

## روشی جدید بر مبنای ترکیب روش‌های آماری برای افزایش دقت نقشه‌های حساسیت به مخاطرات زمین‌لغزش (مطالعه موردی: استان مازندران)

سید محمدرضا اطمینانی  
دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و  
فناوری پیشرفته، کرمان، ایران  
سعید نیازمردی\*  
استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته،  
کرمان، ایران  
رحیم علی عباسپور  
دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه  
تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۳)

### چکیده

زمین‌لغزش یکی از خطرهای طبیعی است که در سراسر جهان رخ می‌دهد و هر ساله سبب خسارت جانی و مالی زیادی می‌شود. کنترل و مدیریت زمین‌لغزش نقش مؤثری در کاهش خسارات آن دارد. اولین مرحله در مدیریت خطر زمین‌لغزش، شناسایی مناطق مستعد به زمین‌لغزش است که روش‌های متفاوتی برای آن ارائه شده است. ارزیابی این روش‌ها در حوزه‌های مختلف می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران قرار بدهد. در تحقیق حاضر، نقشه حساسیت به زمین‌لغزش برای استان مازندران با استفاده از روش‌های شاخص آماری و فاکتور اطمینان تولید شده است. همچنین به منظور افزایش دقت، روش‌های جدیدی با ترکیب روش شاخص آنتروپی با هر یک از روش‌های شاخص آماری و ضریب اطمینان ارائه شده‌اند. برای ارزیابی و مقایسه روش‌ها از اطلاعات ۵۸۵ زمین‌لغزش استفاده شده که در دوره‌های پنجاه‌ساله در استان مازندران رخ داده‌اند. پانزده عامل به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر رخداد زمین‌لغزش در نظر گرفته شده‌اند که خود به چهار دسته عوامل توپوگرافی، هیدرولوژی، محیطی و انسان‌ساخت و زمین‌شناسی تقسیم شده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان دادند که از بین این عوامل، عوامل دسته توپوگرافی بیشترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش دارند. علاوه بر این، مقایسه دقت نقشه‌های حساسیت به لغزش تولیدشده با استفاده از روش‌های ترکیبی، با دقت حاصل از روش‌های شاخص آماری و ضریب اطمینان افزایشی برابر ۳ و ۳/۵ درصد بر اساس شاخص سطح زیر منحنی نشان دادند.

**واژه‌های کلیدی:** استان مازندران، روش‌های آماری، سطح زیر منحنی، عوامل مؤثر در زمین‌لغزش، نقشه حساسیت به زمین‌لغزش.

## مقدمه

زمین لغزش از مهم‌ترین مخاطرات زیست‌محیطی و تهدیدی مهم برای امنیت جان و مال انسان‌ها و همچنین محیط‌زیست در سراسر جهان محسوب می‌شود [۱۲،۷]، چراکه دو ویژگی مهم همه مخاطرات طبیعی یعنی غیرمنتظره بودن و آسیب‌زا بودن را داراست [۱]. همچون دیگر نقاط جهان، در ایران نیز زمین‌لغزش از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است. استان‌های شمالی ایران و به‌ویژه نوار ساحلی دریای خزر به‌دلیل شرایط اقلیمی خاص بیشتر از دیگر مناطق در معرض این خطر قرار دارند [۱۹].

