

Integration of Multi-criteria Decision Making Methods with Logistic Regression Approach to Assess Landslide-Prone Areas in Zilbir-Chai Basin

Mohamad Reza Nikjo ¹, Mohamad Hosein Rezaei Moghadam ², Soghra Andaryani ^{3*}

¹ Assistant Professor of Geomorphology and RS Groups, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Professor of Geomorphology and RS Groups, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Ph.D Candidate in Geomorphology, University of Tabriz and Master of RS & GIS, Tabriz, Iran

Abstract

Identifying susceptible areas to massive movements, including landslides, through risk modeling with appropriate and efficient models, is one of the basic measures in reducing potential damage and managing risk. The purpose of this study is to combine multi-criteria decision making techniques with logistic regression method to investigate landslide-prone areas in Zilbir-Chai basin. One of the methods is Weighted Linear Combination (WLC) method. In this model, firstly, the variables that are effective in landslide occurrences are subdivided into sub-criteria and each specific criterion is given a certain weight. In order to prevent the great role of the experts' taste, the landslides in the studied area were discarded with the sub-criteria of each variable, and the percentage of landslide occurrence in each of them was the criterion of weighting the sub-criteria. This way, Fuzzy standardization was done accordingly. In the WLC model, in addition to weighting the subcategories, the variables themselves are also generally weighted by the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. In the present study, in addition to conventional weighting, this weight was measured by logistic regression (RL) statistical method and weighing criterion were obtained, normalized, and applied directly to the variables in the WLC model. To achieve this purpose, modeling was performed using nine independent parameters. Geological factors, land use type, altitude, slope gradient and aspect, distance from fault, distance from road and distance from drainage network were considered as environmental factors, and rainfall quantity (obtained from precipitation layer) was considered as a trigger factor. According to the results obtained from WLC model based on logistic regression weighting, high and very high risk zones constitute about 7.4% of the area with a validation of 94/0, but based on AHP weighting, these zones constitute about 4.7% of the area with a validation of 90/0.

Key words: Analytical Hierarchy Process, Zilbirchay, Landslide, Logistic Regression, Weighted Linear Combination.

* s.andaryani@gmail.com

تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با روش رگرسیون لجستیک برای بررسی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش در حوضه زلیبیرچای

محمد رضا نیکجو، دانشیار گروه ژئومورفولوژی و سنجش از دور دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمد حسین رضایی مقدم، استاد گروه ژئومورفولوژی و سنجش از دور دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

صغری اندریانی*، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز، کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، تبریز، ایران

وصول: ۱۳۹۵/۰۴/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۷، صص ۳۳-۵۲

چکیده

شناسایی مناطق مستعد حرکت‌های توده‌ای از جمله زمین‌لغزش از راه الگوسازی خطر با الگوهای مناسب و کارا، یکی از اقدام‌های اساسی در کاهش خسارت احتمالی و مدیریت خطر است. هدف مطالعه حاضر، تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با روش آماری رگرسیون لجستیک برای بررسی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش در حوضه زلیبیرچای است؛ از جمله الگوهای یادشده، الگوی ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) است که در آن، ابتدا متغیرهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش به شکل زیرمعیارهایی تقسیم‌بندی می‌شوند و وزن خاصی به هر کدام از آنها تعلق می‌گیرد. برای جلوگیری از نقش سلیقه کارشناسی به عبارتی روش دلفی، زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه مطالعه شده با زیرمعیارهای هر متغیر قطع داده شدند و درصد مساحت وقوع زمین‌لغزش در هر یک از آنها ملاک وزن‌دهی زیرمعیارها قرار گرفت و استانداردسازی فازی بر این اساس انجام شد. در الگوی WLC علاوه بر وزن‌دهی به زیرمعیارها، به خود متغیرها نیز از راه روش فرایند تحلیلی سلسله‌مراتبی (AHP) وزنی اختصاص داده می‌شود. در مطالعه حاضر، علاوه بر وزن‌دهی معمول، وزن‌دهی از راه روش آماری رگرسیون لجستیک (RL) و ملاک قراردادن وزن‌های حاصل و نرمال‌سازی آنها نیز انجام و مستقیماً در الگوی WLC بر متغیرها اعمال شد. برای الگوسازی از ۹ شاخص مستقل اع لایه بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از گسل و فاصله از جاده استفاده شد. نتیجه الگوی WLC-RL نشان‌دهنده مساحتی حدود ۷/۴ درصد در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد با اعتبارسنجی ۰/۹۴ و با وزن‌دهی AHP و به صورت کارشناسی حدود ۴/۷ درصد با اعتبارسنجی ۰/۹۰ در پهنه‌های یادشده است. ۳۶ درصد مساحت منطقه نیز جزو پهنه‌های خطر متوسط است که این پهنه‌های خطر با سومدیریت و ساخت‌وسازهای عوارض انسانی از جمله جاده بدون توجه به ساختار ژئومورفولوژی و لیتولوژی منطقه متأثر شده و به پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد تبدیل می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: روش سلسله‌مراتبی، زلیبیرچای، زمین‌لغزش، رگرسیون لجستیک، الگوی ترکیب خطی وزن‌دار.

مقدمه

زمین‌لغزش و حرکت‌های توده‌ای خاک و مواد دامنه‌ای، شکلی از فرایندهای ژئومورفولوژیکی هستند که از دیدگاه مدیریت مخاطرات طبیعی، نوع ویژه‌ای از سوانح طبیعی قلمداد می‌شوند. هر ساله، وقوع این نوع پدیده‌ها در بخش‌هایی از کشور ما و سایر نقاط جهان به خسارت‌های جانی، مالی و زیست‌محیطی درخور توجهی منجر می‌شود (کرم، ۱۳۸۳: ۱۳۲). زمین‌لغزش، مخاطره‌ای زمین‌شناسی در جهان شناخته شده است که باعث تلفات جانی و مالی بسیار زیاد، آسیب شدید به اکوسیستم‌های طبیعی و عوارض ساخت بشر می‌شود (Dai and Lee, 2002: 214; Guzzetti et al., 2005: 273). آمار ثبت‌شده وزارت جهاد کشاورزی در ایران نشان می‌دهد تا اوایل سال ۱۳۷۸، وقوع حدود ۲۵۹۰ حرکت توده‌ای و لغزش در کشور باعث مرگ ۱۶۲ نفر، تخریب ۱۷۶ خانه، ایجاد خسارت‌های مالی به میزان ۱۸۶۶ میلیارد ریال، تخریب ۶۷۶ هکتار جنگل و تخریب ۱۷۰ کیلومتر راه ارتباطی شده است (گروه بررسی زمین‌لغزه‌های جهاد سازندگی به نقل از رأفت‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰: ۵۴)؛ به‌ویژه در منطقه مطالعه‌شده که بسیاری از روستاهای واقع در دامنه شمالی میشو روی تراس‌های رودخانه‌ای متشکل از عناصر منفصل قرار گرفته‌اند و ماهیت مواد سازنده دامنه‌های مشرف به روستاها عمدتاً از رسوبات میوسن و برش‌های ولکانیکی پلیوسن هستند، امکان وقوع حرکت‌های توده‌ای وجود دارد (مختاری، ۱۳۸۴: ۷۳). شناسایی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان را در

عرصه‌های مختلف از جمله مدیریت حفاظت خاک و منابع طبیعی، برنامه‌ریزی‌های عمرانی و توریستی، مکان‌یابی اراضی مناسب برای توسعه شهرها و روستاها، برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی، تعیین مسیر راهها و خطوط انتقال نیرو و انرژی و... یاری می‌کند (کرم، ۱۳۸۳: ۱۳۲). مطالعه و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری مناطق کوهستانی، نخستین گام در راستای کاهش آثار لغزش‌ها و ایجاد اطمینان لازم برای برنامه‌ریزی‌ها و انجام کارهای عمرانی است (بیاتی خطیبی، ۱۳۸۹: ۲)؛ به عبارتی ارزیابی خطر، نخستین مرحله مدیریت و کاهش خطر است و ارزیابی خطر زمین‌لغزش، احتمال وقوع آن را در یک مکان با یک دوره برگشت برآورد می‌کند (Van Westen et al., 2006: 168). نخستین گام در چنین مطالعه و ارزیابی‌هایی، شناختن رابطه بین شاخص‌های محیطی و لغزش‌های رخ داده است تا از این راه، مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش شناسایی شوند. عوامل محیطی و ماشه‌ای به‌عنوان کنترل‌کنندگان زمین‌لغزش‌ها شناخته شده‌اند (Van Westen et al., 2008: 112)؛ عوامل محیطی از جمله ارتفاع و لایه‌های منتج شده از این لایه (شیب، جهت شیب، انحنا و تراکم زهکشی)، زمین‌شناسی (نوع سنگ، گسل، جنبه‌های ساختاری و هوازدگی)، خاک (نوع خاک، عمق خاک و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک)، آب (فاصله از جریان آب و رطوبت خاک)، ژئومورفولوژی (برای نمونه، واحد فیزیوگرافی و واحد ژئومورفولوژی)، کاربری زمین (جاده‌ها، ویژگی‌های پوشش زمین و ساختمان‌ها) و عوامل ماشه‌ای مانند بارش، زلزله و آتش‌فشان به

