

کاربرد مدل آماری رگرسیون لجیستیک نادر وقوع در ارزیابی پهنه‌بندی حساسیت به حرکات توده‌ای

روح‌اله آدینه‌وند*؛ دکتری هیدروژئولوژی، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، ایران

محمد زارع؛ استاد هیدروژئولوژی، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، ایران

عزت‌اله رئیسی؛ استاد هیدروژئولوژی، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰

چکیده

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش در شناسایی و تفکیک مناطق مستعد زمین لغزش و مکان‌های امن در توسعه اقتصادی آینده ناحیه‌ای لرزه‌خیز در کشوری مانند ایران، با تنوع زمین‌شناسی و توپوگرافی زیاد، حساسیت زیادی دارد. در این مطالعه، ضمن بررسی عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش از مدل‌های آماری در تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش در محدوده باغملک-ایذه استفاده شده است. بدین جهت، با توجه به این واقعیت که محدوده وقوع پدیده زمین لغزش‌ها نسبت به مساحت کل منطقه مورد بررسی بسیار کوچک و در عمل یک نقطه است، از مدل آماری رگرسیون لجیستیک نادر وقوع (RELRL) استفاده شد. پهنه‌های زمین لغزش، به عنوان متغیر وابسته و پدیده‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی، پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، جهت شیب و فاصله از جاده، مناطق مسکونی، رودخانه و گسل‌ها و جزآن به عنوان متغیرهای مستقل در مدل RELRL وارد شد. ضریب اثر هر کدام از پارامترها با مدل محاسبه و میزان احتمال به دست آمده از مدل RELRL به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شد. صحت‌سنجی نقشه پهنه‌بندی تهیه شده با اندیس R انجام شد که نشان داد که زمین لغزش‌ها نخست در مناطق کوچکی واقع شده است؛ دوم، محل زمین لغزش‌ها در کلاس‌های با حساسیت بالا واقع است. ارزیابی کیفیت نقشه پهنه‌بندی حساسیت به زمین لغزش نشان داد که می‌توان از آن در برنامه‌های مدیریتی بحران و کاهش هزینه در بررسی‌های دقیق‌تر زمین لغزش در منطقه استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: ایذه - باغملک، پهنه‌بندی، رگرسیون لجیستیک نادر وقوع، زمین لغزش، مدل‌های آماری.

مقدمه

توسعه اقتصادی سریع و فعالیت‌های گسترده انسانی سبب به هم خوردن تعادل محیط طبیعی می‌شود که نتیجه آن مخاطرات زمین‌شناسی مختلف از قبیل زمین لغزش‌هاست، که بر برنامه‌ریزی شهری و ساخت‌وساز و به طور کلی، توسعه پایدار ناحیه تأثیر شدیدی دارد (بای و همکاران، ۲۰۱۱). به دلیل ماهیت پیچیده مخاطرات طبیعی مانند زمین لغزش، فناوری فعلی بشر قادر به پیش‌بینی وقوع آن نیست. بنابراین، اکثر متولیان امور محلی و منطقه‌ای و برنامه‌ریزان کاربری زمین مجبورند از نقشه‌های حساسیت‌پذیری زمین لغزش در پروژه‌های توسعه‌ای و عمرانی استفاده کنند. تهیه این نوع نقشه‌ها در مقیاس وسیع، با توجه به دورافتاده بودن نقاط دارای پتانسیل زمین لغزش و با توجه به امکانات و بودجه محدود امری بسیار دشوار است. در چنین شرایطی، مناسب‌ترین روش تفسیر دستی یا خودکار عکس‌های هوایی و تصاویر راقومی ماهواره‌ای در چارچوب GIS است. هر چند این تکنیک به طور گسترده استفاده می‌شود و مناسب‌ترین شیوه تهیه نقشه

زمین لغزش در مقیاس منطقه‌ای است، محدودیت‌های بسیاری هم دارد، از جمله مشکل در (۱) شناسایی زمین لغزش‌های با اندازه کوچک به دلیل دقت مکانی پایین تصاویر، (۲) تمایز دقیق مرز بین زمین لغزش‌ها با نواحی بدون زمین لغزش به دلیل فازی بودن مرزهای بین زمین لغزش‌های رخ داده در مکان‌های با پوشش گیاهی و (۳) تمایز نوع مواد جایگزین شده با زمین لغزش به دلیل پوشش گیاهی و قدرت تفکیک تصاویر (نترا و همکاران، ۲۰۱۳).

هر دو روش کیفی و کمی در تهیه نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش استفاده شده است (سوترز و فون‌وستن، ۱۹۹۶؛ گوزتی و همکاران، ۱۹۹۹؛ آوتی و چاورتی، ۱۹۹۹). از چند دهه گذشته تاکنون مطالعات بسیاری درباره پهنه‌بندی زمین لغزش به روش‌های احتمالاتی صورت گرفته است (بیناکی و همکاران، ۱۹۹۸؛ فون‌وستن، ۱۹۹۹؛ بیزا و کرومیناس، ۲۰۰۱؛ لی و همکاران، ۲۰۰۴؛ آیالو و یاماگیشی، ۲۰۰۵؛ نترا و همکاران، ۲۰۱۳؛ بالکین و همکاران، ۲۰۱۲؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۱؛ دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲).

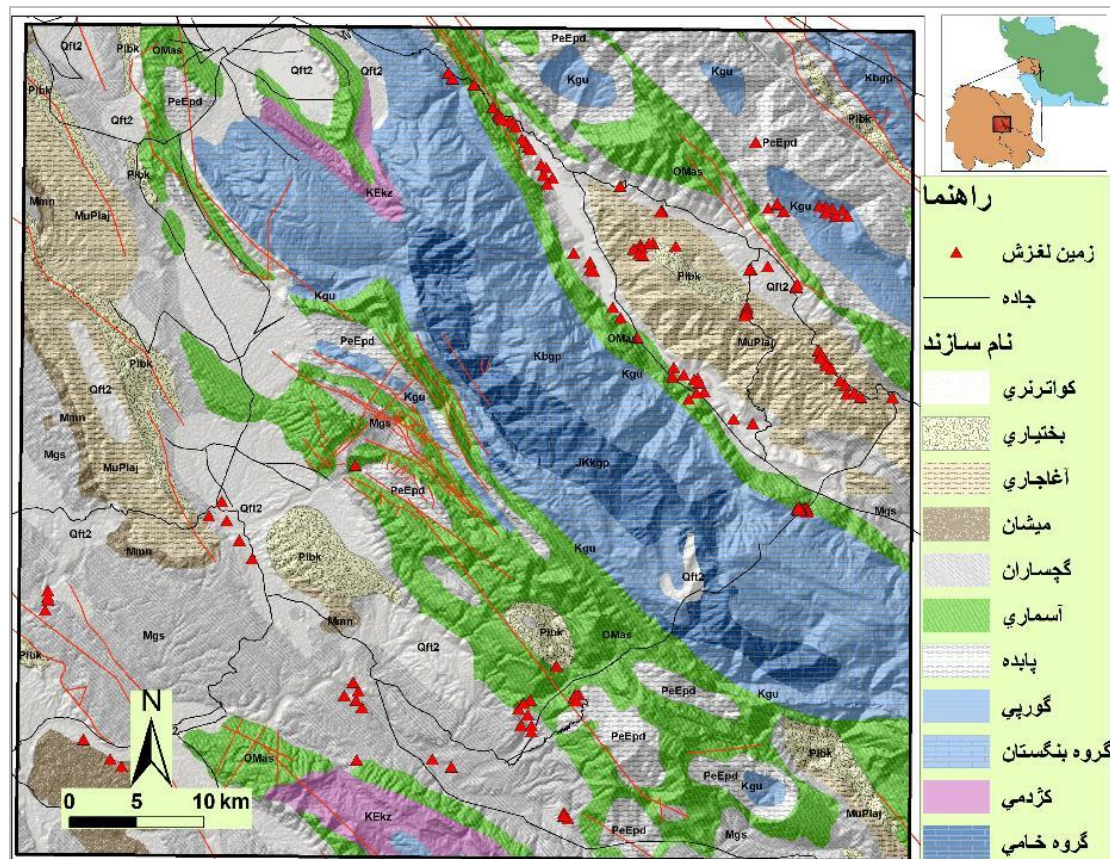
به تازگی، روش‌های محاسباتی نرم‌افزاری از قبیل منطق فازی، شبکه عصبی مصنوعی، روش‌های فازی-عصبی و درخت تصمیم‌گیری نیز در مطالعات موردی مختلفی به کار گرفته شده است (ارانگلو و گوگولسو، ۲۰۰۴؛ پرادهان و لی، ۲۰۰۹؛ پرادهان و لی، ۲۰۱۰؛ پرادهان و لی، ۲۰۱۰؛ ایلماز، ۲۰۰۹). اطلاعات بیشتر در ارتباط با روش‌های ارزیابی مکانی زمین لغزش را می‌توان در مقالات مروری پیدا کرد (سوترز و فون‌وستن، ۱۹۹۶؛ گوزتی و همکاران، ۱۹۹۹؛ برنینگ، ۲۰۰۵؛ پرادهان، ۲۰۱۰؛ فلیسیمو و همکاران، ۲۰۱۲). همه این روش‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود است، اما اکثر آن‌ها بر پایه یک مدل مفهومی مشابه است که مراحل تهیه آن به قرار زیر است: (۱) تهیه نقشه زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه، (۲) تهیه نقشه فاکتورهای محیطی که به نظر می‌رسد به طور مستقیم یا غیرمستقیم به ناپایداری شیب وابسته است، (۳) تخمین توزیع رابطه بین این فاکتورها در ناپایداری شیب دامنه‌ها و (۴) طبقه‌بندی منطقه به محدوده‌های با شدت‌های مختلف حساسیت (گوزتی و همکاران، ۱۹۹۹؛ فون‌دن‌یکهوست و همکاران، ۲۰۰۶). این مدل مفهومی بر پایه این فرضیه است که مکان‌های قبلی زمین لغزش‌ها کلیدهای آینده است (کارارا و همکاران، ۱۹۹۵؛ زرز، ۲۰۰۲). برای مدل‌سازی زمین لغزش‌ها در مقیاس وسیع که داده‌های محدودی وجود دارد و ماهیت متغیر پاسخ مدل دو حالتی است (وقوع و عدم وقوع)، از روش‌های آماری رایج رگرسیون لجیستیک (LR)^۱ و رگرسیون لجیستیک نادر وقوع (RELR)^۲ استفاده می‌شود (کارارا و همکاران، ۱۹۹۵؛ آیالو و یاماگیشی، ۲۰۰۵).

