامنه‌ای در فاصله ۰ تا ۲۰۰۰ متری از جاده‌ها رخ می‌دهند (شکل ۱۴). این نتایج حاکی از آن است که جاده‌سازی و فعالیت‌های مرتبط با آن، تأثیر عمده‌ای بر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای دارند. عوامل متعددی در این رابطه نقش دارند. اول، ساخت‌وساز و جاده‌سازی باعث تخریب پوشش گیاهی می‌شود که در حفظ پایداری خاک و کاهش فرسایش نقش کلیدی دارد. دوم، تغییر در ساختار خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی، مانند تراکم خاک یا کاهش نفوذپذیری، شرایط را برای افزایش تنش برشی در دامنه‌ها فراهم می‌کند. سوم، تغییرات در جریان‌های سطحی و زیرسطحی آب در اطراف جاده‌ها به دلیل ایجاد کانال‌ها یا تغییرات توپوگرافی، می‌تواند خطر فرسایش و ناپایداری را افزایش دهد. در مقابل، در مناطق دورتر از جاده‌ها، به دلیل حفظ شرایط طبیعی شامل پوشش گیاهی و ساختار خاک، وقوع ناپایداری‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این مناطق معمولاً کمتر تحت تأثیر تغییرات انسانی قرار می‌گیرند و پایداری طبیعی خود را حفظ می‌کنند.



شکل ۱۴: نمودار درصد تراکم ناپایداری‌های دامنه‌ای در کلاس‌های فاصله از جاده



شکل ۱۳: نقشه فاصله از جاده در حوضه مورد مطالعه

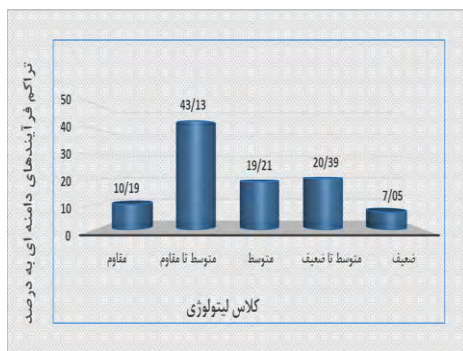
لیتولوژی

نوع مصالح سنگی یکی از عوامل اصلی وقوع ناپایداری های دامنه ای است و تقریباً تمامی روش های پهنه بندی ناپایداری این عامل را مدنظر قرار داده اند. بررسی نتایج تلفیق نقشه لیتولوژی با نقشه ناپایداری های منطقه نشان می دهد که بیشترین ناپایداری ها در سنگ های با مقاومت متوسط تا بالا (۴۳/۱۳ درصد) رخ داده است (شکل ۱۶). برای تهیه نقشه لیتولوژی، از نقشه زمین شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد و واحدهای لیتولوژیکی مختلف بر اساس آن تعریف گردید. طبق مطالعات پیروان و شریعت جعفری (۱۳۹۲)، حساسیت و مقاومت هر واحد سنگی در برابر فرسایش بررسی شد. بر اساس این مطالعات، سنگ ها از نظر فرسایش پذیری به رده های مختلف طبقه بندی شدند و در ناحیه مورد مطالعه، این سنگ ها در هشت گروه لیتولوژیکی قرار گرفتند (شکل ۱۵). نوع مصالح سنگی یکی از عوامل اصلی وقوع ناپایداری های دامنه ای است. نتایج تلفیق نقشه لیتولوژی با نقشه پراکندگی ناپایداری های دامنه ای نشان می دهد که بیشترین ناپایداری ها در سنگ های با مقاومت متوسط تا بالا (۴۳/۱۳ درصد) مشاهده شده است (شکل ۱۶). این نتیجه نشان دهنده تأثیر مستقیم نوع سنگ و ویژگی های فیزیکی آن بر وقوع ناپایداری ها است.

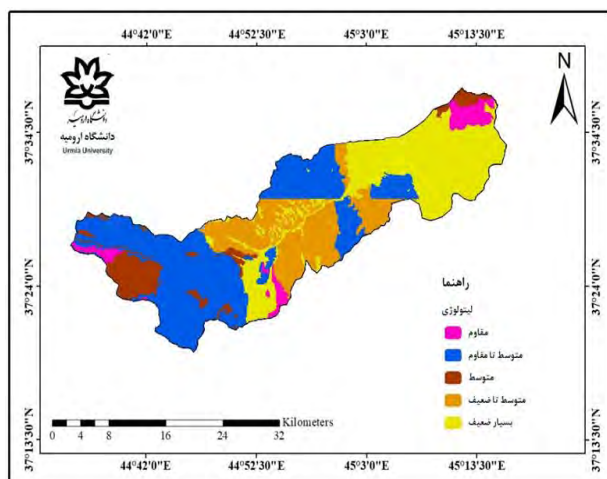
در این ناحیه، سازند قم که شامل منزودیوریت گرانودیوریت، تناب کنگلومرا، توف و ماسه سنگ است، با مساحت ۳۱/۶۳ کیلومتر مربع (معادل ۴۱/۴۳ درصد از مساحت کل منطقه) دارای لیتولوژی مقاوم بوده و از این رو، ناپایداری های کمتری در آن مشاهده می شود.