کارآمد معرفی کردند. Hong و همکاران (۲۰۱۵) منطقه بیهانگ چین را با استفاده از روش‌های رگرسیون لجستیک، درخت تصمیم‌گیری و ماشین بردار پشتیبان از نظر پتانسیل وقوع زمین‌لغزش پهنه‌بندی و روش درخت تصمیم‌گیری را در سطح اطمینان ۹۵ درصد، بهترین روش با استفاده از ۱۴ عامل معرفی کردند. Zhang و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش شاخص آماری و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، ۹ عامل از عوامل محیطی را برای پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش کشور چین به کار بردند. کرم (۱۳۸۳) نواحی مستعد زمین‌لغزش را با استفاده از روش WLC و ۱۰ شاخص محیطی در حوضه آبریز سرخون پهنه‌بندی کرد. با توجه به نتایج پژوهش‌های انجام‌شده و رضایت پژوهشگران از الگوهای تصمیم‌گیری چندمعیاره، این الگو برای شناسایی مکان‌های مستعد زمین‌لغزش در پژوهش حاضر به کار گرفته شد. با وجود این، در وزندهی به الگوی یادشده علاوه بر الگوی تحلیل سلسله‌مراتبی، الگوی آماری رگرسیون لجستیک نیز برای وزندهی استفاده شد و در حوضه آبریز زلیبیرچای، مناطق مستعد زمین‌لغزش در هر دو الگو شناسایی شدند؛ با تعیین مناطق مستعد لغزش و پهنه‌های لغزشی، از ساخت سازه‌های آبخیزداری در این مناطق جلوگیری و در صورت نیاز، به پایدارسازی دامنه‌ها و پهنه‌های یادشده کمک می‌شود.

مواد و روش

منطقه مطالعه‌شده

محدوده مطالعه‌شده موسوم به حوضه آبریز زلیبیرچای با وسعتی معادل ۲۵۲۴/۳۶ کیلومتر مربع

عوامل مستعدکننده زمین‌لغزش معروف هستند (Zhu, 2014: 128; Zhang et al., 2016: 233) نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از الگوهای مختلف و برای شناخت حساسیت‌های موجود در منطقه تهیه می‌شوند (Anbalagan, 1992: 275; Pachauri and Pant, 1992: 95; Garrett, 1994: 129; Gong, 1996: 526; Saha et al., 2005: 67). بیشتر روش‌های استفاده‌شده، رابطه بین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و تحلیل‌های مکانی را بر اساس نمونه‌های تعلیمی و اختصاص وزن به هر یک از معیارها و زیرمعیارها برقرار می‌کنند؛ روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره از جمله روش‌های تحلیل و ارزیابی چندمعیاری پتانسیل وقوع پدیده هستند که انواع مختلفی مانند روش ترکیب خطی وزن‌دار^۱ (WLC) دارند. Feizizadeh و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تلفیق آنها با روش فازی، حوضه آبریز ایزه در شمال‌غرب ایران را پهنه‌بندی کردند. Dehnavi و همکاران (۲۰۱۵)، کل کشور ایران را با ترکیب روش تحلیل نسبت ارزیابی هوشمند^۲ و روش سیستم تطبیقی استنتاج فازی - عصبی^۳ از نظر پتانسیل وقوع زمین‌لغزش پهنه‌بندی کردند. Wang و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های رگرسیون لجستیک، تحلیل آماری دومتغیره و رگرسیون زبانه‌دار تطبیقی چندمتغیره^۴ به پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در شهر میزونامی کشور ژاپن اقدام و الگوی MARSpline را نسبت به دیگر الگوهای استفاده‌شده

¹ Weighted Linear Combination

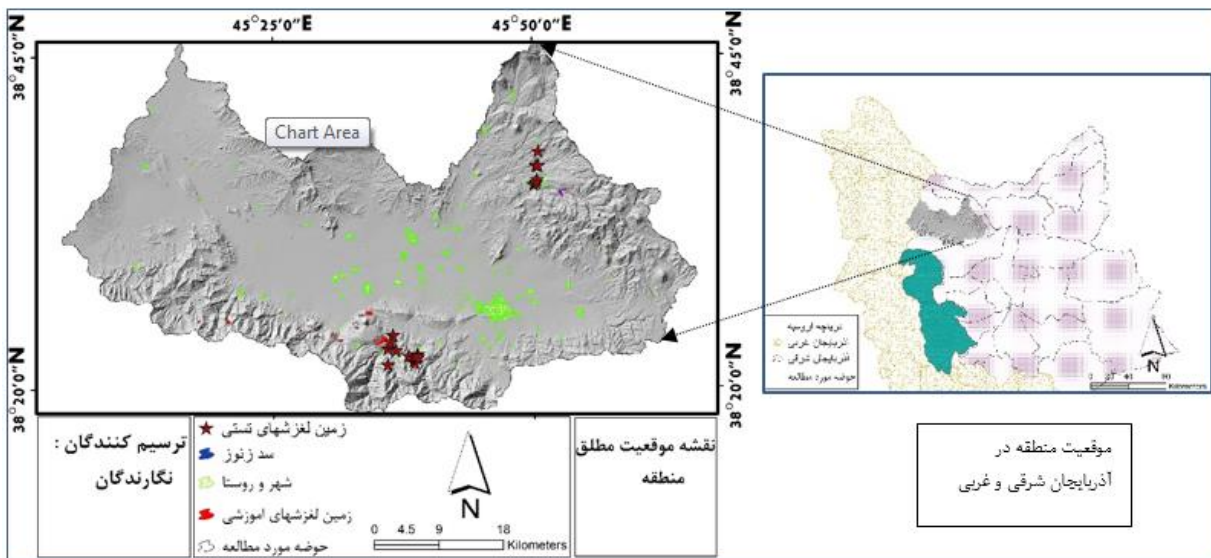
² step-wise weight assessment ratio analysis

³ adaptive neuro-fuzzy inference system

⁴ Multivariate adaptive regression splines

به همین نام خوانده می‌شود. رودخانه قطورچای با روند جنوبی - شمالی به رودخانه ارس ملحق می‌شود. موقعیت مطلق حوضه مطالعه شده در محدوده ۴۴، ۰۴، ۴۵ تا ۵۰، ۳۳، ۵۵ طول شرقی و ۰۹، ۱۸، ۳۸ تا ۵۷، ۴۰ عرض شمالی واقع شده و حداکثر ارتفاع حوضه ۳۲۲۹/۷ متر و حداقل ارتفاع در محل خروجی حوضه ۹۲۶/۴ متر از سطح دریاست (شکل ۱)

در ۷۰ کیلومتری شمال شهر تبریز واقع شده و بیشتر مساحت این حوضه در آذربایجان شرقی و مساحت اندکی از آن در آذربایجان غربی قرار گرفته است. این حوضه بخشی از حوضه آبریز رودخانه ارس است که با روند شرقی - غربی از پیوستن رودخانه زنوزچای تشکیل شده است و در شمال غرب حوضه و در نقطه خروجی به رودخانه قطورچای می‌پیوندد و پس از آن



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده



شکل ۲. زمین لغزش رخ داده در دامنه شمالی میشو، نگاه به سمت دشت کشکسرای

۲۷ متری به آن‌ها اختصاص داده شد و فاصله برای لایه‌های خطی رستر شده تعیین شد. سپس به طبقه‌بندی لایه‌ها به زیرمعیارها و قطع‌دادن لایه زمین‌لغزش با هریک از آن‌ها اقدام شد.

زیرمعیارهای طبقه‌بندی شده با توجه به اهمیت آن‌ها در ایجاد زمین‌لغزش، فازی‌سازی شدند. در روش ترکیب خطی وزن‌دار علاوه بر وزن یافتن تک‌تک زیرمعیارها، لازم است وزنی نیز به متغیرها اختصاص یابد که این وزن‌دهی یکبار با روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۱ AHP و بار دیگر با روش آماری رگرسیون لجستیک به الگوی نهایی اعمال و در نهایت با الگوی ROC^۲ اعتبارسنجی شد. گفتنی است یک‌چهارم ۶۴ نقطه زمین‌لغزشی به‌عنوان داده آموزشی کنار گذاشته شدند و ۴۷ عدد آن‌ها با استفاده از تصاویر کویک‌برد از وکتور نقطه‌ای به پهنه‌های لغزشی تبدیل شدند.

