

## اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن

### با استفاده از شاخص اتروپی شانون

حمیدرضا پورقاسمی<sup>۱</sup>، حمیدرضا مرادی<sup>۱\*</sup>، سید محمود فاطمی عقدا<sup>۲</sup>

(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 اتروپی شانون است. به این منظور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای GeoEye سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۲ و SPOT-5 سال ۲۰۱۰ و بازدیدهای 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) به‌عنوان 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 اتروپی 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 اتروپی 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

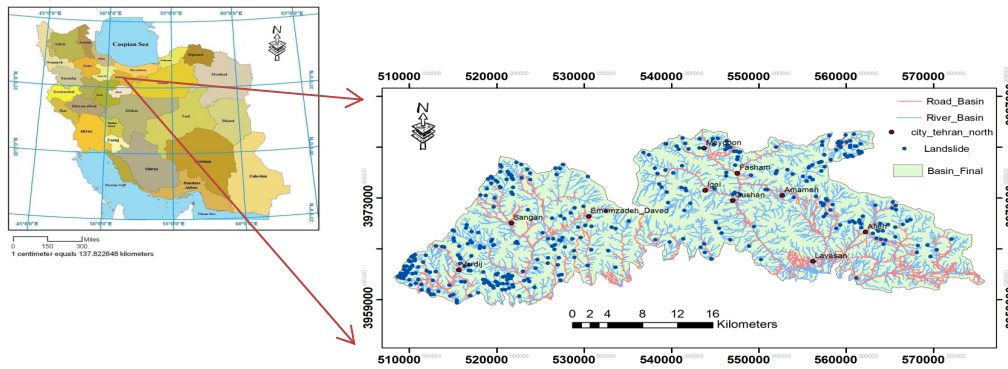
\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hrmoradi@modares.ac.ir

## مقدمه

زمین لغزش یکی از مهم‌ترین خطرات و بلایای طبیعی است که هر ساله منجر به خسارات مالی و جانی فراوانی در سراسر جهان می‌گردد. طبق مطالعات انجام‌شده، زمین لغزش به تنهایی ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را به‌خود اختصاص داده (۱۰) و روند مذکور هم‌چنان به‌خاطر افزایش شهرنشینی بدون برنامه‌ریزی شده، جنگل‌زدایی، 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 به‌نظر می‌رسد. انترپوی به معنای کمیتی از بی‌نظمی بین علل، نتایج یا تصمیم‌گیری‌ها در موضوعات مختلف می‌باشد و به‌ویژه در مطالعات ژئومورفولوژی نظیر زمین لغزش که داده‌های موجود با عدم قطعیت‌ها روبرو هستند می‌تواند کارایی بالایی داشته باشد (۲۴). از این‌رو 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 آسیب‌پذیری 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) به‌منظور ارزیابی حساسیت زمین لغزش شهرستان‌های 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 ویژگی‌های چشم‌انداز به‌عنوان عوامل مؤثر انتخاب و با استفاده از انترپوی وزن‌دهی گردیدند. نتایج نشان داد که لیتولوژی، ویژگی‌های چشم‌انداز، ارتفاع، درجه شیب و جهت شیب به‌ترتیب بیشترین وزن را به‌خود اختصاص داده و سپس نقشه حساسیت زمین لغزش برای منطقه مورد مطالعه

تهیه گردید. نتایج ارزیابی با استفاده از منحنی ROC بیان‌گر 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. لایه‌های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، لیتولوژی و کاربری اراضی به‌عنوان عوامل مؤثر انتخاب و با استفاده از شاخص انترپوی وزن‌دهی گردیدند. نتایج نشان داد که کاربری اراضی و لیتولوژی با وزن‌های ۰/۰۰۷۳ و ۰/۰۰۶۸ 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) تقسیم‌بندی گردید. پورقاسمی و همکاران (۱۴) به‌منظور تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش حوزه آبخیز صفاورد رامسر از مدل‌های 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 به‌عنوان عوامل مؤثر شناسایی و با استفاده از شاخص انترپوی وزن‌دهی گردیدند. نتایج وزن‌دهی بیان‌گر آن بود که فاکتورهای ارتفاع و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش منطقه داشته‌اند. هم‌چنین نتایج ارزیابی مدل‌ها حاکی از دقت بالاتر تئوری انترپوی (۰/۸۶/۰۸) نسبت به تئوری احتمالاتی (۰/۸۲/۷۵) است.

با توجه به شرایط آب و هوایی، زمین‌شناسی، ساخت و ساز در شیب‌های تند و سایر شرایط مستعدکننده ناپایداری دامنه، در بخش‌های شمالی تهران بحث زمین لغزش به مشکلی حاد تبدیل شده‌است. بیشترین مشکل در اطراف رودخانه‌هاست که ساخت و سازهای نامناسب بر میزان خطرپذیری این مناطق افزوده‌است. ناحیه ولنجک در شمال غرب تهران به‌دلیل قرارگرفتن در مسیر گسل شمال تهران و در حاشیه رودخانه ولنجک از مناطق حساس در این زمینه است. از دیگر مناطق مستعد زمین لغزش می‌توان به ازگل، دارآباد، شمال سعادت‌آباد، 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 رقوم می‌گردند. به‌این‌منظور با استفاده از نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه مدل رقوم ارتفاعی (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 کیلومتر مربع 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

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 زمین‌لغزش وزن یکسانی دارند لذا چنان‌چه یکی از عوامل تأثیر بیشتری داشته باشد میزان اثر آن نادیده گرفته می‌شود (۱۸) بنابراین تئوری مذکور می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر بسزایی در شناسایی عوامل مؤثر و میزان تأثیرگذاری آنها داشته باشد (۲۱). به‌طور کلی به‌منظور اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری آن با استفاده از روش مذکور از رابطه‌های ۵ تا ۹ استفاده گردید (۴، ۶ و ۱۴).

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

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

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

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

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

که در آن:  $P_{ij}$ : تراکم لغزش هر طبقه،  $(P_{ij})$ : احتمال تراکم لغزش هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن،  $H_j$  و  $H_{j_{\max}}$ : 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 جمع‌شده و نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش به‌دست می‌آید. طبقه‌هایی که حساسیت بیشتری دارند، وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهند.

#### ارزیابی روش پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش

با توجه به این‌که 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)

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.

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

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

$$\dots \quad [3]$$

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

$$STI = \left( \frac{A_S}{22/13} \right)^{0/6} \cdot \left( \frac{\sin \beta}{0/0896} \right)^{1/3} \quad [4]$$

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

#### شاخص انتروپی شانون

انتروپی، یکی از رویکردهای مدیریتی است که به‌منظور 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) به‌صورت 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 به‌عبارتی متغیرهایی که بیشترین تأثیر را در رخداد یک واقعه دارند برای ما مشخص می‌نماید. از آنجایی‌که در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، بسته به شرایط منطقه معمولاً فاکتورهای

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 ۰/۰۱۸ 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 ۰/۰۵۰) 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. بدین صورت که بعد از تعیین وزن نهایی هر عامل و ضرب آن در کلاس‌های عامل مذکور، نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش به‌دست آمد. سپس نقشه مذکور براساس شکستگی‌های طبیعی (۴، ۶، ۱۴، ۱۶ و ۲۳) به

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 رخداد (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 شده است.

## نتایج و بحث

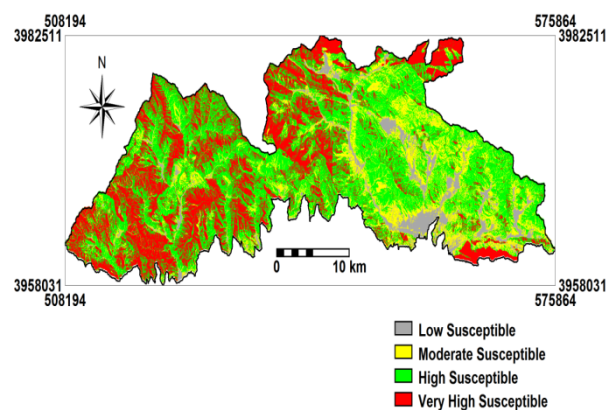
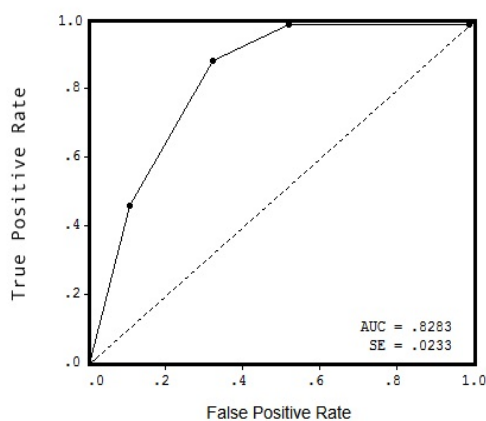
نتایج حاصل از ارتباط بین زمین‌لغزش، عوامل مؤثر و میزان اثر هر یک از آنها با استفاده از شاخص انتروپی شانون در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج بررسی عامل شیب نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در کلاس شیب ۳۰-۱۵ درجه رخ داده است. در شیب‌های کم (۵- و ۱۵-۵ درجه) برآیند نیروها به‌صورتی است که نیروی مقاوم (عمودی) 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

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	۱/۹۳	۲/۳۲	۰/۱۷	۰/۱۰۱
	۵-۱۵	۸۱۰۰۹۳	۹	۰/۲۷	۰/۰۹				
	۱۵-۳۰	۳۸۲۱۷۰۸	۱۹۴	۱/۲۳	۰/۴۱				
	۳۰-۵۰	۴۰۸۴۹۵۲	۱۶۵	۰/۹۸	۰/۳۳				
جهت شیب	۵۰<	۶۴۶۱۵	۱	۰/۳۸	۰/۱۳	۲/۹۱	۳/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۷۸
	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				
	جنوب	۱۴۱۰۹۱۸	۳۹	۰/۶۷	۰/۰۸				
	جنوب غربی	۱۴۸۸۷۵۷	۴۶	۰/۷۵	۰/۰۹				
ارتفاع (متر)	غرب	۱۱۳۹۲۸۱	۳۳	۰/۷۰	۰/۰۸	۲/۵۴	۲/۵۸	۰/۰۲	۰/۰۱۴
	شمال غربی	۸۵۰۲۸۱	۳۵	۱	۰/۱۲				
	۱۵۰۰>	۲۸۱۶۷	۱	۰/۸۷	۰/۱۶				
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۱۷۹۴۸۴۳	۴۹	۰/۶۶	۰/۱۲				
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۳۷۴۲۷۷۴	۱۶۴	۱/۰۶	۰/۲۰				
شکل شیب (100/m)	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۲۳۸۶۵۴۴	۱۱۲	۱/۱۴	۰/۲۱	۱/۵۸	۱/۵۸	۰/۰۱	۰/۰۰۶
	۳۰۰۰-۳۵۰۰	۸۷۸۳۸۵	۴۰	۱/۱۱	۰/۲۰				
نسبت مساحت سطح (SAR)	۳۰۰۰<	۱۵۸۱۷۱۱	۴	۰/۶۱	۰/۱۱	۱/۵۶	۱/۵۸	۰/۰۲	۰/۰۱۸
	۱۵۰۰>	۲۷۴۳۱۱۵	۸۳	۰/۷۴	۰/۲۵				
شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)	مقعر	۳۷۳۰۹۰۸	۱۵۴	۱/۰۰	۰/۳۵	۱/۵۸	۱/۵۸	۰/۰۱	۰/۰۰۷
	یکنواخت	۷۶۸۱۸۵	۲۵	۰/۷۹	۰/۲۸				
شاخص رطوبت (TWI)	محدب	۴۴۹۰۳۳۱	۱۹۱	۱/۰۳	۰/۳۷	۱/۷۵	۲/۰۰	۰/۱۳	۰/۰۹۵
	دره های عمیق و گودی ها	۳۹۰۶۷۴۶	۱۶۰	۰/۹۹	۰/۳۱				
	دامنه ها	۱۰۶۶۴۱۹	۵۴	۱/۲۳	۰/۳۹				
برآمدگی ها و خط الراس ها	برآمدگی ها و خط الراس ها	۴۰۱۶۲۵۹	۱۵۶	۰/۹۴	۰/۳۰	۱/۷۵	۲/۰۰	۰/۱۳	۰/۰۹۵
	۶>	۱۸۰۵۶۸	۴	۰/۵۴	۰/۱۸				
	۶-۸	۵۲۹۷۸۹۶	۲۲۸	۱/۰۵	۰/۳۴				
۸-۱۰	۲۴۹۹۰۸۰	۱۳۰	۱/۲۶	۰/۴۲	۱/۷۵	۲/۰۰	۰/۱۳	۰/۰۹۵	
	۱۰<	۱۰۱۱۸۸۰	۸	۰/۱۹					۰/۰۶

