On the Efficiency of Geomorphometric Parameters in Increasing the Accuracy of the Landslide Zoning Maps (Case Study: Dezolia Basin, Isfahan Province)

Kourosh Shirani

Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

Abstract

One of the goals of geomorphologists in working with the models of different landforms is to obtain better relations in realizing the physical realities of environment. In this study, the efficiency of geomorphometric parameters in increasing the accuracy of landslide sensitivity zoning maps has been evaluated. First, the zoning map was prepared via using the first 9 effective parameters in the landfall occurrence including slope, aspect, elevation, land use, lithology, distance from roads, rivers and vegetation index (NDVI). In the next step, the geomorphometric parameters involve in the occurrence of landslide including topographic location index (TPI), surface curvature, curved sections, slope length (LS), Topographic wetness index(TWI), stream flow power (SPI), surface area ration index (SAR), were added to the model and then plotted to the map. In the last step, the zoning maps of the two approaches were evaluated using the ROC curve. For preparing zoning maps, a new hybrid model was used. In order to determine the weight of the criteria, the multivariate regression method was used and the frequency ratio method was used to determine the weight of the classes. Finally, the linear regression relationship of the type of audit analysis was used as the basis of preparation and comparison of landslide sensitivity map and applied to the two approaches without using geomorphometric indices. The findings of this research indicated that geomorphometric indices have a significant effect on increasing the accuracy of the identification of landslide sensitive areas and increasing the accuracy of the zoning map from 0.731 to 0.938. These indices have also increased the resolution of the slip layers. According to the results of the topography location indices parameters, surface curvature and surface ratio have the highest influence on the accuracy of zoning maps. Based on the results of zoning with geomorphometric parameters, 8/68 percent (6737 ha) of the region are at very high risk and 15.3% (11906 ha) have been identified as high-risk areas. Considering the high power of geomorphometric parameters in determining the sensitive areas of slip, it is recommended to use these parameters in landslide zonation.

Key words: Geomorphometry, Validation, Zonation, Landslide, Dezolia Basin, Isfahan Province.

* k_sh424@yahoo.com

جغرافیـــا و برنامـــه‌ریـــزی محیطـــی
سـال ۲۹، پیـاپی ۷۱، شـماره ۳، پـاییز ۱۳۹۷

ارزیابی کارایی عوامل ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ دزعلیا، استان اصفهان)

کورش شیرانی: استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

وصـول: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸ پـذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۳، صص ۱۳۰-۱۱۱

چکیده

یکی از اهداف ژئومورفولوژیست‌ها در کار با الگوها برای تحلیل لندفرم، رسیدن به روابط بهتر برای درک واقعیت‌های فیزیکی محیط است. در پژوهش حاضر به ارزیابی کارایی شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش دقت نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش پرداخته شد؛ به این ترتیب که ابتدا با استفاده از ۹ شاخص اولیهٔ مؤثر در رخداد زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) نقشهٔ پهنه‌بندی تهیه شد. در گام بعد، شاخص‌های ژئومورفومتریک مؤثر در رخداد لغزش شامل شاخص موقعیت توپوگرافیک (TPI)، انحنای سطح، انحنای مقطع، طول شیب (LS)، شاخص خیسی توپوگرافی (TWI)، شاخص توان آبراهه (SPI) و شاخص نسبت مساحت سطح (SAR) به الگو اضافه و نقشهٔ پهنه‌بندی تهیه شد. در گام آخر، درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از دو رویکرد با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد. برای تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی از الگوی ترکیبی جدیدی استفاده شد؛ به این شکل که برای تعیین وزن معیارها از روش رگرسیون چندمتغیره و برای تعیین وزن کلاس‌ها از روش نسبت فراوانی استفاده شد؛ درنهایت رابطهٔ رگرسیونی چندمتغیرهٔ خطی از نوع تحلیل ممیزی مبنای تهیه و مقایسهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت لغزش برای دو رویکرد با استفاده و بدون استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر نشان دادند شاخص‌های ژئومورفومتریک تأثیر بسزایی در افزایش دقت تشخیص مناطق حساس به زمین‌لغزش داشته‌اند و باعث افزایش درستی نقشهٔ پهنه‌بندی از ۰/۷۳۱ به ۰/۹۳۸ شده‌اند و قدرت تفکیک بین طبقه‌های لغزش را افزایش داده‌اند. طبق نتایج، شاخص موقعیت توپوگرافی، انحنای سطح و نسبت مساحت سطح بیشترین تأثیر را در افزایش درستی نقشهٔ پهنه‌بندی داشته‌اند. بر اساس نتایج پهنه‌بندی و شاخص‌های ژئومورفومتریک، ۸/۶۸ درصد (۶۷۳۷ هکتار) مساحت منطقه در ردهٔ خطر بسیارزیاد و ۱۵/۳۳ درصد (۱۱۹۰۶ هکتار) در ردهٔ زیاد قرار گرفته است. باتوجه‌به توانایی زیاد شاخص‌های ژئومورفومتریک برای تشخیص مناطق حساس لغزش، استفاده از این شاخص‌ها در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ژئومورفومتری، درستی‌سنجی، پهنه‌بندی، زمین‌لغزش، حوضهٔ دزعلیا، استان اصفهان.

*نویسنده مسؤول: K.Shirani@areeo.ir

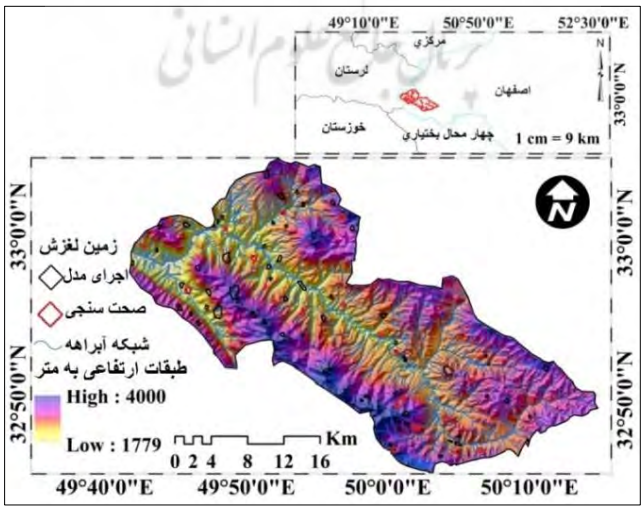
مقدمه

در ژئومورفولوژی عددی، ویژگی‌های فضایی و آماری و ارتباط ویژگی‌های نقطه‌ای مطالعه می‌شوند (شیرانی، ۱۳۸۲: ۵۲؛ شیرانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۴؛ شیرانی و عرب‌عامری، ۱۳۹۴: ۳۲۲؛ شیرانی، ۱۳۹۶: ۵۲؛ Evans, 1972: 28). ژئومورفومتری زیرمجموعه‌ای از ژئومورفولوژی است که رویکرد آن، اندازه‌گیری کمی و کیفی عوارض سطح زمین است (Pike et al., 2009: 12) و بر مبنای تجزیه‌وتحلیل و تنوع ارتفاع و مشتقات آن و توابع فاصله‌ای بنا شده است. اگرچه ژئومورفومتری فعالیتی صحرایی با دامنه‌ای شامل زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک‌شناسی و جغرافیا در نظر گرفته می‌شود، بخش درخور توجهی از آن شامل روش‌های رایانه‌ای مانند سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور است. این فناوری جدید کاربردهای بسیاری نظیر تولید نقشه‌های خاک و پوشش گیاهی، حرکت‌های توده‌ای و زمین‌لغزه، مطالعه‌های کشاورزی دقیق و غیره در علوم طبیعی دارد (Dikau, 1989: 23). زمین‌لغزش‌ها در مناطق کوهستانی شایع هستند (Chousianitis et al., 2016: 12; Zhou et al., 2016: 19) و باعث خسارت‌های جدی به اقتصاد، محیط و انسان در سراسر جهان می‌شوند (Hong et al., 2016: 14). زمین‌لغزش‌ها یکی از فرایندهای ژئومورفیکی تأثیرگذار بر چشم‌انداز تکاملی مناطق کوهستانی هستند و اقلیم اختری و چاله‌های برودتی در ایجاد زمین‌نماها و شکل‌زایی روی سطح زمین نقش اساسی دارند (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۷۰؛ انتظاری، ۱۳۹۳: ۹؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۶؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۲؛ Hong et al., 2015: 14). ارزیابی پتانسیل مناطق نسبت به زمین‌لغزش از راه تهیهٔ نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش امکان‌پذیر است (Wang et al., 2015: 17). طی دو دههٔ گذشته، نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش برای ارزیابی خطرهای لغزش بسیار مهم بوده‌اند و به روش مؤثری تبدیل شده‌اند (Zhou and Fang., 2015: 22)؛ نتایج نقشه‌های یادشده برای مدیریت زمین و کاهش خطرهای لغزش استفاده می‌شوند (Hong et al., 2015: 45) و افزایش درستی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش، اطلاعات دقیق‌تر و کامل‌تری را در این زمینه در اختیار برنامه‌ریزان قرار می‌دهد (Dymond et al., 2006: 16). ازآنجاکه حوضهٔ دزعلیا در منطقه‌ای کوهستانی واقع شده، زمین‌لغزش یکی از معضل‌های عمدهٔ این منطقه است و در نتیجه، ایجاد راهبرد کاربردی برای حفاظت منابع محیطی و اقتصادی و کاهش خسارت‌های ناشی از رخداد زمین‌لغزش بسیار ضروری است. تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی رخداد زمین‌لغزش کمک شایانی به برنامه‌ریزی‌های محیطی منطقهٔ مطالعه‌شده می‌کند و شناسایی مناطق حساس به زمین‌لغزش برای اجتناب از خطرهای آن بسیار ضروری است. روش‌های تهیهٔ نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش به روش‌های کیفی یا دانش‌بنیان (Regmi et al., 2010: 14) و روش‌های کمی (Yilmaz, 2009: 15) طبقه‌بندی می‌شوند: مبنای پهنه‌بندی در روش کیفی، ویژگی‌های ذاتی و طبیعی لغزش‌ها هستند؛ روش‌های کمی نیز بر ارتباط بین عوامل کنترلی و زمین‌لغزش‌ها با بیان عددی استوار هستند و به دو گروه روش‌های جبری و آماری تقسیم می‌شوند (Lee et al., 2004: 23). روش‌های آماری در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به دو شکل دومتغیره و چندمتغیره استفاده می‌شوند (Dai and Lee., 2002: 21)؛ روش‌های چندمتغیره بر مبنای تجزیه‌وتحلیل آماری در ارتباط با