زمین‌شناسی منطقه: لایه لیتولوژی نقش بسیار مؤثری در ناپایداری‌های دامنه‌ای دارد (Ayalew and Yamagishi, 2004, 114; Kamp et al., 2008: 633; Zhu et al., 2014: 124) و اغلب، تنوع آن باعث اختلاف در پایداری و مقاومت سنگ‌ها و تنوع جنس خاک می‌شود (Ayalew and Yamagishi, 2004: 114). شکل (۲)، نقشه سنگ‌شناسی منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد که به ۱۵ طبقه تقسیم شده و بیشترین زمین‌لغزش رخ داده در شیل‌های سبزرنگ همراه با مارن اتفاق افتاده است. برای تأثیر دادن لایه لیتولوژی بر میزان لغزش بالقوه، این لایه از نظر مقاومت سنگ‌ها در برابر انواع حرکت‌های توده‌ای به ۵ طبقه تقسیم و در الگوی پهنه‌بندی استفاده شد (شکل ۳).

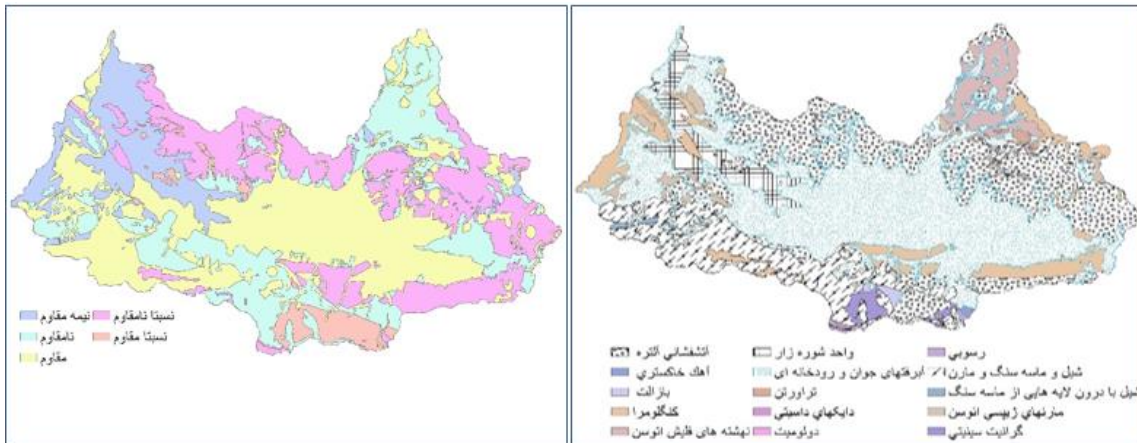
در پژوهش حاضر از داده‌ها، مواد و ابزارهایی به شرح زیر استفاده شده است:

از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ (Operational Land Imager) برای استخراج نقشه کاربری و پوشش اراضی مربوط به ۱۰ جولای سال ۲۰۱۵ و از الگوی رقومی ارتفاعی استر با اندازه پیکسل ۲۷ متری برای استخراج حوضه و تصحیح توپوگرافیکی تصویر لندست استفاده شد. از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ برای تولید رقومی لایه سنگ‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ برای تصحیح هندسی تصویر ماهواره‌ای، استخراج لایه شبکه زهکشی، شیب و جهت شیب، از دستگاه سیستم موقعیت جهانی و سامانه گوگل‌ارث برای برداشت نقاط تعلیمی و از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی، تبخیرسنجی و سینوپتیک اشاره شده در جدول (۱) برای تهیه لایه میانگین بارش سالانه در بازه زمانی بیست‌ساله در سطح حوضه استفاده شد؛ گفتنی است لایه بارش تهیه شده با روش زمین‌آمار جبری و بر اساس تغییرات بارش بر حسب تغییرات ارتفاع حاصل شد. ضریب تبیین بین ایستگاه‌های استفاده شده و ارتفاع آن‌ها ۰/۷۲ بود. نرم‌افزارهای تخصصی ENVI4.8، IDRISI17 و ARC GIS10.1 در مطالعه حاضر استفاده شدند.

عوامل متعددی در وقوع زمین‌لغزش مؤثر هستند؛ با توجه به در دسترس بودن عوامل، لایه‌های زمین‌شناسی، کاربری، ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از شبکه زهکشی به‌عنوان عوامل محیطی و لایه بارش به‌عنوان عامل ماشه‌ای استفاده شدند (Zhang et al., 2016: 234). ابتدا همه لایه‌های وکتوری به لایه رستری تبدیل شدند و به تبعیت از لایه رقومی ارتفاعی پیکسل اندازه

¹ Analytical Hierarchy process

² receiver operating characteristic



شکل ۳. لایه‌های زمین‌شناسی (سمت راست) و مقاومت سنگ‌ها (سمت چپ) در منطقه مطالعه شده

لایه بارش: نقشه میزان بارش با استفاده از رابطه خطی بین میانگین بارش بیست ساله ایستگاههای استفاده شده و ارتفاع منطقه حاصل و رابطه به شکل $P = 0.1355 H + 117/95$ محاسبه شد که دارای ضریب همبستگی $r = 0.85$ و معناداری در سطح ۱ درصد است (شکل ۴).

در این رابطه:

H: ارتفاع ایستگاه (منطقه) از سطح دریا بر حسب میلی‌متر؛
 P: میزان بارندگی سالانه ایستگاه (منطقه) بر حسب میلی‌متر.

گسل: مجاورت با گسل‌ها باعث ناپایداری و حساسیت شیب دامنه‌ها و افزایش نفوذپذیری سطح زمین می‌شود (Vahidnia و همکاران به نقل از Zhang et al., 2016: 235). گسل دامنه شمالی میشو در منطقه مطالعه شده از جمله نمونه‌هایی است که با جهت شرقی - غربی، ویژگی‌های خاصی از نظر ناپایداری‌های دامنه‌ای و پدیده‌های ژئومورفیکی دارد (مختاری، ۱۳۸۴: ۷۲). اطلاعات گسل‌های منطقه و عملکرد آن‌ها در منبع یادشده آمده و بافربندی فاصله از گسل در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۱. ایستگاه‌های استفاده شده در پژوهش حاضر

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	مختصات جغرافیایی به درجه	
				X	Y
۱	خوی	سینوپتیک	۱۱۰۳	۴۴.۹۷	۳۸.۵۵
۲	جلفا	سینوپتیک	۷۳۶	۴۵.۶۷	۳۸.۷۵
۳	مرند	سینوپتیک	۱۵۵۰	۴۵.۷۵	۳۸.۴۳
۴	زنوز	باران‌سنجی	۱۷۱۰	۴۵.۸۲	۳۸.۵۸
۵	میاب	باران‌سنجی	۲۲۰۰	۴۵.۸	۳۸.۷
۶	پیام	باران‌سنجی	۱۷۵۰	۴۵.۸	۳۸.۳۷
۷	چرچر	باران‌سنجی	۱۳۵۰	۴۵.۷	۳۸.۵۶
۸	مظفر	باران‌سنجی	۹۷۰	۴۵.۲۳	۳۸.۷۷

لایه ارتفاعی رقومی، لایه‌های شیب و جهت شیب استخراج شدند. لایه شیب و ارتفاع به طبقه‌هایی تقسیم‌بندی شدند که زیرمعیارها و درصد زمین‌لغزش‌های رخ داده در آن‌ها با نمودارهایی در بخش بحث و نتیجه نشان داده شده است. شیب جزو عواملی است که به‌تنهایی تأثیر بسیار زیادی در حرکت‌های توده‌ای دارد و در پژوهش‌های مربوط به پهنه‌بندی استفاده می‌شود (Clerici et al., 2002: 351; Sützen and Doyuran, 2004: 305; Vahidnia et al., 2010: 1103; Zhang et al., 2016: 237). در لایه جهت شیب نیز چند پیکسل (۵ پیکسل) جزو طبقه بدون شیب بودند که در جهت شیب شمال با توجه به مساحت بسیار اندک آن ادغام شدند. عامل جهت شیب تعیین‌کننده ویژگی‌هایی مانند هوازدهی‌ها، شرایط هوازدهی‌ها (بارش و ذوب برف)، پوشش گیاهی و شرایط خاک (ظرفیت نفوذ) است؛ از این رو، در هشت جهت جغرافیایی به الگو معرفی شد.