موضوع این مطالعه نیز استفاده از روش رگرسیون لجیستیک نادر وقوع در تهیه نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش در منطقه ایزه-باغملک به مساحت ۴۰۶۰ کیلومترمربع است. این محدوده در حد فاصل سه استان خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و فارس با تعداد ۱۵۵ زمین لغزش، به لحاظ وقوع تعداد رخداد زمین لغزش و منابع طبیعی اهمیت دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه ایزه-باغملک در جنوب غرب ایران و در حد فاصل سه استان خوزستان، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد، به طور تقریبی بین ۳۳° ۴۹' تا ۳۴° ۵۰' طول شرقی و ۳۱° ۱۷' تا ۳۱° ۵۱' عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مساحت ناحیه مورد مطالعه حدود ۴۰۶۰ کیلومترمربع و مساحت زمین لغزش‌های رخ داده در آن ۰/۳ کیلومترمربع است. ارتفاع منطقه از حداقل ۲۶۰ متر تا حداکثر ۳۵۹۴ متر از سطح آب‌های آزاد در تغییر است. متوسط بارندگی منطقه حدود ۶۰۰ میلی‌متر در سال است و اقلیم منطقه بر اساس اقلیم نمای دومارتن نیمه‌خشک است.

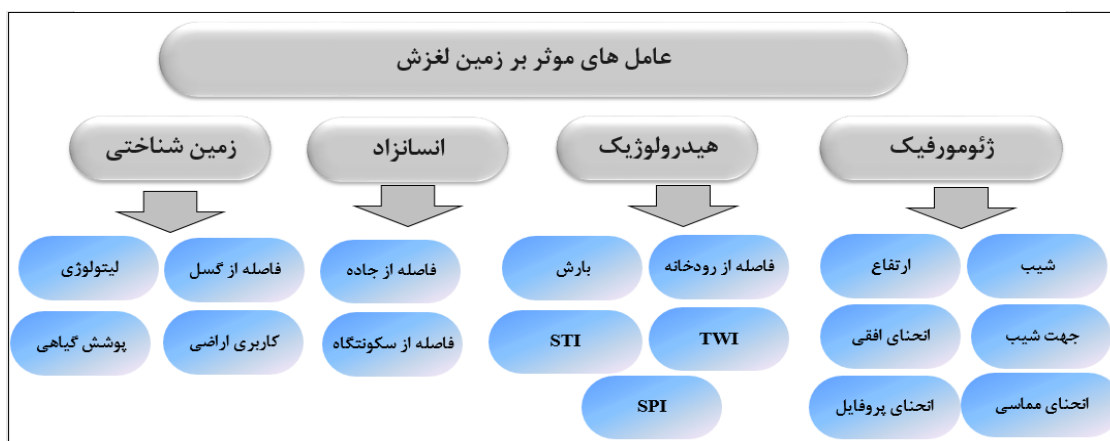
در منطقه تعداد زیادی زمین لغزش وجود دارد که به طور وسیعی در سطح منطقه پراکنده است. بر اساس آمار سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تعداد ۱۵۵ زمین لغزش در محدوده مورد مطالعه وجود دارد (شکل ۱). شناسایی و تهیه نقشه پارامترها در ارتباط با زمین لغزش نیاز به آگاهی از منشأ این پارامترها دارد (گوزتی و همکاران، ۱۹۹۹).



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه و توزیع واحدهای لیتولوژیکی

اساس روش به کارگرفته در این مطالعه استفاده از خصوصیات زمین‌لغزش‌های کنونی در ارزیابی نقاط مستعد زمین‌لغزش در آینده است، چرا که بنا بر اصل یکنواختی، فرایندهای کنونی راهنمای فرایندهای گذشته است (گولد، ۱۹۶۵). بر همین مبنا، پایگاه داده زمین‌لغزش‌ها و فاکتورهای مؤثر در زمین‌لغزش ساخته شد. در این مطالعه ۱۷ فاکتور کنترل‌کننده زمین‌لغزش در چهار گروه اصلی ارزیابی شده است، شامل (۱) عوامل زمینی (لیتولوژی، فاصله از گسل، کاربری اراضی و شدت پوشش گیاهی)، (۲) هیدرولوژیکی (فاصله از رودخانه، بارش، اندیس رطوبت توپوگرافیکی Topographic Wetness Index (TWI)، اندیس انتقال رسوب Stream Sediment Transport Index (STI)، انحنای قدرت جریان (Stream Power Index (SPI) و (۳) ژئومورفولوژیکی (شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای افقی (Plan Curvature)، انحنای پروفایل (Profile Curvature) و انحنای مماسی (Tangential Curvature)) و (۴) انسان‌زاد (فاصله از جاده و فاصله از مناطق مسکونی) (شکل ۲). این اطلاعات از نقشه‌های ۱ به ۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاعی منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر سازمان نقشه‌برداری، اطلاعات میانگین بارندگی سی ساله وزارت نیرو، نقشه کاربری اراضی سازمان منابع طبیعی، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ لندست، موقعیت نقاط جمعیتی مرکز آمار ایران استخراج شده است و در بسته نرم‌افزارهای ArcGIS و ERDAS IMAGINE 9.1، 19 SPSS و MATLAB نسبت به تهیه لایه‌های موضوعی اقدام شده است (شکل ۲).

پس از تهیه نقشه‌های موضوعی، پتانسیل حساسیت به زمین‌لغزش به کمک روش‌های آماری رگرسیون لجیستیک و رگرسیون لجیستیک نادر وقوع تجزیه و تحلیل شد. در مباحث رگرسیون اغلب بحث بر سر یافتن رابطه‌ای بین متغیر وابسته y و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل X_1, X_2, X_3, X_4 و X_n است که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد.



شکل ۲. فاکتورهای مورد استفاده در تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش (برای توضیح بیشتر به متن مراجعه کنید)

$$Y=f(X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n) \quad (1)$$

که به صورت ساده تر می توان آن را به صورت زیر نوشت.

$$Y=\beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_4X_4 + \dots + \beta_nX_n \quad (2)$$

که رابطه ای خطی است و ضرایب $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ تا β_n به کمک نمونه های تصادفی و معمولاً به روش کمترین مربعات خطا برآورد می شود.

در بسیاری از پژوهش ها، مانند پژوهش حاضر، متغیر پاسخ دو حالتی است؛ یعنی، پاسخ ها تنها شامل دو حالت «وجود» یا «عدم وجود» (۰ و ۱) است. از سوی دیگر، متغیرهای پاسخ تأثیرگذار بر متغیر پاسخ ممکن است کمی باشد. حال با توجه به معادله (۲) مشخص می شود که متغیر پاسخ (Y) فقط دو مقدار ۰ و ۱، ولی طرف راست تساوی مقادیر ممکن است از $+\infty$ تا $-\infty$ باشد. برای حل این مشکل می توان طی مراحل زیر، سمت چپ تساوی را به متغیری پیوسته تبدیل کرد:

۱. به جای Y از احتمال Y استفاده کنیم. در این صورت اگر P احتمال $Y=1$ ، $1-P$ احتمال $Y=0$.

۲. به جای استفاده مستقیم از احتمال، از نسبت شانس ($Odds\ Ratio = \frac{P}{1-P}$) استفاده کنیم. در این حالت، سمت چپ تساوی از ۰ تا $+\infty$ در تغییر است.

۳. از متغیر OR لگاریتم طبیعی بگیریم ($\ln(\frac{P}{1-P})$) تا مقادیر سمت چپ تساوی بین $+\infty$ تا $-\infty$ واقع شود. با این تغییرات الگوی قبلی که فقط دو مقدار داشت، به صورت پیوسته تغییر خواهد کرد که به الگوی رگرسیون لجیستیک (LR) معروف است (معادلات ۳ تا ۶).

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right)=\beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \dots + \beta_nX_n \quad (3)$$

$$P=1/(\beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \dots + \beta_nX_n) \quad (4)$$

$$Z= \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \dots + \beta_nX_n \quad (5)$$

$$P=\left(\frac{1}{1+e^{-Z}}\right) \quad (6)$$

که در آن β ضرایب متغیرهای مستقل، β_0 عرض از مبدأ (Intercept)، P احتمال وقوع واقعه (زمین لغزش) و مقدار آن از ۰ تا ۱ در تغییر است، و Z مدل لجیستیک خطی است که از $-\infty$ تا $+\infty$ در تغییر است.

رگرسیون لجیستیک (LR) از روش هایی است که در تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش بسیار استفاده شده است (پرادهان، ۲۰۱۱).

برای چنین آنالیزهایی منطقه مورد مطالعه به واحدهای کوچکی به نام سلول تقسیم می شود؛ بنابراین، با شبکه ای از سلول ها سروکار داریم. به هر کدام از این سلول ها یک کد ۰ و ۱ داده می شود، که به ترتیب بیانگر حضور یا غیاب

زمین لغزش است. در این روش تلاش بر این است که بهترین مدل منطبق و توصیف‌کننده ارتباط بین متغیر وابسته (که در اینجا حضور یا غیاب زمین لغزش است) و دسته‌ای از متغیرهای مستقل را پیدا کنیم.

