مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هفتم، شماره ۱۸، زمستان ۱۳۹۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۷

صفحات: ۱۳۰ - ۱۰۹

پهنه‌بندی‌خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل LNRF (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز قمرود– الیگودرز)

میر مهرداد میرسنجری[۱*]، علیرضا ایلدرمی[۲]، سحر عابدیان[۳]، عارفه علیمحمدی[۴]

چکیده

شناخت نواحی دارای پتانسیل لغزش و پهنه‌بندی آنها یکی از گام‌های اساسی در مدیریت مخاطرات محیطی و کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده محسوب می‌شود، چرا که این پدیده موجب هزینه‌های مالی و جانی، تخریب خاک و اراضی و افزایش تولید رسوب در خروجی حوضه می‌شود. در این پژوهش جهت نیل به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز قمرود- الیگودرز و تشخیص عوامل مؤثر در زمین‌لغزش از مدل LNRF و تکنیک GIS استفاده شده است. به این منظور لایه‌های مؤثر در زمین‌لغزش شامل: کاربری اراضی، لیتولوژی، بارندگی، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، شاخص حمل رسوب آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی تهیه و رقومی شدند. سپس از قطع دادن متغیرهای مستقل و وابسته، میزان زمین‌لغزش در هر طبقه از معیارها محاسبه گردید. سپس براساس روابط موجود در مدل LNRF وزن‌دهی هر یک از طبقات صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین سطح لغزش در سازندهای در بردارنده واحدهای مارن گچی و ماسه‌ای، شیل کربناته با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ، شیل توفی و توف سبز و در طبقات شیب ۲۰-۵ درصد و در جهت شمالی به وقوع پیوسته است. از طرف دیگر طبقات کاربری مرتع و کشاورزی، طبقات فاصله از آبراهۀ ۶۰۰-۰ متر و بارش ۳۰۰-۲۶۶ میلی‌متر بیشترین ناپایداری‌ها را به خود اختصاص داده است. همچنین طبقات ۱۰-۷/۵ شاخص رطوبت توپوگرافی و طبقات بیشتر از ۱۲ شاخص حمل رسوب آبراهه بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش را نشان داده‌اند. همچنین در این منطقه میزان وقوع لغزش با فاصله از گسل‌ها رابطه مستقیم داشته است و نشان‌دهنده عدم تأثیر این گسل‌ها در وقوع لغزش در منطقه بوده است. انتظار می‌رود که بر پایه این نتایج، بهترین برنامه‌ریزی برای حوضه آبریز قمرود- الیگودرز به ویژه در راستای احداث سازه‌هایی نظیر راه‌های ارتباطی، ساخت و سازهای مسکونی و تأسیسات به منظور کاهش هزینه‌های محیط‌زیستی و اقتصادی صورت پذیرد.

واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، شاخص حمل رسوب آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، گسل، LNRF.

[۱]- استادیار، گروه منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر(نویسنده مسئول) Mehrdadmirsanjari@yahoo.com

[۲]- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه ملایر ildromi@gmail.com

[۳]- مدرس دانشگاه پیام‌نور و دانشجو دکترا محیط‌زیست، گروه منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر Sahar.abedian1985@gmail.com

[۴]- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، گروه منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر Alimohammadiar890@gmail.com

مقدمه

سطح زمین موزائیک پیچیده‌ای از فرآیندها و خطرات طبیعی است که به طور انفرادی و یا در ترکیب با یکدیگر برنامه‌های مدیریتی، اقتصادی و اجتماعی کشورها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. زمین‌لغزش که شاخصی در پایداری سرزمین می‌باشد، یکی از این خطرات زمین‌شناختی محسوب می‌شود که تقریباً در تمام دامنه‌های با شیب تند اتفاق می‌افتد (Ownegh, 2004) و از جمله بلایای طبیعی است که همه ساله زیان‌های جانی و مالی بسیاری را در کشورهای مختلف در پی دارد. این پدیده طبیعی باعث تخریب و یا خسارت به انواع سازه‌های مهندسی و فعالیت‌های بشری از جمله مناطق مسکونی، شریان‌های حیاتی مانند راه‌ها، لوله‌های انتقال گاز، خطوط انتقال نیرو (سوری و همکاران، ۱۳۹۰) و همچنین تخریب پوشش گیاهی، فرسایش خاک، افزایش بار رسوبی، بستن مسیر رودخانه، تهدید جاذبه‌های اکوتوریستی مناطق پایین دست و از همه مهمتر تلفات جانی را به دنبال خواهد داشت (جوکار سرهنگی و همکاران، ۱۳۸۶).

احتراز و دوری جستن از این پدیده زمانی میسر می‌گردد که درک صحیحی از آن صورت گیرد که بررسی پدیده ناپایداری دامنه‌ها در چارچوب تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش[1] از یک سو به منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالای خطر در محدوده فعالیت‌های بشری و از سوی دیگر جهت شناسایی مکان‌های امن برای توسعه سکونتگاه‌ها و سایر کاربری‌های آتی امری ضروری در کاهش آسیب‌رسانی و نیل به اهداف توسعه پایدار به شمار می‌آید (سفیدگری و همکاران، ۱۳۸۴). زمین‌لغزش تحت تأثیر شرایط زمین ریخت‌شناسی، آب‌شناسی و زمین‌شناسی منطقه ایجاد می‌گردد که فرآیندهای زمین‌ساختی، پوشش‌گیاهی، فعالیت‌های انسانی و میزان بارندگی نقش‌مؤثری در شدت و توسعه این پدیده دارد (سفیدگری، ۱۳۸۱). شناخت نوع و فرآیند شکل‌گیری این عوامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش و تعیین میزان خطر آنها یکی از گام‌های اساسی در راستای کاهش اثرات این نوع مخاطره طبیعی است (عابدیان، ۱۳۸۸)، که در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه شیوه‌های تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش صورت گرفته است از جمله:

دیموند و همکاران (۲۰۰۶)، در پژوهشی بیان کرد که شیب از عوامل مهم در وقوع زمین‌لغزش است و بین افزایش شیب و میزان حرکات توده‌ای در بین شیب‌های ۵ تا ۳۰ درجه، ارتباط خطی وجود دارد؛ همچنین در اطراف خطوط زهکشی و نیز مناطقی که تخریب جنگل وجود داشته است، وقوع حرکات توده‌ای افزایش یافته است. آنها بیان کردند که با پیشرفت ناپایداری و وقوع گسیختگی، مقدار متوسط شیب دامنه کاهش می‌یابد و مصالح لغزیده در شیب کمتری نسبت به شیب اولیه قرار می‌گیرند. قهرمانی و همکاران (۱۳۹۱)، در تحقیقی به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز النگ‌دره با استفاده از روش‌های LNRF[2]، FAHP و AHP پرداختند. آنها در ابتدا تمام پارامترهای مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش همچون شیب، جهت شیب، باران، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه را از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های پایه استخراج نمودند و به شکل لایه‌های اطلاعاتی در محیط

1- Landslide hazard zonation
2- Landslide Nominal Risk Factor

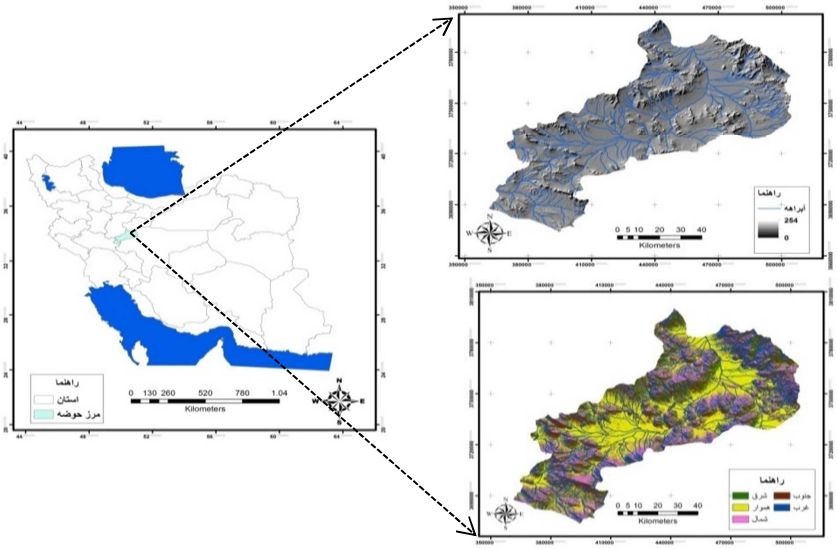
GIS برای تولید نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش براساس مدل‌های ذکر شده ارزش‌گذاری و ترکیب نمودند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روش LNRF در مقایسه با دو روش دیگر تطابق بیشتری با منطقه دارد. در این روش، اعمال نظر کارشناسی در حداقل قرار دارد و در نتیجه امکان بروز خطا در آن کمتر است. در روش سلسله مراتبی به علت وجود متغیرهای بیشتر و اعمال نظر مستقیم کارشناسان، امکان بروز خطا در امتیازدهی پارامترها وجود دارد. در روش FAHP نیز تعیین حدود حداقل و حداکثر مقادیر مؤثر در امتیازدهی پارامترها مستقیماً بستگی به نظر کارشناسی دارد و خطای بیشتری در آن بروز می‌یابد. بنابراین پس از مقایسه سه روش فوق، آنها به این نتیجه رسیدند که مدل بدست آمده از روش LNRF تطابق بیشتری با شرایط محیط مورد مطالعه دارد و این روش را به‌عنوان روش نهایی انتخاب کردند. روستایی و احمدزاده (۱۳۹۱)، ساختار خاص زمین‌شناختی، شرایط اقلیم محلّی در کنار عامل گرادیان شیب را از عوامل اصلی بروز زمین‌لغزش بیان کردند که ساخت‌وسازهای انسانی آن را تشدید می‌کند.

