

## ارزیابی و پیش‌بینی مکانی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری فاکتور قطعیت و رگرسیون

### لجستیک (منطقه مطالعاتی: جاده مواصلاتی خلخال - سرچم)

فربیا اسفندیاری\* - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی  
مسعود رحیمی - دانش آموخته دکترای ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز  
منصور خیری زاده - دانش آموخته دکترای ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۱      تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹

#### چکیده

پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش از جمله اقدامات اساسی در جهت مقابله و کاهش اثرات وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. مناطق واقع در پیرامون جاده خلخال - سرچم از جمله مناطقی از استان اردبیل هستند که در معرض مخاطرات زمین‌لغزش می‌باشند. در این پژوهش، خطر وقوع زمین‌لغزش در این مناطق ارزیابی شده و به پهنه‌بندی و پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه پرداخته می‌شود. داده‌های مورد نیاز از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰، تصاویر مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و Sentinel2 و مطالعات میدانی حاصل گردید. برای پیش‌بینی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از مدل‌های آماری رگرسیون لجستیک و احتمالاتی فاکتور قطعیت استفاده شد. نتایج، نشان‌دهنده کارایی زیاد این مدل‌های کمی در پیش‌بینی مکانی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در حدود ۲۳ درصد از کل منطقه مورد مطالعه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرد. بخشی از جاده ارتباطی خلخال - سرچم به طول تقریبی ۲۳ کیلومتر در پهنه‌های با خطر زیاد و بسیار زیاد احداث شده است. این جاده علاوه بر آسیب‌پذیر بودن در مقابل مخاطره زمین‌لغزش، به عنوان یک متغیر محرک باعث افزایش ناپایداری نیز شده است. در مقیاس کلی، زمین‌لغزش‌های منطقه توسط متغیر لیتولوژی کنترل می‌شوند. اکثر زمین‌لغزش‌ها بر روی دو واحد سنگ‌شناسی «تراکی بازالت - تراکی آندزیت» و «توف سنگی - برش آتشفشانی - لاهار» رخ داده‌اند. در مقیاس محلی، چندین متغیر دیگر بر توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها موثر بوده‌اند. متغیرهای شیب، جهت شیب، ارتفاع، دوری و نزدیکی به آبراهه‌های منطقه و مجاورت با جاده‌ها از جمله این متغیرهای مهم می‌باشند.

واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، رگرسیون لجستیک، فاکتور قطعیت، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، جاده خلخال - سرچم.

## مقدمه

در نوشته‌های علمی نام‌های مختلفی برای فرایند فرسایشی<sup>۱</sup> که توسط آن خاک یا سنگ در امتداد دامنه، عمدتاً از طریق نیروی ثقل جابجا می‌شود بکار رفته است. متداول‌ترین آنها «حرکت توده‌ای» است که بیانگر حرکت توده‌ای از خاک یا سنگ است. حرکت دامنه‌ای احتمالاً اصطلاح مناسب‌تری می‌باشد چرا که بعضی از روانه‌های توده‌ای ممکن است در زمین‌های کاملاً هموار هم اتفاق بیفتند. اما اصطلاح زمین لغزش کاربرد بیشتری دارد و در منابع امروزی این کلمه مترادف تمامی حرکات دامنه‌ای است. اگرچه لغزش از دید تخصصی بیانگر نوع خاصی از حرکت دامنه‌ای می‌باشد. در برخی از مواقع به نظر می‌رسد که زمین لغزش اصطلاح نامناسبی می‌باشد به این دلیل که بسیاری از انواع حرکات دامنه‌ای، شامل لغزش نمی‌شوند و اصطلاح توده‌ای<sup>۲</sup> ژئومورفولوژیست‌ها نیز اصلاحی جزئی می‌باشد. در حالت کلی، اصطلاح لغزش به معنی حرکت توده سنگ، آوار یا خاک به طرف پایین دامنه است (کرودن، ۱۹۹۱). حرکت زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی مواد نسبت به مقاومت برشی آنها افزایش یابد، و نمایانگر مکانیسمی است که ناشی از حرکت دامنه‌ای می‌باشد و بنابراین زمین لغزش را از دیگر اشکال فرایندهای تخریب توده‌ای در میاناب‌ها (فرسایش خاک) متمایز می‌سازد. حرکات توده‌ای، بویژه زمین لغزش‌ها، یکی از عمده‌ترین مخاطرات محیطی هستند که باعث ایجاد خسارات هنگفت مالی و جانی و صدمه به ابنیه‌ها و پروژه‌های مهندسی در سراسر دنیا بالاخص در مناطق کوهستانی می‌شوند (کورنفرث<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵: ۴). به طوریکه، گزارش بانک اطلاعاتی حوادث غیرمترقبه از آمار خسارات زمین لغزش‌ها در کشورهای مختلف جهان در دوره (۱۹۰۳-۲۰۰۷) نشان می‌دهد که در طی این دوره زمانی، زمین لغزش‌ها در مجموع باعث مرگ بیش از ۵۷ هزار نفر و متاثر شدن بیش از ده میلیون انسان در سراسر جهان شده‌اند (کاستلانوس<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸: ۲). به همین دلیل، مطالعه علمی و جامع پدیده لغزش در دنیا به دلایل متعدد، از مهم‌ترین مسائل است. به جرات می‌توان گفت، از جمله حساس‌ترین و مهم‌ترین مسائل در پروژه‌های عمده عمرانی، همچون انتخاب مسیر احداث بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی و فرعی کوهستانی، انتخاب محل احداث سدهای خاکی، بتونی و همچنین آب‌بندها و کانال‌های انتقال آب، احداث تونل‌های عبور و مرور و طرح‌هایی همچون توسعه جنگل‌ها و مراتع طبیعی و هرگونه توسعه معدنی در گرو مطالعه پایداری شیب‌های طبیعی منطقه است. عدم توجه به این مساله خسارات جبران‌ناپذیری را می‌تواند به دنبال داشته باشد. حادثه روستای فتلک که (در پی زلزله ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ گیلان) بر اثر زمین لغزش به کلی از بین رفت و یا حرکت بطئی زمین و تخریب بخشی از شهر گرمی در استان اردبیل در سال ۱۳۷۴، تخریب چند صد هکتار مناطق جنگلی شمال کشور و حوادث مشابه مبین اهمیت توجه به این مساله است. در طراحی مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت و احداث کارگاه‌ها و کارخانجات صنعتی، و پروژه‌های مهم عمرانی ریسک خطر بالاست و توجه به این مساله از اهمیت خاص خود برخوردار است (شریعت جعفری، ۱۳۷۵: ۲). تاکنون متخصصان مختلف علوم طبیعی مطالعات زیادی در مورد حرکات توده‌ای انجام داده‌اند، ولی به دلیل پیچیده بودن این پدیده، بیشتر مدل‌های مورد استفاده حالت کیفی داشته و برای منطقه‌ای خاص کاربرد دارند. در سال‌های اخیر روش‌ها از حالت کیفی و تجربی خارج شده و به سمت روش‌های آماری و کمی سوق یافته‌اند. در این روش‌ها براساس شرایط موجود در منطقه و پراکنش حرکات توده‌ای، رابطه‌ای بین عوامل موثر و وقوع حرکات توده‌ای پیدا شده است و منطقه براساس رابطه به دست آمده از نظر حساسیت به این حرکات بررسی می‌شود (فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۸۰). این رویه

<sup>۱</sup> - denudation

<sup>۲</sup> - mass wasting

<sup>۳</sup> - Cornforth

<sup>۴</sup> - Castellanos

مؤثرترین و اقتصادی‌ترین راه جهت کاهش خطرات آتی می‌باشد (آکسوی و ارجان‌اغلو<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲: ۹۸-۸۷). در این خصوص، تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش، ابزار مهمی برای برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای هستند (ملچیور<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۰۰-۳۷۹). هدف از تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، تفکیک سطح زمین به مناطق همگن، بر اساس احتمال ناپایداری به واسطه حرکات توده‌ای در موقعیت‌های خاص می‌باشد (داس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۶۲۷-۶۳۷). پهنه‌بندی خطر زمین-لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و یا بالقوه خطر از هیچ تا بسیار زیاد تقسیم می‌کند. این فرایند که بر مبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی و مدل سازی کمی بر پایه داده‌های ناحیه مورد مطالعه صورت می‌گیرد، می‌تواند مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و عمران در مقیاس منطقه‌ای، ناحیه‌ای، و محلی محسوب گردد (رامشت، ۱۳۷۵: ۴۵).

کلیه روش‌های موجود در زمینه تهیه LSZ (پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش) مبتنی بر برخی مفروضات پذیرفته شده می‌باشند که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر بیان کرد (کانونگو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۹: ۸۱-۱۰۵):

- گذشته و حال کلید آینده هستند. این مطلب بدین معنی است که زمین‌لغزش‌های آینده، به احتمال زیادی تحت شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی مشابه حال حاضر رخ خواهند داد.
- زمین‌لغزش‌ها به عنوان پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مشخص می‌توانند به هر دو روش برداشت زمینی و تفسیر تصاویر سنجنش از دور، شناسایی، طبقه‌بندی و نقشه‌برداری شوند.
- زمین‌لغزش‌ها به وسیله عوامل درونی قابل شناسایی (یعنی ویژگی‌های ذاتی زمین) که به عنوان فاکتورهای عاملی (مسبب) شناخته می‌شوند، کنترل می‌گردند که می‌توانند به روش برداشت زمینی و تفسیر تصاویر سنجنش از دور، بررسی شوند

ناپایداری دامنه‌ای بواسطه مجموعه‌ای از عوامل زمینی وابسته به هم از قبیل: سنگ‌شناسی و شرایط ساختمانی سنگ‌ها، هوازدگی و تماس با خاک رویی، ویژگی‌های خاک، شیب و شکل دامنه، شرایط هیدرولوژیکی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و شیوه کاربری اراضی و سرانجام فعالیت‌های انسانی کنترل می‌شود. تجزیه و تحلیل مشترک تمامی متغیرهای زمینی در رابطه با توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها، بواسطه ابداع و معرفی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) یعنی ابزاری ایده‌آل برای تحلیل پارامترهایی با میزان بالایی از تغییرپذیری فضایی، به شدت فزونی یافته است (وان وستن و سوترس<sup>۵</sup>، ۱۹۹۸: ۳). از قبیل: فیض‌نیا و همکاران (۱۳۸۰)، احمدی و همکاران (۱۳۸۲)، جباری و میرنظری (۱۳۸۶)، متکان و همکاران (۱۳۸۸)، متولی و همکاران (۱۳۸۸)، شیرانی و همکاران (۱۳۹۱)، اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۳)، رسایی و همکاران (۱۳۹۴)، یائو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، گمیتزی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، کنفورتی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، هسو<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، همزه<sup>۱۰</sup>

<sup>۱</sup> - Aksoy and Ercanoglu

<sup>۲</sup> - Melchiorre

<sup>۳</sup> - Das

<sup>۴</sup> - Kanungo

<sup>۵</sup> - Van Westen and Soeters

<sup>۶</sup> - Yao

<sup>۷</sup> - Gemitzi

<sup>۸</sup> - Conforti

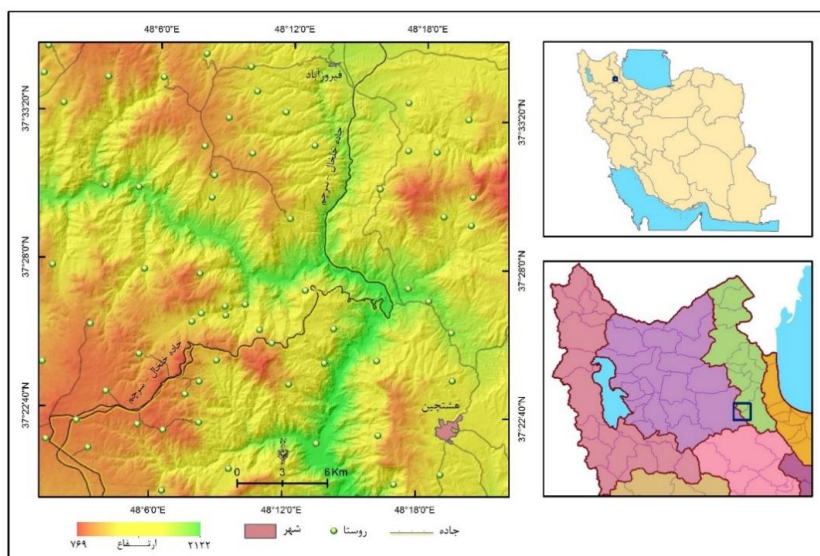
<sup>۹</sup> - Hsu

<sup>۱۰</sup> - Hamza

و همکاران (۲۰۱۷)، سائیتو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷). مناطق واقع در مسیر جاده مواصلاتی خلخال - سرچم از جمله مناطقی از شمال غرب کشور است که ناپایداری‌های دامنه‌ای به صورت زمین لغزش، ریزش و سقوط سنگ‌ها در تحول ژئومورفولوژیکی دامنه‌ها از نقش برجسته‌ای برخوردار می‌باشند و رخداد آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی منطقه تلقی می‌شود. لذا، جهت جلوگیری و یا کاهش خطرات ناشی از این پدیده، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در این منطقه امری ضروری می‌باشد.

### منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در جنوب استان اردبیل و شرق شهرستان‌های خلخال و کوثر واقع شده است که بخشی از شهرستان میانه در استان آذربایجان شرقی را نیز در برمی‌گیرد (شکل ۱). مساحت محدوده مورد مطالعه در حدود ۹۴۵ کیلومتر مربع می‌باشد که در مختصات جغرافیایی "۲۵' ۰۱" ۴۸° تا "۳۷' ۲۱" ۴۸° طول شرقی و "۲۲' ۱۹" ۳۷° تا "۳۶' ۱۳" ۳۷° عرض شمالی قرار گرفته است. بخش اعظم جاده مواصلاتی خلخال - سرچم به طول حدود ۶۴ کیلومتر در این محدوده احداث شده است. حد شمالی این محدوده (جاده خلخال - سرچم) از فیروزآباد شروع می‌شود و حد جنوبی آن به روستای قره‌بلاغ منتهی می‌شود. به منظور بررسی اثرات احتمالی جاده خلخال - سرچم بر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، ارزیابی رخداد زمین لغزش در منطقه‌ای وسیع‌تر مدنظر قرار گرفت. شهر هشجین (هشتجین) در جنوب شرق منطقه و شهر فیروزآباد در شمال منطقه، مهم‌ترین سکونت‌گاه‌های منطقه مطالعاتی می‌باشند. در این منطقه ناپایداری‌های دامنه‌ای مخصوصاً به صورت زمین لغزش‌های بزرگ و کوچک نقش مهمی در تحول دامنه‌ها ایفا می‌کنند. این گونه ناپایداری‌های دامنه‌ای علاوه بر تخریب اراضی و رسوب‌زایی، به عنوان یک مخاطره ژئومورفولوژیکی نیز مطرح می‌باشند که در برخی از موارد تهدیدی جدی برای سکونت‌گاه‌ها و تاسیسات زیربنایی منطقه محسوب می‌شوند.



شکل ۱: موقعیت جاده ارتباطی خلخال - سرچم در استان اردبیل

### مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، جهت ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش، ۱۰ متغیر موثر بر رخداد این پدیده ژئومورفولوژیکی مورد توجه قرار گرفت که عبارتند از: ارتفاع، شیب، جهت شیب، آبراه‌ها، گسل، لندفرم، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و جاده‌های ارتباطی. در راستای اهداف تحقیق، داده‌های مورد نیاز از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس

۱:۵۰۰۰۰؛ نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰؛ تصاویر مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS – PALSAR؛ تصاویر ماهواره‌ای Sentinel2 (با قدرت تفکیک ۱۰ متر) و Google Earth (GeoEye) با قدرت تفکیک تقریباً ۱ متر؛ داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و مطالعات میدانی و نیز منابع کتابخانه‌ای حاصل شد. جهت تهیه و آماده‌سازی لایه‌های موضوعی و اجرای مدل‌های تحقیق از نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI و TerrSet استفاده گردید. به منظور پهنه‌بندی و پیش‌بینی مکانی وقوع زمین‌لغزش از رویکردهای کمی احتمالاتی فاکتور قطعیت و روش آماری چندمتغیره (رگرسیون لجستیک) استفاده شد. در ادامه، این مدل‌ها به اختصار تشریح می‌شوند.

**رگرسیون لجستیک:** در این تحقیق از رگرسیون لجستیک که یکی از روش‌های مشهور آماری چندمتغیره می‌باشد برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش استفاده شد. این روش زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که پاسخ، کیفی و به صورت بود و نبود باشد. در مورد زمین‌لغزش‌ها، وجود (۱) یا عدم وجود (۰) زمین‌لغزش به عنوان مقادیر متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود.

در طی سال‌های اخیر، رویکرد رگرسیون لجستیک به منظور مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش به فراوانی مورد استفاده قرار گرفته است، و شاید بتوان گفت که این رویکرد، متداول‌ترین روش در ادبیات جدید حساسیت زمین‌لغزش می‌باشد. مزیت رگرسیون لجستیک این است که متغیرها می‌توانند هم به صورت پیوسته و هم به صورت گسسته، و یا ترکیبی از هر دو نوع باشند، و لازم نیست که لزوماً توزیع نرمال داشته باشند (لی و سامبث، ۲۰۰۶: ۸۴۷-۸۵۵؛ ییلماز، ۲۰۰۹: ۱۱۲۵-۱۱۳۸).

رگرسیون لجستیک، ایجاد یک رابطه رگرسیون چندمتغیره بین یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل را امکان‌پذیر می‌سازد. بنابراین، برای پیش‌بینی وجود یا عدم وجود یک صفت اختصاصی یا پی‌آمد بر اساس مقادیر یک مجموعه از متغیرهای پیشگو مورد استفاده قرار می‌گیرد (لی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷: ۳۳-۴۱). تجزیه و تحلیل لجستیک برای پیامدهای دودویی<sup>۲</sup> تلاش می‌کند تا شانس وقوع یک رخداد را مدل‌سازی کند و اثرات متغیرهای مستقل بر روی این شانس را برآورد نماید. شانس برای یک رخداد، نسبتی<sup>۳</sup> است که احتمال وقوع یک رخداد (موفقیت) نسبت به عدم وقوع آن رخداد (شکست) را به راحتی مورد مقایسه قرار می‌دهد (اوسونل<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶: ۱۱). در یک مدل رگرسیون لجستیک، احتمال به شانس و شانس بوسیله گرفتن Log طبیعی به Logits تبدیل می‌شود (اوسونل، ۲۰۰۶: ۱۹). مدل لجستیک در ساده‌ترین شکل می‌تواند به صورت زیر بیان شود (شیکر و مون<sup>۵</sup>، ۲۰۱۲: ۵۷-۴۰؛ بی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۳۹-۱۴۹):

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

که در آن: P احتمال وقوع یک رخداد (زمین‌لغزش)، که مقدار آن از ۰ تا ۱ در یک منحنی S شکل در نوسان می‌باشد؛ Z به صورت معادله‌ای (مدل لجستیک خطی) تعریف می‌شود که مقدار آن از -∞ تا +∞ در نوسان می‌باشد (شکل ۲).

<sup>۱</sup> - Lee

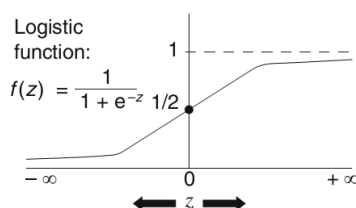
<sup>۲</sup> - binary

<sup>۳</sup> - quotient

<sup>۴</sup> - Oconnell

<sup>۵</sup> - Schicker and Moon

<sup>۶</sup> - Bai



شکل ۲: نمودار تابع لجستیک (کلینبوم و کلین<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰: ۵)

در مورد مطالعه حساسیت زمین لغزش، هدف رگرسیون لجستیک یافتن بهترین (در عین حال معقول) مدل برازش برای بیان رابطه بین وجود یا عدم وجود زمین لغزش‌ها (متغیر وابسته) و مجموعه‌ای از پارامترهای مستقل مانند زاویه شیب، جهت شیب و سنگ‌شناسی می‌باشد و بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود (ایالو و یاماگیشی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵: ۳۱-۱۵):

$$Y = \text{Logit}(p) = \ln(p/(1-p))$$

$$= C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن: P احتمال ا (یک) بودن متغیر وابسته (Y)، P/(1-P) اصطلاحاً شانس<sup>۳</sup> یا نسبت درست‌نمایی<sup>۴</sup>، C<sub>0</sub>: عرض از مبدأ<sup>۵</sup>، و C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, ... C<sub>n</sub> ضرایبی هستند که میزان مشارکت فاکتورهای مستقل (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ... X<sub>n</sub>) در تغییرات Y را نشان می‌دهند. در این زمینه می‌توان دستورالعمل برآورد حداکثر درست‌نمایی<sup>۶</sup> را برای یافتن بهترین برازش مجموعه پارامترهای مستقل مورد استفاده قرار داد که می‌تواند به صورت معادله زیر بیان شود (ارجان‌اغلو و تمیز<sup>۷</sup>، ۲۰۱۱: ۹۴۹-۹۶۴):

$$L = \prod_{i=1}^N \mu_i^{y_i} \times (1 - \mu_i)^{(1-y_i)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: L درست‌نمایی، N تعداد نمونه‌ها،  $\mu_i$  مقدار پیش‌بینی شده متغیر وابسته برای نمونه i و y<sub>i</sub> مقدار مشاهده شده متغیر وابسته برای نمونه i می‌باشد.

**فاکتور قطعیت:** اصول اساسی رویکرد فاکتور قطعیت (CF) در ابتدا در MYCIN، یعنی یک سیستم خبره برای تشخیص و درمان عفونت خونی و مننژیت معرفی شد. تئوری CF برای خطر زمین لغزش بوسیله چانگ و فابری<sup>۸</sup> (۱۹۹۳، ۱۹۹۸)، چانگ و لکلرک<sup>۹</sup> و (۱۹۹۴)، بیناچی<sup>۱۰</sup> و همکاران (۱۹۹۸)، لوزی و پرگالانی<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۹)، و لان<sup>۱۲</sup> و همکاران

<sup>۱</sup> - Kleinbaum and Klein

<sup>۲</sup> - Ayalew and Yamagishi

<sup>۳</sup> - odds

<sup>۴</sup> - likelihood ratio

<sup>۵</sup> - intercept

<sup>۶</sup> - maximum likelihood

<sup>۷</sup> - Ercanoglu and Temiz

<sup>۸</sup> - Chung & Fabbri

<sup>۹</sup> - Chung & Leclerc

<sup>۱۰</sup> - Binaghi

<sup>۱۱</sup> - Luzi & Pergalani

<sup>۱۲</sup> - Lan

(۲۰۰۴) به کار گرفته شد (لانگ<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸: ۸۷). تحلیل احتمالاتی با استفاده از یک روش‌شناسی انتگرال‌گیری نتایج در درون یک پایگاه داده‌های فضایی با استفاده از GIS انجام می‌شود. مفروضات اساسی این مدل‌ها عبارتند از (رموندو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۳: ۴۴۹-۴۳۷):

- ناپایداری آینده تحت شرایط مشابه در گذشته رخ خواهد داد.
  - تمامی فاکتورهای ایجاد کننده زمین‌لغزش، شناسایی شده و در پایگاه داده‌ها قرار می‌گیرند.
  - تمامی رخدادهای ناپایداری، مورد شناسایی قرار گرفته و در تحلیل‌ها منظور می‌شوند.
- این رویکرد، یکی از توابع مناسب پیشنهادی برای حل مسائل متشکل از داده‌های متفاوت و ناهمگن و عدم قطعیت داده‌های ورودی می‌باشد (دو کوتا و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲: ۱۲؛ بیناچی<sup>۴</sup> و همکاران، ۱۹۹۸: ۷۷-۹۷) و به عنوان یک رویکرد داده‌رهنمون<sup>۵</sup> در نظر گرفته می‌شود.

فاکتور قطعیت برای هر لایه از داده‌ها براساس سیاهه لغزش و فراوانی وقوع زمین‌لغزش در هر کلاس از هر لایه موضوعی مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود (کوماج و ماتیجا زورن<sup>۶</sup>، ۲۰۰۸: ۱۷-۱؛ لانگ، ۲۰۰۸: ۸۷؛ بیناچی و همکاران، ۱۹۹۸: ۹۷-۷۷؛ لان و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۰۹-۱۲۸؛ سوچاتا<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۳۳۷-۱۳۵۰):

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_s)} & \text{if } pp_a \geq pp_s \\ \frac{PP_s - PP_a}{PP_s(1 - PP_s)} & \text{if } pp_a < pp_s \end{cases} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن: CF: فاکتور قطعیت، PP<sub>a</sub>: احتمال شرطی وجود تعدادی از زمین‌لغزش‌ها در یک کلاس و PP<sub>s</sub>: احتمال اولیه یا پیشین وجود کل زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. دامنه فاکتور قطعیت بین -۱ و +۱ می‌باشد، مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش قطعیت و مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش قطعیت می‌باشند. مقادیر نزدیک به صفر نشان می‌دهد که احتمال اولیه، بسیار مشابه احتمال شرطی می‌باشد و هیچ اطلاعاتی درباره قطعیت وقوع رخداد بدست نمی‌دهد. هر لایه موضوعی براساس مقادیر فاکتور قطعیت محاسبه شده، طبقه‌بندی مجدد می‌شود و به صورت جفتی برای ایجاد نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از قوانین انتگرال‌گیری ترکیب می‌شوند. ترکیب ارزش‌های CF دو لایه موضوعی (Z) توسط معادله زیر صورت می‌گیرد (لانگ، ۲۰۰۸: ۸۷؛ بیناچی و همکاران، ۱۹۹۸: ۷۷-۹۷؛ سوچاتا<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۳۳۷-۱۳۵۰):

$$z = \begin{cases} x + y - xy, & x, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)}, & x, y \text{ opposite sign} \\ x + y + xy, & x, y < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

<sup>۱</sup> - Long

<sup>۲</sup> - Remondo

<sup>۳</sup> - Devkota

<sup>۴</sup> - Binaghi

<sup>۵</sup> - Data driven

<sup>۶</sup> - Komac and Matija Zorn

<sup>۷</sup> - Sujatha

<sup>۸</sup> - Sujatha

ترکیب جفتی تا زمانیکه تمامی لایه‌های CF به منظور حاصل شدن شاخص حساسیت زمین لغزش<sup>۱</sup> (LSI) اضافه شود، تکرار می‌شود (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۳؛ روستایی و همکاران، ۱۳۹۱).