سازند روته که شامل شیست، سنگ های آتشفشانی، همتافت سیلوانا و ماسه سنگ آهکی است، مساحتی معادل ۲۷۱/۸۰ کیلومتر مربع (معادل ۳۸/۰۶ درصد از مساحت کل منطقه) را در بر می گیرد و لیتولوژی متوسط تا مقاوم دارد. سازند دولومیت سلطانیه با مساحت ۵۴/۳۹ کیلومتر مربع (معادل ۷/۶۱ درصد از مساحت منطقه) شامل توف آندزیت، سنگ های آتشفشانی متوسط دگرگون شده و شیست است که این سازند نیز دارای لیتولوژی متوسط است. سازند ماسه سنگ دانه درشت با مساحت ۱۳۹/۱۱ کیلومتر مربع (معادل ۱۹/۴۸ درصد از مساحت کل منطقه) و لیتولوژی متوسط تا ضعیف است.

علاوه بر سازندهای سنگی، نهشته های مخروط افکنه ای جوان، نهشته های مخروط افکنه ای قدیمی، پادگانه های آبرفتی جوان، خاک های باقیمانده و خاک های زیر کشت نیز در مساحت ۲۱۷/۷۶ کیلومتر مربع (معادل ۳۰/۴۹ درصد از مساحت کل منطقه) قرار دارند. این نواحی دارای لیتولوژی متوسط تا ضعیف هستند که می تواند موجب ناپایداری های دامنه ای بیشتری گردد.



شکل ۱۶: نمودار درصد تراکم ناپایداری های دامنه ای در کلاس های لیتولوژی



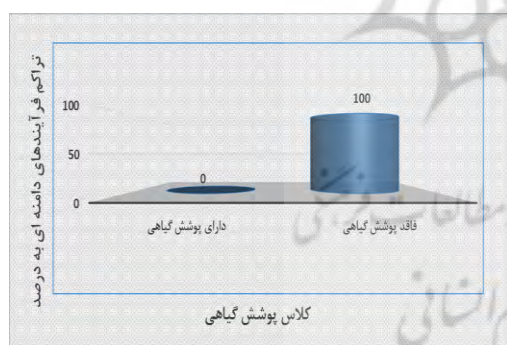
شکل ۱۵: نقشه لیتولوژی در حوضه مورد مطالعه

پوشش گیاهی

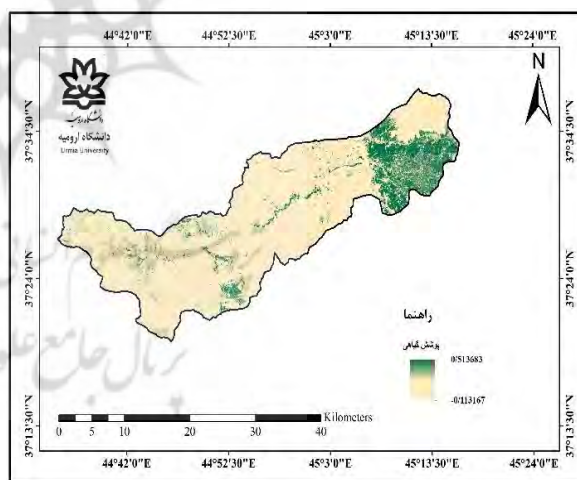
برای بررسی پوشش گیاهی، از تصاویر لندست ۸ (سنجنده OLI) و شاخص پوشش گیاهی NDVI استفاده شد. ابتدا مقادیر DN پیکسل‌های تصویر به رادیانس تبدیل شدند و سپس با استفاده از الگوریتم اتمسفری Flaash، تصحیحات اتمسفری انجام گرفت که نتیجه آن مقادیر بازتاب سطح زمین بود. از آنجا که مقادیر بازتاب سطح زمین بین صفر و یک (در قالب داده‌های Float) قرار دارند، این مقادیر قبل از محاسبه شاخص پوشش گیاهی، مقیاس‌بندی (Rescale) شدند. برای تهیه نقشه پوشش گیاهی، از شاخص NDVI استفاده شد که مقادیر آن بین +۱ و -۱ متغیر است. معادله NDVI به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + \text{RED})} \quad \text{معادله (۳)}$$