ترکیب متغیرها و زمین‌لغزش‌ها (Chen and Jinfei., 2007: 31) و روش‌های دومتغیره، مقایسهٔ آماری بین زمین‌لغزش (متغیر وابسته) و عوامل مستقل در ایجاد ناپایداری هستند (Zhou et al., 2016: 43). تاکنون مطالعه‌های بسیاری در زمینهٔ زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی (Mohammady et al., 2012: 44; Chalkias et al., 2014: 18; Hong et al., 2016: 23) و رگرسیون چندمتغیره (شیرانی، ۱۳۸۲: ۲۳؛ شیرانی و عرب‌عامری، ۱۳۹۴: ۳۲۲؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۲؛ سفیدگری، ۱۳۸۱: ۱۴؛ Van Western et al., 2005: 24) و مطالعه‌های معدودی نیز در زمینهٔ استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک انجام شده‌اند (Pourghasemi et al., 2012: 18; Talebi et al., 2007: 31; Costanzo et al., 2012: 44; Zinko et al., 2005: 16). هدف پژوهش حاضر، ارزیابی کارایی شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش است؛ به این شکل که ابتدا نقشهٔ پهنه‌بندی با استفاده از شاخص‌های اولیهٔ مؤثر در وقوع زمین‌لغزش با عنوان رویکرد بدون شاخص‌های ژئومورفومتریک تهیه شد و در گام بعد، شاخص‌های ژئومورفومتریک به شاخص‌های اولیه اضافه شدند و نقشهٔ پهنه‌بندی با عنوان رویکرد با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک تهیه و در پایان، درستی نقشه‌های پهنه‌بندی با یکدیگر مقایسه شد.

موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده

حوضهٔ دز علیا در حدفاصل طول جغرافیایی ۳۶` ۴۹° تا ۱۹` ۵۰° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ °۳۲ تا ۰۵` °۳۳ شمالی قرار دارد. وسعت منطقهٔ مطالعه‌شده ۷۷۶۴۶ هکتار است. موقعیت عمومی حوضه نسبت به مرز سیاسی استان و کشور در شکل (۱) نشان داده شده است. شهرستان فریدون‌شهر با ارتفاع میانگین ۲۵۰۰ متر از سطح دریا، منطقه‌ای کوهستانی است که به شکل زبانه‌ای میان استان‌های لرستان، خوزستان و چهارمحال‌وبختیاری واقع شده است. این منطقه در بالاترین بخش‌های حوضهٔ آبریز دو رودخانهٔ بزرگ ایران، زاینده‌رود و کارون، واقع و دارای ۵ دهستان است که عبارتند از: برف انبار، عشایر، پیشکوه موگویی، پشتکوه موگویی و چشمه لنگان که هر کدام شامل تعداد زیادی روستا هستند.

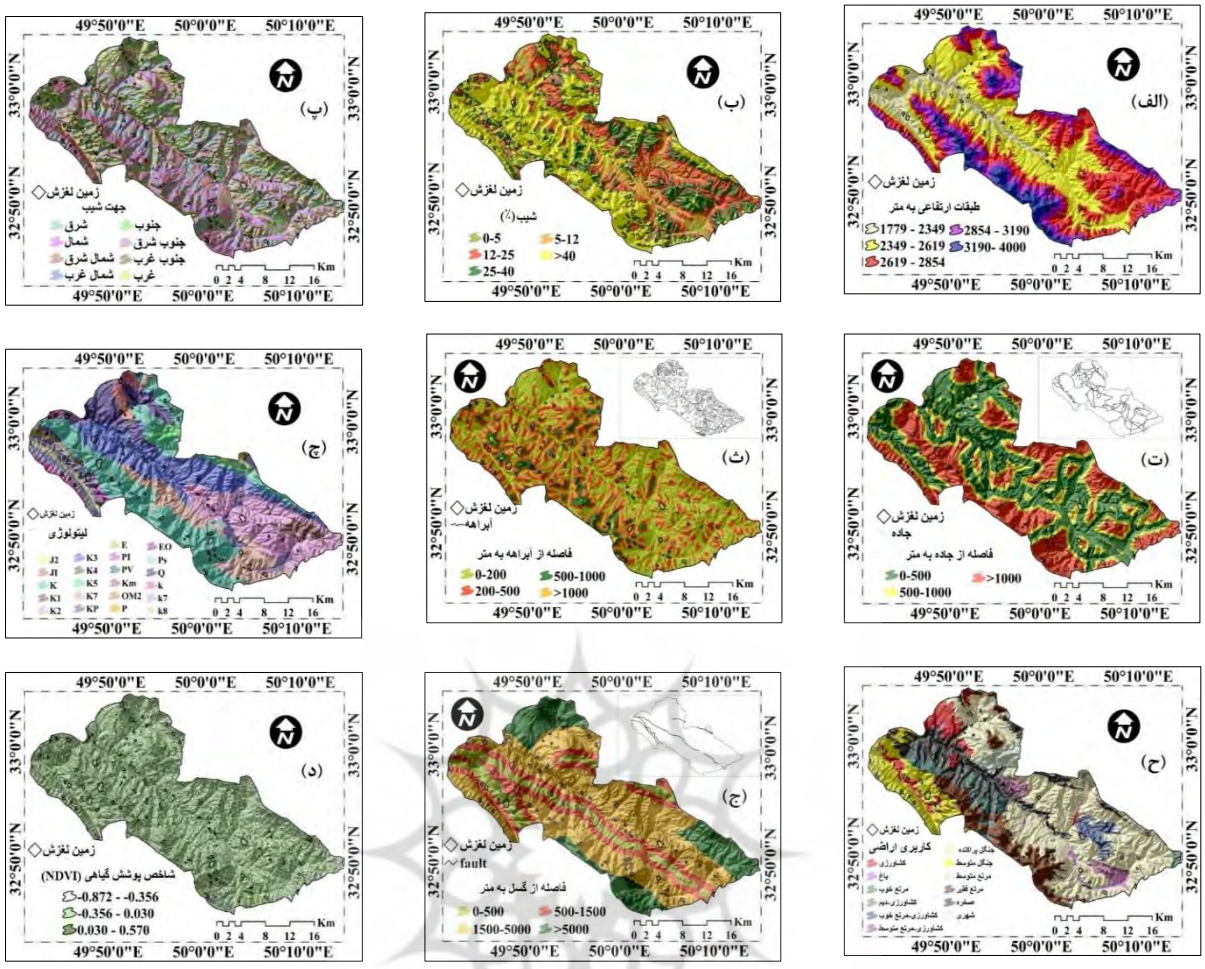


شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده

روش‌شناسی پژوهش

داده‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر عبارتند از: نقشهٔ زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس‌های هوایی در مقیاس ۱:۴۰۰۰۰، نقشهٔ توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای +ETM. متغیرهای استفاده‌شده، ۹ شاخص اولیهٔ مؤثر در رخداد زمین‌لغزش شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، گسل و آبراهه، سنگ شناسی، کاربری اراضی و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و ۷ شاخص ژئومورفومتریک شامل انحنای سطح، انحنای مقطع، نسبت مساحت سطح، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص توان آبراهه و طول شیب هستند. ابزارهای استفاده‌شده در پژوهش حاضر شامل نرم‌افزارهای ENVI 4.8، ILWIS3.8، ArcGIS10.1 و SAGAGIS 2.1.1 هستند. ابتدا با استفاده از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۷)، وضعیت زمین‌شناسی منطقه بررسی و نقشهٔ زمین‌شناسی با مطالعه و بررسی فتوژئولوژیکی عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۷۶) و بررسی‌های میدانی تهیه شد. پس از تهیهٔ نقشهٔ واحدهای سنگی و خطواره‌ها، به رقومی‌کردن آنها اقدام شد و نقشه‌های لیتولوژی (شکل ۲، چ)، فاصله از آبراهه (شکل ۲، ث)، فاصله از گسل (شکل ۲، ج) و فاصله از جاده (شکل ۲، ت) در محیط ArcGIS تهیه شدند. برای تهیهٔ نقشهٔ الگوی ارتفاعی رقومی DEM، نقشهٔ شیب، جهت شیب و طبقه‌های ارتفاعی و شاخص‌های ژئومورفومتریک از نقشهٔ توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۸) استفاده شد. تمام نقاط ارتفاعی و منحنی‌های میزان ۱۰۰ متری حوضهٔ مطالعه‌شده، رقومی و اقدام‌های لازم برای استفاده از این اطلاعات در محیط نرم‌افزار ILWIS3.8[1] انجام شدند. الگوی رقومی ارتفاعی با استفاده از منحنی‌های میزان و نقاط ارتفاعی رقومی‌شده و روش درون‌یابی تهیه شد و پس از ایجاد الگوی رقومی ارتفاعی، نقشهٔ شیب (شکل ۲، ب)، جهت شیب (شکل ۲، پ)، ارتفاع (شکل ۲، الف) و شاخص‌های ژئومورفومتریک با دقت ۱۰ در ۱۰ مترمربع تهیه شد. نقشهٔ کاربری اراضی منطقه نیز از طریق تصاویر سنجندهٔ +ETM در محیط نرم‌افزار ENVI 4.8 تصحیح و تهیه شد (شکل ۲، ح). نقشهٔ NDVI با استفاده از تصاویر IRS با سنسورهای LISS III با قدرت تفکیک (۲۵×۲۵ متر) و پانکروماتیک (۲/۵×۲/۵ متر) استخراج شد. طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم بیشترین شباهت برای استخراج این نقشه طراحی شدند (شکل ۲، د).