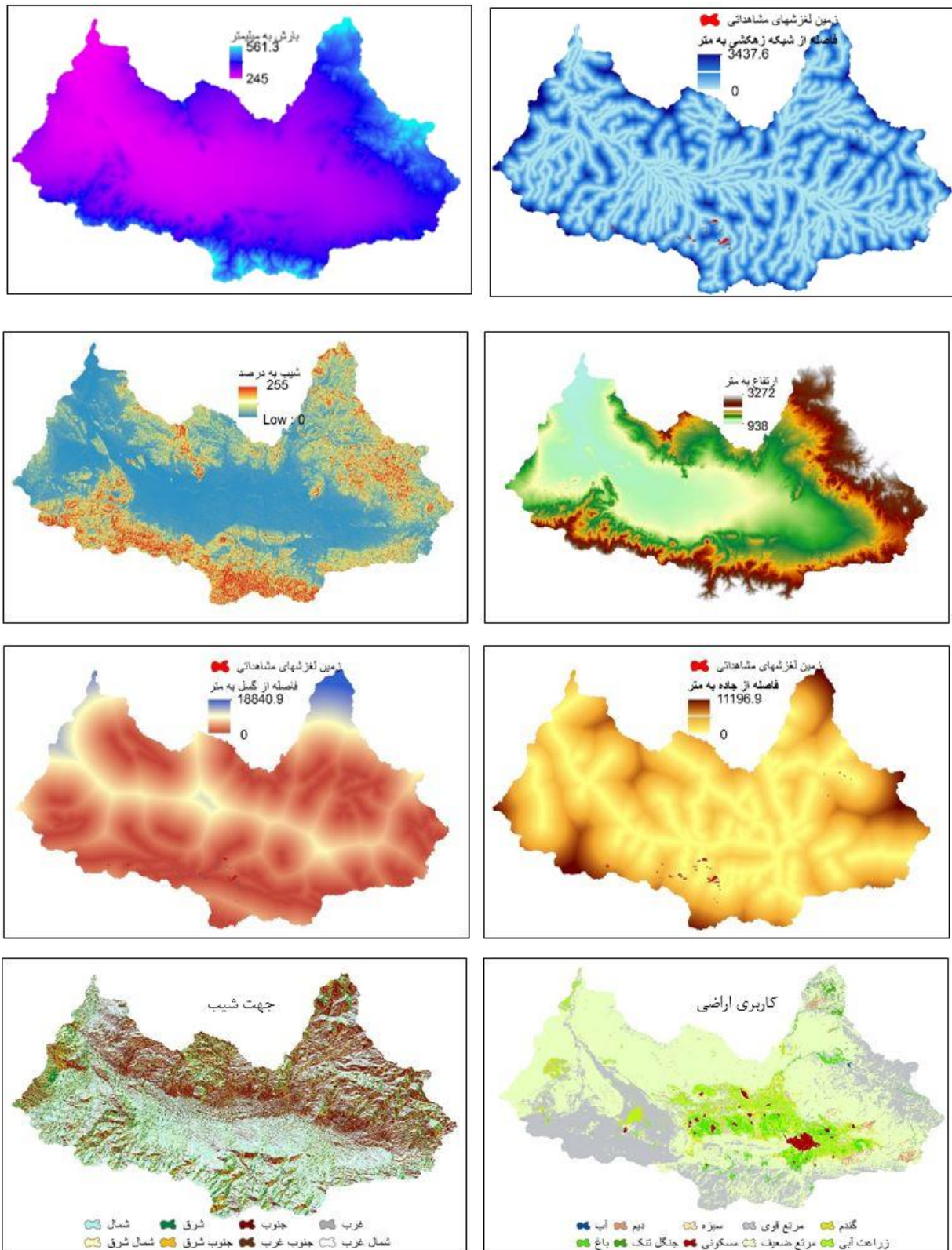
فاصله از جاده و شبکه زهکشی: جاده یکی از عوامل آنتروپوژنیک مؤثر در حساسیت وقوع حرکت توده‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش است. وجود جاده و تعریض آن باعث تشدید حرکت‌های توده‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش در جاده‌های روستایی منطقه مطالعه شده است (مختاری، ۱۳۸۸: ۲۱). برای استفاده از عامل جاده به‌عنوان عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در اطراف جاده‌های آسفالتی و اصلی، بافرهایی به‌اندازه ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ متر و بیشتر ایجاد شدند. Van Westen و همکاران (۲۰۰۳) پیشنهاد کردند استفاده از بافرهای ۵۰ متری برای لایه‌های خطی رودخانه و جاده.

عامل کاربری اراضی: این عامل به‌عنوان عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش به الگو معرفی شد. از انواع کاربری اراضی، تأثیر گیاهان بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش‌ها پیچیده است و به ثبات مکانیکی ناشی از وجود ریشه در عمق خاک، رطوبت خاک و اثر آن در تعرق، وزن درختان و تأثیر باد بستگی دارد (Nilaweera and Nutalaya, 1999: 339). در مطالعه حاضر، تمام کاربری‌های موجود در منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استخراج و در الگو اعمال شدند. برای طبقه‌بندی تصویر و استخراج لایه کاربری - پوشش اراضی از روش نظارت‌شده ناپارامتریک ماشین بردار پشتیبان^۱ استفاده شد؛ این روش طبقه‌بندی‌کننده به شکل باینری عمل و دو کلاس را با استفاده از یک فراصفحه^۲ از هم جدا می‌کند. به‌طور کلی، در پژوهش حاضر از روش نظارت‌شده ناپارامتریک پیکسل پایه به علت دقت زیاد آن در طبقه‌بندی (Vapnik, 1999: 139؛ Mantero et al., 2005: 560؛ اندریانی، ۱۳۹۳: ۱۱۰؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۷۰) استفاده شد (شکل ۴).

لایه ارتفاعی: لایه رقومی ارتفاعی استر با اندازه پیکسل ۲۷ متر، لایه ارتفاعی در نظر گرفته شد. اگرچه با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، عامل ارتفاع تأثیر بسزایی در وقوع زمین‌لغزش دارد (Kamp et al., 2008: 633; Zhu et al., 2014: 124)، به نظر می‌رسد این تأثیر با افزایش ارتفاع رابطه مستقیم و خطی ندارد؛ زیرا عوامل مؤثر دیگری رابطه خطی و مستقیم را در هم می‌ریزند و میزان این تأثیر در مناطق مختلف با توجه به ساختارهای موجود در منطقه تغییر می‌کند. از

¹ Support Vector Machine

² Hyperplane



شکل ۴. تصویر عوامل استفاده‌شده در الگوی تصمیم‌گیری چندمعیاره

و n برابر تعداد معیارها و در مطالعه حاضر برابر ۸ است. w_i و w_j عناصر نرمال‌کردن وزن بردار ویژه W هستند. جمع وزن‌های هر مقایسه به شکل رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad \text{رابطه ۲}$$

از مقایسه دوجه‌دوی ماتریس A ، وزن بردار W طبق رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$AW = \lambda_{\max} W \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، λ_{\max} بیشترین مقدار ویژه ماتریس A است و چنانچه نتیجه ماتریس به شکل رابطه ۴ باشد، ماتریس سازگار تلقی می‌شود.

$$a_{ij} = a_{ik} * a_{kj} \text{ for } i, j, k = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۴}$$

در این روش، نرخ ناسازگاری (CR) کمتر از ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود و چنانچه از این مقدار بیشتر شود، بایستی در مقایسه زوجی معیارها تجدیدنظر شود. محاسبه میزان ناسازگاری به محاسبه شاخص سازگاری (CI، رابطه ۵) و شاخص سازگاری تصادفی (RI) نیاز دارد.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{رابطه ۵}$$

شاخص سازگاری تصادفی از جدول (۲) و بر اساس تعداد معیارها حاصل می‌شود.

روش‌های یادشده از مبانی زیر تبعیت می‌کنند:

فازی‌سازی عوامل مؤثر: در پژوهش حاضر، از

مجموعه فازی معرف کاربر^۱ برای استانداردسازی عوامل پیوسته و گسسته استفاده شد (Schmuck, 1984: 10-192; Burrough, 1989: 485). در این استانداردسازی، وزن ۱ به زیرمعیار دارای تناسب بیشتر با رخداد زمین‌لغزش و وزن صفر به زیرمعیار دارای کمترین تناسب با رخداد یادشده تعلق گرفت. به این منظور، با استفاده از روش هیستوگرام و تحلیل مکانی، تک‌تک کلاس‌های معیارها با لایه وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعه شده قطع داده شدند.

روش سلسله‌مراتبی در سه گام اصلی انجام شد:

۱. تعریف معیار بررسی شده برای تصمیم‌گیری؛
۲. مقایسه دوجه‌دوی معیارهای تعریف شده؛
۳. ارزش‌دهی معیارها با توجه به اهمیت وجودی آن‌ها. گفتنی است اهمیت و ارزش معیارها باید به شکل کارشناسی انتخاب شود. اگرچه Saaty و Vargas (۱۹۹۱) شاخصی را برای ناسازگاری تصمیم‌های اتخاذشده تعریف کرده‌اند، سلیقه و دیدگاه‌های کارشناسان متفاوت است و این مسئله تأثیر بسزایی بر نتیجه تصمیم‌گیری دارد.