برای مدیریت و کاهش خطرات زمین‌لغزش، باید ابتدا احتمال رخداد آن در مناطق مختلف و در قالب نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش تعیین و سپس با پردازش این نقشه‌ها، برای هر منطقه تصمیمات مناسبی اتخاذ شود [۱۰،۶،۵]. در واقع نقشه حساسیت به زمین‌لغزش مهم‌ترین داده ورودی برای برنامه‌ریزی مکانی و مدیریت خطر زمین‌لغزش است. نظر به اهمیت این نقشه، در دهه اخیر روش‌های مختلفی برای تهیه آن ارائه شده است. این روش‌ها، با بررسی ویژگی‌های نواحی از منطقه که در آنها زمین‌لغزش رخ داده است، سعی در یافتن ارتباطی بین مقادیر این ویژگی‌ها و احتمال رخداد زمین‌لغزش دارند. پس از تعیین این ارتباط، می‌توان میزان حساسیت مناطق مختلف را با بررسی ویژگی‌های آنها تعیین کرد. تفاوت اصلی تحقیقات در زمینه تهیه نقشه حساسیت به زمین‌لغزش، روش برای مدل‌سازی ارتباط بین ویژگی‌های نواحی و احتمال رخداد زمین‌لغزش است. در طول سال‌ها روش‌های متنوعی برای تعیین این ارتباط استفاده شده است که می‌توان آنها را در دو دسته روش‌های آماری [۲،۱۳،۳۲] و روش‌های برپایه یادگیری ماشین طبقه‌بندی کرد [۲۷، ۲۹]. از روش‌های ترکیبی (ترکیب روش‌های دو دسته یا روش‌های مختلف یک دسته) نیز با موفقیت در تحقیقات دیگر استفاده شده است [۳۰، ۲۲]. مزیت اصلی روش‌های آماری، توانایی آنها در ترکیب لایه‌های اطلاعاتی ناهمگن و همچنین ملموس بودن کیفی و کمی نتایج آنهاست.

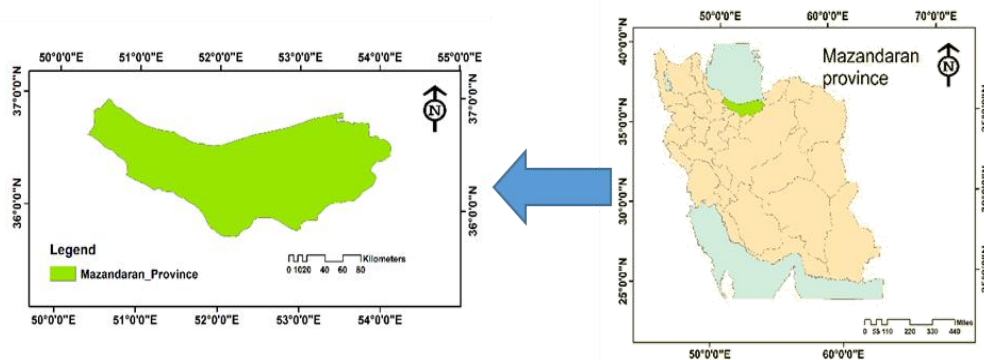
پر واضح است که در صورت در اختیار داشتن نقشه دقیق‌تر حساسیت به زمین‌لغزش، می‌توان برنامه‌ریزی بهتری برای مدیریت و کاهش مخاطرات زمین‌لغزش انجام داد. بنابراین اغلب تحقیقات در این زمینه سعی در بهبود دقت نقشه حساسیت به زمین‌لغزش دارند. هدف این پژوهش، معرفی روشی جدید برای افزایش دقت نقشه‌های تولیدشده با استفاده از روش‌های آماری است. فرض اصلی این روش، در اختیار داشتن موقعیت و ویژگی‌های مناطقی که قبلاً در آنها زمین‌لغزش رخ داده و استفاده از آنها برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های آتی است.

فرایند کلی روش‌های آماری به این صورت است که ابتدا عوامل مؤثر در زمین‌لغزش تعیین می‌شوند. پس از آن، عوامل به کلاس‌هایی تقسیم و حد تأثیر هر کلاس از هر عامل در رخداد

زمین‌لغزش مشخص می‌شود. در نهایت نقشه حساسیت از جمع وزن‌های تخمین زده شده برای کلاس‌هایی که هر نقطه به آن تعلق دارد، حاصل می‌شود. مشکل این روش‌ها، یکسان فرض کردن نحوه تأثیر عوامل مختلف است که روش پیشنهادی این مقاله، با تعیین وزن‌های مختلف برای هر عامل با استفاده از روش شاخص آنتروپی، توانایی رفع این مشکل را دارد. منطقه این پژوهش، پهنه استان مازندران در شمال ایران است که بیشترین تعداد زمین‌لغزش‌های ایران در آن رخ می‌دهد. تحقیقات زیادی با استفاده از روش‌های مختلف برای تولید نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش در این استان انجام گرفته که از آن جمله می‌توان به پژوهش پورقاسمی و همکاران در غرب استان مازندران [۲۵] و تحقیق نوحانی و همکاران در بخش کلیجان رستاق شهرستان ساری [۲۰] اشاره کرد. این تحقیقات به ترتیب با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و روش‌های آماری انجام گرفته‌اند.