[1] Integrated Land and Water Information System)



شکل ۲. شاخص‌های اولیهٔ مؤثر در لغزش. الف. طبقه‌های ارتفاعی، ب. شیب، پ. جهت شیب، ت. فاصله از جاده، ث. آبراهه، ج. گسل، چ. لیتولوژی. ح، کاربری اراضی. د، پوشش گیاهی.

شاخص‌های ژئومورفومتریک استفاده‌شده در پژوهش حاضر شامل انحنای سطح، انحنای مقطع، نسبت مساحت سطح، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص توان آبراهه و طول شیب هستند. انحنای سطح[1] (شکل ۳، الف) و انحنای مقطع[2] (شکل ۳، ب) نوع شیب‌ها را توصیف می‌کنند و عوامل مهمی هستند که در وقوع زمین‌لغزش‌ها نقش دارند (Atkinson and Massari, 2011: 14; He et al., 2012: 18). انحنای سطح بیان‌کنندهٔ تغییرات جهت در طول منحنی و تأثیر انحنای سطح روی فرایند فرسایش شیب به شکل هم‌گرایی و واگرایی آب در طول جریان سراشیبی است (Ercanoglu and Gokceoglu, 2002: 12; Oh and Pradhan, 2011: 13). انحنای مقطع معرف اندازهٔ تغییر شیب منحنی میزان در طول مسیر جریان است و زمانی که تقعر انحنای سطح در حال افزایش است، مقادیر آن منفی و در حالت برعکس، مقادیر آن مثبت است (Hengl et al. 2003: 65)؛ این شاخص بیان‌کنندهٔ سرعت جریان، فرسایش (در مقادیر منفی)،

[1] Plan Curvature
[2] Profile Curvature

رسوب‌گذاری (در مقادیر مثبت) و همچنین ژئومورفولوژی منطقه است (Yesilnacar, 2005: 29). به علت کنترل تغییر سرعت توده‌هایی که به سمت پایین شیب حرکت می‌کنند، انحنای مقطع مهم است (Talebi et al., 2007: 34). شاخص‌های انحنای سطح و مقطع در محیط AGAGIS 2.1.1 استخراج شدند. نسبت مساحت سطح[1] (شکل ۳، ت) مبنایی برای اندازه‌گیری زبری توپوگرافی چشم‌انداز است. شیب‌های دارای زبری زیاد به علت تغییرات شیب برای نفوذ بارندگی در خاک مساعد هستند و بنابراین افزایش آن موجب افزایش لغزش می‌شود. نسبت مساحت سطح هر منطقه در چشم‌انداز با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود (Jenness, 2002: 45):

$$SAR = \left(\frac{A}{A_S}\right)$$ رابطهٔ (۱)

که در آن A: مساحت سطح منطقه و A_S: مساحت پلانیمتریک است. شاخص موقعیت توپوگرافی[2] (شکل ۳، چ) ارتفاع هر پیکسل در الگوی رقومی ارتفاعی را با میانگین ارتفاع پیکسل‌های اطراف آن مقایسه می‌کند (Zinko et al., 2005: 17)؛ این عامل، شرایط طبقه‌بندی چشم‌انداز به کلاس‌های مورفولوژیک را فراهم می‌کند و مقادیر مثبت و منفی آن نشان می‌دهند پیکسل بالاتر و پایین‌تر از پیکسل‌های اطراف است (Jenness, 2008: 12 and Tagil). در پژوهش‌های بسیاری از شاخص‌هایی نظیر شاخص خیسی توپوگرافی[3] (شکل ۳، ج)، شاخص توان آبراهه[4] (شکل ۳، ث) و طول شیب[5] (شکل ۳، پ) به‌عنوان ویژگی‌های توپوگرافی ثانویه برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش استفاده شده است (Wang et al., 2011: 18; Costanzo et al., 2012; Pourghasemi et al., 2012: 2). شاخص خیسی، شاخص ترکیب پستی و بلندی است که نسبت بین شیب‌ها را در حوضه نمایش می‌دهد و شاخصی از توزیع مکانی رطوبت خاک در طول چشم‌انداز زمین است. شاخص توان آبراهه برای توصیف پتانسیل فرسایش جریان و فرایندهای مرتبط استفاده می‌شود. با افزایش مساحت حوضه و عمق شیب، مقدار آب فراهم‌شده به‌وسیلهٔ مناطق پرشیب، شدت جریان آب و در نتیجه، قدرت جریان و پتانسیل فرسایش افزایش می‌یابد. برای محاسبهٔ شاخص‌ها از روابط زیر استفاده شده است (Moore and Burch 1986: 118; Moore et al., 1991: 245).

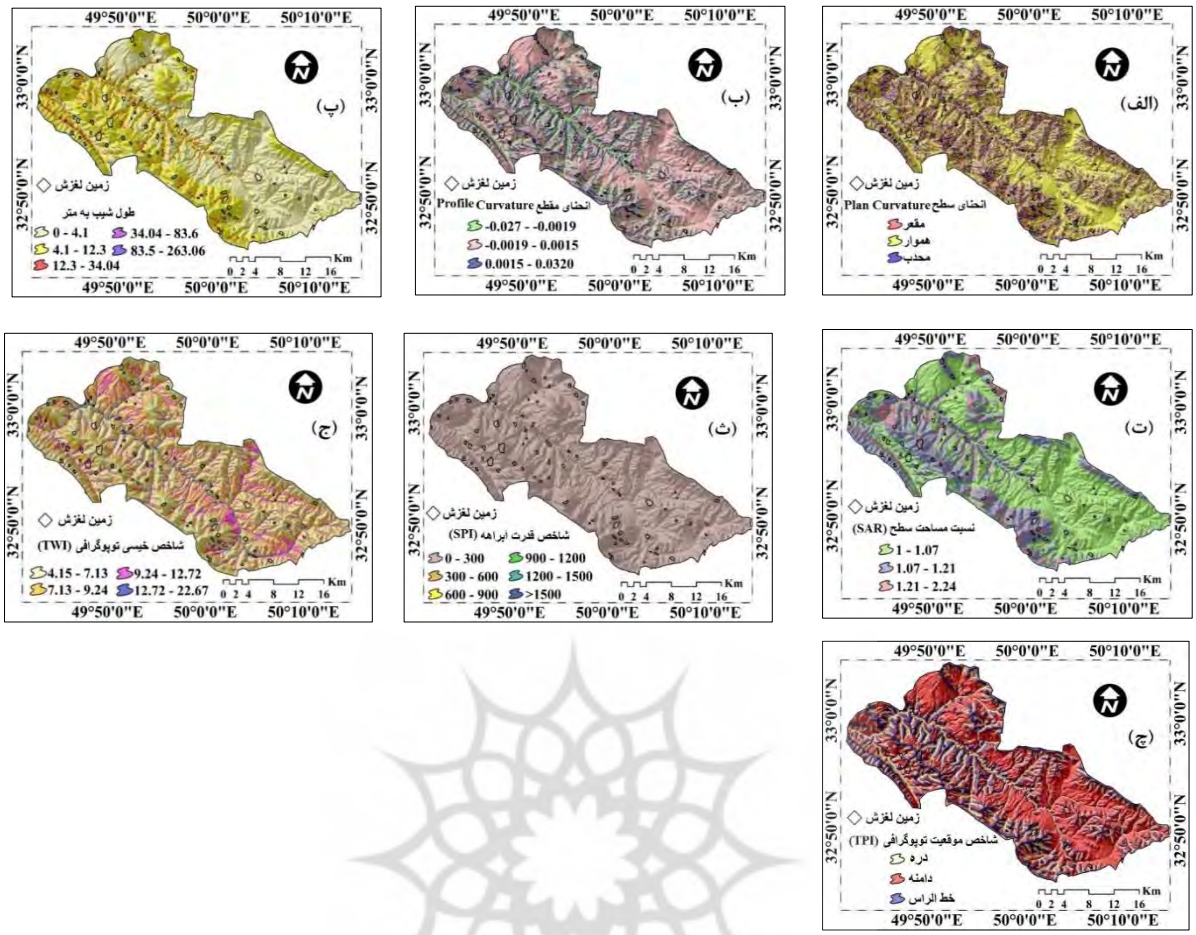
$$TWI = In\ (A_S/\tan\ \beta\ )$$ رابطهٔ (۲)

$$SPI = As \times \tan\ \sigma$$ رابطهٔ (۳)

$$SL = (A_S/22.13)^{0.6} \times (\sin\beta\ /\ 0.0896)^{1.3}$$ رابطهٔ (۴)

که در آن، AS: مساحت حوضهٔ آبخیز و β: گرادیان شیب بر حسب درجه است.

[1] Surface Area Ratio (SAR)
[2] Topographic position index (TPI)
[3] Topography Wetness Index (TWI)
[4] stream power index (SPI)
[5] Length Slope (LS)



شکل ۳. شاخص‌های ژئومورفومتریک مؤثر در لغزش. الف. انحنای سطح، ب. انحنای مقطع، پ. طول شیب، ت. نسبت مساحت سطح، ث. شاخص قدرت آبراهه، ج. شاخص خیسی توپوگرافی، چ. شاخص موقعیت توپوگرافی

برای تهیهٔ نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش از روشی ترکیبی استفاده شد؛ به این ترتیب که برای تعیین وزن معیارها از روش رگرسیون چندمتغیرهٔ تحلیل ممیزی و برای تعیین وزن کلاس‌ها از الگوی نسبت فراوانی استفاده شد. برای درستی‌سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی از منحنی ROC استفاده شد. نوآوری پژوهش حاضر، استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک انحنای سطح، انحنای مقطع، شاخص خیسی توپوگرافی (TWI)، شاخص توان آبراهه (SPI)، طول شیب (LS)، نسبت مساحت سطح (SAR) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و ارزیابی نقش آنها در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و استفاده از روشی ترکیبی در تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی زمین‌لغزش است.