مطالعات اندکی درباره ارزیابی منابع طبیعی، به‌ویژه احتمال وقوع زمین لغزش، به روش RELR صورت گرفته است (فون دن ایکهوست و همکاران، ۲۰۰۶؛ فون‌وال کهم و همکاران، ۲۰۰۸؛ بای و همکاران، ۲۰۱۱؛ گونز و وناکر، ۲۰۱۲). اخیراً، نشان داده‌اند که چنانچه تعداد ۱ها (حضور زمین لغزش) چند ده یا هزار برابر کوچک‌تر از تعداد ۰ها (غیاب زمین لغزش) باشد (کینگ و ژنگ، ۲۰۰۱)، رگرسیون لجیستیک عادی (LR) به‌طور واضحی میزان احتمال را کمتر از حد واقعی برآورد می‌کند. این خطای تخمین زمانی شدیدتر متأثر می‌شود که مساحت کل ناحیه مورد بررسی خیلی بیش از ناحیه متأثر از زمین لغزش باشد. برای رفع این مشکل در رگرسیون لجیستیک عادی (LR) تصحیحاتی پیشنهاد شد و مدل حاصل را مدل رگرسیون لجیستیک نادر وقوع (RELR) نامگذاری کردند. علت این نامگذاری توصیف متغیر دوگانه (وقوع، عدم وقوع) است که با کسری ده‌ها تا هزاران برابر، ۱ کوچک‌تر از ۰ معرفی شده است (کینگ و ژنگ، ۲۰۰۱؛ بای و همکاران، ۲۰۱۱). هر چه تفاوت در اندازه نمونه بیشتر می‌شود، تخمین نیز کمتر برآورد می‌شود (کینگ و ژنگ، ۲۰۰۱، فون دن ایکهوست و همکاران، ۲۰۰۶). زمین لغزش‌ها در مناطقی مانند محدوده مورد مطالعه را می‌توان به‌صورت نادر در نظر گرفت، چرا که وسعت آن‌ها (۰/۳ کیلومتر مربع) نسبت به کل منطقه (۴۰۶۰ کیلومتر مربع) ناچیز است که آن را می‌توان نماینده نقاط بدون زمین لغزش در نظر گرفت. به همین دلیل، در این مطالعه نیز از روش RELR در تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش استفاده شد. برای تبدیل مدل LR به RELR نیاز به تصحیحات زیر است (کینگ و ژنگ، ۲۰۰۱):

۱. تصحیح انتخاب نمونه نماینده. تعداد سلول‌های بدون زمین لغزش، معمولاً از یک تا پنج برابر بیش از سلول‌های دارای زمین لغزش انتخاب می‌شود (فون دن ایکهوست و همکاران، ۲۰۰۶؛ بای و همکاران، ۲۰۱۱). در این مطالعه تعداد ۸۹۰ سلول بدون زمین لغزش در مقابل ۱۷۸ سلول دارای زمین لغزش با نمونه‌برداری تصادفی انتخاب و با هم ترکیب شد (۱۰۶۸ سلول) و متغیر دوگانه و بیانگر وجود یا عدم وجود زمین لغزش ایجاد شد (شکل ۱۸). معمولاً پیشنهاد می‌شود از میان کل نقاط ۲۰ درصد به‌صورت تصادفی برای صحت‌سنجی نتایج انتخاب شود (بای و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین، داده‌های موجود به دو دسته واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم می‌شود. مجموعه داده‌های مرحله واسنجی در این مطالعه شامل ۱۴۲ سلول زمین لغزش و ۷۱۲ سلول بدون زمین لغزش و برای صحت‌سنجی شامل ۳۶ سلول زمین لغزش و ۱۷۸ سلول بدون زمین لغزش به‌طور تصادفی انتخاب شد.

۲. تصحیح پیشین^۲. براساس معادله (۱۰) و با توجه به تعداد ۱ها در کل مجموعه (T)، و تعداد یک‌ها در نمونه (\bar{y}) تخمین برآوردشده را تصحیح می‌کنیم. در واقع، تصحیح دوم، تصحیح مقدار عرض از مبدأ مدل (β_0) است (کینگ و ژنگ، ۲۰۰۱؛ معادله ۷).

$$\bar{\beta}_0 = \beta_0 - \ln\left[\left(\frac{1-T}{T}\right)\left(\frac{\bar{y}}{1-\bar{y}}\right)\right] \quad (7)$$

که در آن β_0 عرض از مبدأ تصحیح شده است.

۳. تصحیح احتمال، پس از استفاده از عرض از مبدأ تصحیح شده، محاسبه احتمال با تخمین کمتر از واقعیت^۳ برآورد می‌شود (بای و همکاران، ۲۰۱۱). با جمع کردن فاکتور تصحیح P_i با C_i ، احتمال تصحیح شده با معادله (۸) به دست می‌آید (فون دن ایکهوست و همکاران، ۲۰۰۶؛ بای و همکاران، ۲۰۱۱).

$$P = P_i + C_i \quad (8)$$

که در آن C_i فاکتور تصحیح است و از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (کینگ و ژنگ، ۲۰۰۱).

$$C_i = (0.5 - P_i) P_i (1 - P_i) X V(\beta) X' \quad (9)$$

که در آن C_i فاکتور تصحیح، X ماتریس داده‌ها، $V(\beta)$ ماتریس واریانس-کواریانس، X' ترانزپوز ماتریس است.

1. representative sample
2. prior correction
3. underestimation

ماتریس واریانس-کواریانس ماتریس مربعی است و تعداد درایه‌های آن بستگی به تعداد متغیرهای موجود در مدل دارد. برای مثال، در این مطالعه این ماتریس نخست ماتریسی 17×17 بود.

بحث

با توجه به عوامل مؤثر در رخداد پدیده زمین لغزش، نقشه‌های موضوعی از این عوامل تهیه شد که به اختصار در ادامه بررسی می‌کنیم.

نقشه زمین لغزش‌های فعلی. در این نقشه موقعیت، نوع و زمان وقوع زمین لغزش‌ها نمایش داده می‌شود (شکل ۱). نخستین گام در ارزیابی‌های حساسیت به زمین لغزش داشتن اطلاعاتی از زمین لغزش‌هایی است که تاکنون به وقوع پیوسته است، چرا که مبنای تصمیم‌گیری بعدی همین موقعیت زمین لغزش‌هاست. از این رو، موقعیت مکانی آن‌ها اهمیت زیادی دارد. زمین لغزش‌های محدوده مورد مطالعه شامل ۱۵۵ است که سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور (۱۵۵ نقطه) شناسایی کرده است. به علاوه، تعدادی زمین لغزش دیگر با تفسیر عکس‌های ماهواره‌ای (۲۳ نقطه) مشخص شده است (شکل ۱).

زمین‌شناسی منطقه. لیتولوژی منطقه عمدتاً از آهک‌ها تا آهک‌های مارنی کرتاسه (گروه خامی و گروه بنگستان) تا ترشیاری (آسماری)، مارن و مارن‌های آهکی کرتاسه-ترشیاری (پایده-گورپی)، ماسه‌سنگ ترشیاری (آغاجاری)، کنگلومرای ترشیاری (بختیاری)، گچ و گچ‌های مارنی ترشیاری (گچساران) و آبرفت‌های عهد حاضر تشکیل شده است (شکل ۱).

شیب منطقه. شیب نرخ تغییر در ارتفاع را نشان می‌دهد (کروسبی، ۲۰۰۶) و معمولاً به صورت درصد یا بر حسب درجه بیان می‌شود. به طور کلی، پایداری شیب به ویژگی‌های مواد از قبیل زاویه اصطکاک و چسبندگی مربوط می‌شود (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲). نقشه شیب از روی DEM منطقه با قدرت تفکیک ۳۰ متر تهیه شد (شکل ۳). مقدار شیب منطقه از ۰ تا ۸۲ در نوسان است.

جهت شیب منطقه. جهت شیب یا جهت حداکثر شیب منطقه در نه طبقه کلاس‌بندی شد (شکل ۴). جهت شیب یکی از پارامترهای مهم در تهیه نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش است. به طور فیزیکی، جهت شیب با پارامترهایی از قبیل راستای ناپیوستگی‌های کنترل‌کننده زمین لغزش، بارش، اثر باد، و جهت تابش خورشید در ارتباط است (ارکانوگلو و همکاران، ۲۰۰۴).

ارتفاع منطقه. ارتفاع از دیگر پارامترهایی است که در تهیه نقشه‌های حساسیت بسیار استفاده می‌شود (فون دن ایکهوست و همکاران، ۲۰۰۶؛ بای و همکاران، ۲۰۱۱؛ دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲؛ تترا و همکاران، ۲۰۱۳). تأثیر ارتفاع در وقوع زمین لغزش را می‌توان در انرژی پتانسیل ذره جستجو کرد که هر چه ارتفاع زیادتر می‌شود، این انرژی و به عبارت دیگر ناپایداری بیشتر می‌شود. در منطقه مورد مطالعه ارتفاع منطقه از ۲۸۰ متر تا ۳۵۹۴ متر در تغییر است.

انحنای افقی^۱. محل تقاطع صفحه تخت افقی با سطح خطی را به دست می‌دهد که انحنای آن بیانگر میزان انحنای افقی سطح مذکور خواهد بود. انحنای افقی یا انحنای خطوط تراز ارتفاعی در میزان محتوای رطوبتی خاک و همگرایی/واگرایی جریان آب جاری شده بر سطح نقش دارد (کروسبی، ۲۰۰۶؛ مر و همکاران، ۱۹۹۱). چنانچه سطحی در راستای افق مقعر باشد، میزان انحنای سطحی آن منفی و چنانچه محدب باشد، انحنای سطحی آن مثبت خواهد بود. هر چه میزان انحنای سطحی منفی تر باشد، میزان رطوبت خاک بیشتری در خاک ذخیره خواهد شد و احتمال رخداد زمین لغزش بیشتر خواهد شد. میزان انحنای سطحی در منطقه از $21/5$ تا $20/4$ درصد در تغییر است (شکل ۵).