ماتریس A که در آن، معیارها دوجه‌دو مقایسه

می‌شوند به شکل رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$A = (a_{ij}) = \left(\frac{w_i}{w_j} \right) \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

رابطه ۱

در رابطه ۱، a_{ij} ترجیح یک معیار بر دیگری است

که می‌تواند به شکل $a_{ij} = 1$ و $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ ، $a_{ij} > 0$ باشد

¹ User Defined

جدول ۲. مقدار شاخص سازگاری تصادفی برای تعداد مختلف معیار (n) (Saaty, 1977: 260)

n	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰/۰	۰/۰۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۱	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

نرخ ناسازگاری به شکل رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$\text{رابطه ۶} \quad \text{CR} = \frac{\text{CI}}{\text{RI}}$$

وزن‌دهی به معیارها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و استفاده از نظر کارشناسان انجام شد؛ به این شکل که ابتدا معیارها بر اساس میزان تأثیرشان در ماتریس ۹ در ۹ مرتب شدند و سپس در مقایسهٔ دوبه‌دو معیارها، امتیازی بین ۱ تا ۹ به آن‌ها تعلق گرفت.

رگرسیون لجستیک^۱ از جمله روش‌های آماری پیش‌بینی‌کننده است که روند گسترش متغیر وابسته را با استفاده از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌کند. در پژوهش حاضر که رویکردهای سیستم اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته شده‌اند، معیارهای مستقل و وابسته به رستری (تصویری که جزء کوچک آن را پیکسل تشکیل می‌دهد) تبدیل شدند. متغیر وابسته، زمین‌لغزش‌های رخ داده هستند که به شکل لایهٔ باینری (صفر و یک) و متغیرهای مستقل، عوامل مؤثر در زمین‌رخداد زمین‌لغزش هستند که به شکل لایه‌های استاندارد شدهٔ فازی (صفر تا یک) و یا طبقه‌بندی شده در نظر گرفته شدند؛ متغیر وابسته با کلاس یک دنبال‌کنندهٔ منحنی لجستیک است.

برای اعتبارسنجی الگوی رگرسیون لجستیک از شاخص‌های Chi Square، Pseudo R Square و ROC^۲ استفاده شد و برای بررسی عملکرد رگرسیون لجستیک و اعتبارسنجی الگوی رگرسیونی ۱۰ درصد

از کل پیکسل‌های تصویر که به شکل تصادفی سیستماتیک انتخاب شده بودند، در برازش الگو استفاده شد (اندریانی، ۱۳۹۳: ۱۴۸).

آزمون Pseudo R Square برای برازش مجموعه داده‌ها استفاده و از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۷} \quad \text{PR2} = 1 - \left(\frac{2\text{Log(Likelihood)}}{2\text{Log(L0)}} \right)$$

در رابطه ۷، Log(Likelihood) مقدار تابع احتمال برای الگوی کامل زمانی برازش و Log(L0) مقدار تابع احتمال است به شرطی که تمام ضرایب بجز عرض از مبدأ، صفر باشند. مقدار PR Square برابر ۱ نشان‌دهندهٔ برازش کامل الگو و مقدار صفر نشان‌دهندهٔ نبود رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل و مقدار بیشتر از ۰/۲ نشان‌دهندهٔ برازش به نسبت خوب الگو است (Ayalew and Yamagishi, 2004: 113)

آزمون Chi Square از اختلاف بین $-2 \text{ Log(Likelihood)}$ برای الگوی بهترین برازش و -2 Log(L0) برای فرضیهٔ صفر حاصل می‌شود. در صورت بیشتر بودن این شاخص از مقدار عددی ۱۴/۱، فرضیهٔ صفر رد می‌شود. فرضیهٔ بررسی شده در این آزمون، صفر فرض کردن همه ضرایب بجز عرض از مبدأ^۳ است.

ROC شاخص آماره برتری برای اندازه‌گیری برازش نیکویی رگرسیون لجستیک و دیگر روش‌های آماری است. دامنهٔ عددی آن بین صفر تا ۱ متغیر است

^۱ Logistic Regression

^۲ Relative Operating Characteristic

^۳ Intercept

استاندارد شده هر معیار با روش فازی‌سازی و نظر کارشناسی تعیین می‌شود و باتوجه به اینکه مرز کاملاً مشخصی در این مجموعه‌ها وجود ندارد یا به عبارتی تبدیل آن‌ها بین عضویت و عدم عضویت در یک مجموعه به شکل تدریجی است، مجموعه فازی به وسیله درجه عضویت فازی آن مشخص شد و دامنه‌ای بین صفر تا ۱ به آن‌ها تعلق می‌گیرد که نشان‌دهنده افزایش پیوسته از عدم عضویت به سمت عضویت کامل است.

یافته‌های پژوهش

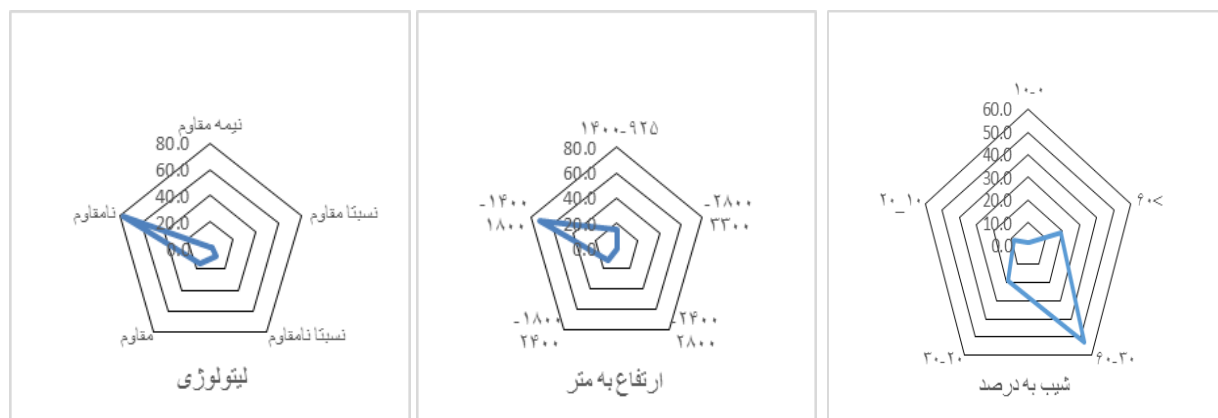
در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، از چندین لایه مؤثر بر وقوع پدیده‌ای خاص استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، هر ۹ لایه استفاده شده با زمین‌لغزش‌های رخ داده قطع شدند. شکل (۵)، درصد وقوع زمین‌لغزش‌ها را در هر یک از زیرمعیارهای عوامل نشان می‌دهد.

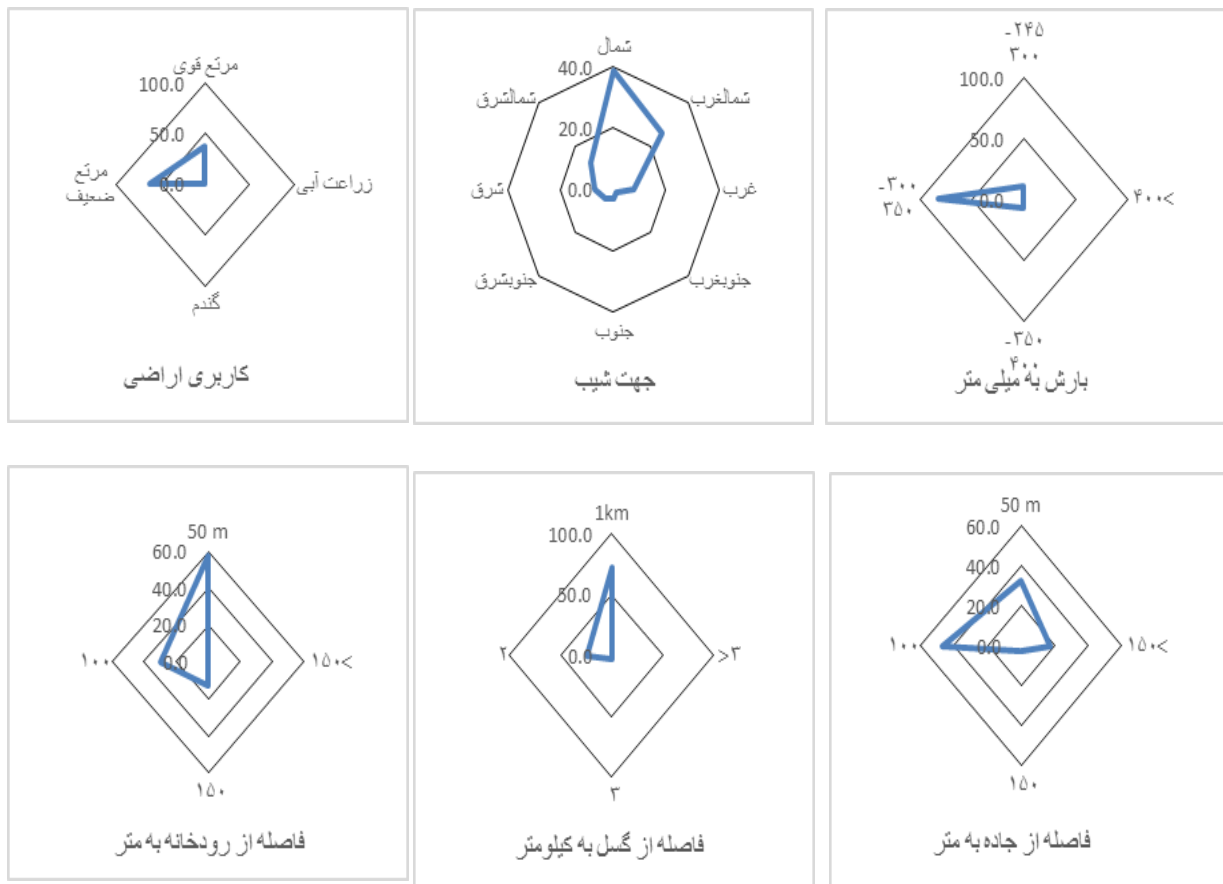
و اعداد ۱ و ۰/۵ به ترتیب نشان‌دهنده برآزش کامل و برآزش تصادفی هستند.