روش چندمتغیرهٔ خطی

الگوی رگرسیون چندمتغیره، روشی آماری است که رابطهٔ متغیر وابسته و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل را تجزیه‌وتحلیل می‌کند (صفاری و همکاران، ۱۳۹۲: ۶۲). روش رگرسیون چندمتغیره ابزاری استنباطی است که برای بررسی روابط میان شاخص‌های مستقل و تأثیر هم‌زمان بر شاخص‌های

غیرمستقل استفاده می‌شود (بهشتی‌راد و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۴). ازآنجاکه پدیده‌های طبیعی نظیر زمین‌لغزش از عملکرد هم‌زمان چند متغیر ناشی می‌شوند، استفاده از این روش‌های چندمتغیره مناسب است. در الگوی رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی با داشتن مقادیر X_i معین (متغیر مستقل)، مقادیر Y_i (متغیر وابسته) به شکل خطی برآورد می‌شود. الگوی کلی تابع رگرسیون به شکل رابطهٔ ۵ است:

$$Y_i = B_1 + B_2X_i + \cdots . + B_jX_i \qquad \text{رابطهٔ (۵)}$$

که در آن، Y_i: تخمین متغیر وابسته، B_1: ضریب ثابت یا عرض از مبدأ، B_2: ضریب متغیر X_i و X_i: متغیر مستقل است.

روش نسبت فراوانی

نسبت فراوانی، ارتباط کمی میان رخداد زمین‌لغزش و متغیرهای مختلف تأثیرگذار در آن را مشخص می‌کند. در تعیین نرخ نسبت فراوانی، نسبت رخداد لغزش در هر کلاس از عوامل تأثیرگذار نسبت به کل لغزش‌ها به دست می‌آید و نسبت سطح هر کلاس نسبت به کل مساحت منطقه محاسبه می‌شود. در پایان، با تقسیم نرخ رخداد لغزش‌ها در هر کلاس بر نرخ مساحت هر کلاس نسبت به کل منطقهٔ مطالعه‌شده، نسبت فراوانی کلاس‌های هر عامل محاسبه می‌شود. مراحل محاسبهٔ نسبت فراوانی هر کلاس از عوامل مؤثر در لغزش در رابطهٔ ۶ بیان شده است

$$FR = \frac{(A/B)}{(C/D)} = \frac{E}{F} \qquad \text{رابطهٔ (۶)}$$

که در آن A: تعداد پیکسل‌های لغزش‌یافته در هر کلاس، B: مجموع پیکسل‌های لغزشی کل حوضه، C: تعداد پیکسل‌های هر زیرکلاس از عوامل مؤثر در لغزش، D: تعداد کل پیکسل‌های منطقه، E: درصد رخداد لغزش در هر زیرکلاس از عوامل مؤثر و F: درصد نسبی مساحت هر زیرکلاس از کل مساحت است. برای محاسبهٔ شاخص حساسیت به رخداد زمین‌لغزش، نتایج عوامل در محیط GIS با یکدیگر جمع شدند (رابطهٔ ۷) (Lee and Pradhan., 2007: 34).

$$LSI = \sum(FR)_i \qquad (i = 1,2, \ldots . , n) \qquad \text{رابطهٔ (۷)}$$

که در آن LSI: شاخص پتانسیل رخداد زمین‌لغزش، FR: نسبت فراوانی عامل و n: مجموع عوامل ورودی است.

یافته‌ها و تجزیه‌وتحلیل آنها

در پژوهش حاضر، کارایی شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش ارزیابی شد؛ به این ترتیب که ابتدا، حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از شاخص‌های اولیهٔ مؤثر در زمین‌لغزش پهنه‌بندی شد و در گام بعد، شاخص‌های ژئومورفومتریک اضافه شدند و تأثیر آنها در افزایش درستی نقشه‌های زمین‌لغزش ارزیابی شد. برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی از روشی ترکیبی استفاده شد؛ به این شکل که برای تعیین وزن شاخص‌ها از روش چندمتغیرهٔ خطی و برای تعیین وزن کلاس‌های شاخص‌ها از روش نسبت فراوانی استفاده شد.

اجرای الگوی چندمتغیرهٔ خطی

در تحلیل خطر زمین‌لغزش، شاخص‌ها در برخی موارد کمی (شیب، بارندگی) و در مواردی نیز کیفی

(جهت شیب، لیتولوژی) هستند؛ ازآنجاکه روش‌های آماری از داده‌های کمی استفاده می‌کنند، لازم است داده‌های کیفی به کمی تبدیل شوند. نقشهٔ واحدهای همگن برای تجزیه‌وتحلیل آثار هر کدام از عوامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش و نیز کمی‌کردن و وزن‌دهی به عوامل در روش رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی نیاز است؛ به این شکل که انواع نقشه‌های مربوطه پس از تهیه و باتوجه‌به متغیرهایی که آثار آنها در وقوع زمین‌لغزش‌ها مدنظر است، با هم مقایسه و نقشه‌های مربوط به این متغیرها همپوشانی و واحدهای همگن حاصل شدند؛ این کار با نرم‌افزار ArcGIS10.2 انجام‌پذیر است. واحدهای همگن، واحدهایی هستند که ویژگی‌های مشترکی ازنظر عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش دارند و از واحدهای مجاور خود به‌واسطهٔ داشتن اختلاف در یکی از عوامل یادشده متمایز می‌شوند. کمی‌کردن عوامل و وزن‌دهی به طبقه‌های مختلف آنها باتوجه‌به درصد سطح لغزش‌یافته در واحدهای همگنی انجام می‌شود که ازنظر تمام عوامل در نظر گرفته شده، مشابه و به‌واسطهٔ تغییر تنها یکی از عوامل متفاوت باشند. به این منظور، ابتدا نقشهٔ واحدهای همگن و نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها همپوشانی می‌شوند و مساحت زمین‌لغزش‌های موجود در هر واحد همگن محاسبه می‌شود. نسبت مساحت لغزش‌ها به مساحت واحد همگن، Y در نظر گرفته می‌شود که بیان‌کنندهٔ درصد سطح لغزیده‌شده در هر واحد همگن است و درصد سطح لغزش‌یافته به این علت مدنظر است که می‌توان اثر هر کدام از عوامل کلیدی یا برتر را نسبت به درصد سطح لغزش‌یافته مقایسه کرد؛ در اینجا، Y تابعی از هر کدام از عوامل مؤثر است. در این مرحله، برای وزن‌دهی به کلاس‌های مختلف، امتیاز ۱۰ به کلاسی تعلق می‌گیرد که بیشترین درصد سطح لغزش‌یافته را داراست و به سایر کلاس‌ها به‌طور نسبتی از این کلاس، امتیاز داده می‌شود. پس از دستیابی به نرخ‌های مربوط به طبقه‌های هر یک از عوامل، این اطلاعات برای ۷۲۳۴۲۵ واحد همگن به شکل ۷۲۳۴۲۵ تکرار و ۱۶ تیمار به محیط نرم‌افزار SPSS22 منتقل شد. از بین روش‌های رگرسیون چندمتغیره، روش Enter با سطح اطمینان بیش از ۹۵ درصد برای هر یک از عوامل انتخاب شد. باتوجه‌به نتایج تجزیه‌وتحلیل رگرسیون چندمتغیره، ضریب معناداری بیش از ۹۸ درصد برای تمام عوامل حاصل شد که نشان می‌دهد ازنظر آماری، رابطه‌ای قوی با درصد سطح لغزش‌یافته در واحدهای همگن داشته‌اند. رابطهٔ ۸، نتیجهٔ نهایی تجزیه‌وتحلیل آماری حاصل با ضریب R برابر ۰/۹۲ را نشان می‌دهد. وزن هر یک از شاخص‌های اولیه در جدول (۱) و شاخص‌های ژئومورفومتریک در جدول (۲) نشان داده شده است.

Y=۰/۰۹۳ + (Xaltitute × ۰/۳) + (Xslope × ۰/۱۳۵) + (Xaspect × ۰/۲۳۵) + (Xdisfault × ۰/۰۷۵) + (Xdisdrinage × –۰/۰۲۳) + (Xdisroad × –۰/۰۰۱۳) + (XNDVI × ۰/۰۴۳۵) + (Xlithology × ۰/۵۰۳) + (Xlanduse × ۰/۰۸۲۳) + (XSPI × 205۰/) + (XLS × ۰/۱۹۸) + (XTWI × -۰/۰۱۳۴) + (XProfile × -۰/۲۹۵) + (XTPI × ۰/۵۳۱) + (XPlan × ۰/۴۳۲) + (XSAR × ۰/۲۶۲) رابطهٔ (۸)

پس از محاسبهٔ وزن شاخص‌ها، وزن کلاس‌های شاخص‌ها با استفاده از روش نسبت فراوانی محاسبه شد؛ به این ترتیب که مقادیر کل سطح هر کلاس تعیین و سطح لغزشی در هر کلاس مشخص و وزن هر کلاس با استفاده از رابطهٔ ۸ محاسبه شد.