۰/۰۱۸	۰/۱۷	۲/۵۸	۲/۵۴	۰/۱۰	۰/۶۴	۵۶	۲۱۰۸۵۷۳	۰-۳۰۰	شاخص توان آبراهه (SPI)
				۰/۱۹	۱/۱۹	۹۷	۱۹۸۴۶۰۱	۳۰۰-۶۰۰	
				۰/۲۳	۱/۴۵	۷۷	۱۲۸۸۹۱۴	۶۰۰-۹۰۰	
				۰/۱۷	۱/۰۹	۳۶	۷۹۹۱۷۵	۹۰۰-۱۲۰۰	
				۰/۱۸	۱/۱۴	۲۴	۵۱۲۷۷۵	۱۲۰۰-۱۵۰۰	
				۰/۱۳	۰/۸۵	۸۰	۲۲۹۵۳۸۶	۱۵۰۰<	
۰/۰۳۰	۰/۰۳	۲/۳۲	۲/۲۵	۰/۱۰	۰/۴۶	۲۵	۱۳۳۲۷۷۷	۳۰>	شاخص حمل رسوب (STI)
				۰/۲۵	۱/۱۷	۱۳۴	۲۷۸۹۳۴۹	۳۰-۶۰	
				۰/۲۶	۱/۲۱	۱۲۷	۲۵۵۲۷۸۳	۶۰-۹۰	
				۰/۲۳	۱/۰۴	۴۹	۱۱۴۷۷۹۳	۹۰-۱۲۰	
				۰/۱۶	۰/۷۳	۳۵	۱۱۶۶۷۲۲	۱۲۰<	
۰/۱۲۸	۰/۱۴	۳	۲/۵۹	۰/۰۸	۰/۵۸	۲۲	۹۱۹۶۸۷	گروه ۱	لیتولوژی
				۰	۰	۰	۱۵۹۴۵	گروه ۲	
				۰/۱۸	۱/۳۲	۸۷	۱۵۹۷۰۷۷	گروه ۳	
				۰/۰۹	۰/۶۵	۶۶	۲۴۷۴۷۳۸	گروه ۴	
				۰/۱۶	۱/۱۹	۱۵۰	۳۰۵۵۵۳۰	گروه ۵	
				۰/۰۵	۰/۴۰	۷	۴۲۶۸۴۴	گروه ۶	
				۰/۳۱	۲/۳۶	۳۰	۳۰۸۶۰۷	گروه ۷	
				۰/۱۴	۱/۰۲	۸	۱۹۰۹۹۶	گروه ۸	
								۰	
							۹۶۴۳	بیرونزدگی سنگی	
۰/۱۳۱	۰/۶۵	۳	۱/۰۴	۰/۲۹	۰/۴۷	۴	۲۰۷۲۵۴	جنگل	کاربری اراضی
				۰/۰۳	۰/۰۴	۱	۵۴۰۱۷۹	باغ	
				۰/۶۸	۱/۰۹	۳۶۵	۸۱۳۷۴۱۰	مرتع	
				۰	۰	۰	۴۹۲۰۶	مسکونی	
				۰	۰	۰	۱۷۶۶۶	بوته‌ای ها	
				۰	۰	۰	۱۵۳۹۳	پهنه‌های آبی	
								۰/۲۵	
۰/۰۹۱	۰/۱۲	۲/۵۸	۲/۲۷	۰/۱۷	۰/۷۵	۱۲	۳۸۹۱۵۷	-۰/۰۰۱-۰/۰	NDVI
				۰/۲۱	۰/۹۵	۶۲	۱۵۷۹۱۱۳	۰/۰-۰/۰۵	
				۰/۲۵	۱/۱۳	۳۹	۸۳۵۵۶۳	۰/۰۵-۰/۱	
				۰/۱۲	۰/۵۳	۲۳	۱۰۶۰۲۶۵	۰/۱-۰/۵	
				۰	۰	۰	۲۱۲۸۲	۰/۵<	
۰/۰۱۴	۰/۰۱	۲/۳۲	۲/۲۹	۰/۱۶	۰/۷۶	۳۳	۱۰۵۳۴۰۳	۲۰۰>	فاصله از گسل (متر)
				۰/۱۹	۰/۸۹	۳۶	۹۸۸۲۵۱	۲۰۰-۴۰۰	
				۰/۱۵	۰/۶۹	۲۵	۸۷۷۰۲۷	۴۰۰-۶۰۰	
				۰/۲۷	۱/۲۴	۴۰	۷۸۵۶۷۰	۶۰۰-۸۰۰	

				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	۴۸۹۹۵۴۱	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<	



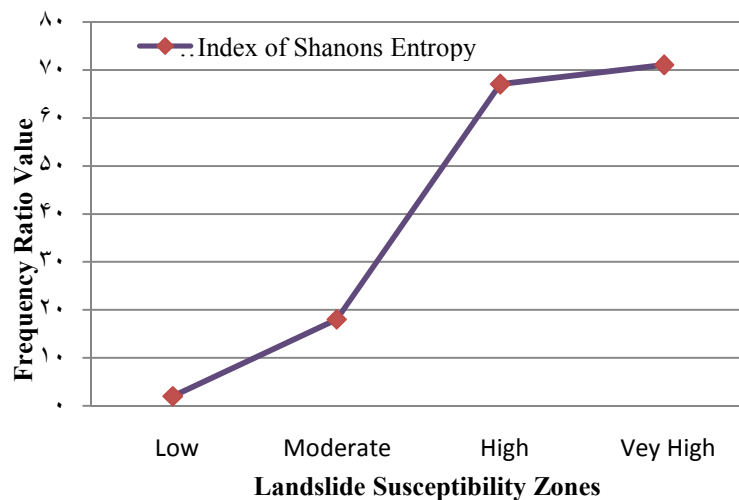
شکل ۳. منحنی ROC و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

شکل ۲. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش 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 زمین لغزش در شکل ۲ نشان داده که به ترتیب 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 ۰/۲۳۳۳ 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 خیلی خوب 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): ۳۹۰-۳۷۵.
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): ۷۹-۶۹.
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](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.
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.
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.