روش ترکیب خطی وزن‌دار: در پژوهش حاضر، از روش ترکیب خطی وزن‌دار (Weighted Linear Combination) در محیط ARC GIS برای تولید نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش استفاده شد. هدف ارزیابی چندمعیاری در پژوهش حاضر، انتخاب بهترین جایگزین بر مبنای رتبه‌بندی زمین‌لغزش از راه ارزیابی چند معیار اصلی است. برای دستیابی به هدف این ارزیابی، معیارها تعریف و تعیین و به شکل عامل (Factor) دسته‌بندی می‌شوند (Malczewski, 1999: 199). در این روش تصمیم‌گیری، مقدار هر جایگزین بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود (Oruc, 2003: 2451; Pontius et al., 2001: 195; Eastman, 2012: 132).

$$S_w = \sum_{i=1}^n W_i * S_i \quad \text{رابطه ۸}$$

در رابطه فوق، SW: میزان مطلوبیت، W_i : وزن هر معیار و S_i : ارزش استاندارد شده هر معیار است. ارزش





شکل ۵. درصد زمین‌لغزش‌های رخ داده در هر یک از زیرمعیارهای موجود در معیارها

جلوگیری از حذف زیرمعیار کم‌ارزش و ادغام‌نشدن آن با حواشی لایه‌ها، عدد ۰/۰۱ در نرم‌افزار ادریسی به آن تعلق گرفت.

پس از وزن‌دارشدن زیرمعیارها در الگوی ترکیب خطی وزن‌دار، لازم است معیارها نیز وزن ویژه‌ای برای خود داشته باشند؛ از این رو، الگوی سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی معیارها استفاده شد. در پژوهش حاضر، با الگوی رگرسیون لجستیک نیز به معیارها وزن تعلق گرفت و نتیجه دو الگوی وزن‌دهی با الگوی ROC اعتبارسنجی شد. جدول (۳)، میزان وزن‌های کارشناسی تعلق‌گرفته به معیارها را با استفاده از روش سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۵)، ارتفاع بین ۱۴۰۰ تا ۱۸۰۰ متر، شیب ۳۰ تا ۶۰ درصدی، در لیتولوژی‌های نامقاوم، ۱۰۰ متری شبکه زهکشی و جاده، ۱ کیلومتری گسل، جهت شیب شمال و شمال‌غربی، کاربری‌های مراتع قوی و ضعیف و در نهایت بارش ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متری، زیرمعیارهای بسیار مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعه شده هستند.

تک‌تک زیرمعیارهای هر عامل با استفاده از اطلاعات شکل (۵) فازی‌سازی شدند و به زیرمعیاری که در آن رخداد زمین‌لغزش دارای درصد مساحت بیشتری بود عدد ۱ و به زیرمعیار دارای کمترین درصد رخداد زمین‌لغزش عدد صفر تعلق گرفت. برای

جدول ۳. ماتریس امتیازدهی به معیارهای مؤثر در بروز خطر زمین‌لغزش

معیارها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وزن‌های مقدار ویژه	ناسازگاری
جهت شیب (۱)	۱									۰/۰۳	
فاصله از جاده (۲)	۲	۱								۰/۰۳	
فاصله از گسل (۳)	۲	۱	۱							۰/۰۵	
بارش (۴)	۵	۴	۲	۱						۰/۰۷	
شیب (۵)	۳	۲	۳	۲	۱					۰/۰۸	
ارتفاع (۶)	۵	۴	۴	۳	۲	۱				۰/۱۵	
لیتولوژی (۷)	۶	۵	۵	۴	۳	۲	۱			۰/۲	
کاربری اراضی (۸)	۷	۶	۵	۵	۴	۳	۰/۵	۱		۰/۲۶	
فاصله از رودخانه (۹)	۱	۳	۰/۵	۲	۱	۰/۳۳	۳	۱	۱	۰/۰۹	

۰/۰۸

جدول (۳) و شیوه امتیازدهی، تأثیر بیشتر به ترتیب عوامل کاربری اراضی، لیتولوژی، ارتفاع، فاصله از رودخانه، شیب، بارش، فاصله از گسل، فاصله از جاده و جهت شیب بر رخداد زمین‌لغزش را نشان می‌دهند؛ ترتیب یادشده با پژوهش‌های انجام‌شده با استفاده از روش دلفی هماهنگی دارد (Kayastha et al., 2013)

جدول ۴. ضرایب حاصل از روش آماری رگرسیون لجستیک و نرمال‌سازی ضرایب

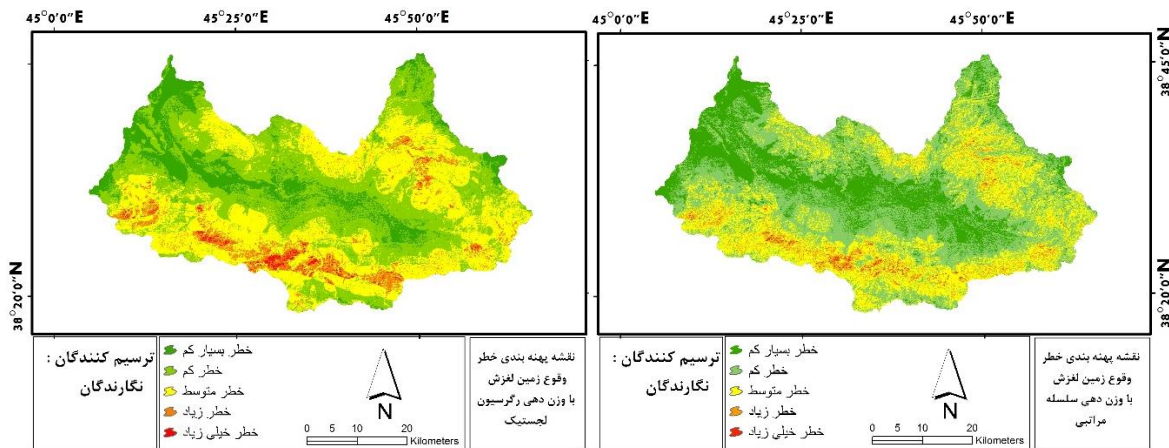
معیارها	جهت شیب	بارش	ارتفاع	لیتولوژی	فاصله از گسل	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از جاده	شیب
ضرایب	۱/۹۴	۰/۹۳	۰/۶۷	۴/۱۴	۶/۳	۱/۲۵	۱/۳۶	۲/۳۴	۲/۴۱
نرمال‌سازی	۰/۳	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۶۶	۱	۰/۲	۰/۲۲	۰/۳۷	۰/۳۸

جدول ۵. نتیجه شاخص‌های برازش الگوی رگرسیونی

عرض از مبدأ	Pseudo R_square	ChiSquare	ROC
-۱۸/۰۲	۰/۳۳	۲۶۸۰	۰/۹۴

در جدول (۵)، شاخص ChiSquare از مقدار عددی ۱۴/۱ بیشتر است و در نتیجه فرض صفر دال

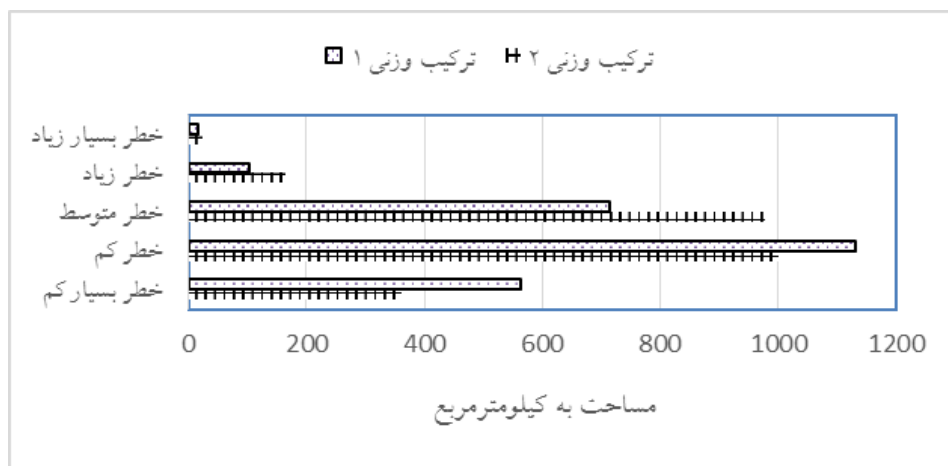
بر صفر بودن همه ضرایب بجز عرض از مبدأ رد می‌شود. بیشتر بودن شاخص PR2 از مقدار عددی ۰/۲ نیز نشان می‌دهد برازش خوبی انجام شده است. عدد شاخص ROC نیز نزدیک به ۱ است و فاصله بسیاری با ۰/۵ (نشان‌دهنده برازش تصادفی) دارد.