جدول ۱. وزن شاخص‌های اولیهٔ مؤثر در لغزش به همراه کلاس‌های آنها

شاخص	کلاس	الگوی نسبت فراوانی					الگوی رگرسیون خطی	
		مساحت کل (هکتار)	مساحت لغزش (هکتار)		نسبت فراوانی		وزن عامل	معناداری
		مساحت	٪	مساحت	٪			
ارتفاع (متر)	۱۷۷۹–۲۳۴۹	۶۵۸۹/۲۴	۱۰/۵۴	۱۲۳/۱۹	۱۰/۰۴	۰/۹۵۲	۰/۳	۰/۰۰۵
	۲۳۴۹–۲۶۱۹	۲۱۸۸۴/۵۷	۳۵/۰۳	۴۰۳/۵۴	۳۲/۹	۰/۹۳۹		
	۲۶۱۹–۲۸۵۴	۱۹۸۱۵	۳۱/۷۲	۲۴۰/۴۲	۱۹/۶	۰/۶۱۷		
	۲۸۵۴–۳۱۹۰	۹۷۴۵/۴۷	۱۵/۶۰	۲۷۴/۱۱	۲۲/۳۵	۱/۴۳۲		
	۳۱۹۰–۴۰۰۰	۴۴۲۴/۴۳	۷/۰۸	۱۸۵/۱۸	۱۵/۰۹	۲/۱۳۱		
شیب (درصد)	۰–۵	۲۶۳۸/۹۲	۳/۳۹	۱۸/۲۴	۱/۱۹	۰/۳۵۲	۰/۱۳۵	۰/۰۰۰
	۵–۱۲	۶۲۱۲/۶۰	۸	۲۵/۲۹	۱/۶۵	۰/۲۰۷		
	۱۲–۲۵	۱۶۸۵۴/۸۷	۲۱/۷	۱۹۹/۴۵	۱۳/۰۹	۰/۶۰۳		
	۲۵–۴۰	۱۹۳۶۳/۷	۲۴/۹۳	۳۱۵/۲۶	۲۰/۶۹	۰/۸۲۹		
	>۴۰	۳۲۵۷۶/۷۸	۴۱/۹۵	۹۶۵/۳	۶۳/۳۵	۱/۵۱		
جهت شیب	جنوب‌شرق	۸۸۱۹/۵۱	۱۱/۳۵	۱۳۶/۵۸	۸/۹۶	۰/۷۸۹	۰/۲۳۵	۰/۰۰۰
	غرب	۸۰۹۷/۶۶	۱۰/۴۲	۱۵۸/۶۳	۱۰/۴۱	۰/۹۹۸		
جهت شیب	شرق	۷۴۴۱/۶۳	۹/۵۸	۱۷۹/۰۱	۱۱/۷۴	۱/۲۲	۰/۲۳۵	۰/۰۰۰
	جنوب	۱۰۶۹۰/۸	۱۳/۷۶	۱۷۹/۴۳	۱۱/۷۷	۰/۸۵۵		
	شمال‌غرب	۹۰۲۹/۱۲	۱۱/۶۲	۱۹۶/۱۵	۱۲/۸۷	۱/۱۰		
	شمال	۱۰۲۸۹/۵۳	۱۳/۲۵	۱۹۷/۸۸	۱۲/۹۸	۰/۹۸۰		
	شمال‌شرق	۱۱۲۶۹/۱۸	۱۴/۵۱	۲۰۲/۹۰	۱۳/۳۱	۰/۹۱۷		
	جنوب‌غرب	۱۲۰۰۹/۴۳	۱۵/۴۶	۲۷۲/۹۶	۱۷/۹۱	۱/۱۵		
فاصله از گسل (متر)	۰–۵۰۰	۹۶۲۹/۸۹	۱۲/۴	۲۱۶/۰۸	۱۴/۱۸	۱/۱۴	۰/۰۷۵	۰/۰۰۵
	۵۰۰–۱۵۰۰	۱۵۲۲۶/۳۶	۱۹/۶	۲۶۶/۳۸	۱۷/۴۸	۰/۸۹۱		
	۱۵۰۰–۵۰۰۰	۳۷۸۸۳/۱۱	۴۸/۷۸	۸۳۵/۵۶	۵۴/۸۴	۱/۱۲		
	>۵۰۰۰	۱۴۹۰۷/۵۱	۱۹/۱۹	۲۰۵/۵۳	۱۳/۴۹	۰/۷۰۲		
فاصله از آبراهه (متر)	۰–۲۰۰	۴۷۱۴۰/۳۹	۶۰/۷۱	۷۶۸/۲۸	۵۰/۴۲	۰/۸۳۰	−۰/۰۲۳	۰/۰۰۰
	۲۰۰–۵۰۰	۲۴۶۳۰/۳۸	۳۱/۷۲	۶۵۳/۴۷	۴۲/۸۹	۱/۳۵		
	۵۰۰–۱۰۰۰	۵۴۹۳/۵۳	۷/۰۷	۱۰۱/۸	۶/۶۸	۰/۹۴۴		
	>۱۰۰۰	۳۸۲/۵۷	۰/۴۹۲	۰	۰	۰		
NDVI	−۰/۸۷ – −۰/۳۵	۲۱۱۲/۴	۳/۰۱	۸۴/۰۶	۴۹/۸	۲/۸۱	۰/۰۴۳۵	۰/۰۰۵
	−۰/۳۵ −۰/۰۳	۲۷۸۷۴/۵	۳۹/۸	۵۰۵/۶	۵۱/۰۶	۱/۲۸		
	۰/۰۳–۰/۵۷	۴۰۰۳۹/۷	۵۷/۱۷	۴۰۰/۳۹	۴۰/۴۴	۰/۷۰۷		
فاصله از جاده (متر)	۰–۵۰۰	۳۳۴۵۱/۰۵	۴۳/۰۸	۶۳۰/۳۴	۴۱/۳۷	۰/۹۶۰	−۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰
	۵۰۰–۱۰۰۰	۱۷۴۷۲/۵۵	۲۲/۵	۳۷۸/۴۱	۲۴/۸۳	۱/۱۰		
	>۱۰۰۰	۲۶۷۲۳/۲۷	۳۴/۴۱	۵۱۴/۸	۳۳/۷۸	۰/۹۸۱		
لیتولوژی	شیل و مارن	۱۰۹۵/۷۳	۱/۸۹	۱۰/۷۲	۰/۷۳۴	۰/۳۸۷	۰/۵۰۳	۰/۰۰۵

ادامهٔ جدول ۱

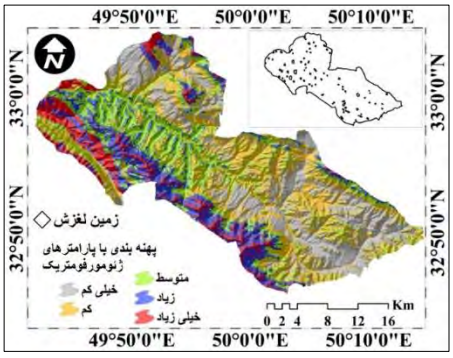
	کلاس	الگوی نسبت فراوانی				رگرسیون خطی	
		مساحت کل		مساحت لغزش		نسبت فراوانی	
		مساحت	٪	مساحت	٪		
پارامتر	آبرفت و پادگانه قدیمی	۸۲۶۶/۸۵	۱۴/۳	۹۱/۶۳	۶/۲۷	۰/۴۳۸	وزن عامل / معناداری
	آهک مارنی، رسی ماسه‌ای	۷۷۶۴/۳۸	۱۳/۴۴	۱۰۳/۳۵	۷/۰۷	۰/۵۲۶	
	کنگلومرا و ماسه‌سنگ	۱۳۶/۱۳	۰/۲۳۵	۰/۲۴۷	۱۶/۹۱	۷۱/۷۸	
	آهک مارنی و ماسه‌سنگی	۶۹۸/۳۹	۱/۲۰	۳۴/۶۶	۲/۳۷	۱/۹۶	
	آهک سفید، مارنی و دولومیتی	۴۳۶/۰۴	۰/۷۵۴	۱۶/۷۴	۱/۱۴	۱/۵۱	
	آهک نازک لایه رسی	۱۳۱۲۹/۰۸	۲۲/۷۲	۱۸۱/۷۱	۱۲/۴۴	۰/۵۴۷	
	آهک ریفی با شیل	۲۱۶۸۰/۸	۳۷/۵۲	۵۲۲/۸۰	۳۵/۸	۰/۹۵۳	
	آهک اوربیتولین‌دار	۸۱۹/۰۷	۱/۴۱	۱۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۵۱۷	
	آهک دولومیتی	۲۳۹۶/۷۹	۴/۱۴	۱۵۲/۹۶	۱۰/۴	۲/۵۲	
	رادیولاریت و کنگلومرا	۱۳۴۷/۴	۲/۳۳	۸۸	۶/۰۲	۲/۵۸	
کاربری اراضی	کشاورزی	۴۲۹۱/۹۶	۵/۵۲	۹۴/۲۷	۶/۰۱	۱/۰۸	۰/۰۸۲۳ / ۰/۰۰۰
	باغ	۶۹۹/۱۶	۰/۹۰۰	۱۹/۶۰	۱/۲۴	۱/۳۸	
	مرتع خوب	۳۴۵۰/۰۹	۴/۴۴	۱۱۰/۸۳	۷/۰۶	۱/۵۹	
	کشاورزی و دیم	۳۴۷/۹۹	۰/۴۴۸	۰	۰	۰	
	کشاورزی و مرتع خوب	۲۲۴۲/۳۲	۲/۸۸	۷۳/۸۸	۷۳/۸۸	۱/۶۳	
	کشاورزی و مرتع متوسط	۲۳۱۶/۷۹	۲/۹۸	۱۶/۰۶	۱/۰۲	۰/۳۴۳	
	مرتع خوب و جنگل پراکنده	۳۳۶۲۶/۹۲	۴۳/۳	۳۹۸/۸۵	۲۵/۴۲	۰/۵۸۷	
	جنگل متوسط	۸۲۰۳/۵۸	۱۰/۵۶	۲۷۶/۶۸	۱۷/۶۳	۱/۶۶	
	مرتع متوسط	۲۵۳۸/۹۷	۳/۲۶	۰	۰	۰	
	مرتع فقیر	۹۳۰۱/۱۷	۱۱/۹۸	۳۷۲/۷۸	۲۳/۷۶	۱/۹۸	
	صخره	۱۰۵۳۴/۵۴	۱۳/۵۶	۲۰۵/۵۸	۱۳/۱	۰/۹۶۶	
	شهری	۹۳/۳۴	۰/۱۲۰	۰	۰	۰	