ارزش‌های بالای NDVI نشان‌دهنده مناطق با تراکم پوشش گیاهی بالا هستند، در حالی که مناطق فاقد پوشش گیاهی با مقادیر منفی مشخص می‌شوند. شکل (۱۷) وضعیت پوشش گیاهی منطقه را نشان می‌دهد. بررسی تلفیق نقشه پوشش گیاهی با نقشه ناپایداری‌های منطقه (شکل ۱۸) نشان می‌دهد که ناپایداری‌های دامنه‌ای عمدتاً در زمین‌های فاقد پوشش گیاهی (با ۱۰۰ درصد وقوع) رخ داده‌اند. به‌طور دقیق‌تر، بررسی‌ها نشان داد که ۱۰۰ درصد از ناپایداری‌ها در مناطق فاقد پوشش گیاهی ثبت شده است. این نتیجه به‌طور مستقیم به ارتباط میان فقدان پوشش گیاهی و آسیب‌پذیری بیشتر زمین‌ها در برابر فرسایش و ناپایداری‌های دامنه‌ای اشاره دارد. کاهش پوشش گیاهی می‌تواند باعث کاهش انسجام خاک، افزایش فرسایش سطحی و در نتیجه تسهیل وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای شود.



شکل ۱۸: نمودار در صد تراکم ناپایداری‌های دامنه‌ای در کلاس‌های پوشش گیاهی



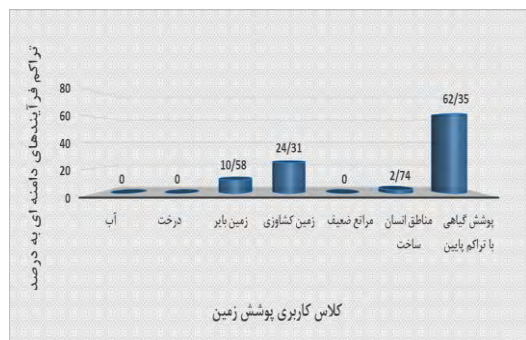
شکل ۱۷: نقشه پوشش گیاهی در حوضه مورد مطالعه

پوشش زمین

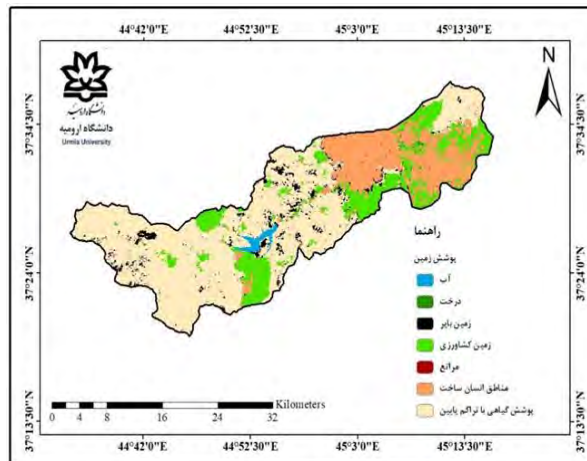
برای شناسایی پوشش زمین در حوضه مطالعه‌شده، از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با وضوح بالا استفاده شد که از پایگاه داده Esri Landcover استخراج گردید. این تصویر ماهواره‌ای با دقت بالا اطلاعات ارزشمندی از وضعیت پوشش زمین در سطح منطقه فراهم می‌آورد. پس از تجزیه و تحلیل تصویر، ۷ نوع کاربری اراضی مختلف شناسایی شد که شامل مناطق کشاورزی، مسکونی، جنگلی و طبیعی بودند (شکل ۱۹).

با توجه به تحلیل انجام‌شده، نتایج نشان می‌دهند که مناطق با پوشش گیاهی کم‌تراکم بیشترین حساسیت به ناپایداری‌های دامنه‌ای را دارند. این مناطق، که پوشش گیاهی مناسبی ندارند، معمولاً در معرض کاهش تثبیت خاک و افزایش خطر وقوع

ناپایداری ها قرار دارند. کاهش پوشش گیاهی در این نواحی باعث تسهیل فرسایش سطحی و ناپایداری های دامنه ای می شود، که در نتیجه افزایش احتمال وقوع زمین لغزش ها و دیگر فرآیندهای ناپایدار را به دنبال دارد (شکل ۲۰).



