

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 کم عمق 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 به طور معمول به شکل مخروط افکنه‌ها 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 به عنوان 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 به طور موفقیت‌آمیزی برای شناسایی عوامل مؤثر بر پدیده‌هایی نظیر لغزش زمین به کار 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، به طوری که این مدل تا به طوری که این مدل تا ۸۷/۳ درصد از پیکسل‌ها را در نقشه‌های احتمال لغزش به درستی 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 تقسیم‌بندی شد و این مطالعه اهمیت روش‌های دقیق در ارزیابی خطر زمین لغزش را نشان داد. همتی و حجازی (۱۳۹۶) در تحقیق خود به پهنه‌بندی 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 می‌دهند. کاربری اراضی به‌عنوان بهترین متغیر پیش‌بینی‌کننده احتمال وقوع زمین لغزش شناسایی شد. چپی و همکاران (۱۳۹۷) کارایی روش‌های رگرسیون لجستیک (LR) و بیزین رگرسیون لجستیک (BLR) را در تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری در دقت نقشه‌های پیش‌بینی 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 بناوان با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک برای تعیین مناطق خطر ناپایداری دامنه‌ای بررسی شد. این تحقیق با استفاده از بازدیدهای میدانی، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، و مرور منابع قبلی، ۹ عامل مؤثر بر ناپایداری دامنه‌ای را در نرم‌افزار Idrisi تحلیل کرد. نتایج نشان داد که مناطق با خطر بسیار بالا کمترین درصد از مساحت منطقه را تشکیل می‌دهند. عامل ارتفاع با بیشترین ضریب، بهترین پیش‌بینی‌کننده وقوع ناپایداری دامنه‌ای بود، و بیشترین ناپایداری‌ها در ارتفاعات بالا و شیب ۲۳-۳۲ درجه رخ داده است. گلی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل‌های 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 به‌عنوان عوامل مؤثر و ۲۸ زمین لغزش به‌عنوان 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 لغزش‌ها شامل نوع انتقالی و چرخشی بودند. روستایی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و تحلیل ۱۴ فاکتور، ناپایداری دامنه‌ها در مسیر اتوبان تهران-شمال را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این روش برای پهنه‌بندی احتمال ناپایداری‌ها مناسب است و جاده‌سازی غیراصولی نقش مهمی در ناپایداری دامنه‌ها دارد. برای کاهش خطرات، باید از تغییرات اکوسیستم و کاربری اراضی جلوگیری کرد و سازه‌ها با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی منطقه ساخته شوند. صدیقی و قاسمی (۱۴۰۲) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، ۹ عامل مؤثر در زمین لغزش‌های استان چهارمحال و بختیاری را تحلیل کرده‌اند. یافته‌های آنها نشان داد که جنس و شیب زمین، فاصله از جاده‌ها و میزان بارش از مهم‌ترین 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 نقشه‌برداری مقاومت شیب‌های کوهستانی در برابر زمین لغزش‌های ناشی از بارندگی توسعه دادند. نتایج نشان داد که ۲۵/۰۶ درصد از منطقه مقاومت پایین دارد، اما ۸۳/۰۷ درصد از زمین لغزش‌های تاریخی در این مناطق رخ داده‌اند. بررسی منحنی ROC نیز دقت و پایداری بالای مدل را تأیید کرد. شارما و همکاران^۲ (۲۰۲۳) با استفاده از تکنولوژی‌های 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.

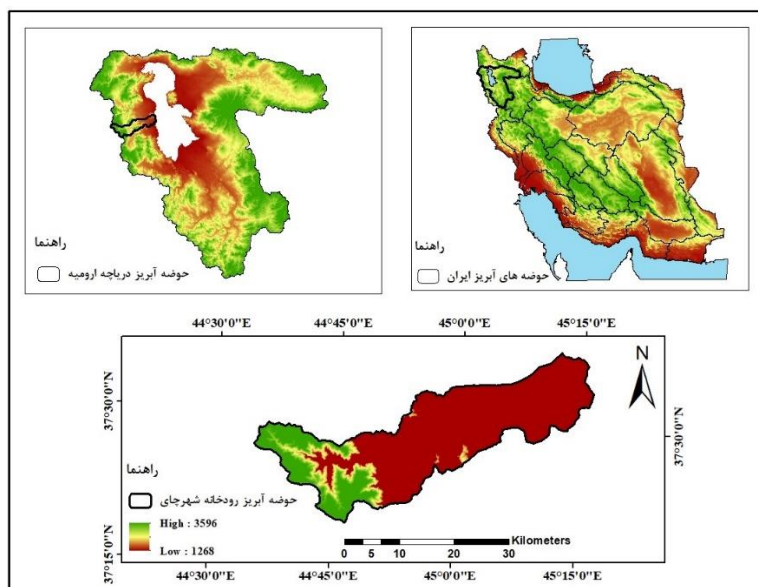
معرفی منطقه

حوضه آبریز شهرچای ارومیه در شمال‌غربی ایران و در استان آذربایجان‌غربی واقع شده است و در فاصله ۱۲ کیلومتری جنوب‌غربی 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 به‌شمار 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.