جدول ۲. وزن شاخص‌های ژئومورفومتریک و کلاس‌های آنها

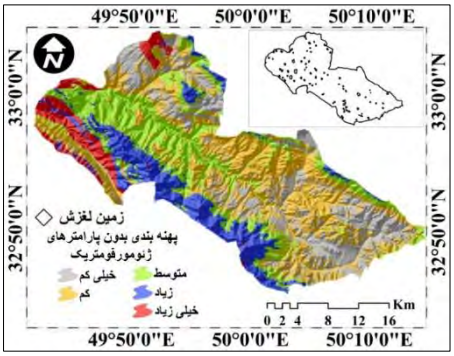
شاخص	کلاس	الگوی نسبت فراوانی				رگرسیون خطی	
		مساحت کل		مساحت لغزش		نسبت فراوانی	وزن عامل / معناداری
		مساحت	درصد	مساحت	درصد		
SPI	۰–۳۰۰	۶۲۰۲۲/۰۷	۹۹/۳۱	۱۲۱۹/۲	۹۹/۴۰	۱/۰۰۱	۰/۲۰۵ / ۰/۰۰۰
	۳۰۰–۶۰۰	۲۳۱/۳۵	۰/۳۷	۲/۶۸	۰/۲۱۸	۰/۵۸۹	
	۶۰۰–۹۰۰	۹۳/۸۶	۰/۱۵	۳/۴۸	۰/۲۸۳	۱/۸۸	
	۹۰۰–۱۲۰۰	۶۸/۶۰	۰/۱۰	۰	۰	۰	
	۱۲۰۰–۱۵۰۰	۳۳/۱۷	۰/۰۵۳	۱/۰۸	۰/۰۸۸	۱/۶۵۸	
	>۱۵۰۰	۹/۶۵	۰/۰۱۵	۰	۰	۰	

طول شیب (متر)	۰-۴/۱۲	۳۵۹۹۷/۲۷	۴۳/۰۲	۵۷۳/۴۸	۴۶/۷۵	۱/۰۸۶	۰/۱۹۸	۰/۰۰۰
	۴/۱۲-۱۲/۳۷	۲۳۸۵۸/۸۲	۲۸/۵۱	۵۸۴/۸۱	۴۷/۶۸	۱/۶۷۱		
	۱۲/۳۷-۳۴/۰۴	۲۳۵۵۵/۵۸	۲۸/۱۵	۶۰/۱۸	۴/۹	۰/۱۷۴		
	۳۴/۰۴-۸۳/۵۶	۲۰۶/۸۱	۰/۲۴۷	۶/۹۶	۰/۵۶۷	۲/۲۹۵		
	۸۳/۵۶-۲۶۳/۰۶	۴۰/۲۱	۰/۰۴۸	۱/۰۱	۰/۰۸۲	۱/۷۱۳		
TWI	۴/۱۵-۷/۱۳	۲۵۸۷۹/۶	۱۷/۳۴	۷۱۱/۱۲	۲۷/۰۳	۱/۵۵	۰/۰۲۳۴	۰/۰۰۰
	۷/۱۳-۹/۲۴	۲۴۸۲۲/۱	۱۶/۶۳	۳۳۲/۹۸	۱۲/۶۵	۰/۷۶۰		
	۹/۲۴-۱۲/۷۲	۹۶۳۶۵/۵	۶۴/۵۹	۱۵۶۰/۰۳	۵۹/۳	۰/۹۱۸		
	۱۲/۷۲-۲۲/۶۷	۲۱۲۰/۳	۱/۴۲۱	۲۶/۳۵	۱/۰۰۱	۰/۷۰۴		
انحنای مقطع	-۰/۰۰۱ - -۰/۰۲	۱۰۴۶۲/۱۸	۱۶/۷۵	۱۸۸۶/۶۷	۳۳/۵۶	۲/۰۰۳	۰/۰۱۹۵	۰/۰۰۰
	-۰/۰۰۱ -۰/۰۰۱	۴۲۷۲۲/۵۶	۶۸/۴	۷۳۸/۲	۱۳/۱۳	۰/۱۹۲		
	۰/۰۰۱-۰/۰۳	۹۲۷۳/۹۷	۱۴/۸۴	۲۹۹۵/۵۹	۵۳/۲۹	۳/۵۸۹		
TPI	دره	۳۶۱۸۷/۶۸	۵۷/۹۳	۵۳۱/۳۸	۴۳/۴۳	۰/۷۴۹	۰/۵۳۱	۰/۰۰۱
	دامنه	۱۲۳۷۶/۸۴	۱۹/۸۱	۴۴۱/۱۲	۳۶/۰۵	۱/۸۱۹		
	خط الراس	۱۳۸۹۳/۵۴	۲۲/۲۴	۲۵۰/۹۵	۲۰/۵۱	۰/۹۲۲		
انحنای سطح	مقعر	۱۰۹۸۹/۹۴	۱۷/۵۹	۲۶۵/۹	۲۱/۶۸	۱/۲۳۲	۰/۴۳۲	۰/۰۰۰
	هموار	۳۸۵۵۳/۸	۶۱/۷۲	۶۳۱/۷	۵۱/۵	۰/۸۳۴		
	محدب	۱۲۹۱۴/۳	۲۰/۶۷	۳۲۸/۸	۲۶/۸۱	۱/۲۹۶		
SAR	۱-۱/۰۷	۳۸۴۴۸/۷۶	۶۲/۷۶	۵۴۶/۷	۴۴/۸۳	۰/۷۱۴	۰/۲۶۲	۰/۰۰۱
	۱/۰۷-۱/۲۱	۱۸۴۵۵/۰۳	۳۰/۱۲	۵۵۳/۸	۴۵/۴۱	۱/۵۰		
	۱/۲۱-۲/۲۴	۴۳۵۰/۴۶	۷/۱۰	۱۱۸/۸	۹/۷۴	۱/۳۷		

پس از تعیین وزن ۹ شاخص اولیهٔ مؤثر در زمین‌لغزش و ۷ شاخص ژئومورفومتریک با استفاده از روش رگرسیون خطی و ضرب آن در وزن کلاس‌های عوامل یادشده که با استفاده از روش نسبت فراوانی حاصل شده است، نقشه‌های وزنی با هم جمع شدند و نقشهٔ نهایی حساسیت زمین‌لغزش رویکرد با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک و رویکرد بدون استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک حاصل شد، سپس نقشه‌های یادشده بر اساس شکست‌های طبیعی (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۳۱؛ ۱۳۹۳: ۳۸؛ شیرانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۶؛ عرب‌عامری و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۲۰؛ عرب‌عامری و حلبیان، ۱۳۹۴: ۷۲؛ عرب‌عامری و شیرانی، ۱۳۹۵: ۹۹؛ شیرانی و عرب‌عامری، ۱۳۹۴: ۲۳) به پنج کلاس بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم تقسیم‌بندی شدند. نتایج پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش رویکرد همراه با پارامترهای ژئومورفومتریک در شکل (۴) و رویکرد بدون شاخص‌های ژئومورفومتریک در شکل (۵) و نمونه‌ای از لغزش‌های رخ‌داده در منطقه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۴. پهنه‌بندی رویکرد با شاخص‌های ژئومورفومتریک



شکل ۵. پهنه‌بندی رویکرد بدون شاخص‌های ژئومورفومتریک

شکل ۶. نمونه‌ای از لغزش‌های منطقهٔ مطالعه‌شده

پس از تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، برای ارزیابی نقش شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی، درستی‌سنجی نقشه‌ها با استفاده از منحنی ROC انجام شد. در پژوهش حاضر، درستی روش‌ها با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) و دقت تفکیک بین طبقه‌ها با استفاده از نسبت فراوانی (FR)[1] و شاخص سطح سلول هسته (SCAI)[2] بررسی و تأیید شد. باتوجه‌به اینکه برای ارزیابی الگو نمی‌توان از همان لغزش‌هایی استفاده کرد که در پهنه‌بندی استفاده شده‌اند (Constantin et al., 2011: 19)، از بین نقاط لغزشی، ۷۰ درصد برای اجرای الگو و ۳۰ درصد برای ارزیابی الگو استفاده شدند (Guzzetti et al., 2012: 20). نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی بر مبنای پهنه‌بندی با شاخص‌های اولیه و بدون شاخص‌های ژئومورفومتریک و پهنه‌بندی به همراه شاخص‌های ژئومورفومتریک با استفاده از شاخص‌های SCAI و FR در جدول (۳) و شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده

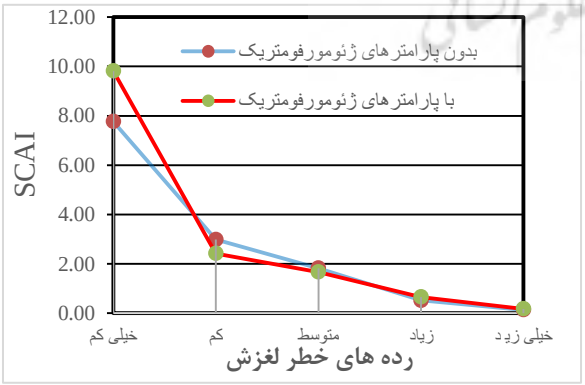
[1] Frequency Ratio
[2] Seed Cell Area Index