شکل ۲۰: نمودار درصد تراکم ناپایداری های دامنه ای در کلاس های پوشش زمین



شکل ۱۹: نقشه پوشش زمین در حوضه مورد مطالعه

نتایج مدل رگرسیون لجستیک

نقشه های عوامل مؤثر در ناپایداری های دامنه ای به عنوان متغیرهای مستقل وارد نرم افزار Idrisi شده و با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک پردازش گردیدند. در این مدل، از نه متغیر مستقل برای ارزیابی فرآیندهای دامنه ای در منطقه استفاده شد. ضرایب به دست آمده نشان داد که متغیرهای فاصله از جاده، جهت شیب، فاصله از گسل و پوشش گیاهی رابطه مثبت و مستقیم با ناپایداری ها دارند و به عنوان مؤثرترین عوامل در وقوع ناپایداری ها شناسایی شدند. برای ارزیابی صحت مدل رگرسیون لجستیک، از معیارهایی همچون آزمون ROC استفاده شد که نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش بینی وقوع ناپایداری ها بود. مقایسه نتایج با مطالعات پیشین، از جمله تحقیق های کان و همکاران^۱ (۲۰۰۵)، گریکو و همکاران^۲ (۲۰۰۷)، نفسلی اوغلو و همکاران^۳ (۲۰۰۸)، نشان می دهد که روش رگرسیون لجستیک در تحلیل خطر ناپایداری دامنه ای دارای دقت و کارایی بالایی است. این نتایج همچنین نشان می دهند که عواملی نظیر فاصله از جاده، جهت شیب، فاصله از گسل و نوع پوشش گیاهی به طور مداوم در مطالعات پیشین به عنوان متغیرهای کلیدی در تحلیل ناپایداری ها شناخته شده اند، که این امر اعتبار مدل و نتایج به دست آمده را تقویت می کند.

جدول ۲: ضرائب حاصل از مدل رگرسیون لجستیک

ضرائب	متغیرهای مستقل	
-۹/۵۴۰۰	عدد ثابت	X ₀
۰/۲۳۷۸۱۹	فاصله از گسل	X ₁
۰/۵۲۴۲۹۷	فاصله از جاده	X ₂
-۰/۱۸۸۴۶۸	فاصله از رودخانه	X ₃
-۰/۱۶۱۸۱۴	لیتولوژی	X ₄
۰/۱۴۱	پوشش گیاهی	X ₅
-۰/۳۹۸۵۳۹	شیب	X ₆
۰/۵۰۵۶۲۶	جهت شیب	X ₇

¹ Can et al.

² Greco et al.

³ Nefeslioglu et al.

X_8	طبقات ارتفاعی	-۰/۰۰۸۹۱۱
X_9	پوشش زمین	-۰/۰۳۶۶۱۵

(۴) معادله

$$\text{logit(Land slide)} = -9.5400 + (0.237819 * X_1) + (0.524297 * X_2) + (-0.188468 * X_3) + (-0.161814 * X_4) + (0.141 * X_5) + (-0.398539 * X_6) + (0.505626 * X_7) + (-0.008911 * X_8) + (-0.036615 * X_9)$$

شاخص‌های اعتبار مدل آماری حاصل از رگرسیون لجستیک در جدول شماره (۳) ذکر شده است. برای ارزیابی این مدل از تست‌های ROC، Pseudo R Square، و Chi Square استفاده شده است.

جدول ۳: شاخص‌های اعتبار سنجی مدل آماری رگرسیون لجستیک

شاخص	مقدار استاندارد	مقدار به دست آمده
Chi Square	$> 14/1$	۱۰۹۳۰/۴۷۹۵
Pseudo R Square	$> ۰/۲$	۰/۳۱۳۳
ROC	$> ۰/۵$	۰/۹۲۲۳

مقدار شاخص Chi-Square که در این تحقیق به میزان ۱۰۹۳۰/۴۷۹۵ محاسبه شده است، به‌طور قابل توجهی بیشتر از آستانه تعیین شده است. این امر نشان‌دهنده ناسازگاری داده‌ها با فرض صفر (یعنی فرضی که هیچ ارتباط معنی‌داری بین متغیرها وجود ندارد) است. بنابراین، فرض صفر رد می‌شود و این به معنای آن است که حداقل یکی از ضرایب مدل ارزیابی شده ارتباط معنی‌داری با متغیر وابسته دارد.