به طوری 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 به طور 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، به طوری 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 حوضه 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 Aspect و Slope 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 پدیده 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, ..., X_n ضرایب مربوط به متغیرهای مستقل، C₁, C₂, ..., C_n هستند.

با تغییر در مقدار Z از -∞ تا +∞ 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 PR2 نشان می‌دهد که مدل لجستیک چقدر موفق است در برازش مجموعه داده‌ها. در واقع، PR2 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 PR2 بیشتر از ۰/۲ باشد، این نشان‌دهنده برازش نسبتاً خوب مدل است. $1 - Ln(L) / Ln(LO) = PR2$	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 ۰/۵ تا ۱ قرار دارد، که ۱ نشان‌دهنده تطابق کامل و ۰/۵ 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.

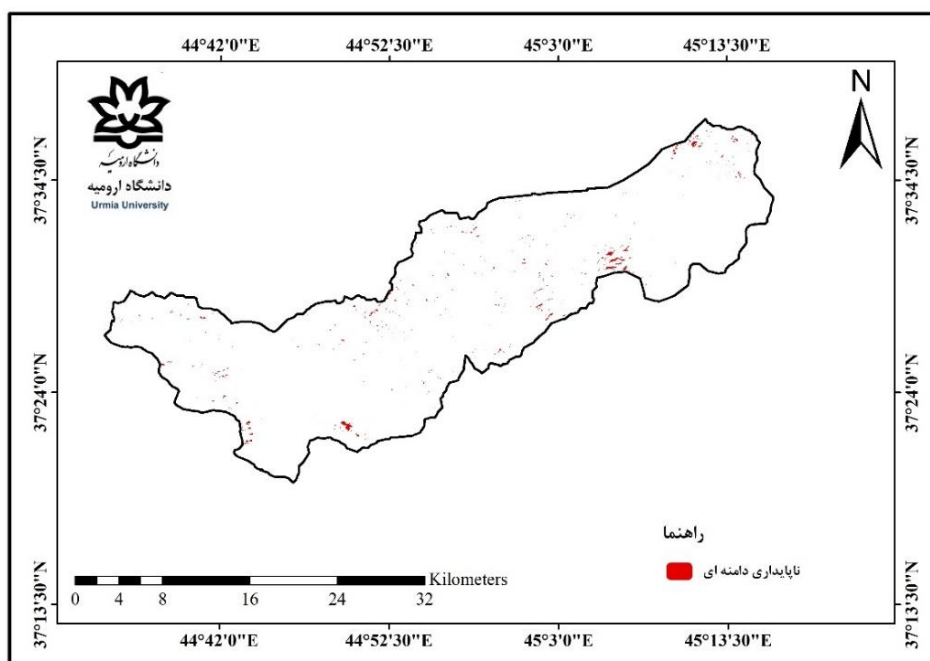
پس از تهیه نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای (که شامل حرکات و تغییرات ناخواسته سطح زمین مانند لغزش‌ها، ریزش‌ها و جریان‌های سطحی در شیب‌ها می‌شود)، مساحت این ناپایداری‌ها با استفاده از نرم‌افزار Idrisi و ابزار Image Calculator محاسبه شد. نتایج نشان داد که مساحت ناپایداری‌ها حدود ۴۲/۴ کیلومتر مربع است که معادل

^۱ Ayalew et al.

^۲ Menard.

^۳ Van Westen.

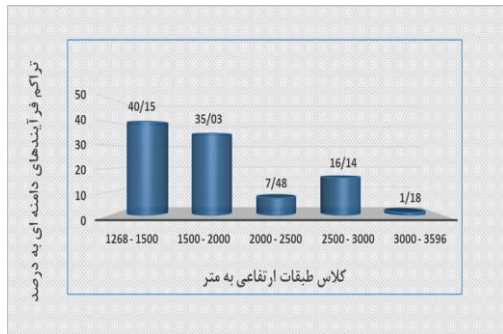
۰/۶۱ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه است. در ادامه، شکل ۲ توزیع این ناپایداری‌ها را در زیرحوضه‌های مختلف منطقه نمایش می‌دهد. این نقشه به عنوان مبنای تحلیل‌های بعدی برای شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع ناپایداری‌ها و ارزیابی خطر در این ناحیه به کار گرفته شد.



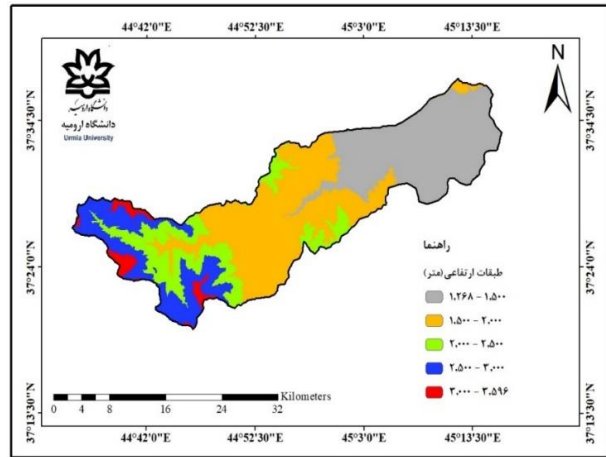
شکل ۲: نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای در منطقه مورد مطالعه