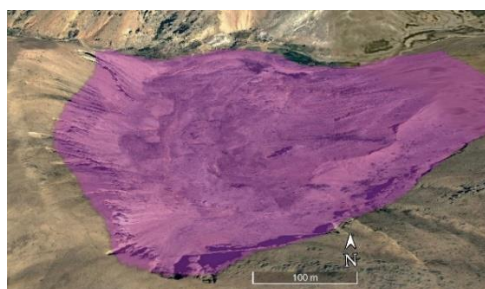
### یافته‌های تحقیق

#### پراکندگی فضایی زمین لغزش‌های منطقه

در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با بهره‌گیری از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، تهیه نقشه پراکندگی فضایی زمین لغزش‌های منطقه یکی از مهم‌ترین مراحل کار می‌باشد. در واقع، برای بررسی و شناخت شرایطی که منجر به بروز زمین لغزش در مکانی خاصی شده است، تهیه نقشه توزیع جغرافیایی زمین لغزش‌ها ضرورت می‌یابد. زمین لغزش‌ها آثار بسیار مشخصی از قبیل زخمه‌های لغزشی، وجود روانه‌ها و توده‌های درهم لغزش یافته، به هم‌ریختگی دامنه‌ها و انحراف مسیر آبراهه‌ها برجای می‌گذارند که شناسایی آنها را از طریق تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا امکان‌پذیر می‌سازد. در موارد مشکوک نیز می‌توان با مراجعه میدانی وجود یا عدم وجود زمین لغزش را مورد بررسی قرار داد. برای منطقه مورد مطالعه، ۹۸ زمین لغزش بزرگ و کوچک از طریق تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث با قدرت تفکیک بسیار بالا (در حدود ۷۰ سانتی‌متر) و بازدیدهای میدانی شناسایی و تعیین حدود شدند (شکل ۵). اکثر این زمین لغزش‌ها با روند شمال شرق - جنوب غرب، یعنی از حدود روستاهای کهران و اسمرود تا حدود روستاهای قشلاق و گورجق، رخ داده‌اند. در این مناطق، رخداد زمین لغزش یکی از مهم‌ترین فرایندهای ژئومورفولوژیکی در تحول لندفرم‌های منطقه می‌باشد که می‌تواند مخاطراتی را نیز متوجه سکونتگاه‌ها و تاسیسات زیربنایی منطقه سازد. تعداد قابل توجهی از زمین لغزش‌ها در پیرامون جاده ارتباطی خلخال - سرچم در حدفاصل بین روستاهای کبودچی تا قشلاق رخ داده است. مساحت کل زمین لغزش‌های منطقه در حدود ۶۵۰ هکتار می‌باشد. بزرگترین زمین لغزش‌های منطقه در شمال روستای اسمرود، جنوب شرق روستای کزج، جنوب شرق روستای قاراب علیا (سه توده لغزشی مجاور هم) و شمال روستای ماوی (دو توده لغزشی مجاور هم) رخ داده است (اشکال ۳ و ۴).



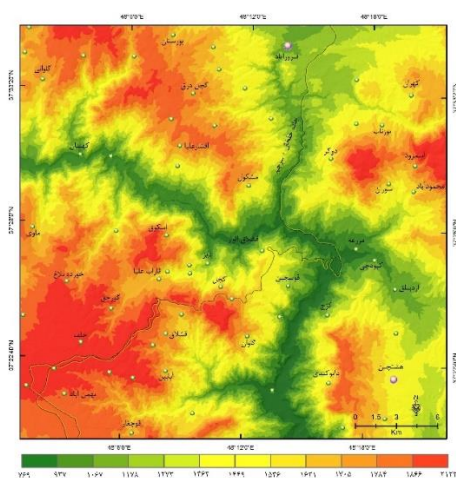
شکل ۴: زمین لغزش‌های بزرگ شمال روستای ماوی



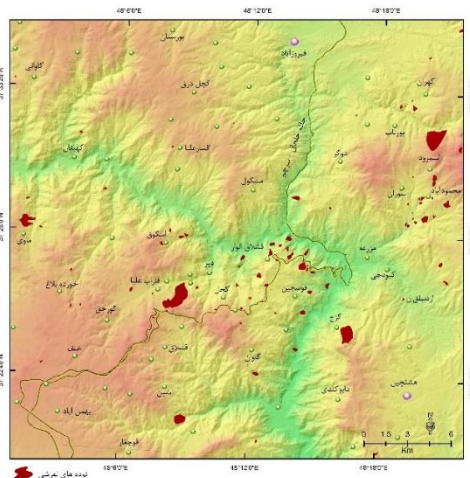
شکل ۳: زمین لغزش بزرگ شمال روستای اسمرود

<sup>۱</sup>- Landslide susceptibility index





شکل ۶: توزیع ارتفاعات منطقه مطالعاتی



شکل ۵: نقشه توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها در منطقه مطالعاتی

### متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه

در پژوهش حاضر، ۱۰ متغیر اساسی در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی مشخص شده و تاثیر هر یک از این متغیرها مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که گسل‌ها تاثیر بر روی زمین‌لغزش‌های منطقه نداشته‌اند. این امر در معادله رگرسیون لجستیک نیز تایید شد. بنابراین متغیر گسل در پهنه‌بندی حذف گردید. بدیهی است که در پهنه‌بندی حساسیت منطقه نسبت به رخداد زمین‌لغزش، تمامی متغیرها به صورت ترکیبی در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه، تاثیر هر کدام از این متغیرها به اختصار مورد بحث قرار می‌گیرد.

### – ارتفاع

با توجه به توزیع ارتفاعات (شکل ۶) می‌توان گفت که منطقه مطالعاتی دارای درجه ناهمواری بالایی می‌باشد که بواسطه دره‌های عمیق رودخانه‌های کیوی‌چای و قزل‌اوزن به صورت چهار فلات مرتفع ظاهر گشته است. زمین‌لغزش‌های منطقه تا ارتفاع ۱۷۰۰ متری روند افزایشی و سپس روند کاهشی را نشان می‌دهند (جدول ۱). در واقع، حدود ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه در طبقات ارتفاعی بین ۱۳۶۲ تا ۱۷۸۴ متر اتفاق افتاده است. با توجه به مقادیر بالای نسبت فراوانی زمین‌لغزش در این طبقات ارتفاعی، در آینده نیز احتمال وقوع زمین‌لغزش در این طبقات ارتفاعی بیشتر خواهد بود.

جدول ۱: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از طبقات ارتفاعی

فاکتور قطعیت	نسبت فراوانی	مساحت توده‌های لغزشی		مساحت کلاس		طبقه ارتفاعی
		به درصد	به هکتار	به درصد	به هکتار	
-۰/۴۲۰	۰/۵۸۲	۱/۶۵	۱۰/۷۵	۲/۸۴	۲۶۸۴/۱۹	۷۶۹-۹۳۷
-۰/۳۴۹	۰/۶۵۲	۳/۱۴	۲۰/۴۲	۴/۸۲	۴۵۵۱/۶۷	۹۳۷-۱۰۶۷
-۰/۴۲۸	۰/۵۷۴	۳/۶۱	۲۳/۴۴	۶/۲۹	۵۹۳۵/۰۸	۱۰۶۷-۱۱۷۸
-۰/۴۲۸	۰/۵۷۴	۵/۱۳	۳۳/۳۳	۸/۹۴	۸۴۴۱/۰۰	۱۱۷۸-۱۲۷۳
-۰/۲۴۳	۰/۷۵۸	۶/۷۶	۴۳/۸۹	۸/۹۱	۸۴۱۲/۰۹	۱۲۷۳-۱۳۶۲
۰/۲۷۴	۱/۳۷۴	۱۲/۷۷	۸۲/۹۷	۹/۲۹	۸۷۷۵/۰۹	۱۳۶۲-۱۴۴۹
۰/۳۳۷	۱/۵۰۲	۱۴/۱۷	۹۲/۰۸	۹/۴۳	۸۹۰۸/۰۰	۱۴۴۹-۱۵۳۶

۰/۲۸۴	۱/۳۹۴	۱۳/۶۴	۸۸/۵۸	۹/۷۸	۹۲۳۸/۴۴	۱۵۳۶-۱۶۲۱
۰/۳۳۶	۱/۵۰۰	۱۵/۵۰	۱۰۰/۷۲	۱۰/۳۴	۹۷۵۹/۷۸	۱۶۲۱-۱۷۰۵
۰/۲۱۸	۱/۲۷۶	۱۳/۰۷	۸۴/۹۱	۱۰/۲۴	۹۶۷۰/۵۰	۱۷۰۵-۱۷۸۴
-۰/۳۰۲	۰/۶۹۹	۷/۷۶	۵۰/۴۱	۱۱/۱۰	۱۰۴۷۶/۶۳	۱۷۸۴-۱۸۶۶
-۰/۶۵۳	۰/۳۴۸	۲/۷۹	۱۸/۱۳	۸/۰۱	۷۵۶۵/۳۴	۱۸۶۶-۲۱۲۲

## شیب

متوسط شیب منطقه مطالعاتی ۲۸/۳ درصد است. تنها در حدود ۶ درصد از منطقه مطالعاتی دارای شیب کم‌تر از ۵ درصد و در حدود ۱۱ درصد آن دارای شیب‌های بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد. اراضی با شیب کم در کف دره‌های رودخانه‌های اصلی و همچنین در سطح بخشی از فلات‌های مرتفع منطقه پراکنده شده‌اند. رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه از شیب‌های ۰ تا ۳۰ درصد دارای روند افزایشی و از شیب‌های ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهشی می‌شود. مساحت توده‌های لغزشی در طبقات شیب بیش از ۵۰ درصد به حداکثر می‌رسد. تقریباً ۱۵ درصد منطقه مطالعاتی دارای شیب بیش از ۵۰ درصد می‌باشد، اما در حدود ۲۸ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه در این طبقات شیب اتفاق افتاده‌اند. مقادیر نسبت فراوانی از شیب‌های کم تا شیب‌های بالا دارای روند افزایشی می‌باشد. با توجه به مقادیر نسبت فراوانی می‌توان دریافت که طبقات شیب بیشتر از ۱۵ درصد شرایط مساعدی را برای وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه فراهم می‌سازند (جدول ۲).

جدول ۲: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از طبقات شیب

طبقات شیب	مساحت کلاس		مساحت توده‌های لغزشی		نسبت فراوانی	فاکتور قطعیت
	به هکتار	به درصد	به هکتار	به درصد		
۰-۵	۵۶۳۸/۳۹	۵/۹۷	۸/۲۸	۱/۲۷	۰/۲۱۳	-۰/۷۸۸
۵-۱۰	۱۰۴۰۶/۵۵	۱۱/۰۲	۲۱/۸۰	۳/۳۶	۰/۳۰۴	-۰/۶۹۷
۱۰-۱۵	۱۰۱۷۰/۰۸	۱۰/۷۷	۳۴/۳۴	۵/۲۹	۰/۴۹۱	-۰/۵۱۱
۱۵-۲۰	۱۱۲۹۷/۴۱	۱۱/۹۷	۵۵/۸۸	۸/۶۰	۰/۷۱۹	-۰/۲۸۳
۲۰-۲۵	۹۷۵۳/۰۹	۱۰/۳۳	۶۲/۵۵	۹/۶۳	۰/۹۳۲	-۰/۰۶۸
۲۵-۳۰	۹۶۳۳/۸۶	۱۰/۲۰	۷۰/۷۸	۱۰/۹۰	۱/۰۶۸	۰/۰۶۴
۳۰-۳۵	۷۶۳۲/۳۰	۸/۰۸	۶۱/۷۰	۹/۵۰	۱/۱۷۵	۰/۱۵۰
۳۵-۴۰	۶۷۴۹/۶۹	۷/۱۵	۶۱/۶۱	۹/۴۸	۱/۳۲۷	۰/۲۴۸
۴۰-۴۵	۵۱۲۹/۲۸	۵/۴۳	۴۹/۷۳	۷/۶۶	۱/۴۰۹	۰/۲۹۲
۴۵-۵۰	۴۲۰۳/۴۸	۴/۴۵	۴۳/۱۹	۶/۶۵	۱/۴۹۳	۰/۳۳۳
۵۰ <	۱۳۸۰۳/۶۹	۱۴/۶۲	۱۷۹/۷۵	۲۷/۶۷	۱/۸۹۳	۰/۴۷۵

## جهت شیب

جهت شیب یکی دیگر از متغیرهایی است که در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه تاثیرگذار بوده است. جهات شیب در منطقه مطالعاتی اهمیت فراوانی در رابطه با نوع هوازدگی و تخریب مواد دامنه‌ها و توزیع رطوبت به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل

کنترل‌کننده ناپایداری‌های دامنه‌ای دارد. توزیع جهت شیب یا جهت‌گیری دامنه‌ها در منطقه مورد مطالعه تقریباً یکسان است؛ اما زمین‌لغزش‌ها در تمامی جهات جغرافیایی به طور یکسانی رخ نداده‌اند. زمین‌لغزش‌ها در جهات شمالی حداکثر و در جهات جنوبی حداقل می‌باشند (جدول ۳).

جدول ۳- مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از طبقات جهت شیب

فاکتور قطعیت	نسبت فراوانی	مساحت توده‌های لغزشی		مساحت کلاس		جهت شیب
		به درصد	به هکتار	به درصد	به هکتار	
-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۲۳	۱۱۵۹/۸۰	مسطح
۰/۴۹۰	۱/۹۴۷	۲۳/۱۲	۱۵۰/۱۷	۱۱/۸۷	۱۱۲۰۸/۵۶	شمال
۰/۲۱۸	۱/۲۷۷	۱۴/۲۶	۹۲/۶۱	۱۱/۱۷	۱۰۵۴۲/۵۶	شمال شرق
۰/۱۳۴	۱/۱۵۳	۱۵/۶۳	۱۰۱/۵۶	۱۳/۵۶	۱۲۸۰۰/۹۵	شرق
-۰/۳۳۴	۰/۶۶۸	۹/۱۸	۵۹/۶۱	۱۳/۷۴	۱۲۹۷۱/۴۵	جنوب شرق
-۰/۵۹۸	۰/۴۰۳	۵/۲۵	۳۴/۰۸	۱۳/۰۱	۱۲۲۸۲/۰۲	جنوب
-۰/۶۱۶	۰/۳۸۶	۴/۵۲	۲۹/۳۴	۱۱/۷۱	۱۱۰۵۳/۰۹	جنوب غرب
-۰/۴۴۳	۰/۵۵۹	۶/۶۱	۴۲/۹۷	۱۱/۸۳	۱۱۱۷۱/۴۵	غرب
۰/۴۴۸	۱/۸۰۳	۲۱/۴۴	۱۳۹/۲۷	۱۱/۸۹	۱۱۲۲۷/۹۲	شمال غرب

### آبراهه‌ها

منطقه مطالعاتی جزئی از سیستم زه‌کشی قزل‌اوزن می‌باشد. بخشی از زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در مجاورت آبراهه‌ها اتفاق افتاده‌اند که برخی از آنها را می‌توان به پدیده زیرشویی و برداشت مواد زیرین دامنه‌ها توسط جریان‌ها موجود نسبت داد (مخصوصاً زمین‌لغزش‌های اطراف روستاهای کههران - اسمرود - محمودآباد - سوران). برای دخالت دادن تاثیر فاصله از آبراهه در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، لایه فاصله از آبراهه‌ها تهیه گردید. در حدود ۳۴ درصد توده‌های لغزشی منطقه در فاصله صفر تا ۲۰۰ متری آبراهه‌ها واقع شده‌اند (جدول ۴). برخی از لغزش‌های منطقه به این دلیل که از حجم و وسعت زیادی برخوردارند از فاصله صفر تا ۳۰۰ و حتی ۴۰۰ متری آبراهه‌ها امتداد یافته‌اند (از قبیل زمین‌لغزش بزرگ شمال روستای اسمرود) و به همین دلیل در چندین کلاس از لایه موضوعی فاصله از آبراهه اثرگذار می‌باشند.