شکل ۶. شناسایی حساسیت منطقه نسبت به وقوع زمین لغزش در الگوی ترکیب خطی وزن دار با وزندهی متفاوت

به پنج طبقه طبقه‌بندی شد. شکل (۷)، درصد هر یک از پهنه‌های سیلابی در منطقه مطالعه و در الگوهای وزندهی متفاوت را نشان می‌دهد.

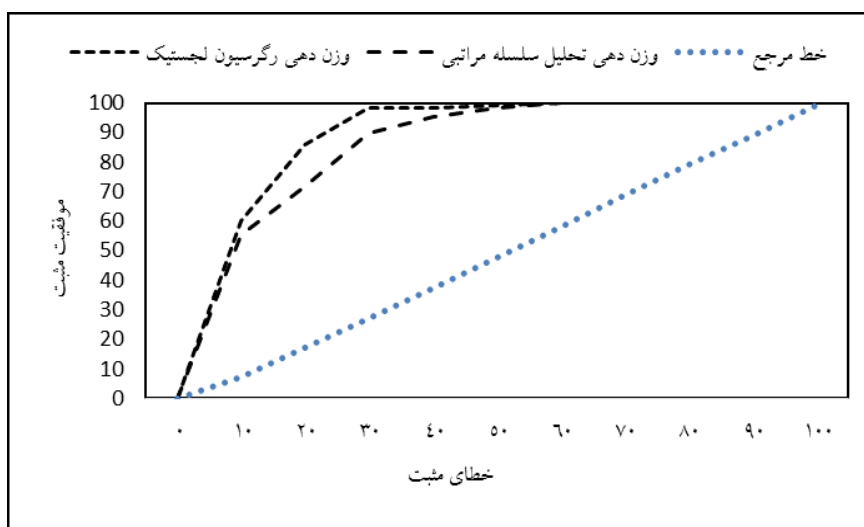
با اعمال وزن‌های حاصل از روش سلسله‌مراتبی و بار دیگر روش رگرسیون لجستیک بر لایه‌های فاز شده، الگوی تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیب خطی وزن دار اجرا و منطقه مطالعه بر اساس شکل (۶)



شکل ۷. درصد پهنه‌های در معرض خطر زمین لغزش

شکل، بیشتر بودن سطح زیرمنحنی را در الگوی ترکیب خطی وزن دار با وزندهی رگرسیون لجستیک نشان می‌دهد.

اعتبارسنجی الگوهای استفاده شده با روش ROC انجام شد؛ شکل (۸)، نتیجه این الگو را نشان می‌دهد که بر اساس تحلیل‌های مبتنی بر طبقه‌بندی آماری و یا به عبارتی، میزان موفقیت الگو نسبت به خطاست. این



شکل ۸. نمودار منحنی ROC برای الگوهای استفاده‌شده

استخراج شد. لایه کاربری نیز با داده‌های تعلیمی برداشت‌شده از منطقه مطالعه و تصاویر لندست ۸ (سنجنده OLI) با استفاده از الگوی ماشین بردار پشتیبان تهیه شد. دیگر لایه‌ها نیز به‌نوعی از تصاویر ماهواره‌ای یا نقشه‌های منطقه مطالعه شده استخراج شدند. سپس لایه زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه با برداشت‌های زمینی و تصویر ماهواره‌ای کویک‌برد به‌عنوان لایه تعلیمی در الگو استفاده شد. زمین‌لغزش‌های رخ داده در تمام جهت‌های شیب دیده می‌شوند، ولی ارتفاع ۱۴۰۰ تا ۱۸۰۰ متر و شیب ۳۰ تا ۶۰ درصد، بیشتر در معرض خطر چنین پدیده‌ای قرار دارند. فاصله از جاده و غسل نیز با توجه به نزدیک بودن به این عوارض انسانی و طبیعی وزن بیشتری را در مطالعه حاضر به خود اختصاص دادند. بارش بر اساس رابطه بین ارتفاع و مقدار بارش در دیگر ایستگاه‌ها درون‌یابی شد و از این‌رو بدیهی است هرچه به سمت ارتفاع بیشتر پیش رویم، بارش نیز بر اساس رابطه حاصل در پژوهش حاضر بیشتر می‌شود. از سویی ارتفاع‌های ۱۴۰۰ تا ۱۸۰۰ متری در این منطقه بیشتر

در مقایسه الگوهای وزن‌دهی استفاده‌شده در روش ترکیب خطی وزن‌دار با استفاده از الگوی آماری ROC، وزن‌دهی رگرسیون لجستیک با میانگین عددی ۰/۹۴ الگوی وزنی کارآمدتری نسبت به وزن‌دهی سلسله‌مراتبی با میانگین عددی ۰/۹۰ معرفی می‌شود.

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، به‌منظور مدیریت بهینه در منطقه و جلوگیری از خسارت‌های احتمالی پیش‌آمده در اثر حرکت‌های توده‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش، اقدام به پهنه‌بندی مناطق حساس به این حرکت‌ها با استفاده از الگوی تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیب خطی وزن‌دار شد. برای الگوسازی از ۹ شاخص مستقل لایه بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از غسل و فاصله از جاده استفاده شد. گفتنی است لایه بارش با استفاده از الگوی جبری و تعداد ۸ ایستگاه در اطراف منطقه مطالعه شده و بر اساس رابطه بین ارتفاع و مقدار میانگین بارش از لایه رومی ارتفاعی منطقه مطالعه

در معرض حرکت‌های توده‌ای هستند و در شاخص بارش به‌عنوان تابعی از ارتفاع، بارش‌های ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متری وزن بیشتری در پهنه‌بندی زمین‌لغزش به خود اختصاص دادند (شکل ۵). باتوجه‌به وزن کم این لایه در روش کارشناسی سلسله‌مراتبی و روش وزن‌دهی رگرسیون لجستیک، می‌توان از این لایه چشم‌پوشی کرد و بهتر است روش‌های درون‌یابی از جمله روش‌های IDW، کریجینگ و یا دیگر روش‌های زمین‌آماری استفاده شوند. در بحث زمین‌شناسی نیز ۷۹ درصد زمین‌لغزش‌های رخ داده به جنس شیل، ماسه‌سنگ و مارن تعلق دارد. این بررسی‌ها با استفاده از الگوی هیستوگرام و بر اساس فراوانی داده‌های تعلیمی در هر یک از شاخص‌ها انجام شدند و فازی‌سازی مبنی بر این عملکرد بوده است. پس از استانداردسازی فازی هر یک از زیرمعیارها، ۹ شاخص به شکل ماتریس ۹ در ۹ تنظیم و نسبت به هم وزن‌دهی سلسله‌مراتبی شدند و وزن نهایی با استفاده از الگوی AHP حاصل شد. سپس بار دیگر، ۹ عامل به‌عنوان متغیر مستقل و زمین‌لغزش‌های رخ داده به شکل یک لایه صفر و یک باینری و به‌عنوان متغیر وابسته برای الگوی رگرسیون لجستیک معرفی شدند و ضریب نهایی آن‌ها استخراج و نرمال‌سازی شد. در نهایت، ضرایب حاصل از هر دو روش به شکل جداگانه در روش ترکیب خطی وزن‌دار به لایه‌ها اعمال شدند. نتیجه اعتبارسنجی ROC با استفاده از زمین‌لغزش‌های مشاهداتی آزمونی نشان می‌دهد مساحت زیرمنحنی در الگوی ترکیب خطی وزن‌دار با وزن‌دهی رگرسیون لجستیک به عوامل (۰/۹۴) باتوجه‌به محاسبه‌های آماری بیشتر از الگوی ترکیب خطی وزن‌دار با وزن‌دهی سلسله‌مراتبی