شده‌اند؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر دو نقشهٔ پهنه‌بندی، مقادیر نسبت فراوانی (FR) با افزایش حساسیت خطر از بسیار کم به بسیار زیاد، روند صعودی داشته‌اند (شکل ۷)، اما شاخص SCAI روند نزولی درخور توجهی را نشان می‌دهد (شکل ۸) و نشان‌دهندهٔ همبستگی زیاد رده‌های خطر لغزش با مناطق لغزشی موجود و بازدیدهای میدانی منطقهٔ مطالعه است و از این نظر، ترتیب تفکیک‌پذیری بین طبقه‌ها مناسب ارزیابی شد. در نقشهٔ پهنه‌بندی با استفاده از شاخص‌های اولیه به همراه شاخص‌های ژئومورفومتریک، این همبستگی نمود بارزتری بین رده‌های خطر لغزش با مناطق لغزشی دارد. نتایج مساحت زیرمنحنی (AUC) بیان‌کنندهٔ اینست که با افزایش شاخص‌های ژئومورفومتریک در فرایند تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی، مقدار AUC افزایش چشمگیری داشته و دقت نقشهٔ پهنه‌بندی افزایش یافته است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

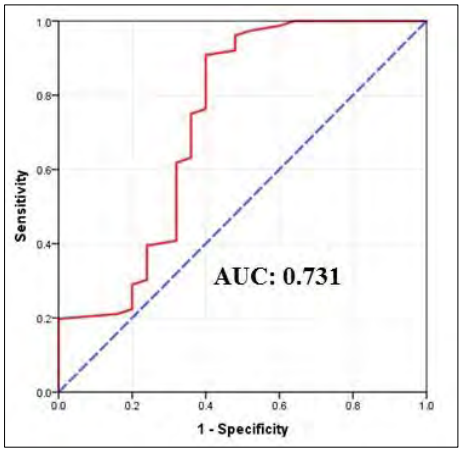
جدول ۳. مقادیر نسبت فراوانی و شاخص سطح سلول هستهٔ مناطق حساس زمین‌لغزش

الگو	رده‌های خطر لغزش	مساحت فاقد لغزش (هکتار)	مساحت لغزش (هکتار)	درصد مساحت لغزش	مساحت هر رده خطر (هکتار)	درصد مساحت رده	درصد نسبت فراوانی	درصد Seed	SCAI
همراه با شاخص‌ها	بسیار کم	۲۰۵۰۱/۱	۷۴/۵۲	۴/۸۹	۲۰۵۷۵/۶	۲۶/۵	۰/۰۰	۲/۷	۹/۸۱
	کم	۲۰۶۲۶	۳۱۳/۲۹	۲۰/۵۶	۲۰۹۳۹/۳	۲۶/۹۷	۰/۰۱	۱۱/۱	۲/۴۲
	متوسط	۱۷۱۷۱/۴	۳۱۷/۲۸	۲۰/۸۲	۱۷۴۸۸/۶	۲۲/۵۲	۰/۰۲	۱۳/۵	۱/۶۶
	زیاد	۱۱۵۳۱/۷	۳۷۴/۳۲	۲۴/۵۷	۱۱۹۰۶	۱۵/۳۳	۰/۰۳	۲۳/۴	۰/۶۵
	بسیار زیاد	۶۲۹۲/۹	۴۴۴/۱۳	۲۹/۱۵	۶۷۳۷	۸/۶۸	۰/۰۷	۴۹/۱	۰/۱۸
بدون شاخص‌ها	بسیار کم	۱۷۵۳۷/۹	۷۱/۰۹	۴/۶۷	۱۷۶۰۹	۲۲/۶۸	۰/۰۰۴	۲/۹۲	۷/۷۶
	کم	۲۵۳۱۱/۶	۳۹۴/۶	۲۵/۹	۲۵۷۰۶/۳	۳۳/۱۱	۰/۰۱۵	۱۱/۱۱	۲/۹۸
	متوسط	۱۸۰۳۶/۹	۳۲۹/۹	۲۱/۶۶	۱۸۳۶۶/۸	۲۳/۶۵	۰/۰۱۸	۱۳	۱/۸۲
	زیاد	۱۰۷۸۸/۱	۴۳۲/۲	۲۸/۳۷	۱۱۲۲۰/۴	۱۴/۴۵	۰/۰۳۹	۲۷/۸۸	۰/۵۲
	بسیار زیاد	۴۴۴۸/۵	۲۹۵/۶	۱۹/۴۱	۴۷۴۴/۱	۶/۱۱	۰/۰۶۲	۴۵/۱	۰/۱۴

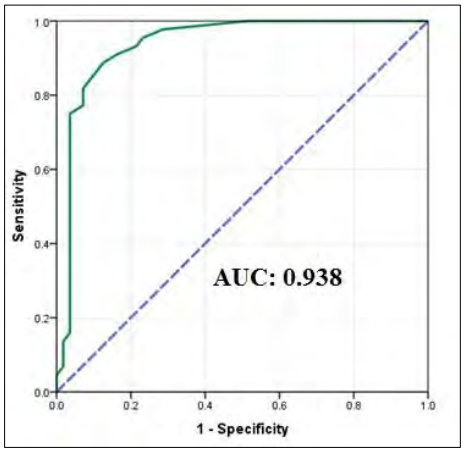
شکل ۷. روند شاخص نسبت فراوانی



شکل ۸. روند شاخص سطح سلول هسته



شکل ۹. مساحت زیرمنحنی بدون شاخص‌های ژئومورفومتریک



شکل ۱۰. مساحت زیرمنحنی با شاخص‌های ژئومورفومتریک

نتیجه‌گیری

ژئومورفومتری، روشی مدرن با رویکرد کارتوگرافیکی - تحلیلی برای نمایش پستی و بلندی‌های سطح زمین با استفاده از ارتفاع زمین در کامپیوتر است. در پژوهش حاضر، کارایی شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهند شاخص‌های ژئومورفومتریک تأثیر زیادی در افزایش دقت شناسایی مناطق حساس به لغزش دارند و با افزایش شاخص‌های ژئومورفومتریک به الگو، دقت آن از ۰/۷۳ به ۰/۹۳ افزایش یافته است؛ به عبارتی، نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حاصل از رویکرد بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک به همراه سایر عوامل مؤثر نسبت به رویکرد صرفاً با استفاده از عوامل مؤثر مرسوم و بدون بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک، درستی نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد و با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها انطباق بهتری دارد. در این میان، شاخص موقعیت توپوگرافی، انحنای سطح و شاخص نسبت مساحت سطح به‌ترتیب با کسب امتیاز ۰/۵۳۱، ۰/۴۳۲ و ۰/۲۶۲ بیشترین تأثیر را در افزایش درستی نقشهٔ پهنه‌بندی داشته‌اند و شاخص‌های قدرت جریان آبراهه (SPI)، طول شیب (SL)، شاخص خیسی توپوگرافی (TWI) و انحنای مقطع در رده‌های بعدی قرار دارند. طبق نتایج پهنه‌بندی حساسیت خطر زمین‌لغزش با استفاده از شاخص‌های اولیه و شاخص‌های ژئومورفومتریک، ۸/۶۸ درصد (۶۷۳۷ هکتار) مساحت منطقه در ردهٔ خطر بسیار زیاد، ۱۵/۳۳ درصد (۱۱۹۰۶ هکتار) در ردهٔ خطر زیاد، ۲۲/۵۲ درصد (۱۷۴۸۸/۶ هکتار) در ردهٔ خطر متوسط، ۲۶/۹۷ (۲۰۹۳۹/۳ هکتار) در ردهٔ خطر کم و ۲۶/۵ درصد (۲۰۵۷۵/۶ هکتار) در ردهٔ خطر بسیار کم قرار دارد. باتوجه‌به تأثیر شایان توجه شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقهٔ مطالعه‌شده، توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی که در زمینهٔ پهنه‌بندی زمین‌لغزش انجام می‌شوند، از این شاخص‌ها به‌عنوان شاخص‌های مؤثر در فرایند پهنه‌بندی استفاده شود.

سپاسگزاری

نویسنده مقالهٔ حاضر را بر اساس داده‌های رقومی تولیدشده و بخشی از نتایج طرحی پژوهشی در مرکز پژوهش‌ها و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان اجرا کرده است؛ ازاین‌رو نویسنده از مرکز یادشده و پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری کشور برای فراهم‌کردن شرایط اجرای پژوهش حاضر قدردانی می‌کند.

منابع

انتظاری، مژگان؛ رامشت، محمدحسین؛ سیف، عبدالله؛ کورش شیرانی، (۱۳۹۰). تأثیرات سیستم‌های شکل‌زا بر زمین‌لغزش‌های ایران، جغرافیا و توسعه، سال نهم، شمارهٔ ۲۴، صص ۱۷۲-۱۵۵.

انتظاری، مژگان، (۱۳۹۳). اقلیم اختری (ایده‌ای در حوزهٔ دانش ژئومورفولوژی ایران)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال بیست و پنجم، پیاپی ۵۳، شمارهٔ ۱، صص ۱۰-۱.

بهشتی‌راد، مسعود؛ فیض‌نیا، سادات؛ سلاجقه، علی؛ حسن احمدی، (۱۳۸۹). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با مدل رگرسیون چندمتغیره با استفاده از GIS، جغرافیای طبیعی، سال سوم، صص ۴۰-۳۳.

سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، (۱۳۷۸). نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، چقاگرگ برگ59561V، دره ساری ورقه 5556II، چاله پره ورقه59551V، وهرگان شیت 5955I، فریدون شهر 50551V.

سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۳۷۷). نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰، برگه‌های گلپایگان و شهرکرد.

سازمان نقشه‌برداری کشور، (۱۳۷۶). عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰، منطقهٔ پیشکوه فریدون‌شهر.