جدول ۴: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از طبقات فاصله از آبراهه

فاکتور قطعیت	نسبت فراوانی	مساحت توده‌های لغزشی		مساحت کلاس		فاصله از آبراهه
		به درصد	به هکتار	به درصد	به هکتار	
-۰/۳۴۶	۰/۶۵۶	۱۵/۱۶	۹۸/۵۰	۲۳/۱۱	۲۱۸۲۴	۰-۱۰۰
-۰/۰۵۳	۰/۹۴۸	۱۸/۵۲	۱۲۰/۳۳	۱۹/۵۵	۱۸۴۵۶/۸	۱۰۰-۲۰۰
۰/۱۷۵	۱/۲۱۰	۲۰/۴۴	۱۳۲/۷۵	۱۶/۸۹	۱۵۹۴۹	۲۰۰-۳۰۰
۰/۱۷۵	۱/۲۱۰	۱۷/۱۳	۱۱۱/۲۷	۱۴/۱۵	۱۳۳۶۰/۹	۳۰۰-۴۰۰
۰/۱۵۷	۱/۱۸۵	۱۲/۸۳	۸۳/۳۴	۱۰/۸۲	۱۰۲۱۸/۹	۴۰۰-۵۰۰
۰/۰۲۸	۱/۰۲۹	۱۵/۹۲	۱۰۳/۴۲	۱۵/۴۷	۱۴۶۰۸	>۵۰۰

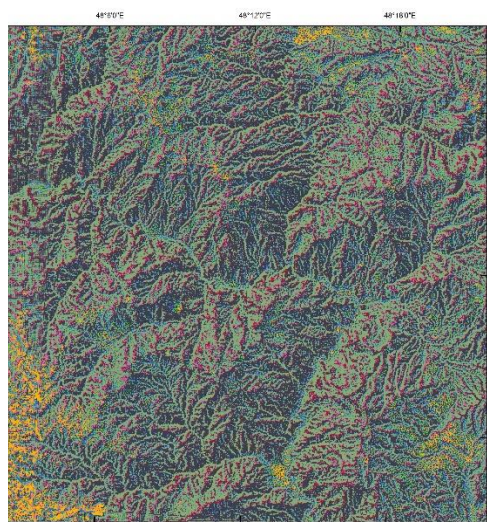
سازندهای مختلفی در منطقه مورد مطالعه وجود دارند که عمدتاً مربوط به دوره‌های اتوسن و الیگوسن از دوران سوم زمین‌شناسی هستند (شکل ۷). محدوده مورد بررسی بخش‌هایی از غرب کمر بند چین‌خورده و رانده البرز و همچنین قسمتی از مجموعه ماگمایی ترسیری البرز را در بر می‌گیرد. سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی - رسوبی اتوسن و الیگوسن اغلب گستره منطقه مطالعاتی را پوشانیده‌اند. در واقع، ماگماتیسیم گسترده ترسیری البرز و تنوع سنگ‌شناختی آن سبب شده است بخش اعظم منطقه مطالعاتی به مجموعه یاد شده اختصاص یابد.

با توجه به مساحت توده‌های لغزشی در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف (جدول ۵) می‌توان به تاثیر بسیار زیاد برخی از واحدها در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه پی برد. واحد Ol-v2 با اینکه تنها حدود ۱۶ درصد از منطقه مورد مطالعه را پوشانده است اما حدود ۴۳ درصد از توده‌های لغزشی منطقه بر روی این واحد جای گرفته‌اند. این واحد از تراکی بازالت و تراکی آندزیت تشکیل شده است که سطوح آن به شدت هوازده شده است. حساسیت این واحد به هوازده‌گی و تخریب فیزیکی و شیمیایی باعث فراهم شدن و انباشت مواد بر سطح دامنه‌ها گردیده است که رخداد زمین‌لغزش را مساعدت می‌کند. OI-t دومین واحد سنگ‌شناسی است که در رابطه با زمین‌لغزش‌های منطقه از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. این واحد از توف سنگی، برش آتشفشانی و لاهار تشکیل شده و در حدود ۸ درصد از منطقه مطالعاتی را می‌پوشاند. در حدود ۲۷ درصد توده‌های لغزشی منطقه بر روی این واحد واقع شده‌اند. این واحد نیز نسبت به فرایندهای تخریب و هوازده‌گی بسیار آسیب‌پذیر می‌باشد. بنابراین وقتی سایر شرایط، مخصوصاً حضور آب و شیب مناسب، فراهم باشد از پتانسیل بالایی جهت لغزش برخوردار می‌شود. در رابطه با رخداد زمین‌لغزش، واحدهای Ol-v1 (ریولیت، ریوداسیت و ته‌نشست‌های آذرآواری موجی)، E-an (بازالت، آندزیت بازالتی همراه با درون لایه‌های توف بازیک)، E-v1 (سنگ‌های آتشفشانی بازیک تفکیک نشده)، E-t (توف شیشه‌ای - سنگی با لایه‌بندی خوب به رنگ تیره) در درجه بعدی اهمیت قرار دارند. بنابراین واحدهای توفی و توف‌دار و واحد تراکی بازالت و تراکی آندزیت حساس به هوازده‌گی و تخریب، شرایط بسیار مساعدی را برای وقوع زمین‌لغزش فراهم ساخته‌اند. در صورتی که شرایط مساعد (بخصوص حضور آب و شیب مناسب) فراهم باشد، این سازندها از پتانسیل زیادی برای لغزش برخوردار می‌باشند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، با اینکه در سایر واحدهای سنگ‌شناسی شرایط کنترل‌کننده زمین‌لغزش (مخصوصاً حضور آب، شیب و جهت شیب) برقرار است اما زمین‌لغزشی بر روی آنها صورت نگرفته یا در مقیاس بسیار محدود و محلی بوقوع پیوسته است؛ از اینرو می‌توان به کنترل شدید متغیر سنگ‌شناسی بر وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه پی برد. می‌توان بیان داشت که زمین‌لغزش‌های منطقه در درجه اول در کنترل متغیر سنگ‌شناسی می‌باشند.

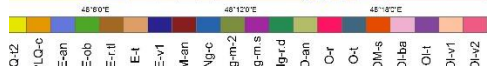
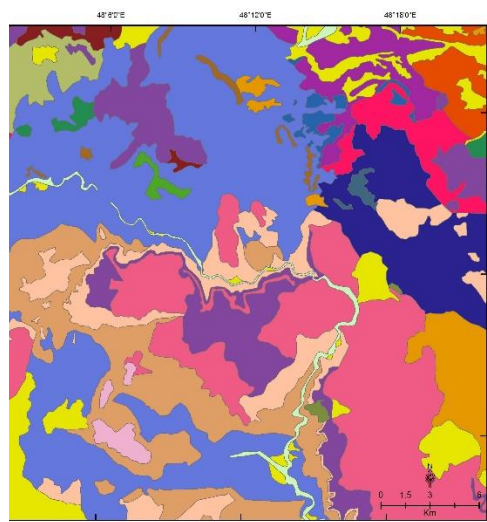
جدول ۵: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از واحدهای لیتولوژیکی

نماد	لیتولوژی توصیف	مساحت کلاس		مساحت توده‌های لغزشی		نسبت فاکتور قطعیت
		به هکتار	به درصد	به هکتار	به درصد	
Ng-c	کنگومرای قرمز رنگ	۶۳۲/۱۴	۰/۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰۰ -
O-t	توف سفید	۲۸۹/۸۰	۰/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰۰ -
E-r.tl	توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی زردرنگ	۴۰۲/۶۹	۰/۴۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰۰ -
O-r	ریولیت‌های هوازده، توف‌های شیشه‌ای با ترکیب داسیتی و ریولیتی و توف‌های آندزیتی	۲۲۹۳/۲۸	۲/۴۳	۱۰/۵۵	۱/۶۲	۰/۳۳۳ ۰/۶۶۸ -

۱/۰۰۰ -	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۹	۴۶۰/۶۱	گنبد‌های آتشفشانی با ترکیب ریولیتی تا ریوداسیتی و گاهی تراکی آندزیت	Ng-r.d
۰/۹۷۷ -	۰/۰۲۳	۰/۰۶	۰/۴۱	۲/۷۶	۲۶۰۲/۷۰	تناوب مارن‌های خاکستری و قرمز ژیبس‌دار با ماسه‌سنگ‌های خاکستری و درون لایه‌های میکروکنگلومرایی	Ng-m.s
۰/۹۸۹ -	۰/۰۱۱	۰/۰۱	۰/۰۸	۱/۱۰	۱۰۴۱/۴۲	آبرفت‌های عهد حاضر	Q-al
۰/۷۳۳ -	۰/۲۶۸	۷/۳۲	۴۷/۵۳	۲۷/۲۵	۲۵۷۳/۷۲ ۲	بازالت، آندزیت بازالتی همراه با دورن لایه‌های توف بازیک	E-an
۰/۰۸۲	۱/۰۸۸	۸/۰۲	۵۲/۱۱	۷/۳۷	۶۹۵۸/۴۸	ریولیت، ریوداسیت و تهنسست‌های آذرآواری موجی	OI-v1
۱/۰۰۰ -	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۷۲	۶۸۱/۱۳	تراکی آندزیت با رنگ ارغوانی و هوازده، توف شیشه‌ای با ترکیب آندزیتی و بافت پرلیتی سیاه رنگ	M-an
۱/۰۰۰ -	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۰	۲۸۲/۲۰	اولیوین بازالت	E-ob
۱/۰۰۰ -	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۶۸	۶۳۹/۶۳	بازالت، آندزیت بازالتی و آندزیت با ساخت منشوری	OI-ba
۰/۶۲۰	۲/۶۰۵	۴۲/۸۲	۲۷۸/۱۴	۱۶/۴۴	۱۵۵۱/۱۶ ۹	تراکی بازالت و تراکی آندزیت سطح فرسوده به رنگ قهوه‌ای	OI-v2
۰/۵۰۸ -	۰/۴۹۳	۵/۱۶	۳۳/۵۰	۱۰/۴۵	۹۸۷۰/۲۵	توف شیشه‌ای - سنگی با لایه‌بندی خوب به رنگ تیره	E-t
۱/۰۰۰ -	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۴	۱۳۵/۳۰	طبقات سرخ رنگ مارن، سیلتستون و ماسه سنگ	Ng-m-2
۰/۷۹۰ -	۰/۲۱۱	۰/۶۵	۴/۲۳	۳/۰۸	۲۹۱۱/۹۴	کنگلومر و ماسه‌سنگ به رنگ خاکستری	PLQ-c
۰/۰۶۴	۱/۰۶۸	۶/۵۴	۴۲/۵۲	۶/۱۳	۵۷۸۵/۵۶	سنگ‌های آتشفشانی بازیک تفکیک نشده	E-v1
۰/۷۱۳	۳/۴۲۹	۲۶/۹۷	۱۷۵/۲۲	۷/۸۷	۷۴۲۷/۰۲	توف سنگی، برش آتشفشانی و لاهار	OI-t
۰/۶۴۵ -	۰/۳۵۶	۰/۶۳	۴/۰۶	۱/۷۶	۱۶۵۷/۵۵	مارن‌های قرمز ژیبس‌دار و نمک‌دار همراه با تناوب‌هایی از مارن‌های ماسه‌ای و ماسه‌سنگ با رنگ روشن	OM-s
۰/۹۸۰ -	۰/۰۲۰	۰/۱۴	۰/۹۱	۷/۰۰	۶۶۱۲/۱۷	پادگانه‌های آبرفتی جوان و پهنه‌های آبرفتی	Q-t2
۰/۹۷۹ -	۰/۰۲۱	۰/۰۶	۰/۳۶	۲/۶۳	۲۴۸۲/۰۸	گدازه آندزیتی و آندزیت کوارتزدار همراه با تناوب‌هایی از توف شیشه‌ای و لیتیک توف	O-an