انحنای نیمرخ^۲. محل تقاطع صفحه تخت قائم با راستای حداکثر شیب و سطح خطی را به دست می‌دهد که انحنای آن بیانگر انحنای نیمرخ سطح مذکور خواهد بود. انحنای نیمرخ در افزایش سرعت جریان، نرخ رسوب و فرسایش نقش دارد (کروسبی، ۲۰۰۶؛ مر و همکاران، ۱۹۹۱). چنانچه سطحی در راستای حداکثر شیب مقعر باشد، میزان انحنای

1. plan curvature
2. profile curvature

نیمرخ آن منفی و چنانچه محدب باشد، انحناى نیمرخ آن مثبت خواهد بود. هر چه انحناى نیمرخ مثبت‌تر باشد، میزان فرسایش و ناپایداری دامنه بیشتر و احتمال رخداد زمین‌لغزش بیشتر می‌شود. میزان انحناى سطحی در منطقه از ۲۶/۷- تا ۳۴/۳+ درصد در تغییر است (شکل ۶).

انحنای مماسی^۱. محل تقاطع صفحه تخت مماس بر هر نقطه از یک سطح میزان انحناى مماسی آن سطح خواهد بود. همانند پارامترهای انحناى افقی و نیمرخ، اگر سطح مقعر باشد، میزان انحناى مماسی آن منفی و چنانچه محدب باشد، انحناى مماسی آن مثبت خواهد بود. این پارامتر در همگرایی و واگرایی موضعی جریان آب جاری شده بر سطح نقش دارد (کروسبی، ۲۰۰۶؛ مر و همکاران، ۱۹۹۱). هر چه این پارامتر مثبت‌تر باشد، مقدار جریان واگراتر و احتمال وقوع زمین‌لغزش بیشتر می‌شود. میزان انحناى سطحی در منطقه از ۳۰/۷- تا ۲۹/۱+ درصد در تغییر است (شکل ۷).

کاربری اراضی^۲. نوع کاربری زمین نقش مهمی در پایداری شیب دامنه‌ها دارد. برای مثال، در مناطق با کاربری شهری نسبت به جنگل، روناب به نسبت بسیار کمتری نفوذ می‌کند. بنابراین، احتمال لغزش آن کمتر است. در محدوده مورد مطالعه کاربری زمین با توجه به نقشه کاربری اراضی سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور به مرتع، جنگل، توده‌های آبی، شهری و مناطق سنگی به ترتیب با درصد مساحت ۵۴/۰۵، ۲۶/۲۶، ۱۷/۵۴، ۱/۴۴، ۰/۴۵ و ۰/۲۶ بخش‌بندی شده است (شکل ۸).

پوشش گیاهی^۳. با استفاده از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)^۴ از روی تصاویر ماهواره‌ای لندست با گذر و ردیف ۳۸-۱۶۴ و ۳۸-۱۶۵ شدت پوشش گیاهی در منطقه تهیه شد (شکل ۹). مقدار این شاخص که از نسبت تفاضل باند مادون قرمز نزدیک و قرمز به مجموع آن‌ها محاسبه می‌شود، از عدد ۱- برای نواحی عاری از پوشش گیاهی تا ۱+ برای نواحی کاملاً پوشیده از گیاه در تغییر است. هر چه پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد میزان جذب رطوبت و در نتیجه ناپایداری زیاد می‌شود. از طرف دیگر، پوشش گیاهی به دلیل وجود ریشه‌های آن در خاک، سبب پایداری نسبی بیشتر خواهد شد. در منطقه مورد مطالعه مقدار شاخص پوشش گیاهی نرمال شده در طیفی از ۰/۴۶- تا ۰/۸۶+ در تغییر است. شدت پوشش گیاهی در میزان رطوبت خاک مؤثر است. بنابراین، نقش مهمی در رخداد زمین‌لغزش ایفا می‌کند.

فاصله از گسل. برای تهیه این لایه نخست، از روی نقشه‌های زمین‌شناسی، گسل‌های منطقه رقومی شد. در مرحله بعد، فاصله از آن با تابعی خطی تا شعاع ۸۰۰ متری درون‌یابی شد (شکل ۱۰). در اینجا فرض شده است که در فواصل بیش از ۸۰۰ گسل و شکستگی نقشی در وقوع زمین‌لغزش ندارد.

فاصله از خطوط ارتباطی. جاده‌های احداث شده روی شیب دامنه‌ها سبب از بین رفتن پیوستگی طبیعی و بنابراین ناپایداری دامنه و رخداد زمین‌لغزش می‌شود. قطعه‌ای از جاده به صورت مانع، محل فرورفتن آب یا چارچوبی برای جریان آب است و سبب افزایش ناپایداری می‌شود (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲). برای تهیه این لایه، نخست از روی نقشه‌های توپوگرافی، خطوط جاده‌ای استخراج و در مرحله بعد فاصله از آن با تابع خطی تا شعاع ۵۰۰ متری درون‌یابی شد (شکل ۱۱).

فاصله از مناطق مسکونی. ساخت‌وساز روی دامنه‌ها سبب ایجاد ناپایداری و زمین‌لغزش می‌شود. لذا، انتظار می‌رود که در صورت که شرایط دیگر برای رخداد زمین‌لغزش مهیا باشد. عامل ساخت‌وساز سبب تشدید حساسیت به زمین‌لغزش خواهد شد. در منطقه مورد مطالعه این لایه با استفاده از نقاط جمعیتی تهیه و در هشت کلاس طبقه‌بندی شده است (شکل ۱۲).

فاصله از شبکه زهکشی. رودخانه‌ها و شبکه آبراهه نقش مهمی در ایجاد زمین‌لغزش دارد. نزدیکی به شبکه زهکشی سبب تشدید رخداد زمین‌لغزش می‌شود. شبکه زهکشی یا رودخانه بر اثر فرسایش شیب و افزایش درجه اشباع خاک پتانسیل سبب ناپایداری در شیب‌ها و وقوع زمین‌لغزش می‌شود (گوکولو و اکسوی، ۱۹۹۶). در محدوده مورد مطالعه این لایه با استفاده از شبکه آبراهه نقشه‌های توپوگرافی استخراج و در هفت کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۱۳).

1. tangential curvature
2. landuse
3. vegetation cover
4. normalized difference vegetation index

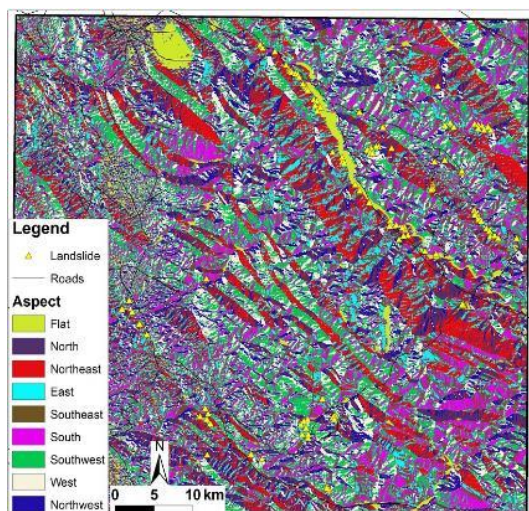
بارش. برای تهیه نقشه بارش منطقه آمار ۳۰ ساله گردآوری شد. سپس، رابطه بین متوسط سالانه بارندگی (P) بر حسب میلی متر) و ارتفاع (H بر حسب متر) منطقه مشخص شد (معادله ۱۰). سپس، با استفاده از این رابطه و نقشه توپوگرافی منطقه، لایه بارش تهیه شد (شکل ۱۴). با توجه به شکل، حداکثر میزان بارش ۹۰۰ میلی متر و حداقل آن ۴۰۰ میلی متر است.

$$P=290.5 \ln(H) + 1350.4, \quad R^2 = 0.89 \quad (10)$$

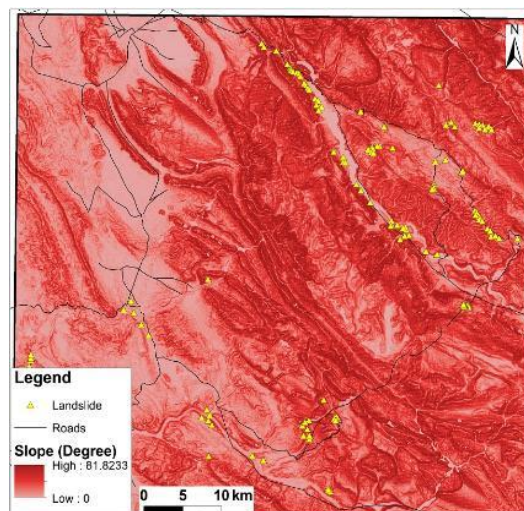
اندیس رطوبت توپوگرافی (TWI)^۱. برای کمی کردن اثر توپوگرافی بر فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده می شود (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲؛ مر و همکاران، ۱۹۹۱). مقدار این پارامتر از رابطه (۱۱) محاسبه می شود (کروسبی، ۲۰۰۶).

$$TWI=\ln(A_s/tg\beta) \quad (11)$$

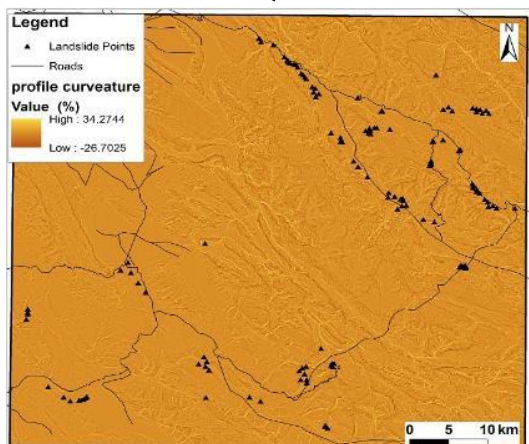
که در آن A_s مساحت بالادست شیب (Specific Catchment Area) که به یک نقطه زهکش می شود (m^2) و β زاویه شیب در آن نقطه (Rad) است. این پارامتر زون های اشباع را برآورد می کند و مقادیر بالای آن بیانگر تمرکز آب است (کروسبی، ۲۰۰۶). مقادیر بالا و مثبت آن بیانگر تمرکز بیشتر آب و مقادیر منفی بیانگر عدم تمرکز آب در یک نقطه است. در منطقه مقدار این پارامتر از $-5/1$ تا $+13/35$ در تغییر است (شکل ۱۵).