اوکاک اوغلو و همکاران (۲۰۰۲)، در ناحیه داگوی ترکیه، بـه مطالعـه دینامیـک حرکـات توده‌ای پیچیده ناشی از بارش‌های سنگین پرداختند. تحلیل داده‌های بارش برای دوره‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت روزانه و ساعتی این پژوهشگران، آشکارا نشان می‌دهد که بارش سنگین به عنوان عاملی محرّک در زمین‌لغزش نقش دارد و پس از آن توپوگرافی، شیب، لایه‌بندی مارن، تراکم پوشش گیاهی و افق خاک ضخیم روی زمین مارنی، نقـش مـؤثّری در وقـوع زمین‌لغزش دارند. ساها و همکاران (۲۰۰۲)، در مطالعه و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، شیب‌های بیش از ۴۵ درصد را عامل ناپایداری معرفی نموده است. همچنین وی، دامنه‌های شمالی را به دلیل برخورداری از انرژی تابشی کمتر، از دیگر عامل‌های مؤثر در وقوع زمین‌لغزش دانست. با توجه به مطالب فوق و اهمیت پدیده زمین‌لغزش به علت حجـم عظـیم خسـارات جـانی و مـالی، مطالعه و بررسی این پدیده ژئومورفولـوژی و آگـاهی از ضـریب پایـداری دامنـه‌ها بـرای جلـوگیری از کـاهش خطرات و خسارات ناشی از آن لازم و ضروری بـه نظـر می‌رسد. از آنجایی که حوضه آبریز قمرود- الیگودرز به دلیل واقع شدن در کمربند کوه‌زایی زاگرس و ویژگی‌های زمین‌شناختی از حساسیت بالایی برخوردار است، لذا این مطالعه با هدف شناخت عوامل زمین‌شناختی و زمین‌ساختی مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش و نقش آنها در ایجاد توده‌های لغزشی صورت پذیرفته است تا مناطق حساسی که بیشترین احتمال خطر وقوع زمین‌لغزش در آنها وجود دارد، تعیین شود.

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز قمرود- الیگودرز در محدوده جغرافیایی ۳۳ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است که از شمال به استان مرکزی، از غرب به استان لرستان، از شرق به استان قم و از جنوب به استان اصفهان محدود می‌شود (شکل ۱). بخش عمده حوضه مورد مطالعه کوهستانی است. پایین‌ترین نقطه ارتفاعی آن ۵۸۳ متر و بالاترین نقطه آن ۴۰۵۴ متر ارتفاع دارد. براساس آمار آب و هواشناسی متوسط درجه حرارت سالانه منطقه ۱۳/۹ درجه سانتی‌گراد است که در فصول زمستان و

تابستان از ۱۵- درجه‌سانتی‌گراد تا ۳۶+ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. میانگین بارش سالانه منطقه ۲۷۰ میلی‌متر است. آب و هوای منطقه براساس روش آمبرژه، خشک و سرد می‌باشد. سازندهای زمین‌شناسی منطقه شامل سازند شمشک، لار، قم و دورود است و کاربری‌های اراضی منطقه به ترتیبِ مساحت شامل مراتع، اراضی بایر، اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

داده‌ها و روش‌ها

الف- روش‌شناسی

در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سطح زمین به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و یا بالقوه خطر از خیلی کم تا بسیار زیاد تقسیم می‌گردد (Cornforth, 2005). این نوع مدل‌سازی کمی که برمبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی منطقه مورد مطالعه است، می‌تواند مبنایی برای اقدامات و برنامه‌ریزی‌های توسعه و عمران محسوب گردد (رامشت و شاه‌زیدی، ۱۳۷۵). در این تحقیق نه عامل مؤثر کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، بارندگی، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، شاخص حمل رسوب آبراهه[1] و شاخص رطوبت توپوگرافی[2] به عنوان عوامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گرفتند. با تعیین مجموعه‌ای از معیارها، نیاز است که هر معیار به صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شوند. لایه‌های شیب و جهت شیب از مدل رقومی ارتفاع[3] منطقه با اندازه سلول ۳۰ متری استخراج گردیدند. لایه‌های شاخص حمل رسوب آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی از نقشه DEM و نقشه شیب برحسب درجه استخراج گردیدند. برای تهیه لایه‌های فاصله از رودخانه و گسل از تابع Distance

1- Stream Transport Index (STI)
2- Topographic Wetness Index (TWI)
3- Digital Elevation Model (DEM)

برمبنای حداکثر فاصله استفاده شد. لایه‌های کاربری اراضی و سنگ‌شناسی نیز براساس میزان تأثیر واحدها بر میزان لغزش با استفاده از تابع Reclassify طبقه‌بندی گردیدند و همچنین داده‌های جدولی همانند داده‌های هواشناسی به صورت نقطه به محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد گردیده و سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی به نقشه همباران تبدیل گردید که در جدول ۱ نقشه‌های مورد استفاده ارائه گردیده است.

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

لایه داده	تشریح	منبع
نقشه رقومی ارتفاع	شامل داده‌های ارتفاعی به صورت متوسط در هر پیکسل	از نقشه توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری
نقشه شیب	شامل میزان شیب به صورت متوسط در هر پیکسل	برگرفته از نقشه مدل رقومی ارتفاع
نقشه جهت شیب	شامل جهت دامنه‌ها به صورت متوسط در هر پیکسل	برگرفته از نقشه مدل رقومی ارتفاع
نقشه کاربری اراضی	شامل زمین کشاورزی، مناطق شهری، جنگلی و غیره	سازمان نقشه‌برداری ایران
نقشه خطوط گسل	شامل خطوط گسل اصلی و فرعی	سازمان زمین‌شناسی ایران
نقشه بارندگی	شامل داده‌های آماری ایستگاه‌های هواشناسی	سازمان هواشناسی استان مرکزی
نقشه سنگ‌شناسی	شامل انواع واحدهای سنگی در منطقه مورد مطالعه	سازمان زمین‌شناسی ایران
نقشه حمل رسوب آبراهه	شامل داده‌های طول و تندی شیب به صورت متوسط در هر پیکسل	نگارندگان
نقشه رطوبت توپوگرافی	شامل میزان رواناب حاصل از اشباع خاک به صورت متوسط در هر پیکسل	نگارندگان
نقشه پراکنش زمین‌لغزش	شامل زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده	سازمان منابع طبیعی استان مرکزی

مدل‌های آماری دومتغیره مبتنی بر هم‌پوشانی پارامترها و تراکم زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده هستند. در این مدل‌ها اهمیت کلاس‌های هر پارامتر با استفاده از محاسبه تراکم زمین‌لغزش در آن با استفاده از فرمول‌های مربوطه صورت می‌گیرد. با به دست آوردن وزن کلاس‌های هر پارامتر و اعمال آن بر روی لایه مربوط و رویهم‌گذاری لایه، نقشه پهنه‌بندی حساسیت لغزش بدست خواهد آمد. در این روش زمین‌لغزش به عنوان متغیر وابسته و پارامترها به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته می‌شوند (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۴). روش‌های آماری متعددی برای محاسبه ارزش‌های وزنی وجود دارد که در اینجا از روش آماری LNRF استفاده شده است. به همین منظور پس از تشکیل پایگاه داده‌ها، بایستی لایه‌ها با توجه به از سطح لغزش‌های رخداده در هر یک از واحدهای همگن از نظر مقادیر مؤثر در زمین‌لغزش و تقسیم آن بر سطح میانگین وقوع زمین‌لغزش در کل واحدها طبقه‌بندی گردد (رابطه ۱).

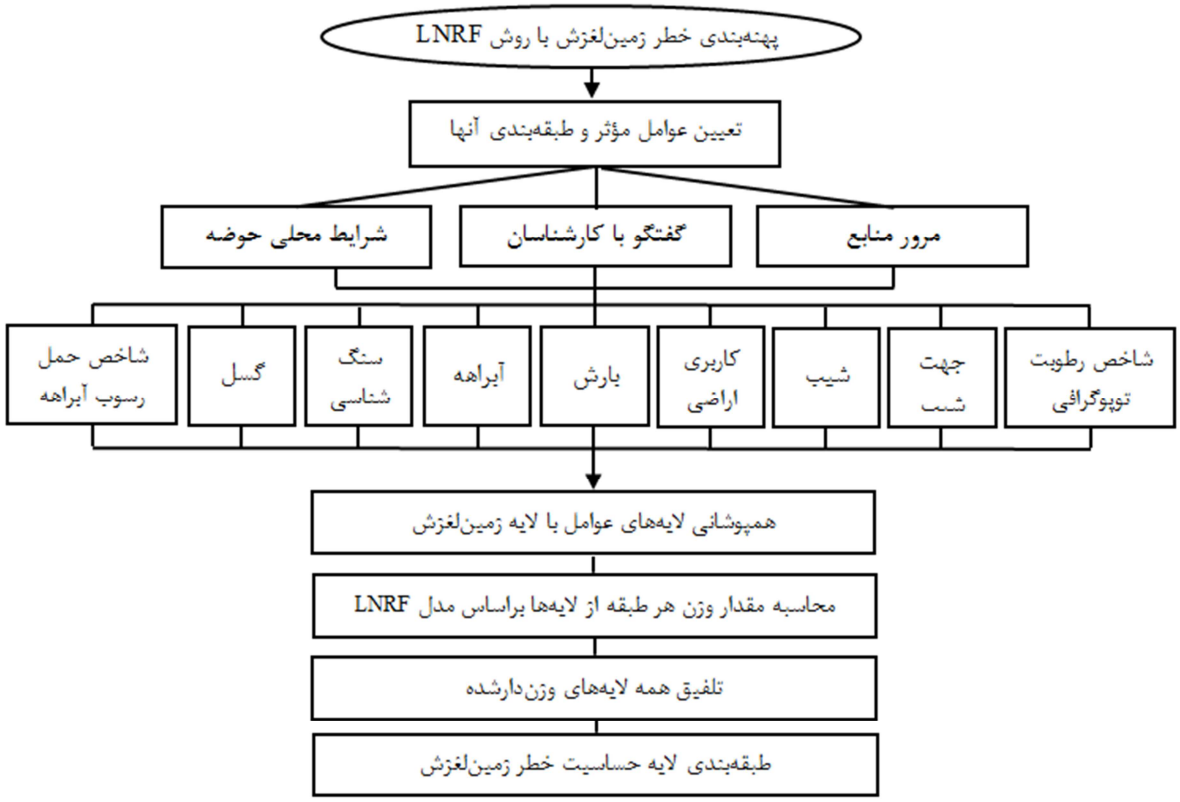
$$LNRF=\frac{A}{E} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، A: سطح حرکات توده‌ای رخداده در یک واحد و E: میانگین حرکات توده‌ای رخداده در کل واحدها می‌باشد. پس از آن باید طبقات براساس دامنه تغییرات LNRF به سه طبقه (کم= صفر، متوسط= یک و زیاد= دو) وزن‌دهی شود (جدول ۲). در نهایت با جمع جبری نقشه‌های وزنی، نقشه ناپایداری دامنه‌ها، براساس میزان

خطرپذیری حوضه با درجه ناپایداری زیاد، ناپایداری متوسط و ناپایداری کم تهیه و پهنه‌بندی گردید. شکل ۲، مراحل انجام کار را نشان می‌دهد (ایلدرمی و روزبهانی، ۱۳۹۳).