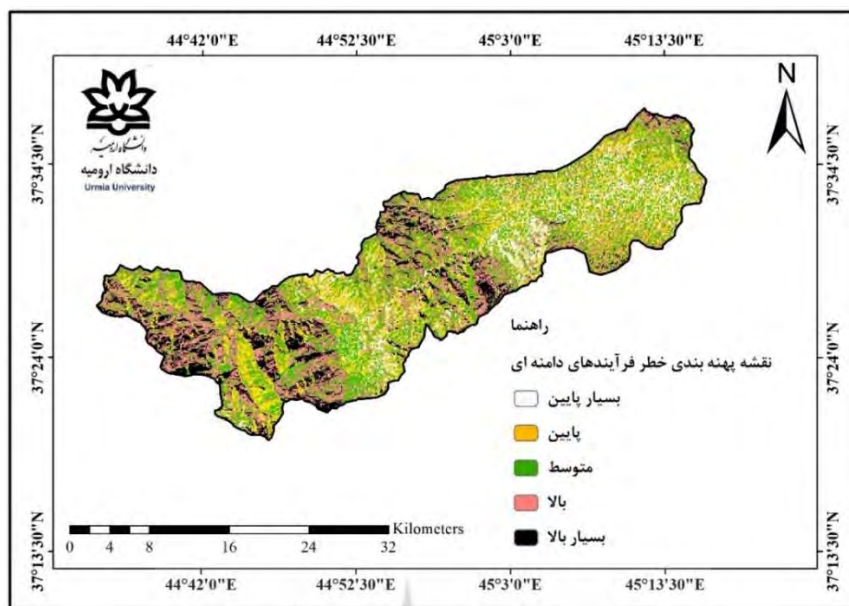
شاخص PR^2 به مقدار ۰,۳۱۳۳ محاسبه شده که از آستانه ۰,۲ بیشتر است. این نتیجه نشان‌دهنده برازش قابل قبول مدل ارائه شده در این تحقیق است. به عبارت دیگر، مدل با استفاده از شاخص PR^2 به خوبی به داده‌ها برازش یافته و پیش‌بینی‌های مدل قابل قبول است.

علاوه بر این، مقدار ROC برابر با ۰,۹۲۲۳ که در این مطالعه به دست آمده، نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی و معنی‌دار بین متغیرهای مستقل و وابسته است. این مقدار، که در مطالعات مشابه به عنوان نشانه‌ای از دقت بالا در پیش‌بینی مدل شناخته می‌شود، تأییدکننده عملکرد مؤثر مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای مورد مطالعه است.

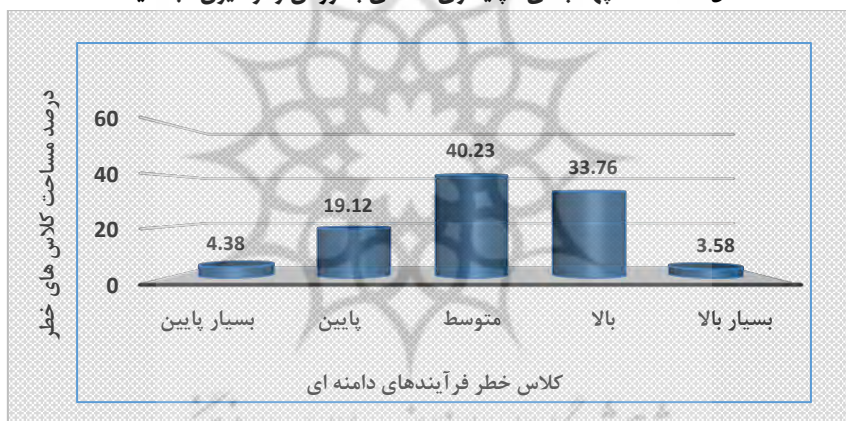
نقشه پهنه‌بندی

پس از وزن‌دهی به کلاس‌های مختلف عوامل تأثیرگذار بر وقوع فرآیندهای دامنه‌ای و تعیین اهمیت نسبی هر عامل با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، و پس از اعتبارسنجی مدل با استفاده از شاخص‌های ارزیابی مدل، نقشه حساسیت به فرآیندهای دامنه‌ای بر اساس معادله (۴) برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۲۱). برای اعتبارسنجی مدل، از شاخص‌هایی مانند مقدار PR^2 ، Chi-Square، و ROC استفاده شد که نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای مدل در پیش‌بینی ناپایداری‌ها هستند.

بر اساس نتایج مدل، منطقه مورد مطالعه به پنج دسته با حساسیت مختلف به فرآیندهای دامنه‌ای تقسیم شد: بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین و بسیار پایین. پس از انجام پهنه‌بندی ناپایداری‌های دامنه‌ای، درصد مساحت ناپایدار در هر دسته محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مناطق با خطر بسیار بالا کمترین درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲۲)، که این امر می‌تواند نشان‌دهنده پراکندگی غیرهمگن خطر ناپایداری‌ها در منطقه باشد.