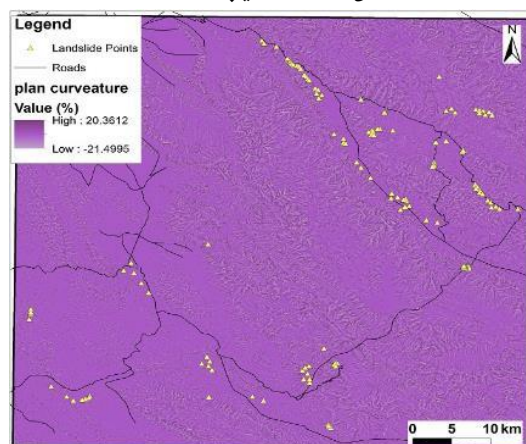
شکل ۴. نقشه جهت شیب منطقه



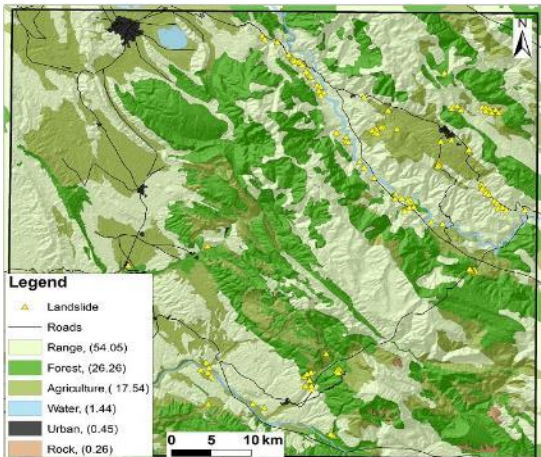
شکل ۳. نقشه شیب منطقه



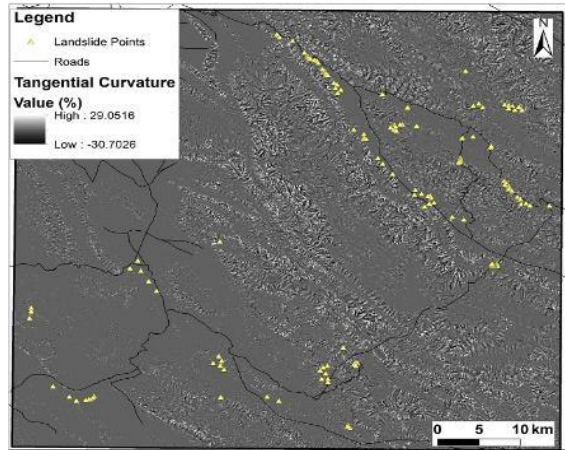
شکل ۶. انحنای نیمرخ در محدوده مورد مطالعه



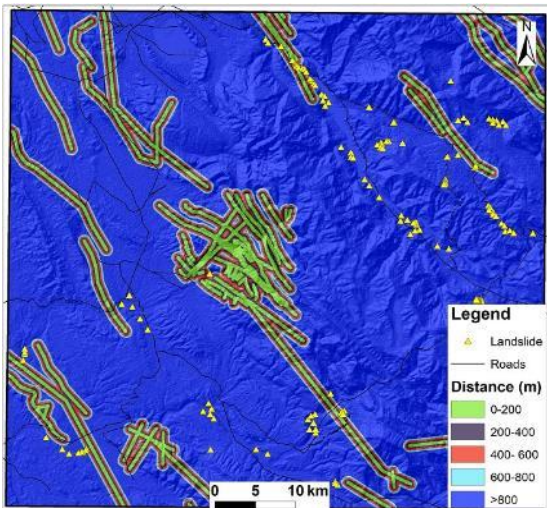
شکل ۵. انحنای سطحی در منطقه



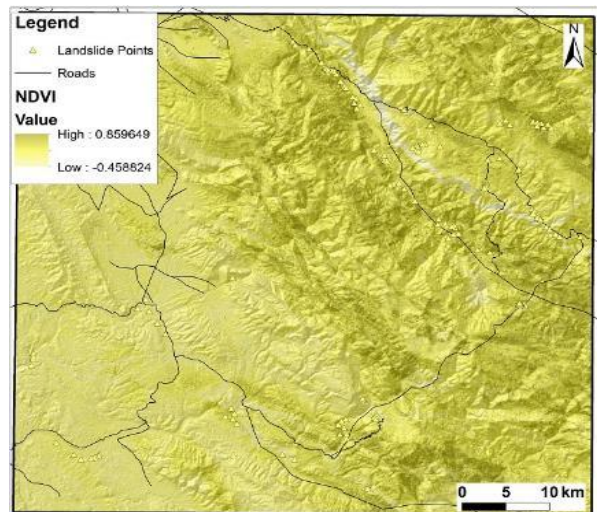
شکل ۸. کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه



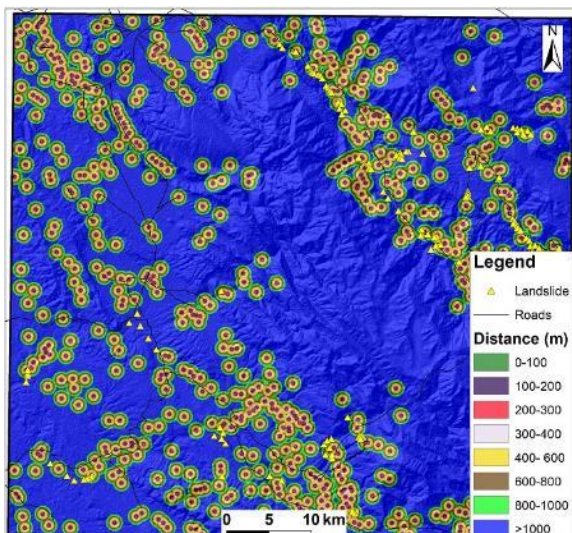
شکل ۷. انحنای مماسی در محدوده مورد مطالعه



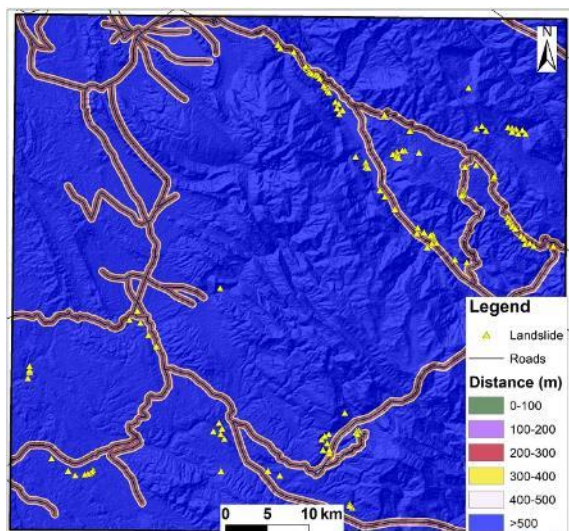
شکل ۱۰. لایه فاصله از گسل‌های منطقه



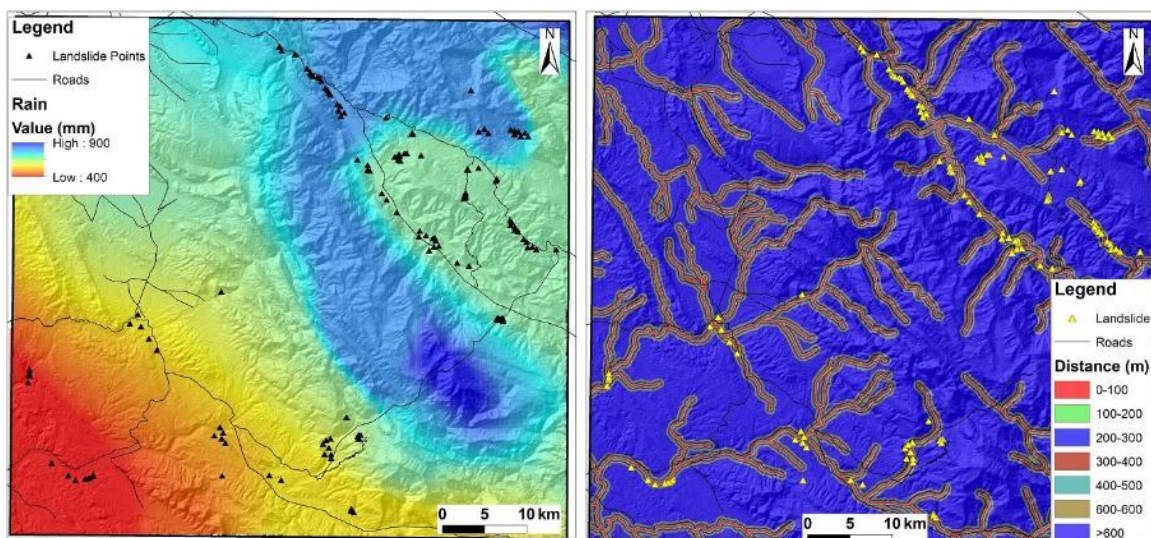
شکل ۹. نقشه پوشش گیاهی در منطقه



شکل ۱۲. لایه فاصله از مناطق مسکونی



شکل ۱۱. فاصله از خطوط ارتباطی



شکل ۱۴. نقشه پراکنده‌گی بارش در محدوده مورد مطالعه

شکل ۱۳. لایه فاصله از شبکه زهکشی

اندیس انتقال رسوب (STI)^۱ در بررسی فرایندهای فرسایش و رسوب استفاده می‌شود (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲؛ مر و بورش، ۱۹۸۶). مقدار این پارامتر از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (کروسبی، ۲۰۰۶).

$$STI = (A_s / 22.13)^{0.6} (\sin \beta / 0.0896)^{1.3} \quad (12)$$

که در آن A_s مساحت بالادست شیب که به یک نقطه زهکش می‌شود (m^2) و β زاویه شیب در آن نقطه (Rad) است.