جدول ۲: تعیین مقادیر وزنی براساس وسعت زمین‌لغزش‌ها براساس مدل LNRF

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



شکل ۲: مراحل اجرای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش براساس مدل LNRF

یافته‌های تحقیق

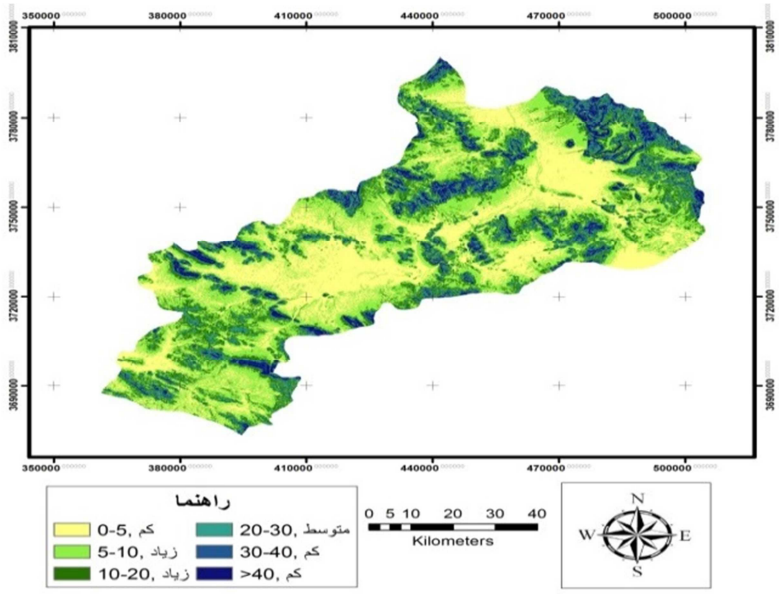
در این پژوهش به بررسی عوامل مؤثر در زمین‌لغزش در منطقه پرداخته شده است. این عوامل مؤثر عبارتند از: کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، بارندگی، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، شاخص حمل رسوب آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی. در زیر به بررسی هر یک از این عوامل در منطقه و نقش آن در زمین‌لغزش پرداخته شده است.

شیب

شیب از عوامل اصلی افزایش استعداد گسیختگی دامنه‌ها و همچنین به‌عنوان فاکتور تحریک‌کننده در نظر گرفته می‌شود. افزایش مقدار شیب دامنه باعث افزایش میزان مؤلفه نیروی وزن در راستای شیب دامنه می‌شود. هرگاه این افزایش از مؤلفه عمودی نیروی وزن بیشتر شود، لغزش رخ می‌دهد (Price, 2009). به همین منظور با استفاده از ابزار Raster Surface در محیط نرم‌افزار ArcGIS نقشه Slope برحسب درصد از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج و در قالب شش کلاس طبقه‌بندی گردید. همان‌گونه که در جدول ۳ و شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، ۷۰ درصد از حرکات زمین‌لغزش در طبقات شیب ۵ تا ۲۰ درصد اتفاق افتاده است. این مسئله شاید به دلیل آن باشد که در این طبقات شیب، به دلیل وجود خاک و پوشش سطحی سست و همچنین جذب آب‌های سطحی، ناپایداری وزن تودهٔ خاک بیشتر می‌شود. همچنین کمترین میزان لغزش در شیب‌های بالای ۳۰ درصد رخ داده است. در شیب‌های بالاتر از ۳۰ درصد به دلیل تضعیف فرآیند خاکزایی معمولاً سطح رخنمون سنگی و بدون خاک است که موجب می‌شود تا در این رده، درصد زمین‌لغزش‌های رخداده به دلیل پیوستگی توده سنگی و عدم وجود مواد مستعد برای وقوع زمین‌لغزش، کمتر باشد.

جدول ۳: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای طبقات شیب و محاسبه وزن هر واحد

طبقات شیب (درصد)	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
۰-۵	۲۲۷۰/۶	۳۰/۱	۸۰/۳	۸/۶	۰/۵۱	۰	کم
۵-۱۰	۲۵۰۰/۴	۳۳/۲	۴۰۲/۷	۴۳/۳	۲/۶	۲	زیاد
۱۰-۲۰	۱۳۶۰/۵	۱۸/۱	۲۵۴/۵	۲۷/۳	۱/۶۴	۲	زیاد
۲۰-۳۰	۶۲۰/۵	۸/۲	۱۰۲/۵	۱۱/۱	۰/۶۷	۱	متوسط
۳۰-۴۰	۳۶۱/۱	۴/۸	۴۵/۶	۴/۹	۰/۲۹	۰	کم
بیش از ۴۰	۴۲۰/۹	۵/۶	۴۴/۷	۴/۸	۰/۲۸	۰	کم
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳	۱۰۰	-	-	-



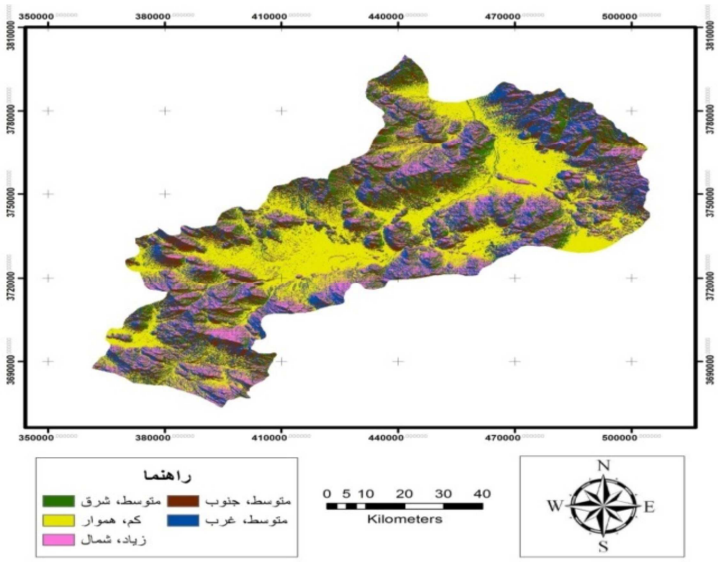
شکل ۳: نقشه وزنی شیب حوضه قمرود- الیگودرز

جهت شیب

جهت دامنه یکی از عوامل تعیین کننده در حرکت‌های توده‌ای به شمار می‌رود. در دامنه‌های شمالی و غربی به دلیل برخوداری از رطوبت بیشتر، مقدار زمین‌لغزش بیشتر بوده و در دامنه‌های شرقی و جنوبی به دلیل حداکثر جذب انرژی و حداقل آب باقیمانده در خاک، کمترین حرکت توده‌ای مشاهده می‌شود (احمدی و فیض‌نیا، ۱۳۸۵). در این پژوهش نقشه جهت شیب از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج و برمبنای ۵ سطح هموار، شمال، شرق، جنوب و غرب طبقه‌بندی گردید. همان‌گونه که در جدول ۴ و شکل ۴ ملاحظه می‌گردد، دامنه‌های شمالی با حدود ۳۰ درصد از حرکات توده‌ای در ۱۷ درصد از مساحت منطقه، بیشترین تأثیر در حرکات لغزشی داشته است و دامنه‌های جنوبی و غربی با حدود ۲۴ و ۱۹ درصد از حرکات توده‌ای در حدود ۱۷ و ۱۹ درصد از مساحت منطقه، تأثیر متوسطی در رخداد لغزش داشته‌اند. البته برخلاف انتظار، دامنه‌های جنوبی منطقه تأثیر متوسطی در وقوع حرکات لغزشی دارند که این مسأله را می‌توان مرتبط به نوع سازندهای منطقه، شیب توپوگرافی و توزیع آبراهه‌ها دانست.