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 پراکنندگی 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 دامنه‌ای در کلاس‌های طبقات ارتفاعی

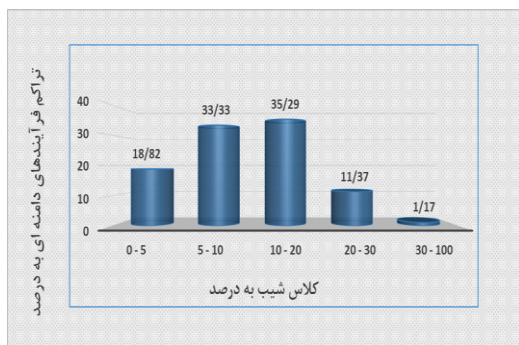


شکل ۳: نقشه طبقات ارتفاعی در حوضه مورد مطالعه

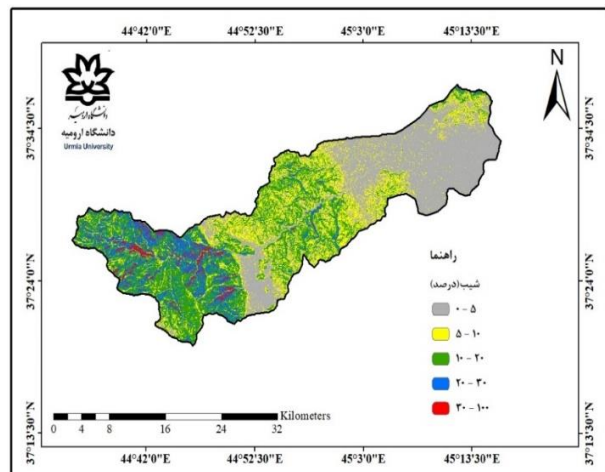
شیب

شیب دامنه، همراه با عواملی مانند سنگ شناسی، بارندگی و زمین لرزه، از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به‌شمار می‌رود. با افزایش شیب، نیروی وزن مؤثر در راستای دامنه افزایش می‌یابد و در شرایطی که پارامترهای مقاومتی ثابت باشند، احتمال وقوع ناپایداری به‌طور غیرخطی افزایش می‌کند. از این رو، شیب به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در افزایش پتانسیل ناپایداری دامنه‌ها در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، شیب اغلب به‌عنوان یک عامل اصلی استفاده می‌شود. 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 می‌شود (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 طبقه‌بندی انجام شد (شکل ۵). نتایج تحلیل‌ها نشان داد که بیشترین ناپایداری‌ها در شیب‌های ۵ تا ۲۰ درصد رخ داده‌اند (شکل ۶). این محدوده به دلیل ترکیب عوامل مانند فرسایش پذیری بالا و تأثیرگذاری فعالیت‌های انسانی، به‌طور قابل توجهی در معرض ناپایداری‌های دامنه‌ای قرار دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تحلیل دقیق‌تر شیب در ارتباط با سایر عوامل محیطی و انسانی، می‌تواند به بهبود پیش‌بینی و مدیریت خطر زمین لغزش کمک کند.



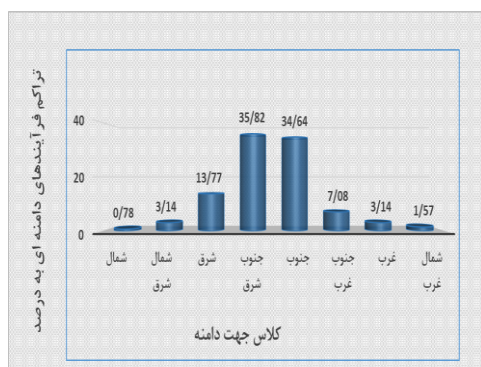
شکل ۶: نمودار درصد تراکم ناپایداری دامنه‌ای در کلاس‌های شیب



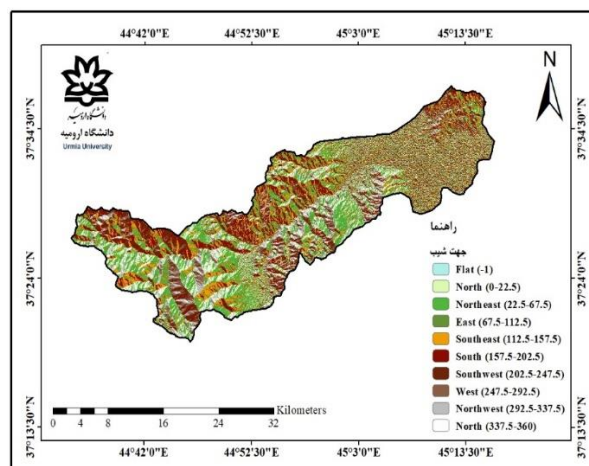
شکل ۵: نقشه شیب در حوضه مورد مطالعه

جهت‌شیب

نقشه جهت‌شیب منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) در هشت طبقه مختلف تهیه شد (شکل ۷). جهت‌شیب 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 خورشیدی، 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 خورشیدی، 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 جهت‌شیب، 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 جهت‌شیب