شکل ۸: نقشه لندفرم‌های منطقه مطالعاتی



شکل ۷: نقشه لیتولوژی منطقه مطالعاتی

### لندفرم

به منظور طبقه‌بندی لندفرم‌های منطقه از روش طبقه‌بندی ارائه شده توسط ویس<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) و جنس<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) استفاده شد. در این روش طبقه‌بندی، از شاخصی موسوم به شاخص موقعیت توپوگرافیک<sup>۳</sup> یا TPI استفاده می‌شود و براساس آن، ده نوع لندفرم قابل تشخیص می‌باشد (جدول ۶). شاخص موقعیت توپوگرافیک (TPI) ارتفاع هر سلول در یک DEM را با ارتفاع هر یک از همسایه‌های مشخص در اطراف آن سلول مقایسه می‌کند (ویس<sup>۴</sup>، ۲۰۰۱). ارتفاع میانگین محلی از مقدار ارتفاع در مرکز پنجره محلی کسر می‌شود. رابطه ریاضی این شاخص به صورت زیر است (سیف<sup>۵</sup>، ۲۰۱۴: ۳۹-۳۳؛ مکرم و نگهبان، ۱۳۹۳):

$$TPI_i = Z_0 - \frac{\sum_{1-n} Z_n}{n} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن:  $Z_0$  = ارتفاع نقطه مدل مورد بررسی،  $Z_n$  = ارتفاع شبکه<sup>۶</sup> (گرید) در داخل پنجره محلی و  $n$  = تعداد کل نقاط پیرامون در نظر گرفته شده در بررسی می‌باشد. مقادیر مثبت TPI نشان‌دهنده نقاطی است که نسبت به میانگین پنجره محلی بزرگتر هستند (به عنوان مثال ستیخ‌ها) و مقادیر منفی TPI نشان‌دهنده نقاط پایین‌تر می‌باشند (به عنوان مثال دره‌ها). مقادیر TPI نزدیک به صفر یا نواحی مسطح (که در آن شیب نزدیک صفر است) و یا نواحی با شیب ثابت هستند (که در آن شیب نقطه به طور قابل توجهی بزرگتر از صفر است)، مقادیر بالای مثبت در ارتباط با قله‌ها و ستیخ‌ها می‌باشند. منطقه مطالعاتی در مقیاس کلی شامل دره‌ها و میاناب‌های متعدد می‌باشد و اراضی هموار درصد کمی از منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند (شکل ۸). اراضی نسبتاً هموار و دشت‌ها عمدتاً مربوط به سطوح فلات‌های منطقه می‌باشد. در واقع،

۱ - Weiss

۲ - Jenness

۳ - Topographic Position Index (TPI)

۴ - Weiss

۵ - Seif

۶ - grid

دلیل اصلی فقدان یا محدود بودن رخداد زمین‌لغزش در جنوب غرب منطقه مورد مطالعه و به تبع آن پیرامون جاده مواصلاتی خلخال - سرچم بعد از روستای قشلاق تا سرچم مربوط به همین امر می‌باشد. علی‌رغم بالا بودن ارتفاع این مناطق نسبت به سطح دریا، در مقیاس کلی به صورت اراضی نسبتاً هموار یا با شیب کم می‌باشند و در نتیجه یکی از شرایط اساسی رخداد زمین‌لغزش فراهم نیست. با توجه به اینکه بخش عمده منطقه مورد مطالعه (حدود ۶۳ درصد) شامل دره و میاناب می‌باشد، اکثریت زمین‌لغزش‌های منطقه نیز بر روی دامنه‌های دره‌های عمیق تا نسبتاً عمیق (۴۴ درصد توده‌های لغزشی) و یا بر روی یال‌های مرتفع (۲۵/۷ درصد توده‌های لغزشی) اتفاق افتاده‌اند (جدول ۶).

جدول ۶: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از لندفرم‌ها

لندفرم	مساحت کلاس		مساحت توده‌های لغزشی		نسبت فراوانی	فاکتور قطعیت
	به هکتار	به درصد	به هکتار	به درصد		
کانیون‌ها، آبراهه‌های عمیقاً حفر شده	۲۹۱۹۰/۰۲	۳۰/۹۲	۲۸۵/۸۴	۴۴/۰۰	۱/۴۲۳	۰/۲۹۹
زهکش‌های دامنه‌های میانی، دره‌های کم‌عمق	۲۴۱۸/۲۷	۲/۵۶	۲۰/۸۹	۳/۲۲	۱/۲۵۶	۰/۲۰۵
زهکش‌های مرتفع، سرشاخه‌ها	۲۲۱۳/۳۰	۲/۳۴	۲۵/۶۳	۳/۹۴	۱/۶۸۳	۰/۴۰۹
دره‌های U-شکل	۹۱۰۰/۹۴	۹/۶۴	۴۸/۲۲	۷/۴۲	۰/۷۷۰	-۰/۲۳۱
دشت‌های کوچک	۲۹۶۷/۱۷	۳/۱۴	۲/۱۶	۰/۳۳	۰/۱۰۶	-۰/۸۹۵
دامنه‌های فراخ	۴۶۳۳/۴۸	۴/۹۱	۲۳/۱۳	۳/۵۶	۰/۷۲۵	-۰/۲۷۶
دامنه‌های (شیب‌های) فوقانی، مزها	۸۲۸۱/۱۳	۸/۷۷	۴۰/۳۱	۶/۲۱	۰/۷۰۸	-۰/۲۹۴
ستیغ‌ها یا تپه‌های محلی در دره‌ها	۲۲۹۳/۷۰	۲/۴۳	۱۷/۳۶	۲/۶۷	۱/۱۰۰	۰/۰۹۲
ستیغ‌های دامنه میانی، تپه‌های کوچک در دشت‌ها	۲۸۳۱/۹۸	۳/۰۰	۱۹/۴۱	۲/۹۹	۰/۹۹۶	-۰/۰۰۴
قله‌های کوه، ستیغ‌های مرتفع	۳۰۴۸۷/۸۳	۳۲/۲۹	۱۶۶/۶۷	۲۵/۶۶	۰/۷۹۵	-۰/۲۰۷

### کاربری اراضی (پوشش زمین)

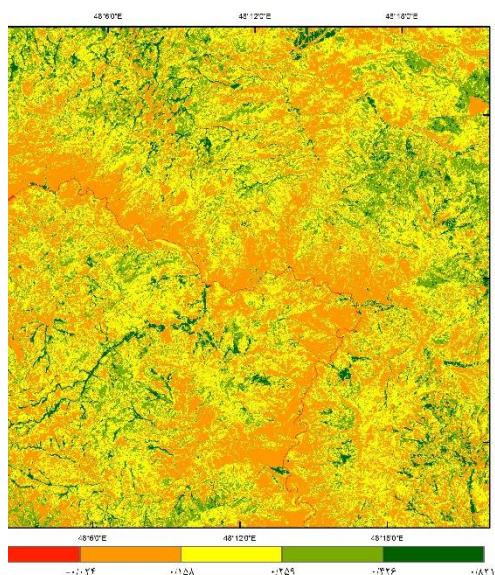
لایه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از روی تصویر ماهواره‌ای Google Earth با قدرت تفکیک بالا و تصویر ماهواره‌ای Sentinel2 مربوط به تابستان ۲۰۱۷ میلادی به روش طبقه‌بندی نظارت شده در محیط نرم‌افزار ENVI تهیه شد (شکل ۹). کاربری‌های عمده منطقه مطالعاتی عمدتاً به صورت اراضی کشاورزی دیم و مراتع می‌باشند. در واقع، به علت کمبود منابع آب زیرزمینی و جریان یافتن رودخانه‌های منطقه در داخل دره‌های باریک و عمیق و همچنین وجود خاک‌های جوان و تکامل نیافته (رده انتی‌سل)، کشاورزی آبی منطقه اغلب به صورت باغاتی است که بر روی دشت‌های سیلابی کم عرض و محدود منطقه واقع شده‌اند. بنابراین کشت دیم (غلات) الگوی غالب کشاورزی منطقه مطالعاتی می‌باشد و در حدود ۲۷ درصد منطقه به این نوع کشت اختصاص یافته است. پوشش عمده زمین در منطقه به صورت مراتعی است که اغلب دارای پوشش گیاهی ضعیفی می‌باشند. مراتع با پوشش گیاهی نسبتاً غنی در محدوده بین روستاهای سوران - کبودچی - کزج - دوگر در شرق منطقه گسترده شده‌اند. اراضی بایر یا با پوشش گیاهی بسیار ضعیف عمدتاً مربوط به شیب‌های بسیار تند دره رودخانه قزل‌اوزن می‌باشد که اصولاً امکان تشکیل خاک و استقرار پوشش گیاهی وجود ندارد. توده‌های آب منطقه مربوط به رودخانه‌های دائمی (کیوی‌چای و قزل‌اوزن) منطقه می‌باشد. با توجه به نوع پوشش اراضی منطقه مطالعاتی بدیهی است که اغلب لغزش‌های منطقه در کلاس مراتع و اراضی دیم قرار بگیرند. با توجه به توزیع



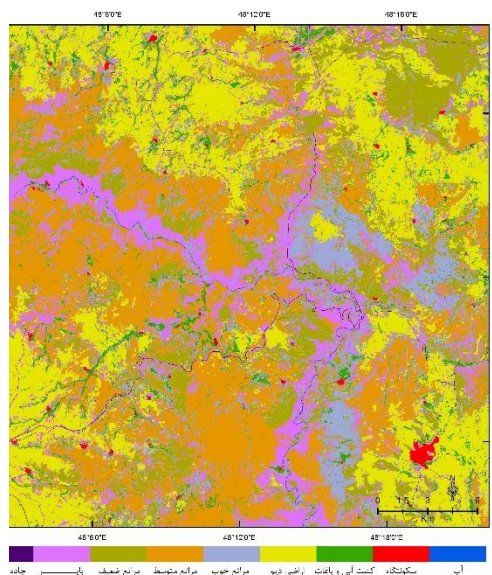
توده‌های لغزشی در هر یک از کلاس‌های کاربری اراضی عمده منطقه (جدول ۷) می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل عدم وجود تفاوت‌های اساسی در توزیع توده‌های لغزشی در کلاس‌های مراتع و اراضی دیم (به عنوان کاربری‌های غالب منطقه) تاثیر کاربری اراضی در وقوع لغزش‌های منطقه اندک می‌باشد.

جدول ۷: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از کلاس‌های کاربری اراضی منطقه

فاکتور قطعیت	نسبت فراوانی	مساحت توده‌های لغزشی		مساحت کلاس		کاربری اراضی
		به درصد	به هکتار	به درصد	به هکتار	
-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۳۱۵/۶۳	جاده آسفالت
۰/۳۱۳	۱/۴۵۲	۱۸/۲۴	۱۱۸/۴۷	۱۲/۵۶	۱۱۸۵۸/۴۸	اراضی بایر
۰/۰۲۶	۱/۰۲۶	۱۶/۴۵	۱۰۶/۸۸	۱۶/۰۳	۱۵۱۳۹/۳۴	مراتع ضعیف
۰/۲۸۲	۰/۹۲۸	۲۵/۸۲	۱۶۷/۷۵	۲۷/۸۳	۲۶۲۷۹/۳۴	مراتع متوسط
-۰/۰۷۳	۱/۳۸۹	۱۶/۰۵	۱۰۴/۲۷	۱۱/۵۶	۱۰۹۱۲/۳۶	مراتع نسبتاً خوب
-۰/۲۰۳	۰/۷۹۸	۲۱/۸۴	۱۴۱/۸۹	۲۷/۳۷	۲۵۸۴۰/۴۱	اراضی دیم
-۰/۵۷۱	۰/۴۳۱	۱/۵۹	۱۰/۳۶	۳/۷۰	۳۴۹۵/۶۱	اراضی کشاورزی آبی و باغات
-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۷	۴۴۲/۳۰	سکونتگاه
-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۴	۱۳۴/۳۴	توده‌های آب



شکل ۱۰: نقشه شاخص NDVI منطقه مطالعاتی



شکل ۹: نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی

### پوشش گیاهی

برای تکمیل کاربری اراضی، نقشه پوشش گیاهی منطقه تهیه شد. در این زمینه، شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) مورد استفاده قرار گرفت. NDVI نسبت محدودشده در دامنه بین -۱ تا +۱ است. مقدار این شاخص هر قدر به ۱ نزدیکتر باشد نشان‌دهنده تراکم بالاتر پوشش گیاهی است. مقادیر این شاخص برای منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده



پایین بودن تراکم پوشش گیاهی منطقه می‌باشد (شکل ۱۰)؛ به طوریکه، در حدود ۳۷ درصد از منطقه مطالعاتی دارای پوشش گیاهی بسیار ضعیف تا بایر می‌باشند. مقادیر بسیار پایین این شاخص (کمتر از ۰/۱۵۸) عمدتاً در دامنه‌های پرشیب مشرف به رودخانه‌های کیوی‌چای و قزل‌اوزن دیده می‌شوند. تنها ۳/۵ درصد از منطقه مطالعاتی دارای مقادیر بالای شاخص NDVI (بیشتر از ۰/۴) می‌باشند و اغلب شامل باغات یا درختانی است که به صورت پراکنده در اطراف آبراهه‌های اصلی منطقه روییده‌اند. پراکندگی توده‌های لغزشی در هر کلاس از لایه موضوعی پوشش گیاهی (جدول ۸) تایید کننده نتایج حاصل از اثرات کاربری اراضی می‌باشد. در حالت کلی، فراوانی نسبی زمین‌لغزش‌ها برای سه کلاس بسیار ضعیف، ضعیف و متوسط، مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد که حاکی از تاثیر اندک پوشش گیاهی در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه می‌باشد. این امر را در مقیاس کلی می‌توان به پایین بودن تراکم پوشش گیاهی نسبت داد. طبقه اول (عاری از پوشش گیاهی) شامل توده‌های آب می‌باشد و به همین دلیل دارای فراوانی نسبی صفر می‌باشد. طبقه با پوشش گیاهی بالا نیز عمدتاً شامل اراضی کشاورزی آبی و باغات می‌باشد که علاوه بر اثرات مقاومت مکانیکی درختان موجود در این مناطق، اصولاً به دلیل شیب اندک زمین احتمال وقوع زمین‌لغزش اندک است.