جدول ۴: مساحت حرکت‌های لغزشی در واحدهای جهت شیب و محاسبه وزن هر واحد

طبقات جهت شیب	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
دشت	۲۲۶۹/۱	۳۰/۱	۸۰/۳	۸/۶	۰/۴۳	۰	کم
شمال	۱۲۶۲/۲	۱۶/۸	۲۸۱/۶	۳۰/۳	۱/۵۱	۲	زیاد
شرق	۱۲۸۹/۹	۱۷/۱	۱۶۲/۴	۱۷/۵	۰/۸۷	۱	متوسط
جنوب	۱۳۰۳/۳	۱۷/۳	۲۲۴/۲	۲۴/۱	۱/۲	۱	متوسط
غرب	۱۴۱۵/۵	۱۸/۷	۱۸۱/۸	۱۹/۵	۰/۹۷	۱	متوسط
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳۵	۱۰۰	-	-	-



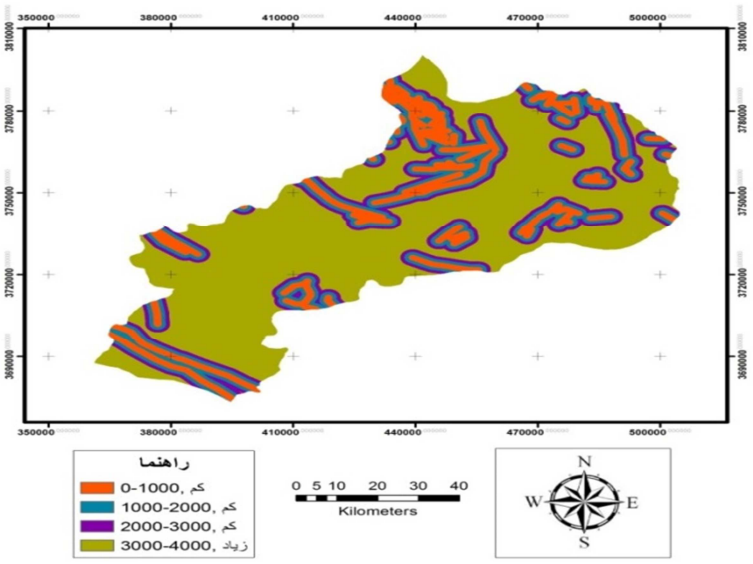
شکل ۴: نقشه وزنی جهت شیب حوضه قمرود- الیگودرز

فاصله از گسل

حرکت‌های زمین‌ساختی و تکتونیکی نقش تشدید کننده در وقوع زمین‌لغزش دارند که آثار مختلفی را در بروز لغزش‌ها در دامنه‌ها می‌توان برای آن متصور شد. خردشدگی و برشی شدن در منطقه گسلی، نفوذ آب از این مناطق به داخل دامنه‌ها، بروز ناپیوستگی در اطراف گسل‌ها و اختلاف فرسایش در دامنه‌ها از جمله آثاری است که می‌توان به آن اشاره کرد (عرب عامری و حلبیان، ۱۳۹۴). در این پژوهش، ابتدا نقشه خطی گسل‌ها از نقشه زمین‌شناسی استخراج و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از گسل تهیه و در نهایت طبقه‌بندی گردید. گسل‌های موجود در منطقه از نوع گسل‌های کواترنری و غیرفعال می‌باشند که بیشتر در بخش شمال و شمال شرقی منطقه قابل مشاهده است (شکل ۵). براساس نتایج جدول ۵، ۵۹ درصد از لغزش‌ها در فاصله بیش از ۳۰۰۰ متری از گسل رخ داده است. به‌طور کلی گسل‌ها و شدت لرزش‌های آنها در افزایش استعداد ناپایداری دامنه‌ها مؤثر می‌باشند؛ اما نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر آن است که گسل‌ها در رخداد لغزش‌های این منطقه مؤثر نیست.

جدول ۵: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای طبقات گسل و محاسبه وزن هر واحد

طبقات گسل (متر)	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
۰-۱۰۰۰	۱۱۳۷/۲	۱۵/۱	۱۳۱/۱۳	۱۴/۱	۰/۵۶	۰	کم
۱۰۰۰-۲۰۰۰	۹۱۹/۵	۱۲/۲	۱۱۵/۹۱	۱۲/۴	۰/۴۹	۰	کم
۲۰۰۰-۳۰۰۰	۷۸۶/۱	۱۰/۴	۱۳۳/۳۲	۱۴/۴	۰/۵۷	۰	کم
بیش از ۳۰۰۰	۴۶۹۷/۲	۶۲/۳	۵۴۹/۹۹	۵۹/۱	۲/۳۶	۲	زیاد
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳۵	۱۰۰	-	-	-



شکل ۵: نقشه وزنی گسل حوضه قمرود- الیگودرز

شاخص رطوبت‌پذیری توپوگرافی

شاخص ترکیب پستی و بلندی بوده که نسبت بین شیب‌ها را در منطقه نمایش می‌گذارد که به شاخص خیسی نیز معروف است. شاخص رطوبت‌پذیری توپوگرافی، شاخصی از توزیع مکانی رطوبت خاک در طول چشم‌انداز زمین است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۴). این مدل، رواناب تولیدی حاصل از اشباع خاک را محاسبه می‌نماید و مشاهدات صحرایی نیز ثابت کرده است که محدوده‌هایی با رطوبت زیاد در خاک و یا اشباع سطحی از آب متمایل به حرکت به سمت ناحیه همگرایی مقعر پایین دامنه هستند. در واقع گزارش‌های علمی بر این نکته تأکید دارند که منشأ زمین‌لغزش‌ها اکثراً در محدوده همگرای دامنه‌ها (به لحاظ توپوگرافی) (Dietrich et al., 1992) واقع شده است. این شاخص به وسیله رابطه ۲ قابل محاسبه است (Moore and Grayson, 1991):

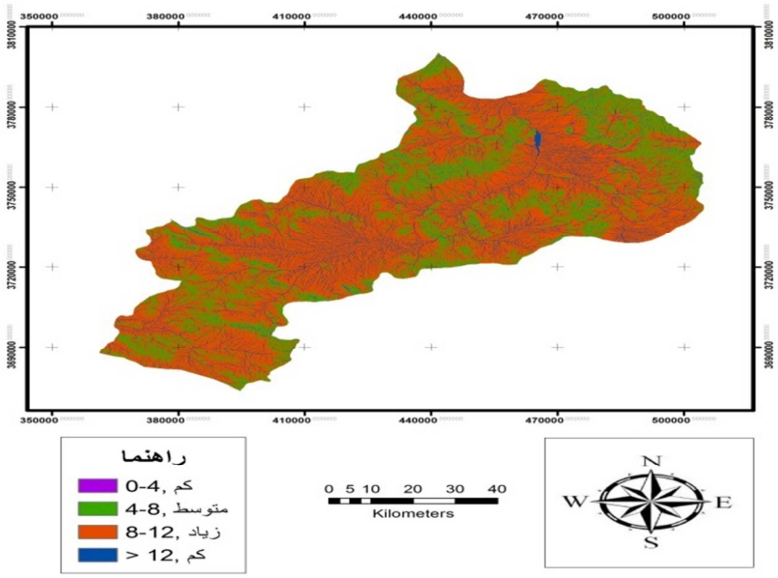
$$TWI = \ln\left(\frac{As}{\mathrm{Tan}\sigma}\right) \qquad (۲)$$

که در این رابطه، As: مساحت ویژه هر سلول و σ: گردایان شیب برحسب درجه است. برای تهیه نقشه مساحت ویژه از دستور Flow Direction و Flow Accumulation در قسمت Spatial Analysis و برای تهیه نقشه شیب بر حسب درجه از دستور Slope در نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. همان‌طور که در جدول ۶ و شکل ۶ آمده است، ۶۳ درصد از لغزش‌ها در طبقه ۷/۵ تا ۱۰/۵ رخ داده است که با قطع دادن این نقشه با نقشه سایه روشن[1] و تراکم لغزش و طول شیب مشخص گردید بیشترین میزان توزیع مکانی منطقه اشباع و مقدار آب خاک در شیب‌های بین ۵ تا ۱۰ درصد و در انتهای دامنه کوه‌ها اتفاق افتاده است.

1- Hillshade

جدول ۶: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای طبقات شاخص رطوبت توپوگرافی و محاسبه وزن هر واحد

طبقات شاخص رطوبت‌پذیری توپوگرافی	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
۱-۴/۵	۵۳۷/۵	۷/۱	۶۴/۸	۶/۷	۰/۲۸	۰	کم
۴/۵-۷/۵	۱۸۲۶/۲	۲۴/۲	۲۷۶/۱	۲۹/۷	۱/۱۸	۱	متوسط
۷/۵-۱۰/۵	۴۵۱۲/۱	۵۹/۸	۵۸۶/۲	۶۳/۱	۲/۵۲	۲	زیاد
بیش از۱۰/۵	۶۷۱/۲	۸/۹	۶۱/۳	۶/۵	۰/۲۷	۰	کم
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳۵	۱۰۰	-	-	-



شکل ۶: نقشه وزنی رطوبت‌پذیری توپوگرافی حوضه قمرود- الیگودرز

شاخص حمل رسوب آبراهه

این شاخص بیانگر توان حمل آبراهه است که با دو پارامتر طول و تندی شیب[1] و یا همان فاکتور LS در معادلـه جهـانی تلفـات خـاک[2] سنجیده می‌شود. طول شیب عبارت است از فاصله افقی از مبدأ جریان بالادست دامنه تا جایی که تندی شیب به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر یافته است (USDA, 1972). همچنین عامل تندی شیب که تابعی از درجه شیب است و منعکس کننده اثر درجه شیب بر میزان فرسایش و لغزش است. حاصل‌ضرب دو عامل یاد شده، به عنوان عامل توپوگرافی شناخته می‌شود که با افزایش میزان آنها فرسایش و لغزش نیز افزایش می‌یابد. برای تهیه نقشه

1- Slope Length and Steepness factor (LS)
2- Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

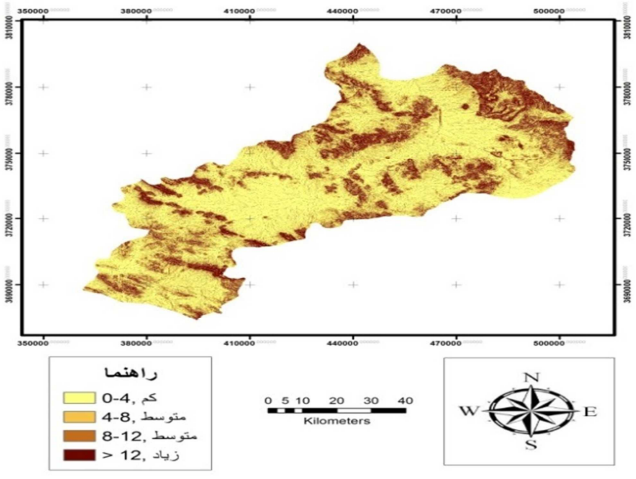
درصد و طول شیب از نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه با اندازه پیکسل ۳۰ متر استفاده شد و جهت حذف چاله‌های هیدرولوژیک نقشه Dem از دستور Fill استفاده گردید که در این دستور ارتفاع پیکسل چاله هیدرولوژیک به ارتفاع پایین‌ترین پیکسل مجاور آن ارتقا می‌یابد (Jenson & Domingue, 1988). سپس برای تهیه طول شیب از دستور Flow Direction و Flow Accumulation در قسمت Spatial Analysis نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. در Flow Direction مسیر جریان آب از ۸ سلول همسایه به سلول مرکزی به صورت سلول به سلول براساس اختلاف ارتفاع تعیین می‌شود. سپس نقشه تجمعی جریان آب (Flow Accumulation) از اتصال مسیر هر سلول به سلول دیگر، از روی نقشه Flow Direction حاصل می‌گردد (پژوهش و همکاران، ۱۳۹۰). در نهایت نقشه فاکتور STI با استفاده از رابطه ۳ ارائه شده توسط Moore و Burch در سال ۱۹۹۶ محاسبه و استخراج گردید.