### منطقه تحقیق

منطقه پژوهش، استان مازندران در شمال ایران و کرانه جنوبی دریای خزر است. مازندران با وسعت ۲۳۸۳۳ کیلومترمربع، بین عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ}46'$  تا  $36^{\circ}58'$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $50^{\circ}21'$  تا  $54^{\circ}08'$  شرقی گسترده شده است. ارتفاع در این استان از کمتر از صفر تا بیش از ۵۶۰۰ متر و شیب آن بین صفر تا ۸۲ درجه متغیر است. بیشتر منطقه توسط جنگل‌های متراکم پوشیده شده است و منطقه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای است (شکل ۱) [۳۱].



شکل ۱. منطقه پژوهش

### مواد و روش تحقیق

این پژوهش شامل چهار مرحله کلی است: ۱. جمع‌آوری داده‌های زمین‌لغزش و بررسی عوامل

مؤثر در زمین لغزش؛ ۲. بررسی تأثیر عامل‌ها بر رخداد زمین لغزش؛ ۳. تولید نقشه حساسیت به زمین لغزش؛ ۴. ارزیابی دقت نقشه‌ها. این مراحل در ادامه به اختصار شرح داده خواهند شد.

### جمع‌آوری داده‌های زمین لغزش و بررسی عوامل مؤثر در رخداد آن

شناسایی لغزش‌ها کلید اصلی تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش است [۳۵]. به این منظور در این تحقیق، از مختصات ۵۸۵ زمین لغزش که برای دوره‌ای پنجاه‌ساله توسط سازمان زمین‌شناسی استان مازندران تهیه شده، استفاده شده است.

برای تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش، باید عوامل مختلف مؤثر در لغزش زمین مشخص شوند. در تحقیق حاضر پس از بررسی بسیاری از تحقیقات در این زمینه [۲۸، ۲۴، ۱۸]، پانزده عامل به‌عنوان عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش در استان مازندران انتخاب و به چهار دسته عوامل توپوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، و طبیعی و انسان‌ساخت تقسیم شده‌اند. این عوامل در جدول ۱ فهرست شده‌اند.

جدول ۱. فهرست عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش و منابع تهیه داده‌های مرتبط با آنها

ارجاع	منبع اخذ داده	نام عامل	دسته
[۸]	مدل ارتفاعی رقومی سنجنده ALOS PALSAR	ارتفاع	توپوگرافی
[۳، ۱۶، ۱۷]	مستخرج از ارتفاع	زاویه شیب	
[۲۳]	مستخرج از ارتفاع	جهت شیب	
[۹]	مستخرج از ارتفاع	شاخص انتقال رسوب (STI) <sup>۱</sup>	هیدرولوژی
[۹]	مستخرج از ارتفاع	شاخص توان آبراهه (SPI) <sup>۲</sup>	
[۲۶]	مستخرج از ارتفاع	شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) <sup>۳</sup>	
[۱۴]	مستخرج از ارتفاع	منحنی پروفیل	
[۱۴]	مستخرج از ارتفاع	منحنی طرح	
[۱۵، ۳۴]	سازمان نقشه‌برداری	فاصله تا رودخانه‌ها	انسان‌ساخت و محیطی
[۲۱]	استخراج از تصاویر سنجنده OLI	شامل NDVI <sup>۴</sup>	
[۹]	طبقه‌بندی تصاویر سنجنده OLI با استفاده از شبکه‌های عصبی	کاربری اراضی	
[۱۱]	دفتر هوشمندسازی و داده‌کاوی وزارت راه و شهرسازی	فاصله از جاده	

1. Sediment transport index
2. Stream Power Index
3. Topographic Wetness Index
4. Normalized difference vegetation index

ارجاع	منبع اخذ داده	نام عامل	دسته
[۱۱]	دفتر هوشمندسازی و داده‌کاوی وزارت راه و شهرسازی	فاصله از ریل	زمین‌شناسی
[۹]	سازمان نقشه‌برداری	فاصله از سکونتگاه‌های انسانی	
[۳۳]	سازمان زمین‌شناسی استان مازندران	فاصله از گسل‌ها	
[۲۱]	سازمان زمین‌شناسی استان مازندران	سنگ‌شناسی	

### بررسی تأثیر عامل‌ها بر رخداد زمین‌لغزش

در این مرحله، حد تأثیر هر یک از عامل‌های تعیین‌شده در مرحله قبل بر احتمال رخداد زمین‌لغزش بررسی و تعیین می‌شود. به این منظور از روش‌های شاخص آماری (SI) و فاکتور اطمینان (CF) استفاده شده است که در ادامه به اختصار معرفی می‌شوند.

### روش شاخص آماری

شاخص آماری یک پردازش آماری دومتغیره و پرکاربرد برای تهیه نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش است [۳۲]. در این روش وزن طبقه  $i$  از عامل  $j$  که با  $S_{ij}$  نشان داده شده است، به صورت لگاریتم طبیعی (ln) نسبت تراکم زمین‌لغزش‌های رخ داده در طبقه  $i$  از عامل  $j$  ( $D_{ij}$ )، بر تراکم زمین‌لغزش‌ها در منطقه تحقیق ( $D$ ) تعریف می‌شود [۳۴]:

$$S_{ij} = \ln\left(\frac{D_{ij}}{D}\right) \quad (1)$$

هرچه وزن تخمین زده شده بیشتر باشد، کلاس مورد نظر، حساسیت (احتمال رخداد) بیشتری به زمین‌لغزش خواهد داشت و برعکس.

### روش فاکتور اطمینان

روش فاکتور اطمینان، نوعی روش آماری برای تخمین حد تأثیر عوامل در رخداد زمین‌لغزش است که توانایی مدیریت عدم اطمینان متغیرهای ورودی و داده‌های ناهمگن را دارد. این روش با استفاده از رابطه ۲ وزن طبقات عوامل را تخمین می‌زند [۳۷]:

1. Statistical Index
2. Certainty factor

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a \times (1 - PP_s)} & \text{if } PP_a > PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s \times (1 - PP_a)} & \text{if } PP_a < PP_s \end{cases} \quad (2)$$

در اینجا  $PP_a$  نسبت تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس به کل پیکسل‌های آن کلاس و  $PP_s$  نسبت کل پیکسل‌های لغزشی منطقه به کل پیکسل‌های نقشه است. با کمک این رابطه، هر کلاس با عددی بین ۱- و ۱+ وزن دهی می‌شود. مثبت بودن وزن طبقه مربوط، نشان‌دهنده اطمینان زیاد از وقوع زمین‌لغزش و منفی بودن وزن طبقه مربوط، نشان‌دهنده اطمینان کم از وقوع لغزش است. صفر بودن وزن، نشان‌دهنده نبود اطلاعات کافی درباره کلاس و تردید در زمینه وقوع زمین‌لغزش است [۴].

#### تولید نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش

پس از تعیین نحوه تأثیر عامل‌های مختلف با استفاده از روش‌های ذکر شده، باید وزن‌های تخمین زده شده برای هر کلاس از هر عامل با هم ترکیب و نقشه حساسیت به زمین‌لغزش تولید شود. با فرض در اختیار داشتن  $n$  عامل مختلف، حساسیت هر نقطه از نقشه ( $LSI$ ) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$LSI = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad (3)$$

$S_i$  وزن تخمین زده شده توسط یکی از روش‌های  $CF$  یا  $SI$  برای هر نقطه است. همان‌طور که از این رابطه مشخص است، در نقشه حساسیت تولید شده، حد تأثیر عوامل مختلف در رخداد زمین‌لغزش برابر فرض شده است که فرض درستی نیست و موجب کاهش دقت نقشه‌های حساسیت لغزش خواهد شد. برای رفع این مشکل و افزایش دقت نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش در این تحقیق، روش‌هایی بر مبنای ترکیب روش شاخص آنتروپی با روش‌های  $CF$  و  $SI$  ارائه شده است. در ادامه ابتدا روش آنتروپی و سپس روش‌های پیشنهادی ارائه می‌شوند.

#### روش شاخص آنتروپی

آنتروپی رویکردی است که به منظور مدل‌سازی بی‌نظمی سیستم استفاده می‌شود. شاخص آنتروپی ( $IOE$ ) در حقیقت بیانگر آن است که چگونه از بین عوامل مؤثر در یک رخداد، می‌توان مهم‌ترین عوامل را تخمین زد یا به عبارتی متغیرهایی دارای بیشترین تأثیر در رخداد

یک واقعه را مشخص می‌کند [۳۶]. به منظور ارزیابی عامل‌ها و به دست آوردن وزن هر عامل با استفاده از مدل آنتروپی از رابطه‌های ۴ تا ۷ استفاده می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{b}{a} \quad (۴)$$

$$E_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} P_{ij}} \quad (۵)$$

$$H_j = - \sum_{j=1}^{S_j} p_{ij} \log_2 E_{ij} \quad j = 1, \dots, n, \quad (۶)$$

$$w_j = \left( \frac{\log_2 S_j - H_j}{\log_2 S_j} \right) \times P_{ij} \quad (۷)$$

در این روابط،  $W_j$  وزن نهایی هر عامل است که از طریق رابطه ۷ به دست می‌آید.  $S_j$  و  $H_j$  و به ترتیب بیانگر تعداد طبقات و مقدار آنتروپی عامل  $j$ ام هستند. در رابطه ۶،  $P_{ij}$  تراکم لغزش در کلاس  $i$  از عامل  $j$  است و از طریق تقسیم درصد لغزش در هر کلاس ( $a$ )، بر درصد مساحت آن کلاس ( $b$ )، محاسبه می‌شود. در نهایت،  $E_{ij}$  بیانگر احتمال تراکم لغزش در هر عامل است. با استفاده از این رابطه، عوامل دارای تأثیر بیشتر در رخداد زمین لغزش، وزن بیشتری خواهند گرفت و عوامل دارای وزن نزدیک به صفر، تأثیر کمتری در ایجاد زمین لغزش خواهند داشت.

#### روش پیشنهادی برای تولید نقشه‌های حساسیت

برای رفع مشکل واحد فرض کردن تأثیر عوامل در نقشه‌های تولید شده توسط روش‌های CF و SI، در این تحقیق، روشی ترکیبی ارائه شده است. در این روش وزن هر عامل ابتدا توسط روش IOE و سپس حد تأثیر هر کلاس از هر عامل توسط یکی از روش‌های CF و SI تخمین زده می‌شود. در نهایت نقشه حساسیت به زمین لغزش با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$LSI = W_1 S_1 + W_2 S_2 + \dots + W_n S_n \quad (۴)$$

$W_i$  وزن عامل  $i$ ام، و  $S_i$  وزن کلاس مربوط به هر نقطه از عامل  $i$ ام است که توسط یکی از روش‌های CF و یا SI تخمین زده شده است.

#### ارزیابی دقت نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش

در تهیه نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش، یکی از مهم‌ترین موارد، اعتبارسنجی نقشه و ارزیابی دقت آن است. متداول‌ترین روش برای این کار، استفاده از شاخص سطح زیر منحنی

مشخصه عملکرد سیستم (ROC<sup>۱</sup>) است که به اختصار AUC<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. هر قدر شاخص AUC به یک (یا برحسب درصد، به صد)، نزدیک‌تر باشد، دقت نقشه‌ها و توانایی آنها در پیش‌بینی احتمال رخداد زمین‌لغزش بیشتر خواهد بود. در این تحقیق برای ارزیابی دقت نقشه‌های حساسیت تولیدشده، ۷۰ درصد از کل زمین‌لغزش‌های رخ داده برای تعیین وزن‌ها، و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای اعتبارسنجی استفاده شده است.