این پارامتر نقاط مستعد فرسایش یا رسوب را برآورد می‌کند و مقادیر بالای آن بیانگر تمرکز آب و فرسایش است (کروسبی ۲۰۰۶). مقادیر بالای آن بیانگر فرسایش بیشتر با آب و مقادیر کم بیانگر عدم تمرکز آب و رسوبگذاری در یک نقطه است. مقدار این پارامتر در منطقه از ۰ تا ۲۰,۷۷۰ بر متر است (شکل ۱۶).

اندیس قدرت جریان (SPI)^۲ برای کمی کردن اثر توپوگرافی بر فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲؛ مر و همکاران، ۱۹۹۱). مقدار این پارامتر از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود (کروسبی، ۲۰۰۶).

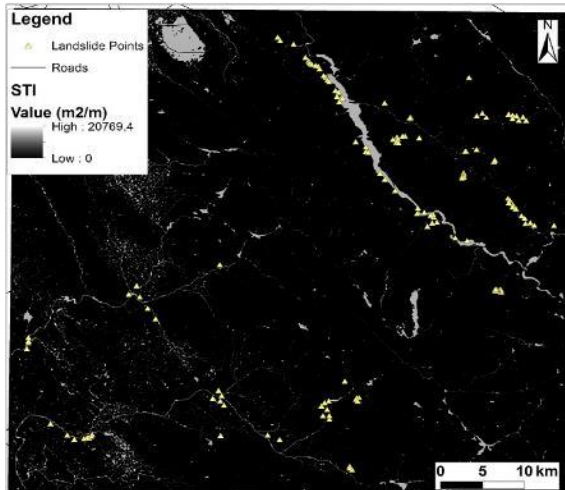
$$SPI = A_s * \tan \beta \quad (13)$$

که در آن A_s مساحت بالادست شیب که به یک نقطه زهکش می‌شود (m^2) و β زاویه شیب در آن نقطه (Rad) است.

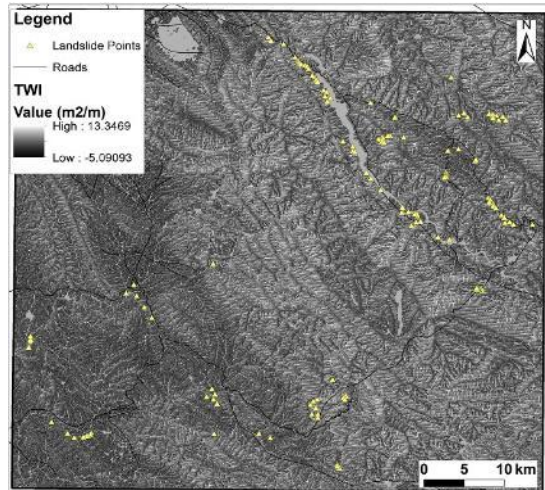
این پارامتر قدرت فرسایشی آب جاری را اندازه می‌گیرد. به عبارتی، فرسایش را در نواحی دارای تحدب نیمرخ و تقعر مماسی (زون‌های با همگرایی و سرعت بالای جریان) و رسوب را در نواحی دارای تقعر نیمرخ (زون‌های کاهنده سرعت جریان) برآورد می‌کند (کروسبی، ۲۰۰۶). هر چه مقدار این پارامتر مثبت‌تر باشد، همگرایی جریان و قدرت فرسایش بیشتر و سبب ناپایداری بیشتر می‌شود. میزان این پارامتر در منطقه از صفر تا ۶۲۵۸۸۲ بر متر در تغییر است (شکل ۱۷).

به طور کلی، سلول‌های مجاور سلول‌های زمین‌لغزش تمایل دارد که سلول‌های زمین‌لغزشی باشد و برعکس. لذا، سلول‌های زمین‌لغزش و بدون زمین‌لغزش معمولاً خودهمبستگی مکانی^۳ مثبت نشان می‌دهد (هاسمر و لیمشو، ۱۹۸۹). به منظور جلوگیری از خودهمبستگی مکانی، موقعیت هر زمین‌لغزش با یک سلول مشخص شد.

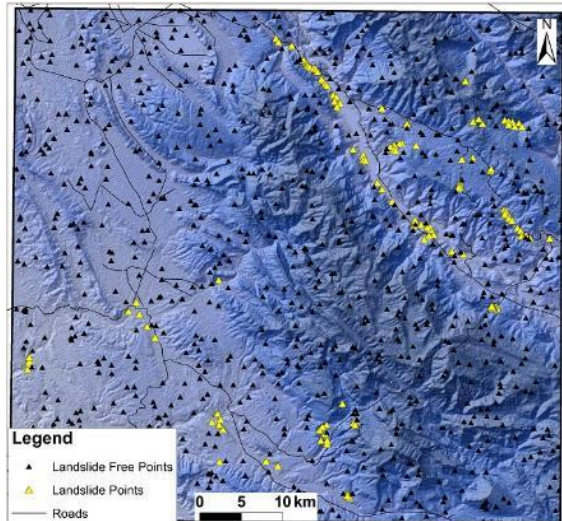
1. sediment transport capacity index
2. stream power index
3. spatial autocorrelation



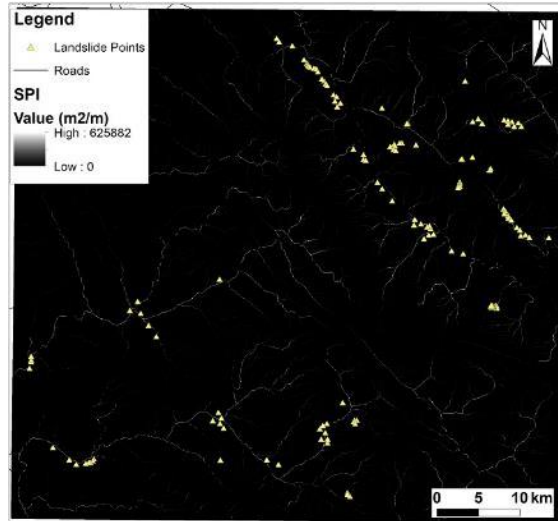
شکل ۱۶. پارامتر STI و تغییرات آن در سطح منطقه



شکل ۱۵. توزیع پارامتر اندیس رطوبتی توپوگرافیکی



شکل ۱۸. موقعیت نقاط زمین لغزش و بدون زمین لغزش



شکل ۱۷. اندیس SPI و توزیع آن در سطح منطقه

نکته دیگر، بحث برآزش مدل از طریق رگرسیون لجیستیک است که به هم‌راستایی^۱ میان متغیرهای مستقل حساسیت نشان می‌دهد، که هم‌راستایی چندگانه^۲ گفته می‌شود (هاسمر و لیمشو، ۱۹۸۹). برای نشان دادن میزان اثر هم‌راستایی چندگانه از دو اندیس فاکتور بیش‌بود واریانس (Variance inflation Factor, VIF) و دامنه تغییرات (Tolerance, TOL) استفاده می‌شود. TOL کوچک‌تر از ۰/۲ نشان‌دهنده وجود هم‌راستایی چندگانه میان متغیرهای مستقل است. در این مطالعه هر دو اندیس محاسبه شده (جدول ۱) و متغیرهای با $VIF > 2$ و $TOL < 0/4$ از آنالیزهای لجیستیک حذف شد (آلیسون، ۲۰۰۱). پس از آنالیزهای هم‌راستایی چندگانه و حذف متغیرهای وابسته با هم‌بستگی بالا از قبیل ارتفاع، بارش، SPI و فاصله از جاده، پایگاه داده نمونه‌ها ورودی الگوریتم LR در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. مقدار حساسیت ۰/۰۰۰۵ به دلیل سهم کوچک نواحی متأثر از زمین لغزش، مقدار حدی در نظر گرفته شد (بای و همکاران، ۲۰۱۱). در این مرحله لایه SPI حذف شد. جدول نهایی مربوط به پارامترهای تخمین زده شده، خطای استاندارد و مقادیر p در جدول ۲ آمده است.