شکل ۷: نقشه جهت‌شیب در حوضه مورد مطالعه

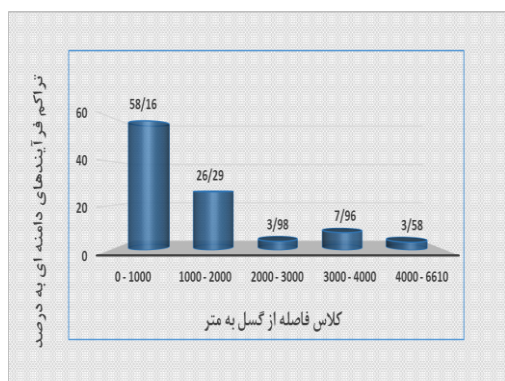
فاصله از گسل

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.

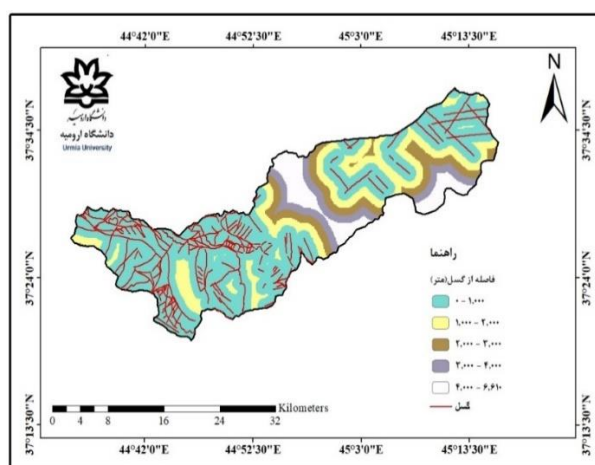
برای تهیه نقشه گسل‌های منطقه، از فایل‌های رقومی گسل‌های موجود در نقشه زمین‌شناسی استفاده شد. سپس با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل فضایی (Distance analysis)، نقشه فاصله از گسل‌ها در پنج کلاس مختلف طبقه‌بندی

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

نتایج نشان داد که بیشترین ناپایداری‌ها در فاصله ۰ تا ۱۰۰۰ متری از گسل‌ها رخ داده‌اند. این الگو به طور مستقیم با تأثیرات زمین‌شناسی ناشی از فعالیت‌های گسل‌ها مرتبط است. گسل‌ها با ایجاد شکستگی و خردشدگی در سنگ‌ها، افزایش نفوذپذیری و تغییر در شیب و جهت‌گیری لایه‌های سنگی، شرایطی فراهم می‌کنند که مقاومت مکانیکی سنگ‌ها کاهش یافته و احتمال نفوذ آب به درون دامنه‌ها افزایش یابد. همچنین، تغییرات در تعادل نیروی برشی و نیروی مقاوم در دامنه‌ها ناشی از جابه‌جایی گسل‌ها، می‌تواند خطر ناپایداری را تشدید کند (صبوری، ۱۴۰۲). این یافته‌ها نشان می‌دهند که مناطق نزدیک به گسل‌ها به دلیل این ویژگی‌ها مستعد ناپایداری‌های دامنه‌ای هستند.



شکل ۱۰: نمودار درصد تراکم ناپایداری‌های دامنه‌ای در کلاس‌های فاصله از گسل



شکل ۹: نقشه فاصل از گسل در حوضه مورد مطالعه

فاصله از رودخانه

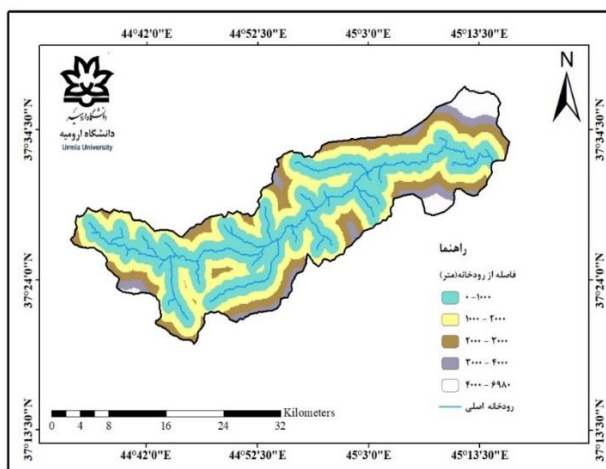
نقشه فاصله از رودخانه‌ها در پنج طبقه فاصله‌ای تهیه شد (شکل ۱۱). این طبقه‌بندی با استفاده از ابزارهای تحلیل فضایی بر اساس فواصل مشخص از شبکه رودخانه‌ای منطقه انجام گرفت.