شکل ۲۱: نقشه پهنه بندی ناپایداری دامنه ای به روش رگرسیون لجستیک



شکل ۲۲: نمودار مساحت تحت اشغال کلاس های خطر در روش رگرسیون لجستیک

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی پتانسیل خطر ناپایداری های دامنه ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه و با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک انجام شد. نتایج نشان داد که این مدل با دقت بالا قادر است عوامل مؤثر بر وقوع ناپایداری های دامنه ای را شناسایی و نقشه های حساسیت پذیری منطقه را تهیه کند.

تحلیل ارتباط میان عوامل مختلف و وقوع ناپایداری ها بیانگر اهمیت عواملی نظیر فاصله از جاده، جهت شیب، فاصله از گسل، و پوشش گیاهی است. این یافته ها با مطالعات پیشین نیز همخوانی دارند. برای مثال، تأثیر فاصله از جاده با نتایج زندی و همکاران (۱۳۹۷) و اهمیت جهت شیب با مطالعات عابدینی و یعقوب نژاد اصل (۱۳۹۶) و همتی و همکاران (۱۳۹۸) سازگار است. تأثیر فاصله از گسل نیز با نتایج تحقیقات اسحاقی و همکاران (۱۳۸۸) مطابقت دارد. همچنین، نقش پوشش گیاهی در کاهش ناپایداری ها، با نتایج محمدی و همکاران (۲۰۱۰) و پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۲) تأیید می شود.

مطالعه حاضر نشان داد که نزدیکی به جاده ها به دلیل تغییرات ناشی از فعالیت های انسانی و کاهش استحکام خاک، احتمال وقوع ناپایداری ها را افزایش می دهد. همچنین، جهت شیب از طریق تأثیر بر عواملی مانند میزان اشباع آب، فرسایش خاک، و تابش خورشید، نقش کلیدی در پایداری دامنه ها ایفا می کند. علاوه بر این، نزدیکی به گسل ها به دلیل فعالیت های

زمین‌ساختی و تغییرات زمین‌شناسی، خطر ناپایداری را افزایش می‌دهد. در نهایت، پوشش گیاهی به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده، از طریق کاهش فرسایش و رانش زمین، تأثیر قابل توجهی در کاهش ناپایداری‌ها دارد. شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش (ROC، Pseudo R Square و Chi Square) نشان‌دهنده دقت و اعتبار بالای مدل بودند. مقدار بالای شاخص Chi Square و مقدار مناسب Pseudo R Square بیانگر برازش مطلوب مدل و توان پیش‌بینی بالای آن است. همچنین، مقدار ROC برابر با ۰٫۹۲۲۳، نشان‌دهنده همبستگی قوی میان متغیرهای مستقل و وابسته در مدل است. نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه‌شده، توزیع مناطق با حساسیت‌های مختلف به ناپایداری دامنه‌ای را مشخص کردند. این نقشه‌ها ابزاری ارزشمند برای برنامه‌ریزان و مدیران بحران در کاهش خطرات و مدیریت بهتر منابع طبیعی فراهم می‌کنند.

محدودیت‌های پژوهش

یکی از محدودیت‌های اصلی این تحقیق، شرایط جغرافیایی و دشواری‌های ناشی از مسیرهای کوهستانی صعب‌العبور و شرایط نامساعد آب و هوایی در زمان جمع‌آوری داده‌ها بود. این مسائل منجر به محدودیت‌هایی در جمع‌آوری داده‌های میدانی شد. علاوه بر این، عدم دسترسی به داده‌های هواشناسی به‌روز و دقیق، چالشی دیگر در تحلیل برخی متغیرها بود. توصیه می‌شود که در تحقیقات آینده با استفاده از داده‌های دقیق‌تر و تحلیل‌های جامع‌تر، این محدودیت‌ها برطرف شود.