سفیدگری رضا، (۱۳۸۱). ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ دماوند)، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

شیرانی، کورش، (۱۳۸۲). ارزیابی مهم‌ترین روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌منظور انتخاب روش مناسب برای جنوب استان اصفهان منطقهٔ سمیرم در مسیر رودخانه ماربر، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، شمارهٔ ثبت ۸۳/۹۶۱. پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری.

شیرانی، کورش؛ سیف، عبدالله؛ احمد نصر، (۱۳۹۲). بررسی عوامل مؤثر بر حرکات توده‌ای بر پایهٔ تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعهٔ موردی: ارتفاعات دنای زاگرس)، علوم زمین، شمارهٔ ۸۹، صص ۱۰-۳.

شیرانی، کورش و علی‌رضا عرب‌عامری (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ دزعلیا)، مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی، علوم آب و خاک، شمارهٔ ۷۲، ۳۳۵-۳۲۱.

شیرانی، کورش، (۱۳۹۶). مدل‌سازی و ارزیابی پتانسیل حساسیت اراضی نسبت به لغزش با استفاده از مدل‌های احتمالاتی آنتروپی شانون و

وزن شاهد تئوری بیزین (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ سرخون کارون)، مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی، علوم آب وخاک، سال بیست و یکم، شمارهٔ ۱، صص ۶۸-۵۱.

صفاری، امیر؛ علی‌مرادی، مسعود؛ رامین حاتمی‌فرد، (۱۳۹۲). پهنه‌بندی خطر رخداد زمین‌لغزش به روش رگرسیون چندمتغیره با استفاده از داده‌های گسسته در حوضهٔ رودخانهٔ ماربر، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، صص ۷۴-۵۹.

عرب‌عامری، علی‌رضا و امیر حسین، حلبیان، (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری دومتغیرهٔ وزنی AHP و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ زرند)، جغرافیای طبیعی، شمارهٔ ۲۸، صص ۸۶-۶۵.

عرب‌عامری، علی‌رضا و کورش شیرانی، (۱۳۹۵). اولویت‌بندی عوامل مؤثر در زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر آن با استفاده از تئوری احتمالاتی دمپسترشفر (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ ونک، استان اصفهان)، مهندسی و مدیریت آبخیز، سال هشتم، شمارهٔ ۱، صص ۱۰۶-۹۳.

عرب‌عامری، علی‌رضا؛ کلوراژان، عبدالله؛ کرمی، جلال؛ علیمرادی، مسعود؛ کورش شیرانی، (۱۳۹۳). استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ ماربر)، زمین پویا، شمارهٔ ۴، صص ۱۲۸-۱۱۲.

یمانی، مجتبی؛ احمدآبادی، علی، غلامرضا زارع، (۱۳۹۱). بکارگیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز درکه)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارهٔ ۳، صص ۱۴۲-۱۲۵.

یمانی، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ گورابی، ابوالقاسم؛ مریم رحمتی، (۱۳۹۳). تعیین مرز پهنه‌های خطر زمین‌لغزش در مسیر آزادراه خرم‌آباد-پل زال با روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شمارهٔ ۳۲، صص ۴۴-۲۷.

یمانی، مجتبی؛ حسن‌پور، سیروس؛ مصطفایی، ابوالفضل؛ مجید شادمان رودپشتی، (۱۳۹۱). نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ آبخیز کارون بزرگ با استفاده از مدل AHP در محیط GIS، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شمارهٔ ۴، صص ۵۶-۳۹.

یمانی، مجتبی؛ مقامی‌مقیم، غلام‌رضا؛ عرب‌عامری، علی‌رضا؛ کورششیرانی، (۱۳۹۶). ارائهٔ مدل ترکیبی به‌منظور افزایش دقت تهیهٔ نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با تأکید بر مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ دزعلیا، استان اصفهان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شمارهٔ ۴، صص ۴۰-۱۹.

Atkinson, P.M. and R. Massari (2011), Autologistic modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy, Geomorphology, Vol. 130: 55-64.

Constantin, M., M. Bednarik, M. C. Jurchescu and M. Vlaicu (2011), Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania), Environ. Earth Sci, Vol. 63: 397-406.

Guzzetti F., A. C. Mondini, M. Cardinali, F. Fiorucci, M. Santangelo, K.T. Chang (2012), Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Earth-Science Reviews, Vol. 112: 42-66.

He, S., P. Pan, L. Dai, H. Wang, J. Liu (2012), Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China, Geomorphology, Vol. 171-172: 30-41.

Hengl, T., S. Gruber, D. P. Shrestha (2003), Digital terrain analysis in ILWIS. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, Netherlands, 62p.

Hong, H., B. Pradhan, M. N. Jebur, D. T. Bui, C. Xu, A. Akgun (2015), Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines, Environ. Earth Sci. Vol. 75(40): 245-256.

Hong, H., W. Chen, C. Xu, A. M. Youssef, B. Pradhan, D. Tien Bui (2016), Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy. Geocarto. Int. Vol. 23(4): 223-2464.

Hong, H., B. Pradhan, C. Xu, D. Tien Bui (2015), Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines, Catena, Vol. 133: 266-281.

Jenness, J. (2002), Surface Areas and Ratios from Elevation Grid, Jenness Enterprises, 216p.

Lee, S., J. H Ryu, J. S. Won, H. J. Park (2004), Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network, Engineering Geology, Vol. 71, 289-302.

Lee, S. and B. Pradhan (2007), Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models, Landslides, Vol. 4: 33-41.

Chousianitis, K., V. Del Gaudio, N. Sabatakakis, K. Kavoura, G. Drakatos, G. D. Bathrellos, H. D. Skilodimou (2016), Assessment of earthquake-induced landslide hazard in Greece: from Arias intensity to spatial distribution of slope resistance demand, Bull. Seismol. Soc. Am, Vol. 106: 174-188.

Costanzo, D., E. Rotigliano, C. Irigaray, J. D. Jimenez-Pervarez, J. Chacon (2012), Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain), Nat Hazards Earth Syst Sci, Vol. 12: 327-340.

Chen Z. and W. Jinfei (2007), Landslide hazard mapping using logistic regression model in Machenzie Valley, Nat Hazard, Vol. 42: 75-89.

Chalkias, C., M. Ferentinou, C. Polykretis (2014), GIS-based landslide susceptibility mapping on the peloponnese peninsula, Greece, Geosciences Vol. 4: 176-190.

Dai, F. C. and C. F. Lee (2002), Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, Geomorphology, Vol. 42: 213-228.

Dikau, R. (1989), The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper J. (Ed.), Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems, Taylor and Francis, London, 51-77.

Dymond, J. R., A. G. Ausseil, J. D. Shepherd, L. Buettner (2006), Validation of a region-wide model of landslide susceptibility in the Manawatu–Wanganui region of New Zealand, Geomorphology, Vol. 74: 70-79.

Ercanoglu, M. and C. Gokceoglu (2002), Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (North of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach, Environ Geol, Vol. 41, 720-730.

Evans, I. S. (1972), General geomorphology, derivatives of altitude and descriptive statistics, In: R. J. Chorley (Ed.) Spatial Analysis in Geomorphology, 17-90

Zonation: Why is it Still so Difficult, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 2: 176-184.

Wang, Q., D. Wang, Y. Huang, Z. Wang, L. Zhang, Q. Guo, W. Chen, W. Chen, M. Sang (2015), Landslide susceptibility mapping based on selected optimal combination of landslide predisposing factors in a large catchment, Sustainability, Vol. 7: 16653-16669.

Wang, H. B., S. R. Wu, J. S. Shi, B. Li (2011), Qualitative hazard and risk assessment of landslides: a practical framework for a case study in China, Nat Hazards. doi:10.1007/s11069-011-0008-1.

Yesilnacar, E. K. (2005), The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, PhD Thesis. Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 p.

Yilmaz, I. (2009), Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey), Computers and Geosciences, No 35: 1125-1138.

Zhou, S., G. Chen, L. Fang, Y. Nie (2016), GIS-Based Integration of Subjective and Objective Weighting Methods for Regional Landslides Susceptibility Mapping, Sustainability, Vol. 8: 334-343.

Zhou, S. and L. Fang, L. (2015), Support vector machine modeling of earthquake-induced landslides susceptibility in central part of Sichuan province, China, Geoenviron. Disasters, Vol. 2(2): 234-243.

Zinko, U., J. Seibert, M. Dynesius, C. Nilsson (2005), Plant species numbers predicted by a topography-based groundwater flow index, Ecosystems, Vol. 8: 430-441.

Mohammady, M., H. R. Pourghasemi, B. Pradhan (2012), Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models, Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 61, 221-236.

Moore, I. D. and G. J. Burch (1986), Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory, Water Res, Vol. 22, 1350-1360

Moore, I. D., R. B. Grayson, A. R. Ladson (1991), Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, Hydro Process, Vol. 5: 3-30.

Oh, H. J. and B. Pradhan (2011), Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area, Comput Geosci, Vol. 37(9): 1264-1276.

Pourghasemi, H. R., M. Mohammady, B. Pradhan (2012), Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Catena, Vol. 97: 71-88.

Pike, R. J., I. S Evans, T. Hengl (2009), Geomorphometry: A Brief Guide, Developments in Soil Science, Vol. 33(1): 225-244.

Regmi, N. R., J. Giardio, J. Vitek (2010), Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA, Geomorphology, Vol. 115: 172-187.

Talebi, A., Uijlenhoet, R., Troch, P. A. (2007), Soil moisture storage and hillslope stability, Nat Hazards Earth Syst Sci, Vol. 7: 523-534.

Tagil, S. and J. Jenness (2008), GIS-based automated landform classification and topographic, land cover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Poje, Turkey. J Appl Sci, Vol. 8, No. 6: 910-921.

Van Western, C. J., T. H. Van Asch, R. Soeters (2005), Landslide Hazard and Risk

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی