

اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن

با استفاده از شاخص انتروپی شانون

حمیدرضا پورقاسمی^۱، حمیدرضا مرادی^{۱*}، سید محمود فاطمی عقدا^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۵)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن در شمال شهر تهران با استفاده از شاخص انتروپی شانون است. به این منظور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای GeoEye سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۲ و SPOT-5 سال ۲۰۱۰ و بازدهای صحرایی، ۵۲۸ نقطه لغزش شناسایی و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طبقه ارتفاعی، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، تراکم جاده، شاخص حمل رسوب، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت، شاخص گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، نسبت مساحت سطح (SAR) و شاخص وضعیت توپوگرافی (TPI) به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شناسایی و نقشه‌های مذکور در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه و رقومی گردید. اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از شاخص انتروپی شانون نشان داد که لایه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی، درجه شیب، شاخص توان آبراهه، و NDVI بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین‌لغزش منطقه و عوامل وضعیت توپوگرافی (شکل اراضی) و شکل شیب کمترین تأثیر را داشته‌اند. هم‌چنین پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با مدل مذکور و ارزیابی دقت آن با استفاده از منحنی ROC و ۳۰ درصد نقاط لغزشی بیانگر دقت خیلی خوب مدل (۸۲/۸۳ درصد) با انحراف استاندارد ۰/۰۲۳۳ برای منطقه مورد مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: حساسیت زمین‌لغزش، شاخص انتروپی شانون، سامانه اطلاعات جغرافیایی، شمال شهر تهران

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

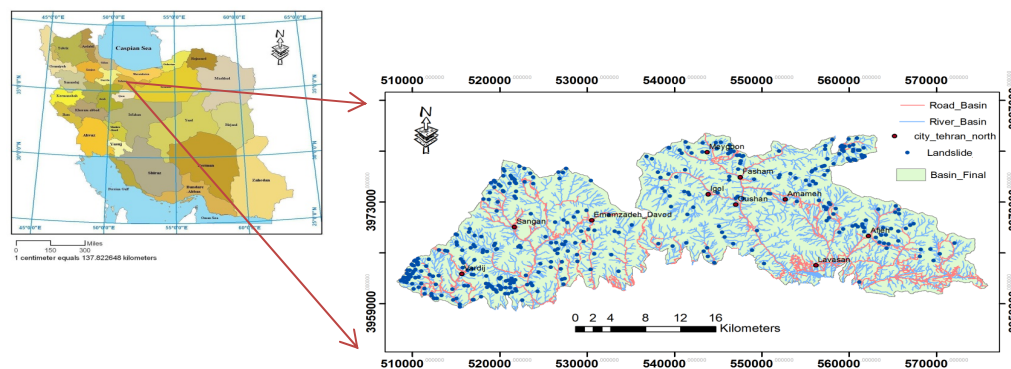
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hrmoradi@modares.ac.ir

مقدمه

زمین لغزش یکی از مهم ترین خطرات و بلایای طبیعی است که هر ساله منجر به خسارات مالی و جانی فراوانی در سراسر جهان می گردد. طبق مطالعات انجام شده، زمین لغزش به تنهایی ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده (۱۰) و روند مذکور هم چنان به خاطر افزایش شهرنشینی بدون برنامه ریزی شده، جنگل زدایی، تغییر کاربری اراضی و تغییر شرایط اقلیمی در حال توسعه است (۸ و ۱۴). نظر به اهمیت موضوع، شناخت عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش و مناطق مورد خطر امری ضروری به نظر می رسد. انترپوی به معنای کمیتی از بی نظمی بین علل، نتایج یا تصمیم گیری ها در موضوعات مختلف می باشد و به ویژه در مطالعات ژئومورفولوژی نظیر زمین لغزش که داده های موجود با عدم قطعیت ها روبرو هستند می تواند کارایی بالایی داشته باشد (۲۴). از این رو مطالعات مختلفی با استفاده از تئوری انترپوی شانون در بحث زمین لغزش صورت گرفته که عبارتند از: شرما و همکاران (۲۱) به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر وقوع لغزش، و میزان آسیب پذیری آن در Sikkim کشور هندوستان از انترپوی شانون استفاده کردند. عوامل مؤثر در این تحقیق عبارتند از: درصد شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از جاده، و فاصله از شبکه آبراهه، عمق خاک، بافت خاک، هدایت الکتریکی و فرسایش. نتایج بررسی عوامل با استفاده از شاخص انترپوی نشان داد که عوامل شیب (۲/۰۸۵)، کاربری اراضی (۱/۳۷۱) و بافت خاک (۱/۲۸۷) بیشترین وزن و بالطبع بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش منطقه داشته است. بدناریک و همکاران (۴) به منظور ارزیابی حساسیت زمین لغزش شهرستان های Kralovany-Liptovsky Mikulas کشور اسلواکی از آنالیز آماری دو متغیره و شاخص انترپوی استفاده کردند. در این تحقیق عوامل لیتولوژی، ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب و ویژگی های چشم انداز به عنوان عوامل مؤثر انتخاب و با استفاده از انترپوی وزن دهی گردیدند. نتایج نشان داد که لیتولوژی، ویژگی های چشم انداز، ارتفاع، درجه شیب و جهت شیب به ترتیب بیشترین وزن را به خود اختصاص داده و سپس نقشه حساسیت زمین لغزش برای منطقه مورد مطالعه

تهیه گردید. نتایج ارزیابی با استفاده از منحنی ROC بیان گر دقت خوب مدل (۷۰ درصد) است. کنستانتین و همکاران (۶) به منظور ارزیابی حساسیت زمین لغزش حوزه آبخیز Sibiciu کشور رومانی از آنالیز آماری دو متغیره و شاخص انترپوی شانون استفاده کردند. لایه های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، لیتولوژی و کاربری اراضی به عنوان عوامل مؤثر انتخاب و با استفاده از شاخص انترپوی وزن دهی گردیدند. نتایج نشان داد که کاربری اراضی و لیتولوژی با وزن های ۰/۰۷۳ و ۰/۰۶۸ بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش منطقه داشته و نقشه زمین لغزش به چهار کلاس خطر کم (۰/۴/۸۶)، متوسط (۰/۵۸/۹)، زیاد (۰/۳۰/۴۵) و خیلی زیاد (۰/۵/۴) تقسیم بندی گردید. پورقاسمی و همکاران (۱۴) به منظور تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش حوزه آبخیز صفارود رامسر از مدل های احتمالاتی و انترپوی شانون استفاده کردند. در تحقیق فوق ۱۲ فاکتور درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، شاخص رطوبت، شاخص توان آبراهه، شاخص حمل رسوب، کاربری اراضی و شکل شیب به عنوان عوامل مؤثر شناسایی و با استفاده از شاخص انترپوی وزن دهی گردیدند. نتایج وزن دهی بیان گر آن بود که فاکتورهای ارتفاع و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش منطقه داشته اند. همچنین نتایج ارزیابی مدل ها حاکی از دقت بالاتر تئوری انترپوی (۰/۸۶/۰۸) نسبت به تئوری احتمالاتی (۰/۸۲/۷۵) است.

با توجه به شرایط آب و هوایی، زمین شناسی، ساخت و ساز در شیب های تند و سایر شرایط مستعد کننده ناپایداری دامنه، در بخش های شمالی تهران بحث زمین لغزش به مشکلی حاد تبدیل شده است. بیشترین مشکل در اطراف رودخانه هاست که ساخت و سازهای نامناسب بر میزان خطرپذیری این مناطق افزوده است. ناحیه ولنجک در شمال غرب تهران به دلیل قرارگرفتن در مسیر گسل شمال تهران و در حاشیه رودخانه ولنجک از مناطق حساس در این زمینه است. از دیگر مناطق مستعد زمین لغزش می توان به ازگل، دارآباد، شمال سعادت آباد، شمال امامزاده



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طبقه ارتفاعی، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، تراکم جاده، شاخص حمل رسوب (Sediment Transport Index)، شاخص توان آبراهه (Stream Power Index)، شاخص رطوبت (Topographic Wetness Index)، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI)، نسبت مساحت سطح (Surface Area Ratio) و شاخص وضعیت توپوگرافی (Topographic Position Index) به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شناسایی و نقشه‌های مذکور در محیط سامانه اطلاعات مکانی رقمی می‌گردند. به‌این‌منظور با استفاده از نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه مدل رقمی ارتفاع (Digital Elevation Model) تهیه و عوامل درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طبقه ارتفاعی، نسبت مساحت سطح (رابطه ۱)، شاخص رطوبت (رابطه ۲)، شاخص حمل رسوب (رابطه ۳)، شاخص توان آبراهه (رابطه ۴)، و شاخص وضعیت توپوگرافی از آن استخراج گردید (۹، ۱۲، ۱۳، ۱۵ و ۱۶). لایه‌های اطلاعاتی کاربری اراضی و شاخص گیاهی تفاضلی نرمال‌شده از روی تصاویر ماهواره‌ای فیوژن‌شده (به‌منظور بهبود دقت هندسی تصاویر و جهت تولید تصاویر با قدرت تفکیک مکانی مناسب در باندهای مختلف) IRS-P6 (سنجنده LISS-III) با توان تفکیک ۲۳/۵ متر و IRS-P5 (سنجنده Pan) با توان تفکیک ۲/۵ متر با الگوریتم Ehler ایجاد گردید. نقشه

قاسم، جاده اوشان و فشم، میگون، شمال لواسان و شمال کن اشاره نمود. از نمونه‌های بارز در منطقه شمالی تهران آثار لغزش‌های بزرگی چون گلاب‌دره قابل توجه است. با توجه به تراکم زیاد جمعیت در این نواحی و امکان وقوع زلزله در تهران به‌عنوان یک عامل محرک در وقوع زمین‌لغزش، مطالعه مناطق مستعد این خطر برای مدیریت بهینه و در صورت نیاز دوری از مناطق خطر امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

بنابراین هدف از تحقیق حاضر اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از شاخص انتروپی شانون در شمال شهر تهران است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخش شمالی شهر تهران است که مساحت تقریبی آن ۸۹۹/۵ کیلومترمربع می‌باشد. این منطقه بین عرض‌های $35^{\circ}45'47''$ تا $35^{\circ}59'13''$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $51^{\circ}05'26''$ تا $51^{\circ}50'30''$ شرقی استقرار یافته‌است. ارتفاع بیشینه و کمینه منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب ۱۳۴۹/۵ و ۳۹۵۲/۹ متر می‌باشد (شکل ۱).

روش تحقیق

در ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای GeoEye سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۲ و SPOT-5 سال ۲۰۱۰ و بازدیدهای صحرائی، ۵۲۸ نقطه لغزش شناسایی و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نیز شامل دو برگه (Sheet) ۱:۱۰۰۰۰۰ (برگه‌های تهران و شرق تهران) بوده که از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه، در محیط نرم‌افزار ILWIS رقومی و لایه‌های لیتولوژی و حریم فاصله تا گسل از آن استخراج گردید. لایه‌های مربوط به آبراهه‌ها و جاده‌ها نیز از نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید.

$$SAR = (S/A_S) \quad [1]$$

$$TWI = \ln(A_S / \tan \beta) \quad [2]$$

$$.. \quad [3]$$

$$SPI = A_S \times \tan \beta$$

$$STI = \left(\frac{A_S}{22/13} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^{1/3} \quad [4]$$

که در آن: S: سطح منطقه، A_S : مساحت حوزه آبخیز، β : گرادیان شیب بر حسب درجه و STI بیان‌گر توان حمل آبراهه و یا به عبارتی عامل LS (Length and Slope) مدل AUSLE (Adapted Universal Soil Loss Equation) است که مدل مذکور اصلاح شده معادله جهانی تلفات خاک (Universal Soil Loss Equation) می‌باشد (۹ و ۱۲).

شاخص انتروپی شانون

انتروپی، یکی از رویکردهای مدیریتی است که به منظور برخورد با بی‌نظمی، بی‌ثباتی، اغتشاش و عدم یقین‌های موجود در یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۶). تئوری مذکور اولین بار توسط استفان بولتزمن (اصل دما پویا یا ترمودینامیک) مطرح و نهایتاً توسط شانون (۱۹۴۸) به صورت کمی ارائه شد (۲۰). انتروپی در حقیقت بیان‌گر آن است که چگونه از بین عوامل مؤثر یک هدف، می‌توان مهم‌ترین عوامل را تخمین زد یا به عبارتی متغیرهایی که بیشترین تأثیر را در رخداد یک واقعه دارند برای ما مشخص می‌نماید. از آنجایی که در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، بسته به شرایط منطقه معمولاً فاکتورهای

مختلفی تأثیرگذار بوده و هم‌چنین در تعیین میزان خطر با استفاده از مدل‌های آماری دومتغیره و احتمالاتی نظیر بیزین (Bayesian)، تمامی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش وزن یکسانی دارند لذا چنانچه یکی از عوامل تأثیر بیشتری داشته باشد میزان اثر آن نادیده گرفته می‌شود (۱۸) بنابراین تئوری مذکور می‌تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر بسزایی در شناسایی عوامل مؤثر و میزان تأثیرگذاری آنها داشته باشد (۲۱). به طور کلی به منظور اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری آن با استفاده از روش مذکور از رابطه‌های ۵ تا ۹ استفاده گردید (۴، ۶ و ۱۴).

$$P_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^S P_{ij}} \quad [5]$$

$$H_j = -\sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), j = 1, \dots, n \quad [6]$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j, S_j \text{ -number of classes} \quad [7]$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \quad [8]$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad [9]$$

که در آن: P_{ij} : تراکم لغزش هر طبقه، (P_{ij}) : احتمال تراکم لغزش هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن، H_j و H_{jmax} : مقادیر انتروپی و ماکزیمم انتروپی، I_j ضریب اطلاعات و W_j : وزن نهایی هر عامل. بعد از تعیین وزن نهایی هر عامل و ضرب آن در کلاس‌های عامل مذکور یعنی مقدارهای P_{ij} مربوط به هر عامل و کلاس‌های آن، نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی حساسیت زمین لغزش به دست می‌آید. طبقه‌هایی که حساسیت بیشتری دارند، وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهند.

ارزیابی روش پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش

با توجه به این که برای ارزیابی مدل نمی‌توان از همان لغزش‌هایی استفاده نمود که در پهنه‌بندی استفاده شده‌اند (۱۱)، از بین تعداد ۵۲۸ نقطه لغزشی، ۷۰ درصد نقاط (۳۷۰ لغزش)

برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد از آن (۱۵۸ لغزش) نیز برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت (۱ و ۲). سپس با استفاده از منحنی ROC (Relative Operating Characteristics Curve) (۱۳ و ۱۷) صحت نقشه تهیه‌شده مورد تأیید قرار گرفت. منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست. سطح زیر منحنی ROC، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین‌لغزش) آن است (۳). ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵-۱ متغیر است. همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به‌صورت (۱-۰/۹، عالی؛ ۰/۹-۰/۸، خیلی خوب؛ ۰/۸-۰/۷، خوب؛ ۰/۶-۰/۷، متوسط و ۰/۶-۰/۵، ضعیف) است (۱۴، ۱۷ و ۱۹). هر چه سطح زیرمنحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده‌است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارتباط بین زمین‌لغزش، عوامل مؤثر و میزان اثر هر یک از آنها با استفاده از شاخص انتروپی شانون در جدول ۱ ارائه شده‌است. نتایج بررسی عامل شیب نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در کلاس شیب ۳۰-۱۵ درجه رخ داده‌است. در شیب‌های کم (۵- و ۵-۱۵ درجه) برآیند نیروها به‌صورتی‌است که نیروی مقاوم (عمودی) بیشتر از نیروی محرکه (افقی) بوده و شرایط وقوع زمین‌لغزش فراهم نمی‌شود. در شیب‌های زیاد (بیشتر از ۳۰ درجه) نیز فرآیندهای فرسایشی دیگر غالب بوده و خاک کافی برای وقوع زمین‌لغزش تحت این شرایط وجود ندارد بنابراین مقدار P_{ij} (تراکم زمین‌لغزش) کاهش می‌یابد که با نظرات پورقاسمی و همکاران (۱۳۸۷ و ۱۳۸۸) کاملاً مطابقت دارد (۲ و ۳). بررسی عوامل دیگر نشان داده که بیش‌ترین وزن لغزشی یا مقدار P_{ij} ، به ترتیب مربوط به کلاس‌های جهت شمال‌شرقی، شرق و شمال (۱/۸۹، ۱/۳۲ و ۱/۲۷)، کلاس ارتفاعی ۳۰۰۰-۲۵۰۰ متر (۱/۱۴)، شکل شیب محدب (۱/۰۳)، طبقه ۱/۲۰-۱/۱۰ از عامل نسبت

مساحت سطح (۱/۲۲)، طبقه دامنه از عامل TPI (۱/۲۳)، طبقه ۱۰-۸ از عامل TWI (۱/۲۶)، طبقه ۹۰۰-۶۰۰ از عامل SPI (۱/۴۵)، طبقه ۹۰-۶۰ از عامل STI (۱/۲۱)، لیتولوژی گروه ۷ (۲/۳۶)، کاربری مرتع (۱/۰۹)، طبقه ۰/۱-۰/۰۵ از NDVI (۱/۱۳)، فاصله‌های ۸۰۰-۶۰۰ متری از گسل (۱/۲۴)، ۳۰۰-۲۰۰ متری از رودخانه (۱/۳۶)، ۴۰۰-۳۰۰ متری از جاده (۱/۱۷)، تراکم زهکشی و تراکم جاده کمتر از ۰/۰۰۱۸ و ۰/۵ کیلومتر بر کیلومتر مربع (۱/۲۲ و ۱/۲۴ به ترتیب) است. هم‌چنین نتایج جدول ۲ (W_j) نشان می‌دهد که عوامل کاربری اراضی، لیتولوژی، درجه شیب، شاخص رطوبت، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، جهت شیب، تراکم جاده و تراکم زهکشی به ترتیب بیشترین وزن (۰/۱۳۱، ۰/۱۲۸، ۰/۱۰۱، ۰/۰۹۵، ۰/۰۹۱، ۰/۰۶۵ و ۰/۰۵۵) را به خود اختصاص داده‌اند که با نتایج بدناریک و همکاران، (۴)؛ کنستانتین و همکاران (۶)؛ پورقاسمی و همکاران (۱۴) و شرما و همکاران (۲۱) مبنی بر تأثیرگذاری زیاد عوامل کاربری اراضی، لیتولوژی و درجه شیب بر رخداد زمین‌لغزش کاملاً مطابقت دارد (۴، ۶، ۱۵ و ۲۱). هم‌چنین عوامل شکل شیب (۰/۰۰۶)، شاخص وضعیت توپوگرافی (۰/۰۰۷)، ارتفاع (۰/۰۱۴) و فاصله از گسل (۰/۰۱۴) کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. در رابطه با شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده ذکر این نکته ضروری است که کمینه و بیشینه مقادیر از ۰/۴- تا ۰/۶ متغیر بوده و براساس جدول ۲، به‌طورکلی مناطقی با پوشش گیاهی تنک و پراکنده و خاک لخت، بیشترین احتمال رخداد لغزش و مناطقی با پوشش گیاهی متراکم و جنگلی، کمترین احتمال وقوع زمین‌لغزش را دارند که با نظرات سونگ و همکاران (۲۲) مطابقت دارد.

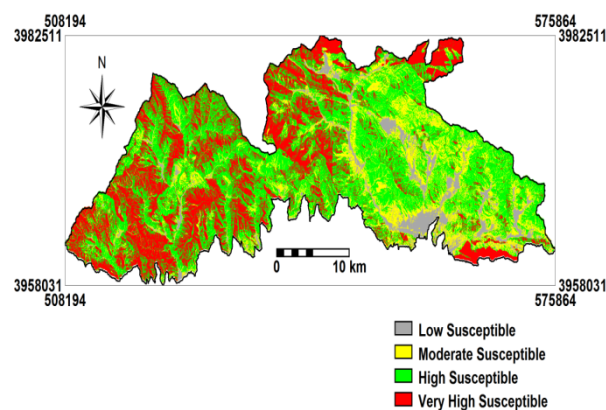
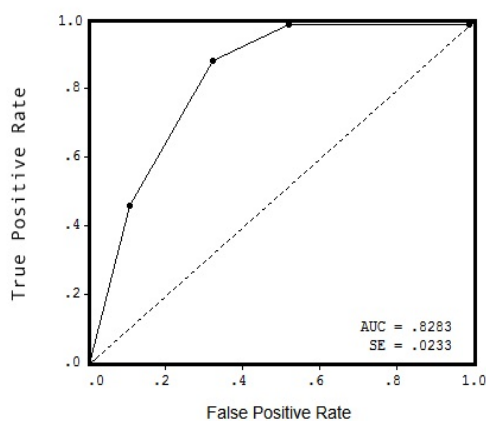
به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش از هفت فاکتور فوق که بیشترین وزن‌ها را داشته‌اند استفاده گردید. بدین‌صورت که بعد از تعیین وزن نهایی هر عامل و ضرب آن در کلاس‌های عامل مذکور، نقشه‌های وزنی با هم جمع‌شده و نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش به‌دست آمد. سپس نقشه مذکور براساس شکستگی‌های طبیعی (۴، ۶، ۱۴، ۱۶ و ۲۳) به

جدول ۱. ارتباط بین زمین لغزش، عوامل مؤثر و تعیین میزان تأثیر آنها با استفاده از شاخص انتروپی شانون

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد لغزش	P_{ij}	(P_{ij})	H_j	H_{jmax}	I_j	W_j
درجه شیب	۰-۵	۲۰۸۰۵۶	۱	۰/۱۲	۰/۰۴				
	۵-۱۵	۸۱۰۰۹۳	۹	۰/۲۷	۰/۰۹				
	۱۵-۳۰	۳۸۲۱۷۰۸	۱۹۴	۱/۲۳	۰/۴۱	۱/۹۳	۲/۳۲	۰/۱۷	۰/۱۰۱
	۳۰-۵۰	۴۰۸۴۹۵۲	۱۶۵	۰/۹۸	۰/۳۳				
	۵۰<	۶۴۶۱۵	۱	۰/۳۸	۰/۱۳				
جهت شیب	هموار (Flat)	۲۳۱۱	۰	۰	۰				
	شمال	۷۴۶۴۱۵	۳۹	۱/۲۷	۰/۱۵				
	شمال شرقی	۹۲۵۷۶۹	۷۲	۱/۸۹	۰/۲۲				
	شرق	۱۱۶۴۳۱۱	۶۳	۱/۳۲	۰/۱۶				
	جنوب شرقی	۱۲۶۱۳۸۱	۴۳	۰/۸۳	۰/۱۰	۲/۹۱	۳/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۷۸
	جنوب	۱۴۱۰۹۱۸	۳۹	۰/۶۷	۰/۰۸				
	جنوب غربی	۱۴۸۸۷۵۷	۴۶	۰/۷۵	۰/۰۹				
	غرب	۱۱۳۹۲۸۱	۳۳	۰/۷۰	۰/۰۸				
	شمال غربی	۸۵۰۲۸۱	۳۵	۱	۰/۱۲				
ارتفاع (متر)	۱۵۰۰>	۲۸۱۶۷	۱	۰/۸۷	۰/۱۶				
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۱۷۹۴۸۴۳	۴۹	۰/۶۶	۰/۱۲				
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۳۷۴۲۷۷۴	۱۶۴	۱/۰۶	۰/۲۰	۲/۵۴	۲/۵۸	۰/۰۲	۰/۰۱۴
	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۲۳۸۶۵۴۴	۱۱۲	۱/۱۴	۰/۲۱				
	۳۰۰۰-۳۵۰۰	۸۷۸۳۸۵	۴۰	۱/۱۱	۰/۲۰				
شکل شیب (100/m)	۳۰۰۰<	۱۵۸۷۱۱	۴	۰/۶۱	۰/۱۱				
	مقعر	۳۷۳۰۹۰۸	۱۵۴	۱/۰۰	۰/۳۵				
	یکنواخت	۷۶۸۱۸۵	۲۵	۰/۷۹	۰/۲۸	۱/۵۸	۱/۵۸	۰/۰۱	۰/۰۰۶
نسبت مساحت سطح (SAR)	محدب	۴۴۹۰۳۳۱	۱۹۱	۱/۰۳	۰/۳۷				
	۱/۱۰>	۲۷۴۳۱۱۵	۸۳	۰/۷۴	۰/۲۵				
	۱/۱۰-۱/۲۰	۳۴۶۷۸۴۴	۱۷۴	۱/۲۲	۰/۴۱	۱/۵۶	۱/۵۸	۰/۰۲	۰/۰۱۸
شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)	۱/۲۰<	۲۷۷۸۴۶۵	۱۱۳	۰/۹۹	۰/۳۴				
	دره های عمیق و گودی ها	۳۹۰۶۷۴۶	۱۶۰	۰/۹۹	۰/۳۱				
	دامنه ها	۱۰۶۶۴۱۹	۵۴	۱/۲۳	۰/۳۹	۱/۵۸	۱/۵۸	۰/۰۱	۰/۰۰۷
شاخص رطوبت (TWI)	برآمدگی ها و خط الراس ها	۴۰۱۶۲۵۹	۱۵۶	۰/۹۴	۰/۳۰				
	۶>	۱۸۰۵۶۸	۴	۰/۵۴	۰/۱۸				
	۶-۸	۵۲۹۷۸۹۶	۲۲۸	۱/۰۵	۰/۳۴	۱/۷۵	۲/۰۰	۰/۱۳	۰/۰۹۵
	۸-۱۰	۲۴۹۹۰۸۰	۱۳۰	۱/۲۶	۰/۴۲				
	۱۰<	۱۰۱۱۸۸۰	۸	۰/۱۹	۰/۰۶				

شاخص توان آبراهه (SPI)	۰-۳۰۰	۲۱۰۸۵۷۳	۵۶	۰/۶۴	۰/۱۰	۲/۵۴	۲/۵۸	۰/۱۷	۰/۱۸
	۳۰۰-۶۰۰	۱۹۸۴۶۰۱	۹۷	۱/۱۹	۰/۱۹	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۶۰۰-۹۰۰	۱۲۸۸۹۱۴	۷۷	۱/۴۵	۰/۲۳	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۹۰۰-۱۲۰۰	۷۹۹۱۷۵	۳۶	۱/۰۹	۰/۱۷	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۱۲۰۰-۱۵۰۰	۵۱۲۷۷۵	۲۴	۱/۱۴	۰/۱۸	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۱۵۰۰<	۲۲۹۵۳۸۶	۸۰	۰/۸۵	۰/۱۳	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
شاخص حمل رسوب (STI)	۳۰>	۱۳۳۲۷۷۷	۲۵	۰/۴۶	۰/۱۰	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۳۰-۶۰	۲۷۸۹۳۴۹	۱۳۴	۱/۱۷	۰/۲۵	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۶۰-۹۰	۲۵۵۲۷۸۳	۱۲۷	۱/۲۱	۰/۲۶	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۹۰-۱۲۰	۱۱۴۷۷۹۳	۴۹	۱/۰۴	۰/۲۳	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
	۱۲۰<	۱۱۶۶۷۲۲	۳۵	۰/۷۳	۰/۱۶	۲/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۳۰
لیتولوژی	گروه ۱	۹۱۹۶۸۷	۲۲	۰/۵۸	۰/۰۸	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
	گروه ۲	۱۵۹۴۵	۰	۰	۰	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
	گروه ۳	۱۵۹۷۰۷۷	۸۷	۱/۳۲	۰/۱۸	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
	گروه ۴	۲۴۷۴۷۳۸	۶۶	۰/۶۵	۰/۰۹	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
	گروه ۵	۳۰۵۵۵۳۰	۱۵۰	۱/۱۹	۰/۱۶	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
	گروه ۶	۴۲۶۸۴۴	۷	۰/۴۰	۰/۰۵	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
	گروه ۷	۳۰۸۶۰۷	۳۰	۲/۳۶	۰/۳۱	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
	گروه ۸	۱۹۰۹۹۶	۸	۱/۰۲	۰/۱۴	۲/۵۹	۳	۰/۱۴	۰/۱۲۸
کاربری اراضی	کشاورزی	۱۲۶۷۳	۰	۰	۰	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	بیرونزدگی	۹۶۴۳	۰	۰	۰	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	سنگی	۲۰۷۲۵۴	۴	۰/۴۷	۰/۲۹	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	جنگل	۵۴۰۱۷۹	۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	باغ	۸۱۳۷۴۱۰	۳۶۵	۱/۰۹	۰/۶۸	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	مرتع	۴۹۲۰۶	۰	۰	۰	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	مسکونی	۱۷۶۶۶	۰	۰	۰	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	بوته‌ای ها	۱۵۳۹۳	۰	۰	۰	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
	پهنه‌های آبی	۱۵۳۹۳	۰	۰	۰	۱/۰۴	۳	۰/۶۵	۰/۱۳۱
NDVI	< -۰/۰۰۱	۵۱۰۴۰۴۴	۲۳۴	۱/۱۱	۰/۲۵	۲/۲۷	۲/۵۸	۰/۱۲	۰/۰۹۱
	-۰/۰۰۱-۰/۰	۳۸۹۱۵۷	۱۲	۰/۷۵	۰/۱۷	۲/۲۷	۲/۵۸	۰/۱۲	۰/۰۹۱
	۰/۰-۰/۰۵	۱۵۷۹۱۱۳	۶۲	۰/۹۵	۰/۲۱	۲/۲۷	۲/۵۸	۰/۱۲	۰/۰۹۱
	۰/۰۵-۰/۱	۸۳۵۵۶۳	۳۹	۱/۱۳	۰/۲۵	۲/۲۷	۲/۵۸	۰/۱۲	۰/۰۹۱
	۰/۱-۰/۵	۱۰۶۰۲۶۵	۲۳	۰/۵۳	۰/۱۲	۲/۲۷	۲/۵۸	۰/۱۲	۰/۰۹۱
	۰/۵<	۲۱۲۸۲	۰	۰	۰	۲/۲۷	۲/۵۸	۰/۱۲	۰/۰۹۱
فاصله از گسل (متر)	۲۰۰>	۱۰۵۳۴۰۳	۳۳	۰/۷۶	۰/۱۶	۲/۲۹	۲/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۱۴
	۲۰۰-۴۰۰	۹۸۱۲۵۱	۳۶	۰/۸۹	۰/۱۹	۲/۲۹	۲/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۱۴
	۴۰۰-۶۰۰	۸۷۷۰۲۷	۲۵	۰/۶۹	۰/۱۵	۲/۲۹	۲/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۱۴
	۶۰۰-۸۰۰	۷۸۵۶۷۰	۴۰	۱/۲۴	۰/۲۷	۲/۲۹	۲/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۱۴

				۰/۲۳	۱/۰۸	۲۳۶	۵۲۸۵۰۷۳	۸۰۰<	
				۰/۱۴	۰/۷۹	۱۱۶	۳۵۸۷۹۹۳	۱۰۰>	
				۰/۲۱	۱/۱۳	۱۲۱	۲۶۱۲۱۰۱	۱۰۰-۲۰۰	
				۰/۲۵	۱/۳۶	۹۱	۱۶۲۳۵۶۲	۲۰۰-۳۰۰	فاصله از
۰/۰۳۴	۰/۰۴	۲/۵۸	۲/۴۹	۰/۱۶	۰/۸۹	۳۰	۸۱۹۴۴۱	۳۰۰-۴۰۰	رودخانه (متر)
				۰/۱۸	۰/۹۷	۱۱	۲۷۶۲۶۷	۴۰۰-۵۰۰	
				۰/۰۶	۰/۳۵	۱	۷۰۰۶۰	۵۰۰<	
				۰/۰۹	۰/۳۹	۱۷	۱۰۶۶۷۷۷	۱۰۰>	
				۰/۱۵	۰/۶۸	۲۳	۸۲۶۹۷۹	۱۰۰-۲۰۰	فاصله از جاده
۰/۰۳۷	۰/۰۴	۲/۳۲	۲/۲۳	۰/۲۴	۱/۰۶	۳۰	۶۸۹۶۶۴	۲۰۰-۳۰۰	(متر)
				۰/۲۶	۱/۱۷	۳۰	۶۲۲۰۹۱	۳۰۰-۴۰۰	
				۰/۲۶	۱/۱۳	۲۷۰	۵۷۸۳۹۱۳	۴۰۰<	
				۰/۴۴	۱/۲۲	۱۶۶	۳۲۹۶۹۰۴	۰/۰۰۱۸>	
۰/۰۵۰	۰/۰۵	۱/۵۸	۱/۵۰	۰/۳۷	۱/۰۳	۱۶۸	۳۹۵۴۲۱۰	-۰/۰۰۲۷	تراکم زهکشی
				۰/۱۸	۰/۵۰	۳۶	۱۷۳۸۳۱۰	۰/۰۰۲۷<	
				۰/۴۹	۱/۲۴	۲۵۱	۴۸۹۵۴۱	۰/۵>	
۰/۰۶۵	۰/۰۸	۱/۵۸	۱/۴۶	۰/۳۴	۰/۸۷	۹۴	۲۶۳۵۴۳۴	۰/۵-۱/۵۰	تراکم جاده
				۰/۱۷	۰/۴۲	۲۵	۱۴۵۴۴۴۹	۱/۵۰<	