$$STI = (\text{Flow Accumulation grid} \times \frac{\text{Cell size}}{22.13})^{0.4} (\frac{\text{Sin(Slope grid)} \times 0.01745}{0.0896})^{1.3} \quad (۳)$$

که در آن Flow Accumulation، تجمع جریان به سمت بالای شیب برای هر سلول، Cell size اندازه سلول‌های شبکه (در این مطالعه ۳۰ متر) و Slope نقشه شیب به درجه است. همچنین از عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به رادیان در سیستم GIS استفاده می‌گردد (پژوهش و همکاران، ۱۳۹۰). همانطور که در جدول ۷ و شکل ۷ آمده است، ۵۰ درصد از لغزش‌ها در طبقه بیش از ۱۲ رخ داده است.

جدول ۷: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای طبقات شاخص (STI) و محاسبه وزن هر واحد

طبقات شاخص حمل رسوب آبراهه	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
۰-۴	۴۰۸۷/۷	۵۴/۲	۹۸/۶	۱۰/۶	۰/۴۲	۰	کم
۴-۸	۱۳۵۷/۱	۱۸	۱۹۴/۹	۲۰/۹	۰/۸۳	۱	متوسط
۸-۱۲	۶۵۸/۳	۸/۷	۱۶۷/۹	۱۸/۱	۰/۷۲	۱	متوسط
بیش از ۱۲	۱۴۳۶/۹	۱۹/۱	۴۶۸/۹	۵۰/۴	۲/۱	۲	زیاد
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳۵	۱۰۰	-	-	-



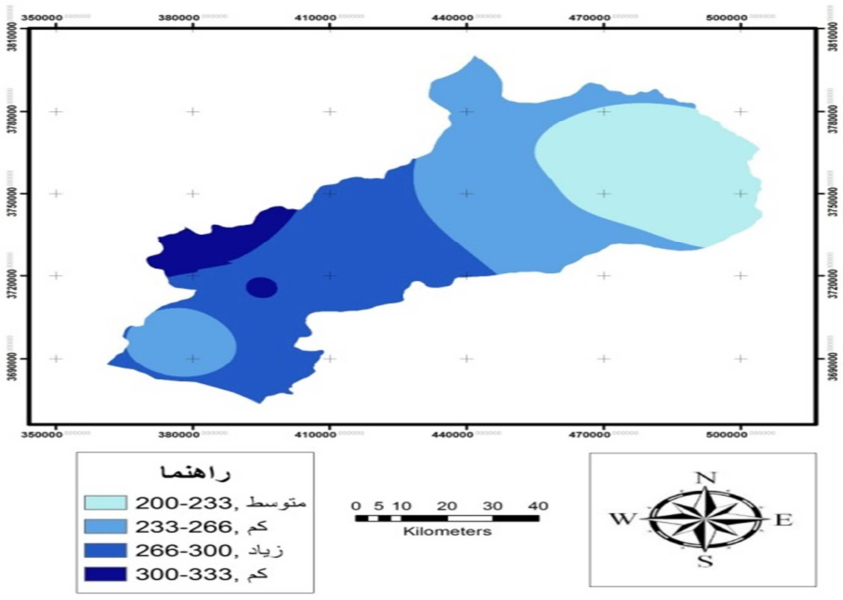
شکل ۷: نقشه وزنی شاخص حمل رسوب آبراهه حوضه قمرود- الیگودرز

بارش

به طور کلی، نفوذ آبِ حاصل از بارندگی در دامنه، سبب بالا رفتن مقدار فشار منفذی، کاهش مکش خاک و افزایش وزن واحد خاک می‌شود و در نهایت از مقاومت برشی خاک کاسته و دامنه را مستعد لغزش می‌کند (Giannecchini, 2006). آستانه تأثیر عامل مذبور بسته به ویژگی‌های مناطق متنوع می‌باشد. در این پژوهش ابتدا براساس آمارهای سازمان هواشناسی استان مرکزی لایه رستری بارندگی با استفاده از روش آماری Kriging به صورت منحنی‌های هم‌بارش درون‌یابی و نقشه هم‌باران سالانه تهیه گردید و در نهایت با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها قطع داده شد. همانطور که در جدول ۸ و شکل ۸ آمده است، ۵۵ درصد از حرکات لغزشی در سطح بارشی ۲۶۶ تا ۳۰۰ میلی‌متر رخ داده است.

جدول ۸: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای طبقات بارش و محاسبه وزن هر واحد

طبقات بارش (میلی‌متر)	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
۲۰۰-۲۳۳	۱۸۸۶/۱	۲۵/۱	۲۹۱/۱۱	۳۱/۳	۱/۲۵	۱	متوسط
۲۳۳-۲۶۶	۲۶۵۹/۵	۳۵/۳	۵۶/۴۵	۶/۱	۰/۲۴	۰	کم
۲۶۶-۳۰۰	۲۵۸۲/۸	۳۴/۲	۵۱۱/۷۵	۵۵/۱	۲/۲۰	۲	زیاد
۳۰۰-۳۳۳	۴۱۱/۶	۵/۴	۷۱/۰۴	۷/۵	۰/۳۰	۰	کم
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳۵	۱۰۰	-	-	-



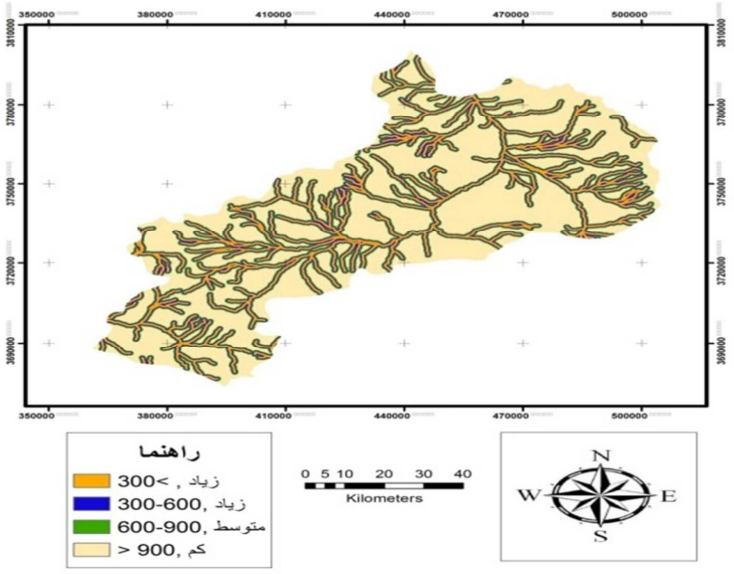
شکل ۸: نقشه وزنی بارش حوضه قمرود- الیگودرز

فاصله از آبراهه

تأثیر فعالیت و عملکرد آبراهه‌ها به صورت مجموعه‌ای از عملکردهای دینامیکی بیرونی و فعالیت‌های مکانیکی نظیر اشباع مواد، افزایش جرم حجمی، کاهش مقاومت مکانیکی توده‌های خاکی و سنگی، افزایش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش بارهای استاتیکی و دینامیکی مشاهده می‌شود (نیک اندیش، ۱۳۷۸). بنابراین مجموعه‌ای از عوامل از طریق آبراهه‌ها تحریک شده و دامنه را مستعد لغزش می‌سازد. همان‌گونه که در جدول ۹ و شکل ۹ ملاحظه می‌گردد، همپوشانی لایه فاصله از رودخانه با لایه حرکات توده‌ای در مدل LNRF بیان می‌کند که بیشترین گستردگی فاصله از آبراهه، اختصاص به رده ۰ تا ۶۰۰ متر، با مساحت ۲۲۹/۵ کیلومتر مربع (۳۰ درصد) دارد، که ۶۹ درصد میزان لغزش‌ها را به خود اختصاص داده است. این عامل با برداشت تکیه‌گاه‌های جانبی رودخانه بر اثر فرسایش و تغییر مسیر کانال‌های آبی توسط انسان، جهت و زاویه شیب دامنه‌ها را تغییر می‌دهد و علاوه بر این نفوذ بیشتر آب از طریق کانال‌ها به لایه‌های حساس موجب سنگینی وزن آن می‌شود.

جدول ۹: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای طبقات آبراهه و محاسبه وزن هر واحد

طبقات آبراهه (متر)	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
کمتر از ۳۰۰	۱۲۳۴/۳	۱۶/۳۵	۳۲۷/۷	۳۵/۲۲	۱/۴۱	۲	زیاد
۳۰۰-۶۰۰	۱۰۶۱/۳	۱۴/۰۵	۳۱۴/۲	۳۳/۷۷	۱/۳۵	۲	زیاد
۶۰۰-۹۰۰	۹۲۴/۴	۱۲/۲۴	۱۶۶/۲	۱۷/۸۶	۰/۷۱	۱	متوسط
بیش از ۹۰۰	۴۳۲۸/۸	۵۷/۳۴	۱۲۲/۲۵	۱۳/۱۴	۰/۵۲	۰	کم
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳۵	۱۰۰	-	-	-



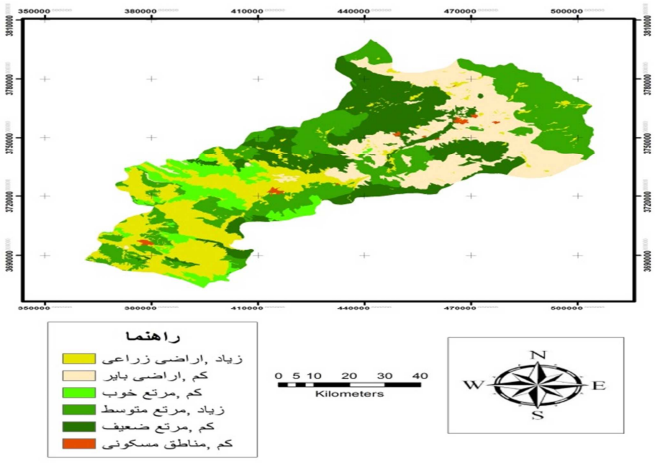
شکل ۹: نقشه وزنی آبراهه حوضه قمرود- الیگودرز

کاربری اراضی

پوشش‌گیاهی دارای اثرات هیدرومکانیکی مثبت و منفی در پایداری دامنه‌ها می‌باشد. گیاهانی که دارای تراکم و تاج بالاتری باشند، اثرات مثبت بیشتری در پایداری دامنه‌ها خواهند داشت. همچنین امکان وقوع لغزش در مناطقی با پوشش گیاهی ضعیف که شیب زیادی نیز دارند، محتمل‌تر است (متشرعی و همکاران، ۱۳۹۱). همان‌گونه که در جدول ۱۰ و شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد، ۴۶/۵۲ و ۳۷/۹۱ درصد از زمین‌لغزش‌ها در مراتع متوسط و اراضی زراعی اتفاق افتاده است که این مسئله به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه و بی‌ضابطه انسان‌ها دراراضی مرتعی و مدیریت نادرست فعالیت‌های کشاورزی صورت پذیرفته است. همچنین کمترین میزان لغزش در مناطق مسکونی و مناطق بایر رخ داده است که با قطع دادن نقشه کاربری اراضی با نقشه شیب مشخص گردید این مناطق در شیب کمتر از ۵ درصد واقع شده‌اند.

جدول ۱۰: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای کاربری اراضی و محاسبه وزن هر واحد

طبقات کاربری اراضی	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
	کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
اراضی زراعی	۱۴۹۳/۳	۱۹/۸	۳۵۲/۷۵	۳۷/۹۱	۲/۲۷	۲	زیاد
مناطق بایر	۱۶۳۹/۴	۲۱/۷	۱/۷۸	۰/۱۹	۰/۰۱۱	۰	کم
مرتع خوب	۵۶۱/۲	۷/۵	۸۱/۹۷	۸/۸۱	۰/۵۲	۰	کم
مرتع متوسط	۲۱۲۵/۱	۲۸/۲	۴۳۲/۸۶	۴۶/۵۲	۲/۷۹	۲	زیاد
مرتع ضعیف	۱۶۸۴/۲	۲۲/۳	۶۰/۹۹	۶/۵۵	۰/۳۹	۰	کم
مناطق مسکونی	۳۶/۸	۰/۵	۰	۰	۰	۰	کم
جمع	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳۵	۱۰۰	–	–	–



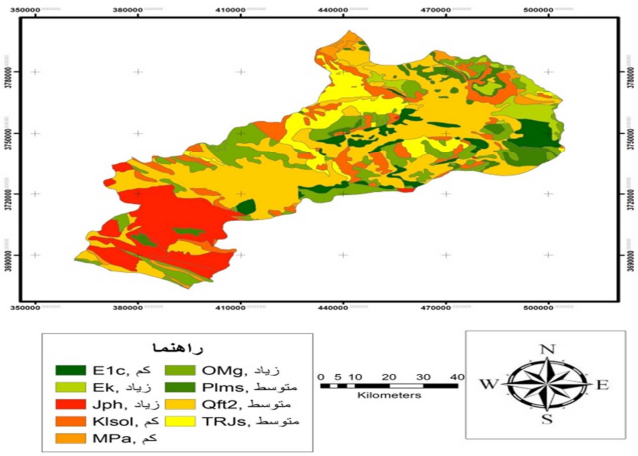
شکل ۱۰: نقشه وزنی کاربری اراضی حوضه قمرود- الیگودرز

سنگ‌شناسی

جنس زمین و نوع سنگ‌ها از عوامل مهم و تأثیرگذار در پدیده زمین‌لغزش است. سنگ‌ها به واسطه تفاوت در جنس رسوبات تشکیل‌دهنده و شرایط و دوران شکل‌گیری، مقاومت‌های مختلفی را در مقابل نیروهای خارجی از خود نشان می‌دهند (رنجبر و معمار افتخاری، ۱۳۹۱). همان‌گونه که در جدول ۱۱ و شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد، ۷۸ درصد لغزش‌ها در واحدهای مارن گچی، مارن ماسه‌ای، شیل کربناته با میان لایه‌هایی از سنگ‌آهک (OMg)، شیل توفی و توف‌های سبز (EK)، فیلیت، سنگ‌آهک متبلور (Jph) و پادگانه‌های آبرفتی جدید (Qft2) رخ داده است. زیرا با نفوذ آب در خلل و فرج، این سنگ‌ها پس از انبساط و اشباع به حالت خمیری و سیلان در آمده که با افزایش نیروی وزن در جهت شیب بر روی دامنه‌ها حرکت می‌کنند.

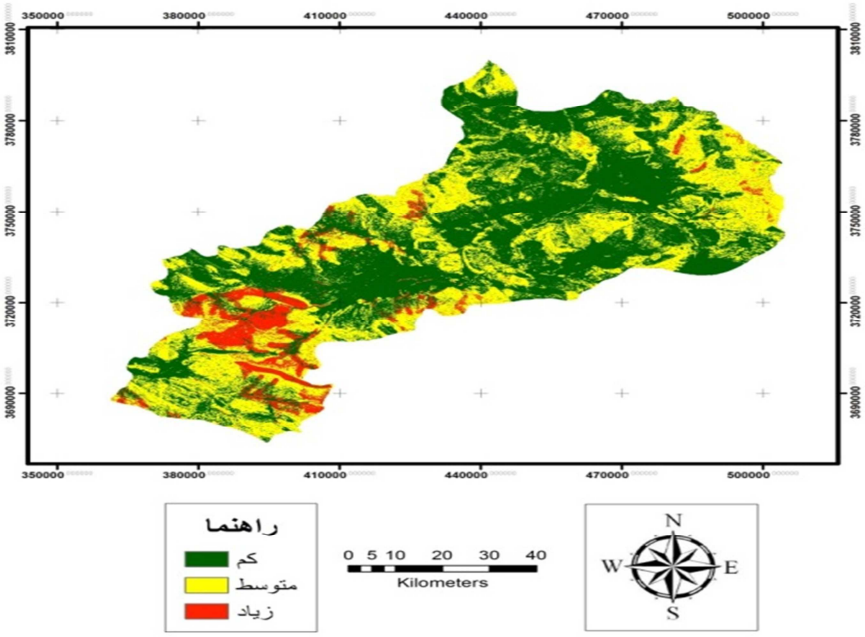
جدول ۱۱: مساحت زمین‌لغزش‌های رخداده در واحدهای سنگ‌شناسی و محاسبه وزن هر واحد

طبقات سنگ‌شناسی	علامت اختصاری	مساحت طبقات		مساحت لغزش‌ها		LNRF	وزن	میزان ناپایداری
		کیلومتر مربع	درصد	هکتار	درصد			
پادگانه‌های آبرفتی جدید	Qft_2	۲۶۸۸/۷	۳۵/۶	۱۲۹/۹	۱۳/۹	۱/۲۵	۱	متوسط
توف‌های آتشفشانی بازالت و آندزیتی	MPa	۱۸۳/۴	۲/۴	۱۹/۳	۲/۱	۰/۱۸	۰	کم
شیل خاکستری و ماسه‌سنگ	TRJs	۶۱۱/۱	۸/۱	۸۷/۱	۹/۴	۰/۸۴	۱	متوسط
کنگلومرا قرمز و ماسه‌سنگ	E1c	۴۲۵/۳	۵/۶	۰	۰	۰	۰	کم
فیلیت، سنگ‌اهک متبلور	Jph	۱۰۹۱/۱	۱۴/۷	۱۴۳/۷	۱۵/۴	۱/۴	۲	زیاد
شیل توفی و توف‌های سبز	Ek	۲۸۹/۸	۳/۸	۱۹۶/۹	۲۱/۲	۱/۹	۲	زیاد
مارن، شیل، کنگلومرا و ماسه‌سنگ	Plms	۷۹۵/۵	۱۰/۵	۷۳/۹	۷/۹	۰/۷۱	۱	متوسط
سنگ آهک اوربیتولین‌دار	Klsol	۱۰۸۶/۳	۱۴/۴	۲۲/۹	۲/۵	۰/۲۲	۰	کم
مارن گچی، مارن ماسه‌ای، شیل کربناته با میان لایه‌هایی از سنگ‌آهک	OMg	۳۶۸/۸	۴/۹	۲۵۶/۶	۲۷/۶	۲/۵	۲	زیاد
جمع	–	۷۵۴۰	۱۰۰	۹۳۰/۳	۱۰۰	–	–	–



شکل ۱۱: نقشه سنگ‌شناسی حوضه قمرود- الیگودرز

پس از شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها و طبقه‌بندی و قطع دادن آنها با نقشه زمین‌لغزش، به هر یک از طبقات لایه‌های اطلاعاتی وزنی بین ۰ تا ۲ براساس رابطه ۱تعلق گرفت بدین صورت که بیشترین وزن یعنی ۲ به طبقه‌ای داده می‌شود که بیشترین میزان زمین‌لغزش را داشته و امکان وقوع لغزش در آن بیشتر بوده است و کم‌ترین امتیاز یعنی صفر به طبقه‌های داده می‌شود که کم‌ترین میزان زمین‌لغزش را داشته‌اند. سپس با جمع نتایج متغیرها، نقشه پتانسیل خطر لغزش حاصل گردید. هر چه ضریب حاصل شده در هر پیکسل بیشتر باشد نشان‌دهنده پر خطر بودن وقوع زمین‌لغزش است و هر چه این ضریب به سمت صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده کم خطر و یا نهایتاً بی‌خطر بودن وقوع آن است. همچنین جهت پهنه‌بندی این لایه، روش‌های مختلفی از جمله شکست طبیعی[1]، فاصله برابر[2]، مقادیر صفت[3]، انحراف استاندارد[4] و فاصله ژئومتریک[5] در محیط Reclassify نرم‌افزار ArcGIS مورد آزمون قرار گرفته و در نهایت روش طبقه‌بندی شکست طبیعی به دلیل تطابق بیشتر آن با نقاط لغزش‌پذیر انتخاب گردیده است و نقشه پتانسیل خطر با توجه به نقاط شکستگی به دست آمده از این روش به ۳ پهنه ناپایداری کم، متوسط و زیاد تقسیم گردید و پس از آن مساحت هر پهنه محاسبه گردید که نتایج در جدول ۱۲ و شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه قمرود- الیگودرز

1- Natural Breaks
2- Equal Interval
3- Quantile
4- Standard Deviation
5- Geometric Interval

جدول ۱۲: مساحت طبقات ناپایداری در حوضه قمرود- الیگودرز

ردیف	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	ناپایداری
۱	۴۰۱۸/۲	۵۳/۳	کم
۲	۲۹۵۹/۱	۳۹/۳	متوسط
۳	۵۶۳/۳	۷/۶	زیاد

مطابق جدول ۱۲ پهنه خطر زیاد، ۷/۶ درصد از مساحت محدوده را شامل می‌گردد که این پهنه از توزیع جغرافیایی عمدتاً در نواحی غربی و جنوبی منطقه واقع گردیده است. سپس پهنه‌ی با خطر متوسط در درجه دوم اهمیت می‌باشد که از لحاظ وسعت، ۳۹/۳ درصد از مساحت محدوده را به خود اختصاص داده و غالباً در قسمت‌های شرقی و غربی و بخش شمالی منطقه قرار دارد. پهنه‌ی با خطر کم، بیشترین محدوده را (۵۳/۳ درصد) به خود اختصاص داده است، این پهنه از نظر توزیع جغرافیایی عمدتاً در شمال و مرکز منطقه مورد پژوهش واقع شده است.

نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش تحت تأثیر عوامل مختلفی طبیعی و انسانی از قبیل شیب، کاربری اراضی، بارش، گسل و نظایر آن صورت می‌گیرد که هر یک از این عوامل در ایجاد زمین‌لغزش نقش بسزایی دارند. نتایج بررسی زمین‌لغزش نشان می‌دهد که ۷۱ درصد از حرکات توده‌ای در طبقات شیب ۵ تا ۲۰ درصد اتفاق افتاده است. مطالعات مختلف در سطح حوضه نشان داده است که افزایش گسیختگی دامنه‌ها به شکل لغزش تا درصد شیب معینی اتفاق می‌افتد و به نظر می‌رسد بعد از آن درصد ناپایداری‌ها دامنه‌ها کاهش می‌یابد. علت را می‌توان سختی سازندهای تشکیل‌دهندهٔ این دامنه‌ها و تضعیف فرآیندهای خاکزایی در شیب‌های بالا دانست که با نتایج تحقیق (شیرانی و سیف، ۱۳۹۰) هم‌خوانی دارد. همچنین، دامنه‌های شمالی با حدود ۳۰ درصد از حرکات توده‌ای بیشترین تأثیر را در حرکات لغزشی داشته است و دامنه‌های جنوبی و غربی با حدود ۲۴ و ۱۹ درصد از حرکات توده‌ای تأثیر متوسطی در رخداد لغزش داشته‌اند. دامنه‌های شمالی بیشترین حساسیت را به لغزش را نشان می‌دهد. این موضوع ناشی از آن است که دامنه‌های شمالی به دلیل زاویه تابش خورشید در نیمکره شمالی نسبت به دامنه‌های جنوبی، میزان کمتری از تابش خورشیدی را دریافت می‌کنند که این مسئله باعث دمای کمتر، کاهش تبخیر و افزایش ماندگاری رطوبت در لایه‌های خاک می‌شود و در نتیجه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش خواهد داد که با نتایج تحقیق (شیرانی و سیف، ۱۳۹۰) هم‌خوانی دارد. همچنین، از بین سازندهای زمین‌شناسی، سازندهای در بردارنده‌ی واحدهای مارن گچی، مارن ماسه‌ای، شیل کربناته با میان لایه‌هایی از سنگ‌آهک، شیل توفی و توف‌های سبز، فیلیت و سنگ‌آهک متبلور و پادگانه‌های آبرفتی جدید مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند و ۷۸ درصد زمین‌لغزش‌ها در این واحدها صورت گرفته است. وجود خلل و فرج زیاد در این نوع سنگ‌ها و نفوذ آب به داخل آنها سبب افزایش ناپایداری دامنه‌ها و وقوع حرکات دامنه‌ای در جهت شیب دامنه‌ها در این سازندهای زمین‌شناسی شده است که در این خصوص احمدی و فیض‌نیا (۱۳۸۵) نیز به پتانسیل بالای این رسوبات در مناطق شیب‌دار در وقوع لغزش اشاره نموده‌اند. نتایج نشان داد

که بیشترین میزان زمین‌لغزش‌ها در فاصله بیش از ۳۰۰۰ متری از گسل اتفاق افتاده است. اگرچه گسل‌ها نقش تشدیدکننده در لغزش را دارند اما در این منطقه میزان وقوع لغزش با فاصله از گسل‌ها رابطه مستقیم داشته است و نشان‌دهنده عدم تأثیر این گسل‌ها در وقوع لغزش در منطقه بوده است. علاوه بر این، ۶۹ درصد از زمین‌لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۶۰۰ متری از آبراهه و ۵۵ درصد از حرکات لغزشی نیز در سطح بارشی ۲۶۶ تا ۳۰۰ میلی‌متر رخ داده است. آبراهه‌ها موجب زیرشویی پای شیب‌ها و برهم خوردن نیروهای متعادل‌کننده شیب دامنه‌ها می‌شوند و در نتیجه خطر زمین‌لغزش را افزایش می‌دهند و بارش باران نیز با افزایش سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و فشار آب منفذی و افزایش رطوبت خاک به حالت اشباع مسبب افزایش بار دامنه و رخداد لغزش است. کاربری اراضی یکی از شاخص‌های اصلی در مطالعهٔ پایداری دامنه‌ها و پهنه‌بندی خطر آنها محسوب می‌شود. نقشه‌های وزنی کاربری اراضی نشان می‌دهد که بیشترین میزان وقوع زمین‌لغزش‌ها در اراضی مراتع متوسط با ۴۶/۵۲ درصد و اراضی زراعی با ۳۷/۹۱ درصد از کل زمین‌لغزش‌ها روی داده است که این مسئله به دلیل تخریب و چرای بی‌رویه و بی‌ضابطه از مراتع در فصول نامناسب و مدیریت نادرست و غیرعلمی در فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه صورت پذیرفته است. مقادیر بالای TWI و STI بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش را از خود نشان می‌دهند. TWI در حقیقت نشان‌دهنده رطوبت خاک است. طبق نتایج صابر چناری و همکاران (۱۳۹۴)، مناطقی که TWI بیشتری دارند رطوبت بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند بنابراین حساسیت آن‌ها به زمین‌لغزش بیشتر است و همچنین با افزایش شاخص STI رطوبت بیشتری در پایین دست دامنه تجمع می‌یابد که زمینه را برای زمین‌لغزش فراهم می‌کند. همچنین با تلفیق نقشه پهنه‌بندی حاصل از مدل مذکور و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های موجود مشاهده شد که در حدود ۹۳ درصد از زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه در پهنه متوسط تا زیاد قرار دارند که می‌تواند دلیلی بر صحت مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه باشد. با توجه به اینکه در روش LNRF، وزن‌دهی طبقات براساس نظرات کارشناسان صورت نمی‌گیرد بلکه براساس تعداد لغزش‌های رخ داده در هر طبقه وزن‌دهی طبقات صورت می‌گیرد، امکان بروز خطا در آن به حداقل رسیده و از روش‌هایی که متکی بر وزن‌دهی براساس نظرات کارشناسان می‌باشد، مطمئن‌تر است. به عنوان مثال قهرمانی و همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از روش‌های LNRF، FAHP وAHP لغزش‌های حوزه آبخیز النگ‌دره را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل بدست آمده از روش LNRF به دلیل لحاظ نکردن وزن‌دهی براساس نظرات کارشناسان نسبت به دو روش دیگر، تطابق بیشتری با شرایط محیط مورد مطالعه دارد و این روش را به‌عنوان روش نهایی انتخاب کردند. ایلدرمی و روزبهانی (۱۳۹۳)، با استفاده از روش LNRF حوضهٔ سد کلان در ملایر را از نظر حرکات توده‌ای و ناپایداری دامنه‌ها پهنه‌بندی کردند و به این نتیجه دست یافتند که این روش نتایج مناسبی را نشان می‌دهد که این موضوع با بررسی‌های میدانی گسترده نیز به خوبی مورد تأیید قرار گرفته است. همچنین شادفر و یمانی (۱۳۸۶) اقدام به پهنه‌بندی حوضهٔ جلیسیان کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل LNRF کارآیی بسیار خوبی برای بررسی و پهنه‌بندی نواحی مرطوب و نیمه مرطوب دارد. در پژوهش حاضر، بررسی‌های انجام شده در مورد پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز قمرود- الیگودرز با روش LNRF نشان می‌دهد که در بخش غربی و جنوبی حوضه احتمال وقوع زمین‌لغزش بالاست که با توجه به درجهٔ شیب بیشتر در این ناحیه، نتیجه به دست آمده تطابق مناسبی با شرایط حاکم بر منطقه دارد و در بخش‌های مرکزی که

دارای شیب کمتر از ده درصد است پهنه‌های با احتمال لغزش زیاد، وجود ندارد. با توجه به نحوه پراکنش پهنه‌هایی با خطر زمین‌لغزش بالا در نواحی غربی و جنوبی منطقه، پیشنهاد می‌گردد به منظور کاهش مخاطرات محیطی و جلوگیری از خسارات احتمالی، هر گونه سرمایه‌گذاری و اجرای برنامه‌های عمرانی با توجه به ویژگی‌های طبیعی حاکم بر حوزه آبریز صورت گیرد و از فعالیت‌های مخرب انسانی همچون بهره‌برداری بی‌رویه و تغییر کاربری اراضی در مناطق حساس و مستعد به خطر زمین‌لغزش اجتناب گردد.

منابع

احمدی حسن؛ سادات فیض‌نیا (۱۳۸۵). سازندهای دورهٔ کواترنر (مبانی نظری و کاربردی آن در منابع طبیعی)، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، ۶۰۲ صفحه.

ایلدرمی علیرضا؛ روزبهانی حبیبه (۱۳۹۳). پهنه‌بندی خطر ناپایداری دامنه‌ها با مدل LNRF و GIS در حوضه کلان ملایر، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۸، شماره ۴۸، صص ۶۰-۳۷.

پژوهش مهدی؛ گرجی منوچهر؛ طاهری محمود؛ سرمدیان فریدون؛ محمدی جهانگرد؛ صمدی بروجنی حسین. (۱۳۹۰). اثر کاربری اراضی مختلف حوضه سد زاینده‌رود علیا در تولید رسوب با استفاده از GIS، مجله پژوهش آب ایران، سال پنجم، شماره ۸، صص ۱۵۲-۱۴۳.

جوکار سرهنگی عیسی؛ امیراحمدی ابوالقاسم؛ سلملیان حسین (۱۳۸۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه صفارود با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، دوره ۵، شماره ۹، صص ۹۲-۷۹.

رامشت محمد حسی؛ شاه‌زیدی سمیه سادات (۱۳۷۵). کاربرد ژئومرفولوژی در برنامه‌ریزی ملی، منطقه‌ای، اقتصادی، توریسم، اصفهان: انتشارات دانشگاه اصفهان، ۳۹۲ صفحه.

رضایی مقدم حسن؛ حسنعلی‌زاده محسن؛ بردی شیخ واحد؛ جعفری رویا (۱۳۹۴). برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل رقومی پستی و بلندی زمین، مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال ۶، شماره ۳، صص ۷۲-۶۱.

رنجبر محسن؛ معمار افتخاری محمد (۱۳۹۱). پهنه‌بندی پدیده لغزش با استفاده از روش LNRF در جاده هراز (از امامزاده هاشم تا لاریجان)، فصلنامه جغرافیا، دوره ۱۰، شماره ۳۳، صص ۱۲۸-۱۰۷.

روستایی شهرام؛ احمدزاده حسن (۱۳۹۱). پهنه‌بندی مناطق متأثّر از خطر زمین‌لغزش در جاده تبریز- مرند با استفاده از سنجش از دور و GIS، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، شماره ۱، صص ۵۸-۴۷.

سفیدگری رضا (۱۳۸۱). ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دماوند)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۵۹ ص.

سفیدگری رضا؛ غیومیان جعفر؛ فیض‌نیا سادات (۱۳۸۴). ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش درمقیاس ۱:۵۰۰۰۰ (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دماوند)، سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، تهران، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.

سوری سلمان؛ لشکری پور غلامرضا؛ غفوری محمد (۱۳۹۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه کشوری نوژیان)، مجله زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۵، شماره ۲، صص ۱۲۸۶-۱۲۶۹.

شادفر صمد؛ یمانی مجتبی (۱۳۸۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزهٔ آبخیز جلیسان با استفاده از مدل LNRF، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، سال ۳۹، شماره ۶۲، صص ۲۳-۱۱.

شیرانی کورش؛ سیف عبدالله (۱۳۹۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های آماری (منطقه پیشکوه، شهرستان فریدون شهر)، مجله علوم زمین، دوره ۲۲، شماره ۸۵، صص ۱۵۸-۱۴۹.

صابر چناری کاظم؛ سلیمانی حسین؛ محمدی مجتبی (۱۳۹۴). ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و LNRF، مجله اکوهیدرولوژی، دوره ۲، شماره ۱، صص ۱۱۶-۱۰۵.

عابدیان سحر (۱۳۸۸). تأثیر احداث شبکه جاده‌ای بر روی اکوسیستم‌ها از دیدگاه بوم‌شناسی سیمای طبیعت (مطالعه موردی شهرستان‌های کردکوی، بندرگز و گلوگاه)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

عابدینی موسی؛ بهشتی جاوید ابراهیم؛ فتحی محمد حسین (۱۳۹۴). پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین‌لغزش با مدل آماری دو متغیره و منطق فازی (حوضه آبخیز رودخانه بالخلو)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۵۹، شماره ۳، صص ۶۰-۴۳.

عرب عامری علیرضا؛ حلبیان امیرحسین (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری دو متغیره وزنی AHP و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه زرند)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۸، دوره ۲۸، صص ۸۶-۶۵.

قهرمانی نرجس؛ خاشعی سیوکی عباس؛ دخیلی عباس (۱۳۹۱). بررسی روش‌های تحلیل سلسله مراتبی LNRF، FAHP و AHP (مطالعه موردی حوزه آبخیز النگ دره)، مجله سنجش ازدور و GIS ایران، سال ۴، شماره ۱، صص ۸۰-۶۵.

متشرعی آرش؛ قمی جعفر؛ افتخاری اکرم؛ پوزش بهروز؛ شاهماری مهدی (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش بر روی جاده تهران-چالوس و بزرگراه در دست احداث، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۸، شماره ۲، صص ۱۵۸-۱۴۷.

نیک‌اندیش نسرین (۱۳۷۸). بررسی عوامل هیدرواقلیم در وقوع حرکات توده‌ای در حوضه کارونی میانی، تز دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.

Cornforth, D. H., (2005), Landslides in practice, USA: John Wiley & Sons Inc., 591p.

Dietrich, W. E., Wilson C. J., Montgomery, D. R., McKean, J., and Bauer, R., (1992), Erosion thresholds and land surface morphology, Journal of Geology, 20(8), 675-679.

Dymond, J. R., Ausseeil, A. G., Shepherd J. D., and Buettner, L., (2006), Validation of a region-wide model of landslide susceptibility in the Manawatu-Wanganui region of New Zealand, Journal of Geomorphology, 74(1-4), 70-79.

Giannecchini, R., (2006), Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy), Journal of National Hazards Earth System Science, 6(3), 357-364.

Jenson, S. K., and Domingue, J. O., (1988), Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11), 1593-1600.

Moore, I., and Burch, G., (1986), Physical basis of the length- slope factor in the universal soil loss equation, Journal of Soil Science Society of America Journal, 50(5), 1294–1298.

Moore, I. D., and Grayson, R. B., (1991), Digital terrain modeling: A review of the hydrological, geomorphological and biological application, Journal of Hydrology Process, 5(1), 3-30.

Ocakoglu, F. Gokeeoglu, C., and Ercanoglu, M., (2002), Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study from NW Turkey, Journal of Geomorphology, 42(3-4), 329-341.

Ownegh, M., (2004), Assessing the applicability of the Australian landside database in hazard management, Proceeding of ISCO, 2004, Brisabane, Australia, pp: 1001-1006.

Price, D. G., (2009), Engineering geology: principles and practice, Springer, PP. 268-290.

Saha, A. K., Gupta, R. P., and Arora, M. K., (2002), GIS-based landslide hazard zonation in a part of the Himalayas, Journal of Remote Sensing, 23(2), 357–369.

USDA., (1972), Sediment sources, yields, and delivery ratios, National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.

Landslide hazard zonation using LNRF model (Case study: Ghomroud- Aligudarz basin)

Mir Mehrdad Mirsanjari*[1], Alireza Ildoromi[2], Sahar Abedian[3], Arefeh Alimohamadi[4]

Received: 05-05-2017 Accepted: 16-04-2018

Abstract

Determination and zoning of landslide hazard areas is a primary activity in environmental hazard management and reduce the landslide costs because this phenomenon is caused to financial and felon, soil and land degradation and increasing sedimentation in the watershed outlet. Therefore, identification of susceptible zones to landslide using experimental models is one of the basic steps in hazard management in basins. In this study, to effective factors in a landslide and also landslide hazard zonation in Ghomroud- Aligudarz basin was used LNRF model and GIS techniques. For this purpose, effective layers in landslide such as land use, lithology, rainfall, slope, aspect, distance to fault, distance from the river, Stream Transport Index and Topographic Wetness Index were prepared and digitized. The intersection of independent and dependent variables of mass movements and the weighting factor classes in each class have been executed based on LNRF model. The result of this investigation indicates that most of the landslide occurred in Gypsiferous and Sandy Marl, Shale with intercalations of limestone, Tuffaceous Shale and green Tuff units, slope class 5- 20 percent, and a north aspect. On the other hand, most of the instability occurred in rangeland and agricultural classes, a distance of 0-600 m from drainage network, and rain class 266-300 mm. Also, the class of 7.5- 10 for Topographic Wetness Index and class of more than 12 for stream transport index had shown the most susceptible to landslide. Also in the area, a landslide had a direct relationship to the distance of the fault and reflects the ineffectiveness of the faults in the landslide in the region. It is expected that based on these results, the best plan is done for the Ghomroud-Aligudarz basin, in particular, the construction of structures such as roads, building construction, and facilities to reduce the environmental and economic costs.

Keywords: Landslide, Stream Transport Index, Topographic Wetness Index, Fault, LNRF.

[1]*- Assistant Professor of Environmental Sciences, Malayer University, Iran. Email: mehrdadmirsanjari@yahoo.com
[2]- Associate professor of Rangeland and Watershed Management, Malayer University, Iran.
[3]- Instructor of Payam e Noor and Ph.D student of Environmental Science, Malayer University, Iran.
[4]- Master Science student of Environment Science, Malayer University, Iran.