جدول ۸: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از کلاس‌های شاخص NDVI

فاکتور قطعیت	نسبت فراوانی	مساحت توده‌های لغزشی		مساحت کلاس		شاخص NDVI	
		به درصد	به هکتار	به درصد	به هکتار	کمی	کیفی
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۶	۱۵۰/۸۴	-۰/۰۲۴ - -۰/۴۷	عاری از گیاه
۰/۰۰۱	۱/۰۰۱	۳۶/۶۲	۲۳۷/۹۱	۳۶/۵۷	۳۴۵۳۳/۲۳	-۰/۱۵۸ - -۰/۰۲۴	بسیار ضعیف
۰/۰۶۷	۰/۹۳۳	۳۸/۰۴	۲۴۷/۱۳	۴۰/۷۶	۳۸۴۸۳/۶۳	۰/۱۵۸ - ۰/۲۵۹	ضعیف
۰/۲۰۲	۱/۲۵۱	۲۳/۷۳	۱۵۴/۱۴	۱۸/۹۷	۱۷۹۰۸/۷۲	۰/۲۵۹ - ۰/۴۲۶	متوسط
۰/۵۴۸	۰/۴۵۴	۱/۶۱	۱۰/۴۴	۳/۵۴	۳۳۴۱/۳۹	۰/۴۲۶ - ۰/۸۲۱	بالا

### جاده‌های ارتباطی

در پژوهش حاضر به منظور بررسی اثرات جاده‌های منطقه (ترافیک و دستکاری چشم‌اندازها بواسطه عملیات خاک‌برداری و تسطیح)، مخصوصاً جاده مواصلاتی خلخال - سرچم به عنوان مهم‌ترین جاده ارتباطی منطقه، لایه موضوعی فاصله از جاده‌های اصلی منطقه تهیه شد. در حدود ۴/۵ درصد از زمین‌لغزش‌های منطقه در پیرامون جاده‌های ارتباطی و تا شعاع ۲۵۰ متری از آنها اتفاق افتاده‌اند (جدول ۹). تمرکز اصلی این زمین‌لغزش‌ها در امتداد جاده مواصلاتی خلخال - سرچم در

حد فاصل تقریبی روستاهای مزرعه و کبودچی تا روستای قشلاق می‌باشد. مطابق بررسی‌های میدانی، نقشه توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها و تاثیر سایر متغیرها (مخصوصاً متغیر سنگ‌شناسی)، می‌توان بیان داشت که دلیل اصلی تمرکز زمین‌لغزش‌های منطقه در این محدوده در درجه اول مربوط به کنترل شدید متغیر لیتولوژی می‌باشد. هرچند که جاده‌ها می‌توانند به عنوان متغیر محرک در نظر گرفته شوند (به دلیل تغییرات سطوح ناهمواری و لرزش‌ها و تکانه‌های ناشی از وسایط نقلیه)؛ اما باید توجه داشت که در منطقه مطالعاتی، زمین‌لغزش‌ها عمدتاً در محدوده‌هایی پراکنده می‌باشند که از شرایط لیتولوژیکی مساعدی برخوردار می‌باشند. بنابراین، با توجه به کنترل شدید شرایط لیتولوژیکی بر روی زمین‌لغزش‌های منطقه، پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در پیرامون امتداد خاصی از جاده خلخال - سرچم معلول سنگ‌شناسی حساس به لغزش می‌باشد.

به دلیل شرایط توپوگرافی و فیزیوگرافی منطقه در اطراف جاده خلخال - سرچم در امتداد دره رودخانه کیوی‌چای، در برخی موارد، ایجاد ترانشه‌ها و دستکاری ناهمواری‌ها به منظور عملیات راه‌سازی، احتمال وقوع زمین‌لغزش را افزایش داده است. این امر مخصوصاً در مقاطعی دیده می‌شود که توده‌های رسوبات منفصل بواسطه عملیات خاک‌برداری به صورت پرشیب و عمودی نسبت به جاده ارتباطی ظاهر شده‌اند. هرچند در مواردی با ایجاد دیواره‌های نگهدارنده سعی در جلوگیری از ناپایداری این رسوبات منفصل نموده‌اند اما ارتفاع اندک دیواره‌ها و در برخی موارد حجم زیاد رسوبات باعث عدم کارایی مناسب این دیواره‌ها شده است. اثرات تحرک و ناپایداری این رسوبات به صورت ایجاد ترک‌ها و شکاف‌هایی بر روی دیواره‌های نگهدارنده رسوبات ظاهر شده است (اشکال ۱۱ و ۱۲). این رسوبات به دلیل منفصل بودن، در هنگام بارندگی و ذوب برف‌ها می‌توانند رطوبت زیادی را جذب نموده و بواسطه اشباع و افزایش وزن از شرایط بسیار مناسبی برای جابجایی ناگهانی و رخداد زمین‌لغزش برخوردار شوند.

جدول ۹: مساحت توده‌های لغزشی، نسبت فراوانی و مقادیر فاکتور قطعیت هر یک از کلاس‌های لایه فاصله از جاده

فاصله از جاده	مساحت کلاس		مساحت توده‌های لغزشی		نسبت فراوانی	فاکتور قطعیت
	به هکتار	به درصد	به هکتار	به درصد		
۰-۲۵۰	۱۰۰۲۳/۵۸	۱۰/۶۲	۲۸/۵۹	۴/۴۰	۰/۴۱۵	-۰/۵۸۷
۲۵۰-۵۰۰	۸۵۶۱/۶۳	۹/۰۷	۴۶/۰۰	۷/۰۸	۰/۷۸۱	-۰/۲۲۰
۵۰۰-۷۵۰	۷۵۶۲/۸۶	۸/۰۱	۴۴/۴۸	۶/۸۵	۰/۸۵۵	-۰/۱۴۶
۷۵۰-۱۰۰۰	۶۷۴۱/۹۴	۷/۱۴	۳۷/۹۱	۵/۸۴	۰/۸۱۷	-۰/۱۸۴
۱۰۰۰-۱۲۵۰	۵۸۷۸/۹۲	۶/۲۳	۲۱/۰۵	۳/۲۴	۰/۵۲۰	-۰/۴۸۱
۱۲۵۰-۱۵۰۰	۴۹۳۶/۹۵	۵/۲۳	۲۷/۹۴	۴/۳۰	۰/۸۲۲	-۰/۱۷۹
۱۵۰۰-۱۷۵۰	۴۳۸۶/۷۸	۴/۶۵	۲۸/۵۹	۴/۴۰	۰/۹۴۷	-۰/۰۵۳
۱۷۵۰-۲۰۰۰	۴۰۶۰/۹۲	۴/۳۰	۱۸/۱۴	۲/۷۹	۰/۶۴۹	-۰/۳۵۲
۲۰۰۰-۲۲۵۰	۳۷۷۲/۷۵	۴/۰۰	۱۴/۴۵	۲/۲۲	۰/۵۵۷	-۰/۴۴۵
< ۲۲۵۰	۳۸۴۹۱/۴۸	۴۰/۷۷	۳۸۲/۴۵	۵۸/۸۷	۱/۴۴۴	۰/۳۱۰



شکل ۱۲: احداث دیواره‌های نگهدارنده کم‌ارتفاع جهت جلوگیری از ناپایداری دامنه‌ای



شکل ۱۱: رخنمون رسوبات منفصل و مستعد لغزش در اطراف جاده خلخال - سرچم در امتداد دره کیوی چای در نتیجه ایجاد ترانشه

### پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک

در این تحقیق جهت پهنه‌بندی و پیش‌بینی مکانی رخداد زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره، از رگرسیون لجستیک استفاده شد. این روش زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که پاسخ، کیفی و به صورت بود و نبود باشد. در مورد زمین‌لغزش‌ها، وجود (۱) یا عدم وجود (۰) زمین‌لغزش به عنوان مقادیر متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. مزیت رگرسیون لجستیک این است که متغیرها می‌توانند هم به صورت پیوسته و هم به صورت گسسته، و یا ترکیبی از هر دو نوع باشند و لازم نیست که لزوماً توزیع نرمال داشته باشند (لی و سامبث<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶: ۸۵۵-۸۴۷؛ ییلماز<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹: ۱۱۳۸-۱۱۲۵). معادله رگرسیون لجستیک برای منطقه مطالعاتی به صورت زیر حاصل شد<sup>۳</sup>:

Regression Equation:

رابطه (۷)

$$\text{Logit (Landslide)} = -11.0756 + 1.321947 * \text{Aspect} + 1.079102 * \text{Elevation} + 0.692897 *$$

$$\text{Landcover} + 0.709544 * \text{Landform} + 2.735826 * \text{Lithology} + 0.368100 * \text{NDVI} + 0.823022 *$$

$$\text{Road} + 1.323833 * \text{Slope} + 0.968291 * \text{Stream}$$

ROC و pseudo R<sup>2</sup> دو آماره مهم آزمون معناداری مدل رگرسیون لجستیک می‌باشد که برای منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۳۷۲ و ۰/۹۱۲ می‌باشند. مقدار pseudo R<sup>2</sup>، با احتیاط نشان می‌دهد که مدل logit چگونه مجموعه داده‌ها را برازش می‌دهد. بنابراین، pseudo R<sup>2</sup> برابر با ۱ نشان‌دهنده برازش کامل می‌باشد، درحالی‌که مقدار ۰ نشان‌دهنده عدم وجود رابطه است. زمانی‌که pseudo R<sup>2</sup> بزرگتر از ۰/۲ باشد، یک برازش نسبتاً خوب را نشان می‌دهد (ایالو و یاماگیشی، ۲۰۰۵: ۳۱-۱۵). رویکرد جایگزینی که برای تفسیر ساده‌تر نیز می‌باشد توجه به این امر است که مدل، واقعا چه مقدار متغیر

<sup>۱</sup> - Lee and Sambath

<sup>۲</sup> - Yilmaz

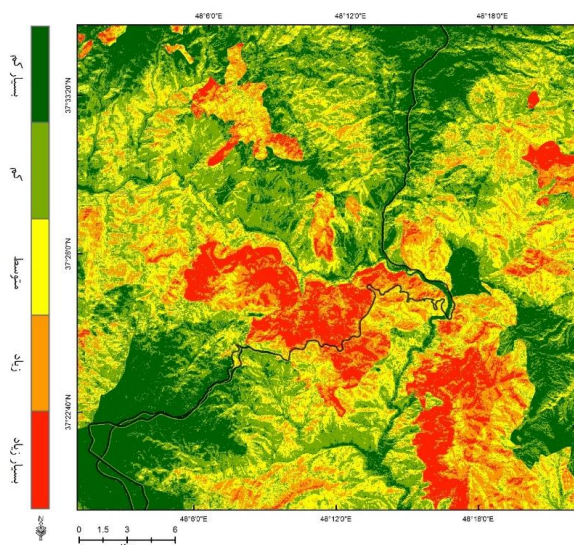
<sup>۳</sup> - طبقات هر یک از لایه‌های موضوعی با استفاده از تراکم زمین‌لغزش‌ها کمی گردیده و سپس لایه‌ها استانداردسازی شدند.

وابسته را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. در این مورد، نرم‌افزار TerrSet اصطلاحاً مشخصه عامل نسبی<sup>۱</sup> (ROC) را برای مقایسه یک نقشه بولین «واقعیت»<sup>۲</sup> (وجود یا عدم وجود زمین‌لغزش‌ها) با نقشه احتمالاتی به کار می‌گیرد. دامنه ارزش ROC از ۰/۵ تا ۱ می‌باشد، که در آن ۱ نشان‌دهنده یک برازش کامل و ۰/۵ نشان‌دهنده یک برازش اتفاقی است (ایالو و یامایشی، ۲۰۰۵: ۱۵-۳۱). در سال‌های اخیر، استفاده از ROC بدلیل در دسترس بودن نرم‌افزارهای کامپیوتری برای تولید راحت منحنی و نیز محاسبه مساحت زیر منحنی متداول‌تر شده است (کلینوم و کلین، ۲۰۱۰: ۳۴۶). این شاخص از آنجایی اهمیت دارد که مبنای آن مقادیر حقیقی احتمال نیست بلکه در نظر گرفتن مقادیر احتمال به صورت رتبه‌ای است. یعنی خروجی رگرسیون لجستیک که به صورت مقادیر احتمال وقوع می‌باشد به صورت نسبی بررسی می‌گردد. این مساله در تحقیق حاضر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه مساحت حرکات توده‌ای نسبت به مساحت کل منطقه مورد مطالعه ناچیز می‌باشد، لذا تعداد صفرها (عدم وقوع) در نمونه‌گیری بسیار بیشتر از تعداد یک‌ها (وقوع) خواهد بود و در نتیجه مقادیر احتمال بدست آمده به سمت اعداد پایین‌تر سوق پیدا می‌کند. در صورتیکه در شرایط برابر چنین روندی صادق نمی‌باشد. در شاخص ROC، ماکزیمم احتمال به صورت نسبی بررسی می‌گردد لذا از این جهت شاخص بسیار مناسبی است (حسین زاده و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۷-۳۷).

مقادیر آماره‌های آزمون معناداری مدل رگرسیون لجستیک نشان‌دهنده تناسب زیاد این مدل برای منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در این رابطه، شاخص ROC با مقدار بالاتر از ۰/۹ از اهمیت زیادتری برخوردار می‌باشد و توان مدل مذکور در تبیین زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. با توجه به ضرایب متغیرهای مستقل (رابطه ۷) می‌توان نتیجه گرفت که چهار متغیر لیتولوژی، شیب، جهت شیب و ارتفاع مهمترین متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشند. نکته قابل توجه، وزن بسیار سنگین متغیر لیتولوژی نسبت به سایر متغیرها می‌باشد. این امر نشان‌دهنده حساسیت بسیار شدید برخی از واحدهای سنگ‌شناسی منطقه نسبت به وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. اهمیت لیتولوژی در نقشه خروجی از مدل رگرسیون لجستیک نیز به خوبی نمایان است (شکل ۱۳)؛ به طوری‌که می‌توان بیان داشت که سایر متغیرها نقش محلی تشدید کننده یا محدود کننده را ایفا نموده‌اند. ضرایب پایین لایه‌های موضوعی لندفرم، پوشش زمین و پوشش گیاهی را می‌توان به تغییرپذیری فضایی اندک این متغیرها و همچنین توزیع فضایی نسبتاً یکنواخت زمین‌لغزش‌های منطقه در کلاسه‌های این لایه‌ها نسبت داد. به همین دلیل می‌توان به تاثیر اندک این متغیرها در وقوع لغزش‌های منطقه پی برد. ضریب جاده‌های ارتباطی منطقه با مقدار ۰/۸ نشان‌دهنده تاثیر نسبتاً اندک این متغیر در وقوع لغزش‌های منطقه می‌باشد.