تحلیل نتایج نشان داد که ۸۷/۲۵ درصد از ناپایداری‌های دامنه‌ای در فاصله ۰ تا ۳۰۰۰ متری از رودخانه‌ها رخ داده‌اند. این ناپایداری‌ها عمدتاً در دامنه‌های 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 کناره رودخانه‌ای است که با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی زمین، از جمله کاهش استحکام خاک و تغییر در تعادل شیب دامنه، منجر به افزایش ناپایداری می‌شود. جریان آب رودخانه با کنده‌شدن لایه‌های سطحی خاک، پیوستگی آن‌ها را کاهش داده و شرایط مساعدی برای وقوع لغزش و سایر ناپایداری‌های دامنه‌ای ایجاد می‌کند. علاوه بر این، فرسایش می‌تواند باعث تضعیف پایه دامنه‌ها و افزایش تنش‌های برشی شود (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶).



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

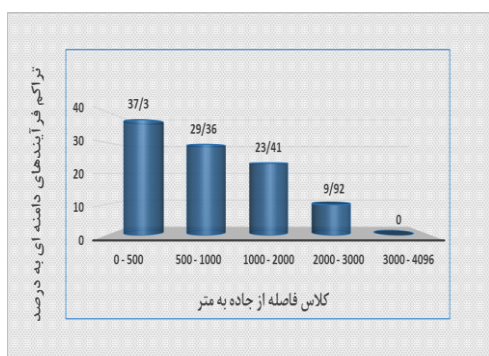


شکل ۱۱: نقشه فاصل از رودخانه در حوضه مورد مطالعه

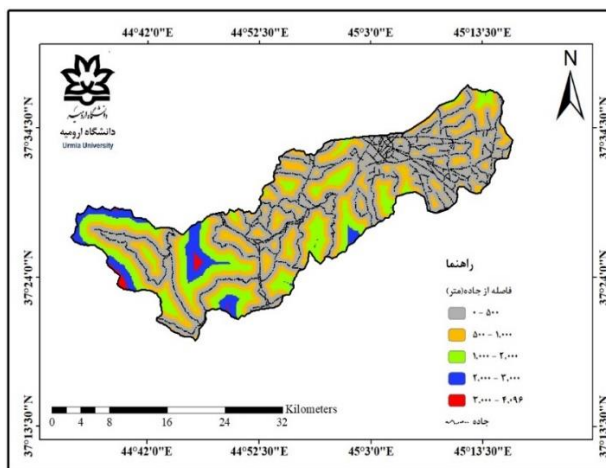
فاصله از جاده

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

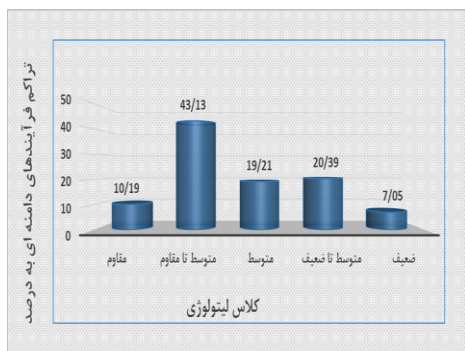
لیتولوژی

نوع مصالح سنگی یکی از عوامل اصلی وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای است و تقریباً تمامی روش‌های پهنه‌بندی ناپایداری این عامل را مدنظر قرار داده‌اند. بررسی نتایج تلفیق نقشه لیتولوژی با نقشه ناپایداری‌های منطقه نشان می‌دهد که بیشترین ناپایداری‌ها در سنگ‌های با مقاومت متوسط تا بالا (۴۳/۱۳ درصد) رخ داده است (شکل ۱۶). برای تهیه نقشه لیتولوژی، از نقشه زمین‌شناسی 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، سنگ‌ها از نظر فرسایش‌پذیری به رده‌های مختلف طبقه‌بندی شدند و در ناحیه مورد مطالعه، این سنگ‌ها در هشت گروه لیتولوژیکی قرار گرفتند (شکل ۱۵). نوع مصالح سنگی یکی از عوامل اصلی وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای است. نتایج تلفیق نقشه لیتولوژی با نقشه پراکندگی ناپایداری‌های دامنه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین ناپایداری‌ها در سنگ‌های با مقاومت متوسط تا بالا (۴۳/۱۳ درصد) مشاهده شده است (شکل ۱۶). این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نوع سنگ و ویژگی‌های فیزیکی آن بر وقوع ناپایداری‌ها است.

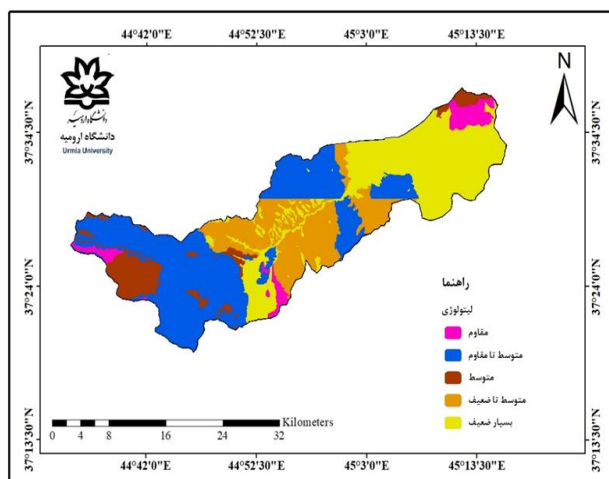
در این ناحیه، سازند قم که شامل منزودیوریت گرانودیوریت، تناوب کنگلومرا، توف و ماسه‌سنگ است، با مساحت ۳۱/۶۳ کیلومتر مربع (معادل ۴۱/۴۳ درصد از مساحت کل منطقه) دارای لیتولوژی مقاوم بوده و از این رو، ناپایداری‌های کمتری در آن مشاهده می‌شود.