پیشنهادهای

- اضافه کردن تحلیل‌های زمانی برای بررسی تأثیر تغییرات فصلی و سالانه بر وقوع ناپایداری‌ها.
- مطالعه تأثیرات تغییرات اقلیمی بلندمدت بر ناپایداری‌های دامنه‌ای.
- استفاده از فناوری‌های جدید مانند پهپادها برای تهیه تصاویر دقیق‌تری از مناطق مورد مطالعه.
- ایجاد سیستم‌های پایش و ارزیابی مستمر برای نظارت بر وضعیت ناپایداری‌ها و به‌روزرسانی اطلاعات به‌صورت منظم

منابع

- اسحاقی، امیر؛ معتمد وزیری، بهارک؛ فیض نیا، سادات. (۱۳۸۸)، پهنه‌بندی خطر وقوع حرکت‌های توده‌ای با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز صفارود)، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، ۶ (۲۴): ۷۷-۶۷.
- پیروان، حمیدرضا؛ شریعت جعفری، محسن. (۱۳۹۲). ارائه روشی جامع برای تعیین فرسایش‌پذیری واحدهای سنگ‌شناسی با نگرشی بر زمین‌شناسی ایران. نشریه علمی - پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. ۵ (۳): ۲۱۳-۱۹۹.
- پیروتنی اول، دیمین. (۱۳۹۲). بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز شهرچای ارومیه تا محل سد (پایان‌نامه کارشناسی ارشد). وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه تبریز، دانشکده جغرافیا.
- چپی، کامران؛ طالب پور، داود؛ شیرزادی، عطا الله. (۱۳۹۷). مقایسه مدل‌های رگرسیون لجستیک و بیزین رگرسیون لجستیک به منظور پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای استان کردستان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۷ (۲): ۸۱-۶۰.
- حسین‌زاده، محمدمهدی؛ صدوق، سید حسن؛ متش بیرانوند، سعیده؛ اسماعیلی، رضا. (۱۳۹۶). تحلیل پایداری کرانه رودخانه در برابر فرسایش با استفاده از تنش برشی - مطالعه موردی: رودخانه لایوچ. فصلنامه جغرافیای طبیعی. ۱۰ (۳۵): ۳۹-۴۴.
- رحیمی، حسین. (۱۳۹۰). مدل‌سازی زمانی - مکانی تغییرات پوشش زمین با تلفیق تحلیل زنجیره مارکوف، شبکه‌ای عصبی مصنوعی، سلول‌های خودکار، رستم‌زاده، هاشم، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تبریز.

- روستایی، شهرام؛ مختاری، داود؛ جانانه، کریستینه. (۱۴۰۱). تحلیل کمی ناپایداری های دامنه ای در دامنه های مشرف بر اتوبان در حال احداث تهران- شمال (تهران- سولقان) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک. جغرافیا و برنامه ریزی. ۲۶(۸۰): ۱۵۷-۱۶۹.
- روستائی، شهرام؛ خدائی، لیلا. (۱۳۹۷۵). ارزیابی روش های تحلیل شبکه (ANP) و رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده محور و مخزن سد، مطالعه موردی: سد قلعه چای. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی. ۵(۳): ۶۷-۸۰.
- زندی، رحمان؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ محمدنیا، ملیحه. (۱۳۹۷)، استفاده از مدل آنتروپی در ارزیابی مخاطره زمین لغزش در مسیر جاده پیشنهادی طبقه - درود (مشهد- نیشابور). جغرافیا و روابط انسانی. ۲: ۵۸-۳۷.
- صبوری، سعید محمد. (۱۴۰۲). بررسی ارتباط بین رخداد زمین لغزش با پهنه های گسلی در ایران. دو فصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی). ۹(۲ و ۱): ۱۰۷-۸۰.
- صدیقی، حدیثه؛ قاسمی، احمد رضا. (۱۴۰۲). مدل سازی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: استان چهار محال و بختیاری). پژوهش های دانش زمین. ۱۴(۴): ۶۰-۴۲.
- عابدینی، موسی؛ یعقوب نژاد اصل، نازیلا. (۱۳۹۶)، پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در استان تهران با استفاده از مدل فازی. دو فصلنامه علمی پژوهشی مدیریت بحران. ۶(۱): ۱۵۵-۱۴۵.
- گلی پور، شیوا؛ حسین زاده، سیدرضا، پورعلی، ملیحه. (۱۴۰۱). شناسایی دامنه های مستعد زمین لغزش و طبقه بندی انواع آن با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه قهرمانلو استان خراسان شمالی). پژوهش های ژئومورفولوژی کمی. ۱۱(۱): ۲۲۸-۲۰۹.
- متولی، صدرالدین؛ اسماعیلی، رضا. (۱۳۹۱)، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان). فصلنامه علمی- پژوهشی پژوهش های فرسایش محیطی. ۲۰(۸): ۲۰-۱.
- متولی، صدرالدین؛ حسین زاده، محمد مهدی؛ اسماعیلی، رضا؛ درفشی، خهبات. (۱۳۹۷). ارزیابی دقت روش های رگرسیون چند متغیره (MR)، رگرسیون لجستیک (LR)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (FL) در پهنه بندی خطر زمین لغزش حوضه آبخیز طالقان. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی. ۴(۱): ۲۰-۱.
- معماریان، حسین؛ سیارپور، مرتضی. (۱۳۸۵). نقش پارامتر شیب دامنه در بروز خطا در پهنه بندی خطر زمین لغزش. نشریه دانشکده فنی. ۴۰(۱): ۱۱۳-۱۰۵.
- همتی، فریبا؛ حجازی، سید اسداله. (۱۳۹۶). پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش آماری رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز لواسانات. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۷(۴۵): ۲۴-۷.
- همتی، فریبا؛ مختاری، داود؛ روستائی، شهرام؛ زمانی قره چمنی، بهزاد. (۱۳۹۸). تعیین حساسیت وقوع ناپایداری های دامنه ای در پیرامون گسل بناروان با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک. فضای جغرافیایی. ۱۹(۶۵): ۱۶۹-۱۵۱.
- Al Zawbaee, O. M. M., & Tabra, H. M. (2020). Identifying factors influencing decision making using logistic regression. *General Letters in Mathematics (GLM)*, 8(2), 83-89.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65 (1-2), 15-31.