<sup>۱</sup> - relative operating characteristic

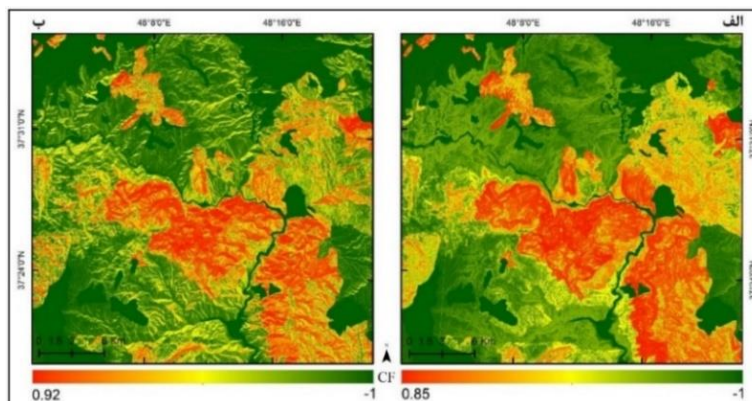
<sup>۲</sup> - reality



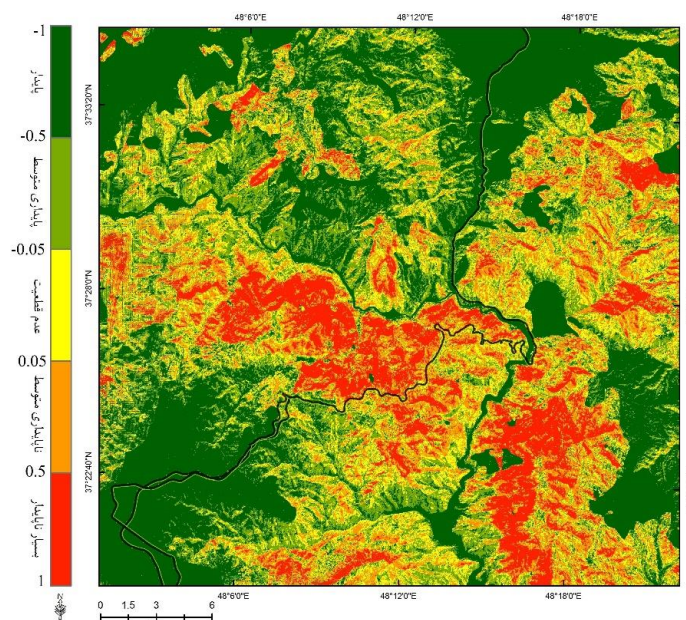
شکل ۱۳: پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک

#### پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از فاکتور قطعی

مدل فاکتور قطعی، یکی دیگر از مدل‌هایی است که جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد استفاده قرار گرفت. برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از این مدل، ابتدا هر لایه موضوعی با لایه سیاهه لغزش تلفیق گردید و از این طریق تراکم زمین‌لغزش در هر کلاس لایه موضوعی (PP<sub>a</sub>) و همچنین تراکم زمین‌لغزش در کل منطقه (PP<sub>s</sub>) بدست آمد. سپس مطابق رابطه (۴) مقدار فاکتور قطعی برای هر یک از کلاس‌های لایه‌های موضوعی محاسبه شد (جداول ۱ تا ۹). مقادیر فاکتور قطعی وارد جداول توصیفی لایه‌های موضوعی شده و براساس آن، لایه‌ها طبقه‌بندی مجدد گردیدند. برای تلفیق لایه‌های موضوعی از رابطه (۵) استفاده شد و تعداد هشت تلفیق صورت گرفت (لایه فاصله از گسل در پهنه‌بندی دخالت داده نشد). برای نمونه، لایه لیتولوژی به عنوان X و لایه شیب به عنوان Y در نظر گرفته شد و مطابق رابطه فوق‌الذکر (با در نظر گرفتن سه حالت: هر دو بزرگتر یا مساوی صفر، مختلف‌العلامه و هر دو کوچکتر از صفر) با هم تلفیق شدند. سپس نتیجه تلفیق این دو لایه، دوباره به عنوان X در نظر گرفته شد و با لایه بعدی (برای نمونه جهت شیب به عنوان Y) مطابق رابطه (۵) تلفیق گردید (شکل ۱۴). لایه نهایی مطابق جدول (۱۰) به پنج کلاس خطر طبقه‌بندی شد (شکل ۱۵). از مزایای مدل فاکتور قطعی این است که لایه‌ها به صورت جمع جبری ساده با هم تلفیق نمی‌شوند و مطابق قانون انتگرال‌گیری، وزن لایه‌ها با هر تلفیق تغییر می‌یابد. همچنین با هر بار تلفیق عامل جدید (Y)، اهمیت آن عامل در وقوع زمین‌لغزش مشخص می‌شود که این امر می‌تواند به انتخاب موثرترین عوامل در وقوع زمین‌لغزش برای منطقه‌ای خاص کمک کند. کنترل شدید متغیر لیتولوژی بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه در این روش پهنه‌بندی نیز همانند مدل فوق مشهود است. با اینکه ۲۱ واحد مختلف سنگ‌شناسی در منطقه مطالعاتی وجود دارد اما مقادیر فاکتور قطعی (CF) تنها برای چهار واحد سنگ‌شناسی بیشتر از صفر می‌باشد. واحد OI-v2 با مقدار فاکتور قطعی ۰/۶۲ و واحد OI-t با مقدار فاکتور قطعی ۰/۷۱ دارای حساسیت بسیار شدیدی نسبت به وقوع ناپایداری دامنه‌ای به صورت زمین‌لغزش هستند.



شکل ۱۴: الف: نقشه حاصل از تلفیق لایه‌های لیتولوژی و شیب؛ ب: نقشه حاصل از تلفیق نتیجه لیتولوژی - شیب با جهت شیب



شکل ۱۵: نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل فاکتور قطعیت

جدول ۱۰: طبقه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با مقادیر حاصل از مدل فاکتور قطعیت (لان و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۰۹-۱۲۸؛ بیناکی و همکاران، ۱۹۹۸: ۷۷-۹۷؛ سوجاتا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۳۳۷-۱۳۵۰)

کلاس خطر	توصیف	دامنه فاکتور قطعیت	کد
بسیار کم	قطعیت بسیار کم وقوع لغزش - پایدار	-۱ - -۰/۵	۱
کم	قطعیت کم وقوع لغزش - پایداری متوسط	-۰/۵ - -۰/۰۵	۲
عدم قطعیت	عدم قطعیت	-۰/۰۵ - ۰/۰۵	۳
بالا	قطعیت بالای وقوع لغزش - ناپایداری متوسط	۰/۰۵ - ۰/۵	۴
بسیار بالا	قطعیت بسیار بالای وقوع لغزش - بسیار ناپایدار	۰/۵ - ۱	۵

<sup>۱</sup> - Sujatha

تفاوت اساسی در نتایج این مدل‌ها مربوط به مرز کلاسه‌های خطر می‌باشد. بدیهی است که این امر در ارتباط با روش‌شناسی متفاوت این مدل‌ها می‌باشد. برای انتخاب مدل مناسب از شاخص نسبت تراکم، شاخص جمع مطلوبیت و مشاهدات میدانی بهره گرفته شد. برای هر دو مدل مقدار شاخص جمع کیفیت تقریباً مشابه هم می‌باشد (۲/۴) برای رگرسیون لجستیک و ۲/۱ برای فاکتور قطعیت). هر چند که به نظر می‌رسد نتایج مدل رگرسیون لجستیک نسبت به فاکتور قطعیت اندکی دقیق‌تر است. با این حال، نتایج پهنه‌بندی نشان‌دهنده کارایی بالای این مدل‌ها در تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش می‌باشند. از نظر درصد مساحت کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد، هر دو روش نتایج تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند بطوریکه می‌توان گفت در حدود ۲۳ درصد منطقه مورد مطالعه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. این پهنه‌ها عمدتاً منطبق بر محدوده روستاهای کهران - یوزناب - اسمرود - محمودآباد - سوران در شرق رودخانه کیوی‌چای، محدوده مابین روستاهای کزج - دایوکنندی در دامنه‌های شرقی مشرف به رودخانه قزل‌اوزن (غرب شهر هسجین) و پیرامون جاده ارتباطی خلخال - سرچم از محل تلاقی جاده با رودخانه قزل‌اوزن تا محدوده روستای قشلاق می‌باشد.

مجموعه‌ای از شرایط باعث شده است که رخداد زمین‌لغزش در قسمت‌هایی از منطقه مطالعاتی از احتمال وقوع بسیار بالایی برخوردار باشند. با وجود این، پراکندگی سازندهای خاص زمین‌شناسی که شرایط بسیار مساعدی را برای ناپایداری دامنه‌ای به صورت تخریب توده‌ای فراهم می‌سازند در درجه اول اهمیت قرار دارند. اکثر زمین‌لغزش‌های منطقه بر روی واحدهای سنگ‌شناسی OI-v2 (تراکی بازالت و تراکی آندزیت) و OI-t (توف سنگی، برش آتشفشانی و لاهار) رخ داده‌اند. در نتایج حاصل از پهنه‌بندی و پیش‌بینی مکانی هر دو مدل مورد استفاده نیز پهنه‌های منطبق بر این واحدها به دلیل وزن سنگین در فرایند ترکیب لایه‌های موضوعی از احتمال وقوع زمین‌لغزش بالایی برخوردار می‌باشند. این امر مخاطره جدی برای سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌های مستقر بر روی این پهنه‌ها ایجاد می‌کنند. بخشی از جاده ارتباطی خلخال - سرچم به طول تقریبی ۲۳ کیلومتر از روی این پهنه‌ها عبور می‌کند و جزو حساس‌ترین پهنه‌ها نسبت به وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی می‌باشند. وقتی منطقه‌ای نسبت به رخداد زمین‌لغزش بسیار حساس است عواملی مانند تکانه‌ها و لرزش‌های ناشی از جنبش گسل‌ها و حتی عبور و مرور وسایط نقلیه سنگین می‌تواند به عنوان ماشه عمل نموده و باعث ناپایداری و تحرک توده‌های مواد شوند. خاک‌برداری و ایجاد ترانشه‌ها و یا برعکس، افزایش بار ناشی از احداث تاسیسات و ساختمان‌ها می‌تواند محرکی بر وقوع زمین‌لغزش باشد. در واقع، مقایسه نقشه لیتولوژی (شکل ۷) با توزیع فضایی زمین‌لغزش‌های منطقه (شکل ۵)، معادله رگرسیون لجستیک (رابطه ۷)، مقادیر فاکتور قطعیت (جدول‌های ۱ تا ۹) و نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از مدل‌های کمی تحقیق (شکل‌های ۱۳ و ۱۵) نشان‌دهنده تاثیر قاطع سنگ‌شناسی بر رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی می‌باشد. در این رابطه، واحدهای توفی و توف‌دار و واحد تراکی بازالت و تراکی آندزیت کنترل شدیدی بر وقوع لغزش‌های منطقه اعمال نموده‌اند. آشکار است که توزیع زمین‌لغزش‌ها بر روی این واحدهای حساس توسط سایر متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش کنترل می‌شوند. در این رابطه، شیب، جهت شیب و ارتفاع نقش تعیین‌کننده‌ای بر وقوع زمین‌لغزش بر روی این واحدهای سنگ‌شناسی ایفا می‌کنند. پراکندگی زمین‌لغزش‌ها بر روی سایر واحدهای لیتولوژیکی بسیار تصادفی بوده و حاصل دخالت چندین عامل اثرگذار به صورت محلی می‌باشد.

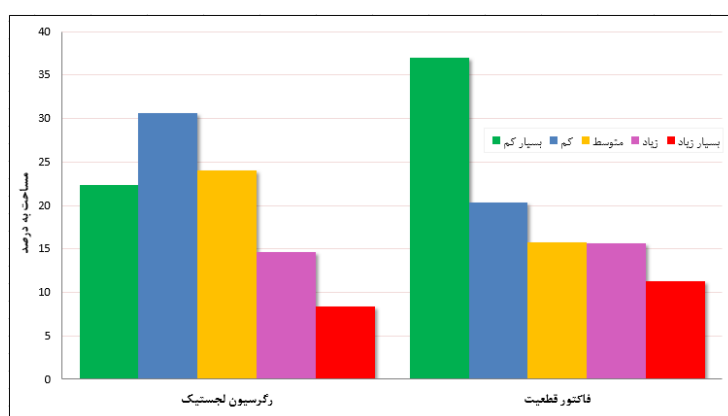
نکته قابل توجه، علاوه بر فراوانی زیاد، مربوط به حجم توده‌های لغزشی می‌باشد. برخی از زمین‌لغزش‌هایی که بر روی این سازندها اتفاق افتاده‌اند از حجم و مساحت زیادی برخوردار می‌باشند که تهدیدات ناشی از این نوع مخاطره ژئومورفولوژیکی را مضاعف می‌سازد. در واقع، حساسیت زیاد این واحدهای سنگ‌شناسی نسبت به تخریب و هوازگی باعث انباشت حجم زیادی از مواد بر روی دامنه‌ها شده است که با مساعدت سایر شرایط، زمین‌لغزش‌های عظیمی ممکن است رخ دهد. در اینگونه موارد، نقش مکانیکی ریشه‌های گیاهان بی‌اثر می‌شود و حتی به دلیل افزایش نفوذ آب و در نتیجه افزایش وزن مواد و کاهش اصطکاک نقش تشدید کننده‌ای در رخداد زمین‌لغزش ایفا می‌کنند. با توجه به کنترل بسیار شدید لیتولوژی بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، اقدامات حفاظتی باید بر روی این سازند متمرکز شود. می‌توان گفت رخداد زمین‌لغزش بر



روی سایر واحدهای سنگ‌شناسی در کنترل متغیرهای دیگری از قبیل شیب، جهت شیب، زیربردگی مواد در نتیجه فرسایش کناره مجرای رودخانه‌ها و سایر شرایط محلی می‌باشد.