(۰/۹۰) باتوجه‌به وزن‌دهی کارشناسی است. نتیجه حاصل نشان‌دهنده کارایی الگوی تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیب خطی وزن‌دار با وزن‌دهی فرایند سلسله‌مراتبی است که با یافته‌های کرم (۱۳۸۳) و Zhang و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. با ترکیب الگوی WLC با رگرسیون لجستیک و به عبارتی استفاده از ضرایب حاصل از رگرسیون لجستیک باتوجه‌به کاهش تأثیر نظر کارشناسی، دقت الگو افزایش خوبی داشت. نتیجه الگوی ترکیب خطی وزن‌دار با وزن‌دهی رگرسیون لجستیک نشان‌دهنده مساحتی حدود ۷/۴ درصد در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد است و با وزن‌دهی سلسله‌مراتبی و به شکل کارشناسی حدود ۴/۷ درصد در پهنه‌های یادشده قرار می‌گیرد. ۳۶ درصد مساحت منطقه نیز جزو پهنه‌های خطر متوسط است که با سومدیریت و ساخت‌وسازهای عوارض انسانی از جمله جاده بدون توجه به ساختار ژئومورفولوژی و لیتولوژی منطقه متأثر شده و به پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد تبدیل می‌شود؛ زیرا در این الگوسازی نیز مناطق نزدیک به عوارض انسان‌ساخت و عامل طبیعی گسل در هر دو الگو جزو مناطق حساس به خطر زمین‌لغزش پهنه‌بندی می‌شوند. همچنین تعیین مناطق مستعد لغزش و پهنه‌های لغزشی به‌منظور اجتناب از ساخت سازه‌های آبخیزداری در این مناطق و در صورت نیاز کمک به پایدارسازی دامنه‌ها و پهنه‌های یادشده نقش بسزایی در توسعه پایدار دارد.

منابع

اندریانی، صغری، (۱۳۹۳). کاربرد تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در بررسی

گسل شمالی میشو)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۵۱، صص ۸۶-۷۱.

مختاری، داود، (۱۳۸۸). آثار ژئومورفیکی عملیات راه‌سازی در مناطق حساس ژئومورفولوژیک (مطالعه موردی: راه روستایی ارلان در شمال غرب ایران)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۳۶، صص ۴۲-۱۷.

Anbalagan, R. (1992), Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain, *Journal of Engineering Geology*. Vol. 32, 269-277.

Ayalew, L. and Yamagishi, H. (2004), Slope failures in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective, *Journal of Geomorphology*. Vol. 57, 95-116.

Burrough, P.A. (1989), Fuzzy Mathematical Methods for Soil Survey and Land Evaluation, *Journal of Soil Science*, Vol. 40, 477-492.

Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P. (2002), A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method, *Journal of Geomorphology*, Vol 48, 349-364.

Dai, F.C. and Lee, C.F. (2002), Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Journal of Geomorphology*, Vol. 42, 213-238.

Dehnavi, A., Nasiri Aghdam, I., Pradhan, B., Morshed Varzandeh, M.H. (2015), A new hybrid model using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) technique and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for regional landslide hazard assessment in Iran, *Journal of Catena*, Vol. 135, 122-148.

Eastman, R.J. (2012), *IDRISI for Windows: IDRISI Selva Manual*, Clark University, New York.

Feizizadeh, B., Shadman Roodposhti, M., Jankowski, P., Blaschke, T. (2014), A GIS-

تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر دبی رودخانه (مطالعه موردی: صوفی چای)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد RS & GIS، دکتر محمدحسین رضایی‌مقدم، گروه سنجش از دور، دانشگاه تبریز. بیانی خطی، مریم، (۱۳۸۹). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه قرنقوچای به روش دو متغیره آماری، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۳۲، صص ۲۷-۱.

رأفت‌نیا، نصرت‌ا...؛ کاویانپور، محمدکاظم؛ توفیق احمدی، (۱۳۹۰). بررسی علل وقوع پدیده زمین‌لغزش در جنگل گلندرود (مطالعه موردی، سری ۳ حوزه آبخیز ۴۳)، فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی، سال ششم، شماره ۱، صص ۶۳-۵۳. رضایی مقدم، محمدحسین؛ ولی‌زاده کامران، خلیل؛ اندریانی، صغری؛ فرهاد الماس‌پور، (۱۳۹۴). مقایسه روش‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان در استخراج نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی با استفاده از تصاویر لندست ۸ (مطالعه موردی: حوضه صوفی چای)، شماره ۵۲، صص ۱۸۳-۱۶۳.

کرم، عبدالامیر، (۱۳۸۳). کاربرد مدل ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) در پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش (مطالعه موردی: منطقه سرخون در استان چهارمحال‌بختیاری)، جغرافیا و توسعه، صص ۱۴۶-۱۳۱.

مختاری، داود، (۱۳۸۴). آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی از فعالیت گسل و ضرورت جابه‌جایی آن‌ها (نمونه موردی: روستاهای واقع در امتداد

- Nilaweera, N.S. and Nutalaya, P. (1999), Role of tree roots in slope stabilization, *Journal of Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 57, 337-342.
- Oruc, I., Maloney, L.T., Landy, M.S. (2003), Weighted linear cue combination with possibly correlated error, *Journal of Vision Research*. 43, 2451-2468.
- Pontius, R.G., Cornell, G.D., Hall, C.A. (2001), Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica, *Journal of Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85, 191-203.
- Pachauri, A.K. and Pant, M. (1992), Landslide hazard mapping based on geological attributes, *Journal of Engineering Geology*, 32, 81-100.
- Schmuck, K.J. (1984). *Fuzzy Sets, Natural Language Computations and Risk Analysis*, Computer Science Press.
- Saaty, T.L. and Vargas, L.G. (1991), *Prediction Projection and Forecasting*, Dordrecht: Kluwer, 251.
- Saaty, T. L. (1977), A scaling method for priorities in hierarchical structure, *Mathematical Psychology*. Vol. 15, 234-281.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Starker, I., Arora, M.K., Csaplovics, E. (2005), An approach for GIS based statistical landslide susceptibility zonation with a case study in the Himalayas, *Journal of Landslides*, Vol. 2, 61-69.
- Süzen, M.L. and Doyuran, V. (2004), Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Journal of Engineering Geology*, Vol. 71, 303-321.
- Van Westen, C.J., Van Asch, Th.W.J., Soeters, R. (2006), Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?, *Bulletion of Engineering Geology and the Environment*, Vol 65, 167-184.
- based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping, *Journal of Computers & Geosciences*, Vol. 73, 208-221.
- Garrett, J. (1994), Where and why artificial neural networks are applicable in civil engineering, *Journal of Computer Civil Engineering*. Vol. 8, 129-130.
- Gong, P. (1996), Integrated analysis of spatial data for multiple sources: using evidential reasoning and artificial neural network techniques for geological mapping, *Journal of Phonogram, Engineering Remote Sensing*, Vol. 62, 513-523.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F. (2005), Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale, *Journal of Geomorphology*, Vol. 72, 272-299.
- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C., Tien Bui, D.T. (2015), Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines, *Journal of Catena*, Vol. 133, 266-281.
- Kamp, U., Growley, B.J., Khattak, G.A., Owen, L.A. (2008), GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region, *Journal of Geomorphology*. Vol. 101, 631-642.
- Kayastha, P., Dhital, M.R., De Smedt, F. (2013), Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal, *Journal of Computers & Geosciences*, Vol. 52, 398-408.
- Mantero, P., Moser, G., Serpico, S.B. (2005), Partially Supervised Classification of Remote Sensing Images Through SVM-Based Probability Density Estimation, *Journal of Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 43(3), 559-570.
- Malczewski, J. (1999), *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley and sons, New york, USA.

- Wang, L.J., Guo., Sawada, M.K., Lin, J., Zhang, J. (2015), Landslide susceptibility mapping in Mizunami City, Japan: A comparison between logistic regression, bivariate statistical analysis and multivariate adaptive regression spline models, *Journal of Catena*, Vol. 135, 271-282.
- Zhang, G., Cai, Y., Zheng, Z., Zhen, J., Liu, Y., Huang, K. (2016), Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China, *Catena*, 142, 233-244.
- Zhu, A.X., Wang, R.X., Qiao, J.P., Qin, C.Z., Chen, Y.B., Liu, J., Du, F., Lin, Y., Zhu, T.X. (2014), An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic, *Journal of Geomorphology*, 214, 128-138.
- Vapnik, V.N. (1999), *The Nature of Statistical Learning Theory*, Second Edition, New York, Springer-Verlag, 339.
- Vahidnia, M.H., Alesheikh, A.A., Alimohammadi, A., Hosseinali, F., (2010), A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping, *Comput. Geosci.* Vol. 36, 1101-1114.
- VanWestin, C.J., Rengers, N., Soeters, R. (2003), Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment, *Journal of Natural Hazards*, Vol. 30, 399-419.
- Van Westen, C.J., Castellanos, E., Kuriakose, S.L. (2008), Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview, *Journal of Engineering Geology*, 102: 112-131.