- Can, T., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., & Duman, T. Y. (2005). *Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. Geomorphology*, 72(1-4), 250-271.
- Chau, K. T., Sze, Y. L., Fung, M. K., Wong, W. Y., Fong, E. L., & Chan, L. C. (2004). *Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS". Computers and Geosciences*, 30 (4), 429–443.
- Chouhan, S., & Mukherjee, M. (2023). *Design and application of a multi-hazard risk rapid assessment questionnaire for hill communities in the Indian Himalayan region. Natural hazards and earth system sciences*, 23(4), 1267-1286.
- Cook, K., Andermann, C., Puri, B., Schwanghart, W., & Adhikari, B. R. (2022). *The influence of river-hillslope interactions on fluvial hazards in the Himalaya (No. ICG2022-508). Copernicus Meetings.*
- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). "Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS -Hong Kong. *Geomorphology*, 42 (3-4), 213–228.
- Dastrup R. A. (2020). *Physical Geography and Natural disasters*. Salt Lake Community College. Creative commons Attribution-Noncommercial-ShareAlike 4.0 International License.
- Greco, R., Sorriso-Valvo, M., & Catalano, E. (2007). *Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: the Aspromonte case study, Calabria, Italy. Engineering geology*, 89(1-2), 47-66.
- Ildromi, A. (2011). *The study and modeling land slide hazards by using logistic regression. Case study: Syahdare watershed, Hamedan, Iran.*
- Jamir, I., Kumar, V., Ojha, A. K., & Gupta, V. (2022). *An appraisal of Pre-and Post-failure regimes of a hillslope using stability, runout, and structural implications; A case study from the NW Himalaya (No. ICG2022-185). Copernicus Meetings.*
- Khan, M. Y., Shafique, M., Turab, S. A., & Ahmad, N. (2021). *Characterization of an unstable slope using geophysical, UAV, and geological techniques: Karakoram Himalaya, Northern Pakistan. Frontiers in Earth Science*, 9, 668011.
- Menard, S. (2002). *Applied logistic regression analysis*. Thousand Oaks, Calif. Sage Publications, c2002. (2nd ed).
- Mohammadi, M., Moradi, H. R., Feyznia, S., & Pourghasemi, H. R. (2010). *Comparison of the efficiency of certainty factor, information value and AHP models in landslide hazard zonation (case study: part of Haraz Watershed).*
- Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., & Sonmez, H. (2008). *An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. Engineering Geology*, 97(3-4), 171-191.
- Pourghasemi, H. R., Mohammady, M., & Pradhan, B. (2012). *Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. Catena*, 97, 71-84.
- Riegel, R. P., Alves, D. D., Schmidt, B. C., de Oliveira, G. G., Haetinger, C., Osório, D. M. M., & de Quevedo, D. M. (2020). *Assessment of susceptibility to landslides through geographic information systems and the logistic regression model. Natural Hazards*, 103, 497-511.

- Sharma, M., Upadhyay, R. K., Tripathi, G., Kishore, N., Shakya, A., Meraj, G., & Thakur, S. N. (2023). Assessing landslide susceptibility along India's National Highway 58: a comprehensive approach integrating remote sensing, GIS, and logistic regression analysis. *Conservation*, 3(3), 444-459.
- Sun, D., Wen, H., Zhang, Y., & Xue, M. (2021). An optimal sample selection-based logistic regression model of slope physical resistance against rainfall-induced landslide. *Natural Hazards*, 105, 1255-1279.
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering geology*, 102(3-4), 112-131.