بخشی از جاده خلخال - سرچم در امتداد دره رودخانه کیوی‌چای احداث شده است که در امتداد مسیر خود توسط تونل‌های مختلف در دل ناهمواری‌های منطقه امتداد یافته است. بخش اعظمی از واحدهای سنگ‌شناسی این محدوده منطبق بر بازالت‌ها و کنگلومراها می‌باشند. در منطقه مطالعاتی، این واحدها از پتانسیل نسبتاً پایینی جهت زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند. اما به دلیل شیب بسیار زیاد و حالت پرتگاهی از شرایط بسیار مساعدی برای ریزش، واژگونی و سقوط تکه‌سنگ‌های کوچک و بزرگ برخوردار می‌باشند. نوسانات شدید درجه حرارت منطقه مطالعاتی شرایط بسیار مساعدی را برای اینگونه حرکات فراهم ساخته است که آثار آن به صورت تالوس‌ها و مخروط‌های واریزه‌ای در پای دامنه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. پهنه‌های با پتانسیل بالای وقوع زمین‌لغزش در امتداد این جاده به صورت لکه‌های کوچکی در نقشه‌های پهنه‌بندی دیده می‌شود. خاک‌برداری و ایجاد ترانشه‌ها، وجود سازندهای هوازده شده و منفصل به صورت محلی و شیب‌های در حدود ۳۵ تا ۶۰ درجه می‌تواند منجر به ناپایداری‌های موضعی شود. آثار این نوع ناپایداری‌ها به صورت ترک‌خوردگی دیواره‌های محافظ و نگهدارنده مشهود است.

زمین‌لغزش در سطح فلات‌های منطقه در چهار گوشه منطقه مطالعاتی به دلیل فقدان شرایط لازم از احتمال وقوع بسیار پایینی برخوردار می‌باشند. در دامنه‌های با شیب بسیار تند مشرف به رودخانه‌های قزل‌اوزن و کیوی‌چای، فرایندهای ناپایداری دامنه‌ای عموماً به صورت ریزش و سقوط سنگ‌ها عمل می‌کنند و تخریب توده‌ای از احتمال پایین‌تری برخوردار می‌باشد.



شکل ۱۶: نمودار درصد مساحت کلاس‌های خطر منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های رگرسیون لجستیک و فاکتور قطعیت

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خطر وقوع زمین‌لغزش برای مناطق پیرامون جاده ارتباطی خلخال - سرچم با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارزیابی و پهنه‌بندی گردید. در این رابطه از دو مدل رگرسیون لجستیک و فاکتور قطعیت استفاده شد. رگرسیون لجستیک، یکی از مناسب‌ترین رویکردها در زمینه پیش‌بینی مکانی خطر وقوع زمین‌لغزش می‌باشد و بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اساسی این مدل در این است که تمامی متغیرهای مستقل به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و وارد مدل می‌شوند. در پژوهش حاضر، نتایج حاصل از این روش به عنوان مطلوب‌ترین مدل تشخیص داده شد. مدل فاکتور قطعیت، یک مدل احتمالاتی دومتغیره است و از مدل‌های مناسب جهت پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. تفاوت عمده فاکتور قطعیت با سایر مدل‌های دومتغیره در نحوه تلفیق لایه‌های عاملی می‌باشد. درحالی‌که در سایر مدل‌های دومتغیره، لایه‌های عاملی به صورت جمع جبری ساده باهم تلفیق می‌شوند اما در مدل فاکتور قطعیت، تلفیق لایه‌ها براساس قوانین انتگرال‌گیری صورت می‌گیرد. تفاوت اساسی در نتایج مدل‌های پژوهش حاضر عمدتاً



مربوط به مرز کلاسه‌های خطر وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. این تفاوت در کلاسه‌های با خطر بسیار زیاد و زیاد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج پهنه‌بندی هر دو مدل مورد استفاده می‌توان بیان داشت که در حدود ۲۳ درصد منطقه مطالعاتی در معرض خطرات ناشی از رخداد زمین‌لغزش می‌باشد. این امر نشان‌دهنده اهمیت ناپایداری‌های دامنه‌های در تحول چشم‌اندازها، عرضه رسوب و تخریب منابع طبیعی منطقه مطالعاتی می‌باشد. بنابراین، ناپایداری‌های دامنه‌ای به صورت تخریب توده‌ای باید در هرگونه برنامه‌ریزی و آمایش فضا در این منطقه مدنظر قرار گیرند. در بین عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، شرایط لیتولوژیکی کنترل‌شده را اعمال می‌کند. پراکندگی فضایی اغلب زمین‌لغزش‌های منطقه بر روی واحدهای لیتولوژیکی خاصی می‌باشد. در این زمینه، واحدهای توفی و توفدار و واحد تراکی بازلت و تراکی آندزیت از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشند. احداث جاده ارتباطی خلخال - سرچم بر روی این واحدهای حساس به زمین‌لغزش نه تنها منجر به افزایش مخاطرات ناشی از رخداد زمین‌لغزش شده است بلکه خود این جاده نیز می‌تواند محرک ناپایداری دامنه‌ای شود. متغیرهای شیب، جهت شیب و ارتفاع نیز تاثیرات زیادی را بر روی رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه اعمال می‌کنند. تاثیر سایر شرایط را می‌توان به صورت محلی و موضعی در نظر گرفت.

### سپاس‌گزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با شماره ۱۹۳ تاریخ ۱۳۹۵/۱۲/۲۲ می‌باشد که با حمایت مالی حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردیده است. در این راستا، از زحمات این معاونت محترم قدردانی می‌گردد.

### منابع

- احمدی، حسن؛ اسمعیلی، اباذر؛ فیض‌نیا، سادات؛ شریعت‌جعفری، محسن. ۱۳۸۲. پهنه بندی خطر حرکت های توده‌ای با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغیره (*MR*) و تحلیل سلسله مراتبی (*AHP*) (مطالعه موردی حوزه آبخیز گرمی چای). منابع طبیعی ایران، دوره ۵۶، شماره ۴، صص ۳۲۳-۳۳۶.
- اسفندیاری درآباد، فریبا؛ بهشتی جاوید، ابراهیم؛ فتحی، محمدحسین. ۱۳۹۳. پهنه بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سیاهرود). جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۳، شماره ۱۲، صص ۱-۱۸.
- جباری، ایرج؛ میرنظری، جواد. ۱۳۸۶. پهنه بندی رویداد زمین لغزش در حوضه آبریز پشت تنگ شهرستان سرپل ذهاب (استان کرمانشاه). پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۹، شماره ۷، صص ۵۵-۶۷.
- حسین زاده، محمد مهدی؛ ثروتی، محمدرضا؛ منصوری، عادل؛ میرباقری، بابک؛ خضری، سعید. ۱۳۸۸. پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: محدوده مسیر سنج-دهگلان). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال سوم، شماره یازدهم، صص ۲۷-۳۷.
- رامشت، محمد حسین. ۱۳۷۵. کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی، منطقه‌ای، اقتصادی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه اصفهان.
- رسایی، آرمان؛ خسروی، خه‌بات؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ حیدری، ارکان؛ مشایخان، آرمین. ۱۳۹۴. پهنه بندی خطر زمین لغزش با مدل رگرسیون چند متغیره در محیط *GIS* (مطالعه موردی: حوزه آق مشهد، استان مازندران). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۶ شماره ۱۲، صص ۲۰۵-۲۱۵.
- روستایی، شهرام؛ خیری‌زاده آروق، منصور؛ سرافروزه، سلیمان؛ نجفی ایگدیر، احمد. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل فاکتور قطعیت (منطقه مورد مطالعه: گردنه گویجه‌بل تا شهر اهر)، اولین همایش انجمن ایرانی ژئومورفولوژی.
- سازمان زمین‌شناسی کشور. نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، برگه‌های هشجین و کیوی به همراه گزارشات.
- شریعت‌جعفری، محسن. ۱۳۷۵. زمین‌لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی). انتشارات سازه.

- شیرانی، کورش؛ حاجی هاشمی جزی، محمدرضا؛ نیک‌نژاد، سیدعلی؛ رخشا، سلیمان. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین لغزش به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR) (مطالعه موردی: سراب حوضه کارون شمالی). نشریه مرتع و آبخیزداری (مجله منابع طبیعی ایران)، دوره ۶۵، شماره ۳، صص ۳۹۵-۴۰۹.
- فیض‌نیا، سادات؛ حسن‌زاده، محمد؛ احمدی، حسن. ۱۳۸۰. پهنه بندی خطر زمین لغزش حوزه آبخیز شلمان رود در استان گیلان. منابع طبیعی ایران، دوره ۵۴، شماره ۳، صص ۲۰۷-۲۲۰.
- متکان، علی اکبر؛ سمیعا، جلال؛ پورعلی، سیدحسین؛ صفایی، مهرداد. ۱۳۸۸. مدل های منطق فازی و سنجش از دور جهت پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز لاجیم. زمین‌شناسی ژئوتکنیک (زمین‌شناسی کاربردی)، دوره ۵، شماره ۴، صص ۳۱۸-۳۲۵.
- متولی، صدرالدین؛ اسماعیلی، رضا؛ حسین‌زاده، محمد مهدی. ۱۳۸۸. تعیین حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز واز (استان مازندران). فصلنامه جغرافیای طبیعی، شماره ۵، صص ۷۳-۸۴.
- مکرم، مرضیه؛ نگهبان، سعید. ۱۳۹۳. طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) (مطالعه موردی: منطقه جنوبی شهرستان داراب). فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۳، شماره ۹۲، صص ۵۷-۶۵.
- Aksoy, B and Ercanoglu, M. 2012. Landslide identification and classification by object-based image analysis and fuzzy logic: An example from the Azdavay region (Kastamonu, Turkey), *Computers & Geosciences* 38: 87-98.
- 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.
- Bai, Shibiao et al. 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; Rampini, A. 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster- Shafer approaches. *Natural hazards* 17: 77-97.
- Castellanos Abella, Enrique Armando. 2008. Multi-scale landslide risk assessment in Cuba. Doctoral thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., & Sdao, F. 2014. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). *Catena*, 113, 236-250.
- Cornforth D. H. 2005. *Landslide in practice*. John Wiley.
- Das, Iswar; Sahoo, Sashikant; Van Westen, Cees; Stein, Alfred; Hack, Robert. 2010. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology* 114: 627-637.
- Devkota, K. C; Regmi, A. D; Pourghasemi, H. R; Yoshida, K; Pradhan, B. 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 the international society for the prevention and mitigation of natural hazards*.
- Ercanoglu M and F. A. Temiz. 2011. Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). *Environ Earth Sci* 64: 949-964.
- Gemtzi A., Falalakis G., Eskioglou P., Petalas C. 2010. Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, fuzzy membership functions and GIS. *Global nest*, vol.12
- Hamza, T., & Raghuvanshi, T. K. 2017. GIS based landslide hazard evaluation and zonation—A case from Jeldu District, Central Ethiopia. *Journal of King Saud University-Science*, 29 (2), 151-165.

- Hsu, C. H., Tsao, T. C., Huang, C. M., Lee, C. F., & Lee, Y. T. 2016. Using Remote Sensing Techniques to Identify the Landslide Hazard Prone Sections along the South Link Railway in Taiwan. *Procedia Engineering*, 143, 708-716.
- Jenness, Jeff. 2006. Topographic Position Index (TPI) v. 1.2. <http://www.jennessent.com>
- Kanungo, D. P; Arora, M.K; Sarkar, Shantanu; Gupta, R. 2009. Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping - A Review. *Journal of South Asia Disaster Studies*. Vol. 2 No. 1: 81- 105.
- Kleinbaum D. G and Klein M. 2010. *Logistic regression, a self-learning text*. Springer.
- Komac, Blaz and Matija, Zorn. 2008. Statistical landslide susceptibility modeling on a national scale: the example of Slovenia. IAG regional conference on geomorphology landslides, floods and global environmental change in mountain regions, Brasov.
- Lan, H. X; Zhou, C.H; Wang, L.J; Zhang, H.Y; Li, R.H. 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology* 76. 109- 128.
- Lee S, Sambath T. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environ Geol* 50:847–855.
- Lee S. 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environ Geol* 52:615–623.
- Long, N. T. 2008. Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in a Luoi district, ThuaThien Hue province, Vietnam. Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the degree of Doctor in Engineering.
- Melchiorre, C et al. 2008. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation, *Geomorphology* 94: 379–400.
- Oconnell Ann A. 2006. *Logistic regression models for ordinal response variables*. Sage Publications.
- Remondo, J; Gonzalez, A; Teran, J.R.D.D; Cendrero, A; Fabbri, A; Chung, Chang-Jo F. 2003. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards* 30 (3), pp 437-449.
- Saito, H., Murakami, W., Daimaru, H., & Oguchi, T. 2017. Effect of forest clear-cutting on landslide occurrences: Analysis of rainfall thresholds at Mt. Ichifusa, Japan. *Geomorphology*, 276, 1-7.
- Schicker R and Moon V. 2012. Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale. *Geomorphology* 161–162: 40–57.
- Seif, A. 2014. Using Topography Position Index for Landform Classification (Case study: Grain Mountain). *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, Vol 3: 33-39.
- Sujatha, E. R; Rajamanickam, G.V; Kumaravel, P. 2012. Landslide susceptibility analysis using probabilistic certainty factor approach: a case study on Tevankarai stream watershed, India. *Earth System Science*, 121, No. 5, pp. 1337-1350.
- Van Westen, C. J & Soeters, R. 1998. *Geographic information systems in slope instability zonation (GISSIZ)*. ITC. 156p.
- Weiss, A. 2001. *Topographic Position and Landforms Analysis*. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.
- Yao, X., Tham, L. G., & Dai, F. C. 2008. Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, 101(4), 572-582.
- 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). *Comp Geosci* 35(6):1125–1138.