1. collinearity
2. multicollinearity

جدول ۱. اندیس‌های هم‌راستایی چندگانه برای متغیرها

متغیر مستقل	دامن Z تغییرات	فاکتور بیشبود واریانس
بارش	۰/۴۴۰	۲/۲۷
شیب	۰/۷۰۳	۱/۴۲
اندیس قدرت جریان	۰/۸۵۴	۱/۱۷
اندیس انتقال رسوب	۰/۹۵۵	۱/۰۵
اندیس رطوبت توپوگرافی	۰/۶۷۹	۱/۴۷
پوشش گیاهی	۰/۷۴۶	۱/۳۴
انحنای افقی	۰/۶۰۱	۱/۶۶
انحنای نیمرخ	۰/۸۸۱	۱/۱۴
انحنای مماسی	۰/۶۵۷	۱/۵۲
فاصله از غسل	۰/۴۸۹	۲/۰۵
فاصله از شبکه زهکشی	۰/۸۳۱	۱/۲۰
فاصله از خطوط ارتباطی	۰/۴۵۱	۲/۲۲
فاصله از مناطق مسکونی	۰/۴۲۴	۲/۳۶
ارتفاع	۰/۲۳۵	۲/۲۵

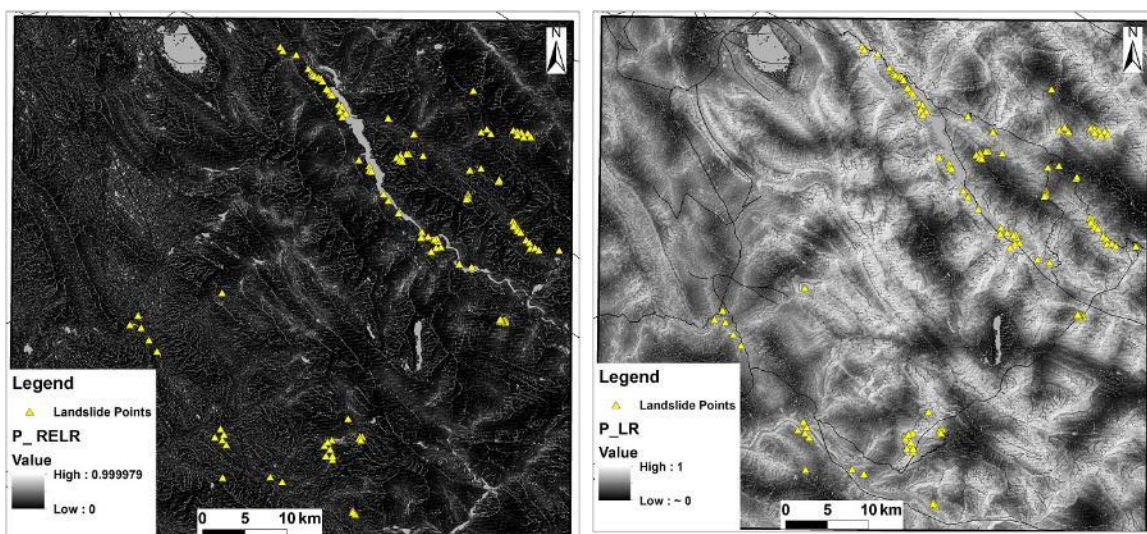
جدول ۲. ضرایب محاسبه‌شده و حاصل از مدل LR

ضریب	پارامتر
۰/۰۳۶	شیب
-۰/۰۰۵	اندیس قدرت جریان
۰/۱۷۸	اندیس رطوبت توپوگرافی
۱/۰۲۲	پوشش گیاهی
-۰/۶۱۲	انحنای افقی
۰/۲۶۷	انحنای نیمرخ
۱/۲۴۷	انحنای مماسی
-۰/۰۰۱	فاصله از شبکه زهکشی
۰/۶۴۰	ثابت

پس از محاسبه ضریب متغیرها با الگوریتم LR، نقشه پهنه‌بندی حساسیت به زمین لغزش به روش LR تهیه شد (شکل ۱۹). در نهایت، پس از اعمال تصحیح‌های سه‌گانه کیننگ و ژنگ (۲۰۰۱) بر مدل LR، نقشه پهنه‌بندی حساسیت به زمین لغزش به روش RELR برای منطقه تهیه شد (شکل ۲۰). لازم به ذکر است که اعمال تصحیح‌های شماره ۲ و ۳ پیشنهادی کیننگ و ژنگ (۲۰۰۱) روی مدل LR، در بسته زلیگ (کیننگ و ژنگ، ۲۰۰۱) از بسته‌های نرم‌افزاری R انجام می‌گیرد که در این مطالعه از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. نقشه تهیه‌شده به روش RELR به پنج طبقه (از حساسیت بسیار بالا تا بسیار پایین) مطابق با جدول ۳ (بای و همکاران، ۲۰۱۱) طبقه‌بندی شد. نتیجه آن در شکل ۲۱ آمده است. مقایسه ساده نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش و تهیه‌شده به روش LR و روش RELR نشان می‌دهد که در حالت دوم پهنه‌های با حساسیت بالای زمین لغزش بسیار محدودتر شده است.

جدول ۳. طبقه‌بندی نقشه (بای و همکاران، ۲۰۱۱) تهیه‌شده منطقه به روش RELR

تعداد سلول‌ها	درصد مساحت تحت پوشش هر کلاس	کلاس حساسیت	مقدار کلاس‌بندی شده جدید
۱۸۹۲۰۴۰	۴۹/۱۸	خیلی کم	۰/۰۰۰۲ - ۰/۰۰۰۰
۱۱۸۶۵۳۲	۳۰/۸۴	کم	۰/۰۰۰۵ - ۰/۰۰۰۲
۶۱۷۷۰۵	۱۶/۰۵	متوسط	۰/۰۰۱۲ - ۰/۰۰۰۵
۱۴۷۳۷۱	۳/۸۳	زیاد	۰/۰۰۵ - ۰/۰۰۱۲
۳۸۰۶	۰/۱۰	خیلی زیاد	۰/۹۹۹۹ - ۰/۰۰۵
۳۸۴۷۴۵۴	۱۰۰	کل	



شکل ۱۹. پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش به روش LR
شکل ۲۰. پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش به روش RELR

علت این موضوع در واقع، حاصل همان تصحیحات سه‌گانه بر مدل LR است. کمتر شدن میزان پهنه‌های حساسیت بالا با واقعیت مطابقت بیشتری دارد، چرا که زمین‌لغزش پدیده‌ای محلی است و معمولاً در وسعت پایین به نسبت وسعت‌های بزرگ بیشتر به‌وقوع می‌پیوندد. با توجه به نقشه طبقه‌بندی‌شده، ۳/۹ درصد منطقه در حساسیت‌های بالا و بسیار قرار می‌گیرد.

صحت‌سنجی نتایج

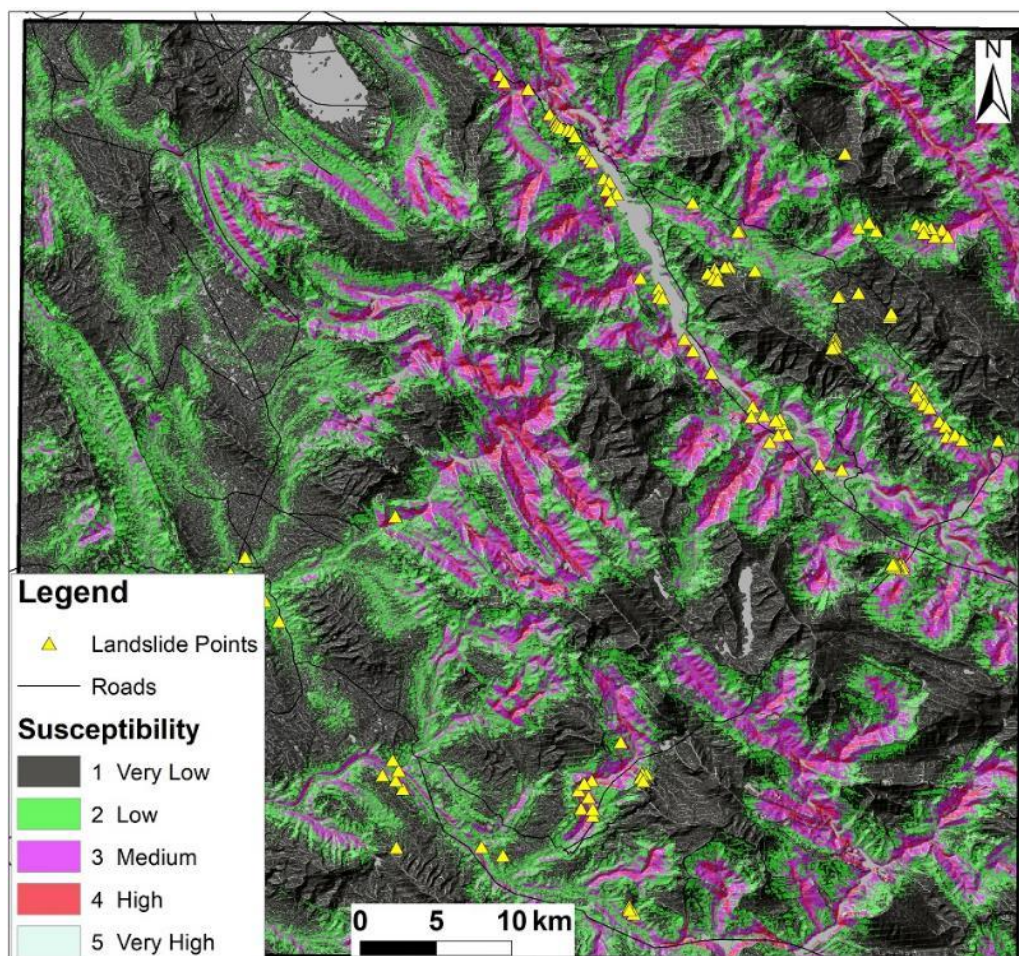
به‌منظور ارزیابی میزان صحت نقشه تهیه‌شده به روش RELR از اندیس R شوجاتا و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شد (معادله ۱۴).

$$R = \left[\frac{\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right)}{\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right)} \right] \times 100 \quad (14)$$

که در آن n_i تعداد زمین‌لغزش‌ها در کلاس حساسیت N_i و N_i مساحت اشغال‌شده با سلول‌های کلاس حساسیت N_i است.