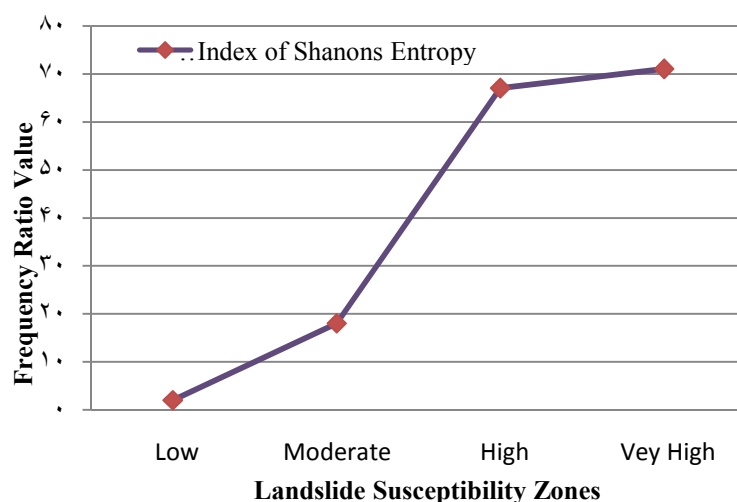
شکل ۳. منحنی ROC و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

شکل ۲. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل انترپوی شانون

مورد مطالعه در طبقه خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است.

همان‌طور که بیان شد برای ارزیابی مدل از منحنی ROC

چهار کلاس خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی گردید. نتایج پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در شکل ۲ نشان داده که به‌ترتیب ۶/۲۷، ۱۸/۷۰، ۴۵/۹۸ و ۲۹/۰۶ درصد از منطقه



شکل ۴. نمودار نسبت فراوانی کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش

خیلی خطرناک قرار گرفته‌است که با نتایج بوی و همکاران (۵)؛ پورقاسمی و همکاران (۱۴، ۱۵ و ۱۶) و پرادهان و لی (۱۷) کاملاً مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، پیش‌زمینه‌ای در شناخت عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، رخداد آن، مدیریت خطر و روش‌های پیشگیری از خطر و ریسک است. هدف از تحقیق حاضر اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن در شمال شهر تهران با استفاده از شاخص انتروپی شانون است. پس از تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها، لایه‌های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طبقه ارتفاعی، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، تراکم جاده، شاخص حمل رسوب، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت، شاخص گیاهی نرمال‌شده، نسبت مساحت سطح و شاخص وضعیت توپوگرافی به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه انتخاب گردیدند. اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از شاخص انتروپی شانون نشان داد که لایه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی، درجه شیب،

استفاده شد. این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند (۲۳).

براساس نتایج منحنی RO، مقدار سطح زیر منحنی منطقه مورد مطالعه (۰/۸۲۸۳) یا ۸۲/۸۳٪ با انحراف استاندارد ۰/۰۲۳۳ برآورد گردیده‌است. شکل ۳ نشان‌دهنده ارزیابی خیلی خوب مدل انتروپی شانون در شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن است. نتایج تحقیق حاضر با مطالعه بدناریک و همکاران (۴)؛ پورقاسمی و همکاران (۱۴) و دوکوتا و همکاران (۷) مبنی بر دقت بالای مدل انتروپی به‌ترتیب در مقایسه با مدل‌های دومتغیره، احتمالاتی (بیزین یا وزن واقعه) و رگرسیون لجستیک و مدل دومتغیره فاکتور اطمینان کاملاً مطابقت دارد (۴، ۱۴ و ۸).

هم‌چنین یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل و تأیید توانایی و صحت آن، استفاده از نمودار نسبت فراوانی است. به‌طور تئوری، مقادیر نسبت فراوانی می‌بایست از کلاس خطر کم تا زیاد افزایش پیدا کند (۵ و ۱۷). نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که فرضیه مذکور نیز ثابت گردیده و مقادیر به‌طور تدریجی افزایش پیدا کرده‌است. به‌طوری که ۸۷/۳۴ درصد از لغزش‌ها (نقاط لغزشی مورد استفاده در ارزیابی مدل) در دو طبقه خطرناک و

سیاسگزاری

تحقیق حاضر بخشی از رساله دکتری نویسنده اول در دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی (گروه علوم و مهندسی آبخیزداری) بوده و تحت حمایت‌های مالی آن دانشگاه اجراء گردیده است. هم‌چنین تصاویر ماهواره‌ای IRS استفاده‌شده در تحقیق حاضر، از سازمان جغرافیایی ارتش (<http://www.ngo-iran.ir/ngo.htm>) تهیه و در اختیار قرار گرفته‌است. بدین‌وسیله از زحمات و همکاری‌های ارزنده آن سازمان قدردانی می‌گردد.