سازند روته که شامل شیست، سنگ‌های آتشفشانی، همتافت سیلوانا و ماسه‌سنگ آهکی است، مساحتی معادل ۲۷۱/۸۰ کیلومتر مربع (معادل ۳۸/۰۶ درصد از مساحت کل منطقه) را در بر می‌گیرد 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، سنگ‌های آتشفشانی متوسط دگرگون‌شده و شیست است که این سازند نیز دارای لیتولوژی متوسط است. سازند ماسه‌سنگ 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، نهشته‌های مخروط افکنه‌ای جوان، نهشته‌های مخروط افکنه‌ای قدیمی، پادگانه‌های آبرفتی جوان، خاک‌های باقیمانده و خاک‌های 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 می‌تواند موجب ناپایداری‌های دامنه‌ای بیشتری گردد.



شکل ۱۶: نمودار درصد تراکم ناپایداری‌های دامنه‌ای در کلاس‌های لیتولوژی



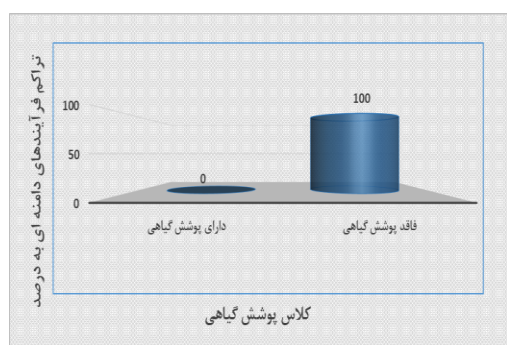
شکل ۱۵: نقشه لیتولوژی در حوضه مورد مطالعه

پوشش گیاهی

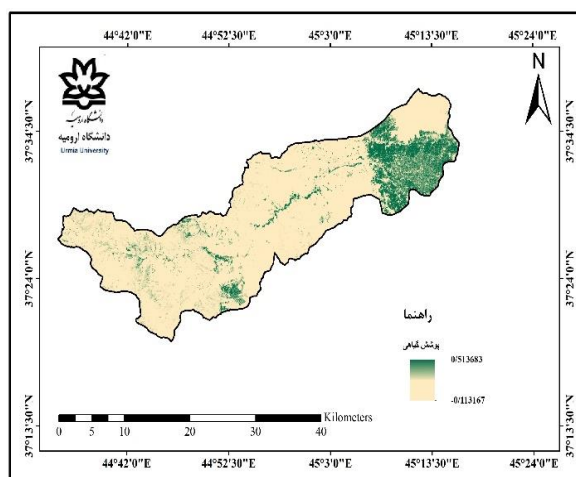
برای بررسی پوشش گیاهی، از تصاویر لندست ۸ (سنجنده OLI) و شاخص پوشش گیاهی NDVI استفاده شد. ابتدا مقادیر DN پیکسل‌های تصویر به رادیانس تبدیل شدند و سپس با استفاده از الگوریتم اتمسفری Flaash، تصحیحات اتمسفری انجام گرفت که نتیجه آن مقادیر بازتاب سطح زمین بود. از آنجا که مقادیر بازتاب سطح زمین بین صفر و یک (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



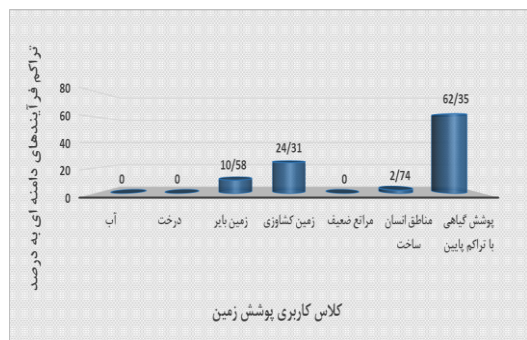
شکل ۱۷: نقشه پوشش گیاهی در حوضه مورد مطالعه

پوشش زمین

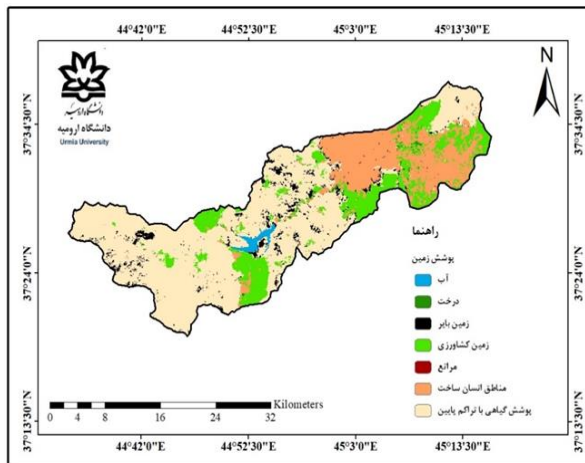
برای شناسایی پوشش زمین در حوضه مطالعه‌شده، از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با وضوح بالا استفاده شد که از پایگاه داده Esri Landcover استخراج گردید. این تصویر ماهواره‌ای با دقت بالا اطلاعات ارزشمندی از وضعیت پوشش زمین در سطح منطقه فراهم می‌آورد. پس از تجزیه و تحلیل تصویر، ۷ نوع کاربری اراضی مختلف شناسایی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