مطابق با رابطه (۱۴) انتظار داریم که افزایش اندیس R حساسیت با افزایش هم‌گام باشد (جدول ۴). لازم به ذکر است که دو قاعده مهم در نقشه حساسیت به زمین‌لغزش عبارت است از (۱) تعداد زمین‌لغزش‌هایی که در کلاس‌های بالایی حساسیت واقع می‌شود باید بالا باشد، (۲) کلاس‌های با حساسیت بالا باید مساحت‌های کوچکی را پوشش دهد (دومن و همکاران، ۲۰۰۶؛ کان و همکاران، ۲۰۰۵؛ شوجاتا و همکاران، ۲۰۱۲). با انتخاب مقدار حدی ۰/۰۰۰۵ (بای و همکاران، ۲۰۱۱) قاعده یک مورد پوشش واقع شد و همان‌طور که در شکل ۲۱ ملاحظه می‌شود، بیشتر زمین‌لغزش‌های تاریخی روی مناطق با حساسیت بالا قرار گرفته است که صحت قابل قبول مدل را نشان می‌دهد. همچنین، با توجه به شکل ۲۱ و جدول ۴ ملاحظه می‌شود که قاعده دوم هم حاصل آمده و زمین‌لغزش‌ها نواحی بسیار کوچکی را دربر گرفته است.

خطاهای احتمالی مدل ناشی از عدم‌دقت کافی داده‌های ورودی به آن است. برای مثال، کوچک بودن مقیاس نقشه‌ها عامل مهمی در ایجاد خطاست؛ یا، برای مثال، در مورد بارش از میانگین سالانه استفاده شده است، در صورتی که باید رخداد هر واقعه بارندگی به‌طور مجزا در وقوع پدیده زمین‌لغزش بررسی شود. در ارتباط با نقشه‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی نیز وضعیت به‌همین صورت است و با مشکل مقیاس زمانی مناسب برای اندازه‌گیری داده مواجهیم.



شکل ۲۱. طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی حساسیت به زمین لغزش به روش RELR

جدول ۴. محاسبه اندیس R در نقشه حساسیت به زمین لغزش

اندریس R	تعداد زمین لغزش‌ها	مساحت (مترمربع)	تعداد سلول‌ها	کلاس حساسیت
۰/۲۳۱۲	۳۰	۱۵۶۲۰۴۲۴۶۱	۱۸۹۲۰۴۰	خیلی کم
۰/۶۲۶۸	۵۱	۹۷۹۵۸۴۶۶۳	۱۱۸۶۵۳۲	کم
۱/۱۸۰۴	۵۰	۵۰۹۹۶۸۸۳۷	۶۱۷۷۰۵	متوسط
۲/۱۷۶۹	۲۲	۱۲۱۶۶۷۴۹۱	۱۴۷۳۷۱	زیاد
۹۵/۷۵۸۰	۲۵	۳۸۴۷۴۵۴	۳۸۰۶	خیلی زیاد
۱۰۰/۰۰۰۰	۱۷۸	۳۱۷۶۴۰۵۶۳۴	۳۸۴۷۴۵۴	کل

نتیجه‌گیری

نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش پایه ارزیابی‌های مربوط به ریسک است. بنابراین، نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش در مدیریت بحران و توسعه یک ناحیه حیاتی است. روش‌های کمی و کیفی بر پایه GIS فراوانی وجود دارد که برای آنالیز ارتباط بین زمین لغزش‌ها و عوامل طبیعی مفید است. در این مطالعه برای تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش از مدل روش رگرسیون لجیستیک نادر وقوع (RELR) بر پایه GIS استفاده شد. واقعیت اینکه محدوده وقوع زمین لغزش‌ها نسبت به مساحت منطقه مورد بررسی بسیار کوچک است و به صورت نقطه‌ای تلقی می‌شود، روش RELR در تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش، دقت نقشه را تا حد زیادی افزایش می‌دهد و تطابق مطلوبی را با رخداد‌های تاریخی ایجاد می‌کند. برای نشان دادن میزان اثر هم‌راستایی چندگانه در حذف لایه‌هایی که کاربرد آن‌ها در تهیه نقشه نهایی باعث

تأثیر مضاعف می‌شود از دو اندیس VIF و TOL استفاده و لایه‌های ارتفاع، بارش، SPI و فاصله از جاده از مجموع لایه‌های ۱۷ گانه پیشنهادی اولیه حذف شد. در نهایت، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه تعیین شد، شامل شیب، فاصله از شبکه زهکشی، اندیس انتقال رسوب جریان (STI)، اندیس رطوبت توپوگرافیکی (TWI)، اندیس NDVI، انحنا سطحی، پروفایل و مماسی. ارزیابی نقشه کلاس‌بندی شده حساسیت به زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه با استفاده از اندیس R نشان داد که تنها ۰/۱ درصد از وسعت کل منطقه دارای حساسیت بسیار بالا به زمین‌لغزش است و این نقاط با واقعیت‌های تاریخی رخداد زمین‌لغزش در منطقه تطابق خوبی دارد.

منابع

- Aleotti, P. and Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Environ*, 58: 21-44.
- Allison, P.D. (2001). *Logistic regression using the SAS system: theory and application*. Wiley Interscience, New York, 288 p.
- Ayalew, L. and Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65: 15-31.
- Baeza, C. and Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surf Proc Land*, 26: 1251-1263.
- Bai, Sh.; Guonian Lu, G.; Wang, J.; Zhou, P. and Ding, L. (2011). GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. *Environ Earth Sci.*, 62: 139-149.
- Binaghi, E.; Luzi, L.; Madella, P.; Pergalani, F. and Rampini, A. (1998). Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches. *Nat Hazards*, 17: 77-97.
- Brenning, A. (2005). Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 853-862.
- Can, T.; Nefeslioglu, H.A.; Gokceoglu, C.; Sonmez, H. and Duman, T.Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earth flows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, 72: 250-271.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. in: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Acad. Publ, Dordrecht: 135-176.
- Crosby, D.A. (2006). The effect of DEM resolution on the computation of hydrologically significant topographic attributes. M.S. Thesis Arts, Department of Geography, College of Arts and Sciences, University of South Florida, 135 p.
- Devkota, C.K.; Regmi, D.A.; Pourghasemi, R.H.; Yoshida, K.B.; Pradhan Ryu, C.I.; Dhital, R.M. and Althuwaynee, F.O. (2012). Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Journal of Nat Hazards*.
- Duman, T.Y.; Can, T.; Gokceoglu, C.; Nefeslioglu, H.A. and Sonmez, H. (2006). Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environ. Geol.*, 51: 241-256.
- Ercanoglu, M. and Gokceoglu, C. (2004). Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Eng Geol*, 75: 229-250.
- Ercanoglu, M.; Gokceoglu, C. and van Asch, T.W.J. (2004). Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. *Nat Hazards*, 32: 1-23.
- Felicísimo, A.; Cuartero, A.; Remondo, J. and Quirós, E. (2012). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*.
- Gokceoglu, C. and Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*. 44 (4): 147-161.
- Gould, S.J. (1965). Is uniformitarianism necessary? *American Journal of Science*, 263: 223-228.
- Guns, M. and Vanacker, V. (2012). Logistic regression applied to natural hazards: rare event logistic regression with replications. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12: 1937-1947.
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M. and Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy. *Geomorphology*, 31: 181-216.
- Hosmer, D.W. and Lemeshow, S. (1989). *Applied regression analysis*. Wiley, New York, 307 p.
- King, G. and Zeng L. (2001). Logistic regression in rare events data. *Political Analysis*, 9(2): 137-163.
- Lee, S. (2004). Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management*, 34(2): 223-232.
- Moore, D.I. and Burch, G.J. (1986). Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Resources Research*, 22(8).
- Moore, I.D.; Grayson, R.B. and Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Process*, 5: 3-30.
- Netra, R.; Regmi, I.; John, R.; Giardino, I.; Eric, V.; McDonald, I. and Vitek, D. (2013). A comparison of logistic regression-based models of susceptibility to landslides in western Colorado, USA. *Journal of Landslides*. doi: 10.1007/s10346-012-0380-2.
- Pourghasemi, H.R.; Moradi, H.R. and Fatemi Aghda, S.M. (2013). Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their

- performances. *Journal of Nat Hazards*. doi: 10.1007/s11069-013-0728-5.
- Pradhan, B. (2011). Manifestation of an advanced fuzzy logic model coupled with geo-information techniques to landslide susceptibility mapping and their comparison with logistic regression modeling. *Environ Ecol Stat.*, doi: 10.1007/s10651-010-0147-7.
- Pradhan, B. (2010). Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 38: 301-320.
- Pradhan, B. and Lee, S. (2010a). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environ Earth Sci.*, 60: 1037-1054.
- Pradhan, B. and Lee, S. (2010b). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling. *Environ Modell Softw.*, 25(6): 747-759.
- Pradhan, B. and Lee, S. (2010c). Regional landslide susceptibility analysis using back propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia. *Landslides*, 7(1): 13-30.
- Pradhan, B. and Lee, S. (2009). Landslide risk analysis using artificial neural network model focusing on different training sites. *Int J Phys Sci.*, 3(11): 1-15.
- Soeters, R. and Van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition analysis and zonation. In: Turner KT, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board National Research Council, Special Report, Washington, DC: 129-177.
- Sujatha, E.R.; Rajamanickam, G.V. and Kumarav, P. (2012). Landslide susceptibility analysis using Probabilistic Certainty Factor Approach: A case study on Tevankarai stream watershed, India. *J. Earth Syst. Sci.*, 121(5): 1337-1350.
- Van Den Eeckhaut, M.; Vanwalleghe, T.; Poesen, J.; Govers, G.; Verstraeten, G. and Vandekerckhove, L. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76: 392-410.
- Vanwalleghe, T.; Van Den Eeckhaut, M.; Poesen, J.; Govers, G. and Deckers, J. (2008). Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest: Application of rare event logistic regression. *Geomorphology*, 95: 504-517.
- Van Westen, C.J.; Seijmonsbergen, A.C. and Mantovani, F. (1999). Comparing landslide hazard maps. *Nat Hazards*.
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers & Geosciences*, 35: 1125-1138.
- Zêzere, J.L. (2002). Landslide susceptibility assessment considering landslide typology, a case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2: 73-82.