شاخص توان آبراهه، و NDVI بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین‌لغزش منطقه و عوامل وضعیت توپوگرافی (شکل اراضی) و شکل شیب کمترین تأثیر را داشته‌اند. هم‌چنین پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با مدل انتروپی و ارزیابی دقت آن با استفاده از منحنی ROC و ۳۰ درصد نقاط لغزشی بیان‌گر دقت خیلی‌خوب مدل (۸۲/۸۳ درصد) برای منطقه مورد مطالعه است. بنابراین به‌عنوان پیشنهاد می‌توان گفت که نقشه مذکور می‌تواند نقشه به‌سزایی در تصمیم‌گیری‌های آتی، مدیریت دامنه‌های خطرناک و آمایش سرزمین در منطقه مورد مطالعه داشته باشد.

منابع مورد استفاده

۱. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی، م. محمدی، م. و ر. مهدویفر. ۱۳۸۷. تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین‌لغزش و ارزیابی آن با استفاده از اپراتورهای فازی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان. ۱۲ (۴۶ الف): ۳۷۵-۳۹۰.
۲. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی، س. م. فاطمی‌عقدا، م. ر. مهدوی‌فر، و م. محمدی. ۱۳۸۸. ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۳ (۸): ۶۳-۵۱.
۳. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی، و م. محمدی. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۱ (۳): ۶۹-۷۹.
4. Bednarik, M., B. Magulova, M. Matys and M. Marschalko. 2010. Landslide susceptibility assessment of the Kralovany-Liptovsky Mikulaš railway case study. *Phys. Chem. Earth* 35: 162-171.
5. Bui, D.T., B. Pradhan, O. Lofman, I. Revhaug and O.B. Dick. 2011. Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS. *Comput. & Geosci.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.031>.
6. 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.* 63: 397-406.
7. Devkota, K.C., A.D. Regmi, H.R. Pourghasemi, K. Yoshida, B. Pradhan, I.C. Ryu, M.R. Dhital, O.F. Althuwaynee. 2013. 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. *Nat. Hazards* 65: 135-165.
8. Goetz, J.N., R.H. Guthrie and A. Brenning. 2011. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology* 129: 367-386.
9. Jenness, J. 2002. Surface Areas and Ratios from Elevation Grid, Jenness Enterprises, http://www.jennessent.com/arcview/surface_areas.htm (connected: 10.08.2003).
10. Koehorst, B. A. N., O. Kjekstad, D. Patel, Z. Lubkowski, J. G. Knoeff and G. J. Akkerman. 2005. Work package 6, Determination of Socio-Economic Impact of Natural Disasters, Assessing socio-economic Impact in Europe. 173 p.
11. Komac, M.A. 2006. Landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Sloveni. *Geomorphology* 74: 17-28.
12. Moore, I.D., P.E. Gessler, G.A. Neslesn and G.A. Peterson. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Society American J.* 57(2): 443-452.
13. Nefeslioglu, H.A., T.Y. Duman and S. Durmaz. 2008, Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey), *Geomorphology* 94: 401-418.

14. Pourghasemi, H. R., M. Mohammady, and B. Pradhan. 2012a. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran, Catena 97: 71–84.
15. Pourghasemi H.R, B., Pradhan and C. Gokceoglu. 2012b. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. Nat. Hazard. doi:[10.1007/s11069-012-0217-2](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2).
16. Pourghasemi H.R., B., Pradhan, C., Gokceoglu and K. Deylami Moezzi. 2012c. A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster-Shafer and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS. Geomatics, Nat. Hazards & Risk. doi:[10.1080/19475705.2012.662915](https://doi.org/10.1080/19475705.2012.662915).
17. Pradhan, B. and S. Lee. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling. Environ. Model. Softw. 25 (6): 747–759.
18. Ramakrishna, D., M.K., Ghose, R., Vinu Chandra and A. Jeyaram. 2005. Probabilistic techniques, GIS and remote sensing in landslide hazard mitigation: a case study from Sikkim Himalayas, India. Geocartography Int. 20 (4): 53–58.
19. Regmi, N. R., J. R. Giardino and J. D. Vitek. 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA, Geomorphology 115: 172–187.
20. Shannon, C.E. 1948. A mathematical theory of communication. Bulletin System Technol. J. 27: 379–423.
21. Sharma, L.P., N. Patel, M. K. Ghose and P. Debnath. 2010. Influence of Shannon's entropy on landslide-causing parameters for vulnerability study and zonation-a case study in Sikkim, India. Arab. J. Geosci. 5 (3): 421–431.
22. Song, K.Y., J., Oh, J., Choi, I., Park, C., Lee and S. Lee. 2012. Prediction of landslides using ASTER imagery and data mining models. Adv. Space Res. 49:978–993
23. Swets, J.A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Sci. 240: 1285–1293.
24. Wan, S. 2009. A spatial decision support system for extracting the core factors and thresholds for landslide susceptibility map. Eng. Geo. 108: 237–251
25. Xu, C., F., Dai, X., Xu and Y.H. Lee. 2012. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China. Geomorphology. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.040>.
26. Yufeng, S. and J. Fengxiant. 2009. Landslide Stability Analysis Based on Generalized Information Entropy, International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. 83–85. DOI 10.1109/ESIAT.2009.258.