ناپایداری‌ها قرار دارند. کاهش پوشش گیاهی در این نواحی باعث تسهیل فرسایش سطحی و ناپایداری‌های دامنه‌ای می‌شود، که در نتیجه افزایش احتمال وقوع زمین‌لغزش‌ها و دیگر فرآیندهای ناپایدار را به دنبال دارد (شکل ۲۰).



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



شکل ۱۹: نقشه پوشش زمین در حوضه مورد مطالعه

نتایج مدل رگرسیون لجستیک

نقشه‌های عوامل مؤثر در ناپایداری‌های دامنه‌ای به‌عنوان متغیرهای مستقل وارد نرم‌افزار Idrisi شده و با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک پردازش گردیدند. در این مدل، از نه متغیر مستقل برای ارزیابی فرآیندهای دامنه‌ای در منطقه استفاده شد. ضرایب به‌دست‌آمده نشان داد که متغیرهای فاصله از جاده، جهت شیب، فاصله از گسل و پوشش گیاهی رابطه مثبت و مستقیم با ناپایداری‌ها دارند و به‌عنوان مؤثرترین عوامل در وقوع ناپایداری‌ها شناسایی شدند. برای ارزیابی صحت مدل رگرسیون لجستیک، از معیارهایی همچون آزمون ROC استفاده شد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی وقوع ناپایداری‌ها بود. مقایسه نتایج با مطالعات پیشین، از جمله تحقیق‌های کان و همکاران^۱ (۲۰۰۵)، گریکو و همکاران^۲ (۲۰۰۷)، نفسلی‌اوغلو و همکاران^۳ (۲۰۰۸)، نشان می‌دهد که روش رگرسیون لجستیک در تحلیل خطر ناپایداری دامنه‌ای دارای دقت و کارایی بالایی است. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که عواملی نظیر فاصله از جاده، جهت شیب، فاصله از گسل و نوع پوشش گیاهی به‌طور مداوم در مطالعات پیشین به‌عنوان متغیرهای کلیدی در تحلیل ناپایداری‌ها شناخته شده‌اند، که این امر اعتبار مدل و نتایج به‌دست‌آمده را تقویت می‌کند.

جدول ۲: ضرایب حاصل از مدل رگرسیون لجستیک

ضرایب	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	لینتولوژی	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

مقدار به دست آمده	مقدار استاندارد	شاخص
۱۰۹۳۰/۴۷۹۵	>۱۴/۱	Chi Square
۰/۳۱۳۳	>۰/۲	Pseudo R Square
۰/۹۲۲۳	۱>۰/۵	ROC

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.

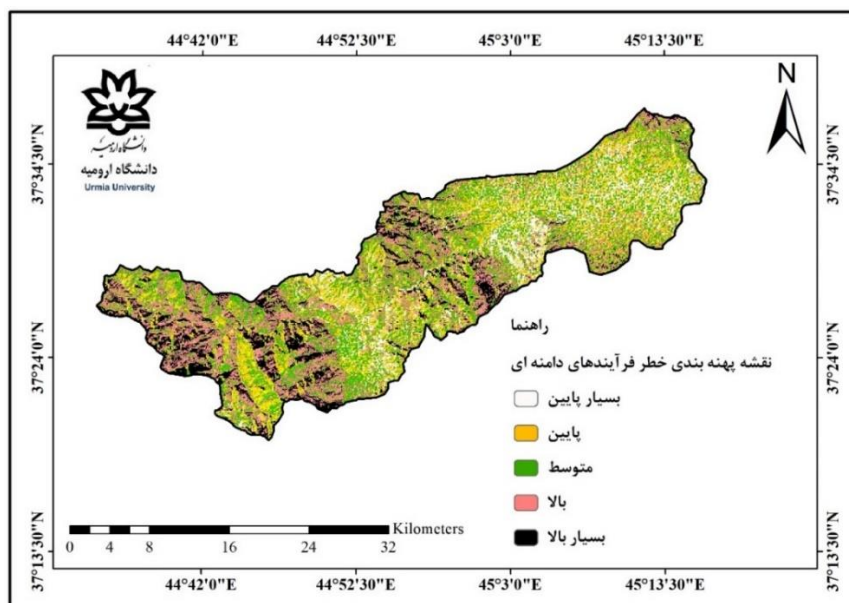
شاخص PR² به مقدار ۰,۳۱۳۳ محاسبه شده که از آستانه ۰,۲ بیشتر است. این نتیجه نشان‌دهنده برازش قابل قبول مدل ارائه‌شده در این تحقیق است. به عبارت دیگر، مدل با استفاده از شاخص PR² به خوبی به داده‌ها برازش یافته و پیش‌بینی‌های مدل قابل قبول است.

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 به‌عنوان نشانه‌ای از دقت بالا در پیش‌بینی مدل شناخته می‌شود، تأییدکننده عملکرد مؤثر مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای مورد مطالعه است.

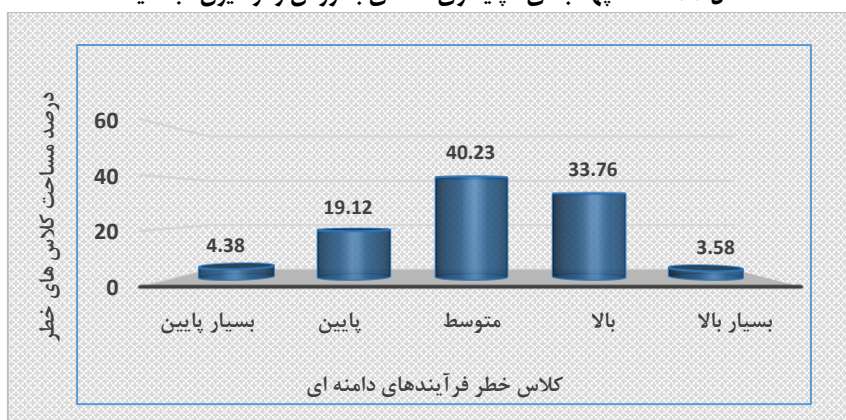
نقشه پهنه‌بندی

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 Chi-Square، PR² 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 پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ای به روش رگرسیون لجستیک



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

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی پتانسیل خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای 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 ناپایداری‌های دامنه‌ای را شناسایی و نقشه‌های حساسیت‌پذیری منطقه را تهیه کند.

تحلیل ارتباط میان عوامل مختلف و وقوع ناپایداری‌ها بیانگر اهمیت عواملی نظیر فاصله از جاده، جهت شیب، فاصله از گسل، و پوشش گیاهی است. این یافته‌ها 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 یعقوب‌نژاد 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 ناپایداری‌ها، با نتایج محمدی و همکاران (۲۰۱۰) و پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۲) تأیید می‌شود.

مطالعه حاضر نشان داد که نزدیکی به جاده‌ها به دلیل تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی و کاهش استحکام خاک، احتمال وقوع ناپایداری‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، جهت شیب از طریق تأثیر بر عواملی مانند میزان اشباع آب، فرسایش خاک، و تابش خورشید، نقش کلیدی در پایداری دامنه‌ها ایفا می‌کند. علاوه بر این، نزدیکی به گسل‌ها به دلیل فعالیت‌های

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.

پیشنهادات

- 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 صفاورد)، 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.
- پیروتی اول، دیمن. (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): ۴۴-۲۹.
- 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 ناپایداری‌های دامنه‌ای در دامنه‌های مشرف بر اتوبان در حال احداث تهران- شمال (تهران- سولقان) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک. جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۲۶(۸۰): ۱۵۷-۱۶۹.
- روستائی، شهرام؛ خدائی، لیلا. (۱۳۹۷۵). ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده محور و مخزن سد، مطالعه موردی: سد قلعه چای. پژوهش‌های 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 پهنه‌های 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). پژوهش‌های دانش زمین. ۱۴(۴): ۶۰-۴۲.
- عابدینی، موسی؛ یعقوب نژاد اصل، نازیلا. (۱۳۹۶)، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در استان تهران با استفاده از مدل فازی. دو فصلنامه علمی پژوهشی مدیریت بحران. ۶(۱): ۱۵۵-۱۴۵.
- گلی‌پور، شیوا؛ حسین‌زاده، سیدرضا، پورعلی، ملیحه. (۱۴۰۱). شناسایی دامنه‌های مستعد زمین لغزش و طبقه‌بندی انواع آن با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه قهرمانلو استان خراسان شمالی). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۱۱(۱): ۲۲۸-۲۰۹.
- متولی، صدرالدین؛ اسماعیلی، رضا. (۱۳۹۱)، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان). فصلنامه علمی- پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۲۰(۸): ۲۰-۱.
- متولی، صدرالدین؛ حسین‌زاده، محمد مهدی؛ اسماعیلی، رضا؛ درفشی، خه‌بات. (۱۳۹۷). ارزیابی دقت روش‌های رگرسیون چند متغیره (MR)، رگرسیون لجستیک (LR)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (FL) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه آبخیز طالقان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۴(۱): ۲۰-۱.
- معماریان، حسین؛ سیاریور، مرتضی. (۱۳۸۵). نقش پارامتر شیب دامنه در بروز خطا در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش. نشریه دانشکده فنی. ۴۰(۱): ۱۱۳-۱۰۵.
- همتی، فریبا؛ حجازی، سید اسداله. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی 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 قره‌چمنی، بهزاد. (۱۳۹۸). تعیین حساسیت وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای 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, runoff, 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.*