### بحث

در این قسمت ابتدا، نتایج بررسی عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های CF و SI ارائه می‌شوند. سپس نقشه‌های حساسیت تولیدشده توسط این دو روش و روش پیشنهادی بررسی خواهند شد.

### بررسی عوامل مؤثر در زمین‌لغزش با استفاده از روش شاخص آماری و فاکتور اطمینان

نتایج نشان می‌دهند که روش‌های شاخص آماری و فاکتور اطمینان نتایج مشابهی دارند. تأثیر عوامل توپوگرافی در رخداد لغزش‌ها، در جدول ۲ نشان داده شده است. ارتفاع از مهم‌ترین عوامل در ایجاد زمین‌لغزش است. براساس نتایج، کلاس ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر بیشترین وزن را داراست، بیشترین وزن عامل شیب، مربوط به کلاس ۷ تا ۱۶ درجه است که بیشترین تأثیر را در رخداد لغزش داراست و بیش از ۳۰ درصد لغزش‌ها در این کلاس رخ داده است. بیشترین وزن در عامل جهت شیب مربوط به جنوب و جنوب غربی در منطقه است که به دلیل غالب بودن این جهت شیب در منطقه است.

بررسی تأثیر عوامل هیدرولوژی بر رخداد زمین‌لغزش که در جدول ۲ خلاصه شده، نشان می‌دهد که بیشترین وزن برای عامل SPI در کلاس ۳ تا ۶ و بیشترین وزن در TWI در کلاس ۲ تا ۴ قرار دارد. در مورد عامل STI نمی‌توان با قطعیت بیان کرد که کدام کلاس بیشترین وزن لغزش را دارد، ولی کلاس ۳۰ تا ۴۰ نسبت به کلاس‌های دیگر وزن بیشتری دارد. عامل منحنی طرح در کلاس بزرگ‌تر از ۳، وزن بیشتری دارد و عامل انحنای پروفایل در کلاس ۰/۲- تا ۰/۸- بیشترین تأثیر را در رخداد لغزش داراست. در مورد فاصله از رودخانه، کلاس ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر بیشترین تأثیر را دارد.

NDVI به‌عنوان یکی از عوامل محیطی و انسان‌ساخت، در کلاس ۰/۳ تا ۰/۴۵ بیشترین وزن را دارد. این کلاس به‌طور معمول نشان‌دهنده پوشش گیاهی کم تا متوسط است که نمی‌تواند ثبات کافی را برای زمین فراهم کند. عامل مهم دیگر در این دسته، کاربری اراضی

1. Receiver operating characteristic

2. Area Under Curve (AUC)



است که در آن بیشترین وزن مربوط به کلاس جنگل است. از بررسی عامل فاصله از جاده نشان می‌دهد که بیشترین وزن مربوط به کلاس ۰ تا ۵۰۰ متر است. همچنین در مورد فاصله از ریل، بالاترین وزن، مربوط به فاصله ۱۰۰۰ متری از ریل است. نتایج بررسی عوامل محیطی و انسان‌ساخت در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج بررسی عوامل دسته زمین‌شناسی در جدول ۳ نشان داده شده است. برای عامل فاصله تا گسل، بیشترین وزن مربوط به کلاس صفر تا ۳۰۰ متر است. بررسی نتایج حاصل از عامل سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌ها در سنگ‌هایی از جنس ماسه‌سنگ، کنگلومرای و ماسه‌سنگ آهکی رخ داده است که دلیل آن، ساختار لایه‌ای و کم‌ثبات این نوع سنگ است.

### اعتبارسنجی روش پیشنهادی برای تهیه نقشه‌های حساسیت

در این بخش ابتدا، وزن‌های تخمین زده شده برای هر عامل با استفاده از روش IOE ارائه شده و پس از آن دقت نقشه‌های حساسیت تولید شده با استفاده از روش‌های SI، CF و همچنین نقشه‌های تولید شده از ترکیب روش آنروپی و روش SI و CF که به ترتیب IOE-SI و IOE-CF نامگذاری شده‌اند، بررسی شده است.

در جدول ۴، حد تأثیرگذاری هر عامل در ایجاد زمین‌لغزش با استفاده از روش شاخص آنروپی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که عوامل دسته توپوگرافی بیشترین تأثیر را در رخداد لغزش دارند و بعد از آن عوامل محیطی و انسان‌ساخت تأثیرگذارترین عوامل‌اند؛ سپس عوامل زمین‌شناسی و در نهایت عوامل هیدرولوژی در زمین‌لغزش در رخداد زمین‌لغزش مؤثرند. در بین پانزده عامل، ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش دارند.

جدول ۲. تأثیر کلاس‌های عوامل توپوگرافی و هیدرولوژی در زمین‌لغزش‌های رخ داده با استفاده از روش‌های شاخص آماری، فاکتور اطمینان

SI	CF	کلاس‌ها		SI	CF	کلاس‌ها	
-۰/۵۳۲	-۰/۴۱۰	< ۲	عوامل هیدرولوژی منحني طرح	-۰/۷۳۹	-۰/۵۲۰	۰-۷	عوامل توپوگرافی شیب (درجه)
-۰/۰۹۵	-۰/۰۹۰	-۰/۸ تا ۲		۰/۵۶۶	۰/۴۳۰	۷-۱۶	
-۰/۰۷۹	-۰/۰۷۰	۰/۲ تا ۰/۸		۰/۳۸۴	۰/۳۱۰	۱۶-۲۵	
۰/۰۰۱	۰	۰/۵ تا ۰/۲		-۰/۳۴۳	-۰/۲۹۰	۲۵-۳۴	
۰/۰۳۹	-۰/۰۳۰	۳ تا ۰/۵		-۱/۴۴۰	-۰/۷۶۰	۳۴-۵۲	
۰/۱۳۰	۰/۱۲۰	> ۳					

SI	CF	کلاسها		SI	CF	کلاسها	
Nan	-۱	<۲	منحنی پروفایل	-۰/۸۵۲	-۰/۵۷۰	>۵۲	جهت شیب
-۰/۲۲۰	-۰/۱۹۰	۰/۸ تا -۲					
۰/۱۱۷	۰/۱۱۰	-۰/۲ تا					
...	...	-۰/۸					
-۰/۰۱۳	-۰/۰۱۰	۰/۵ تا -۰/۲					
Nan	-۱	-۰/۵ تا ۳					
۰/۳۹۴	۰/۳۲۰	۰-۲۰۰	فاصله تا رود (متر)	-۱/۷۸۵	-۰/۸۳۰	مسطح	جهت شیب
۰/۴۵۷	۰/۳۶۷	۴۰۰-۲۰۰				شمال	
۰/۱۴۹	۰/۳۳۸	۶۰۰-۴۰۰				شمال شرق	
۰/۰۷۱	۰/۰۶۸	۱۰۰۰-۶۰۰				شرق	
-۰/۱۲۲	-۰/۱۱۵	-۱۰۰۰				جنوب شرق	
-۰/۶۳۶	-۰/۴۷۰	۱۴۰۰				جنوب	
-۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	<۲	TWI	۰/۰۹۵	۰۹۱	جنوب شرق	جهت شیب
-۰/۱۰۸	۰/۱۰۰	۲-۴				جنوب	
-۰/۰۵۴	-۰/۰۵۰	۴-۶				جنوب غرب	
-۰/۱۸۵	-۰/۱۶۰	۸-۶				غرب	
-۰/۴۱۴	-۰/۳۳۰	۸-۱۰				شمال غرب	
۰/۰۵۱	-۰/۰۵۰	۱۰>					
۰/۰۷۰	۰/۰۷۰	۰-۵	STI	-۰/۰۶۷	-۰/۰۶۵	۰-۳۰۰	ارتفاع (متر)
-۰/۳۲۳	-۰/۲۷۰	۵-۱۰				۳۰۰-۶۰۰	
-۰/۵۲۹	-۰/۴۱۰	۱۰-۲۰				۶۰۰-۹۰۰	
-۰/۱۱۳	-۰/۰۴۰	۲۰-۳۰				۹۰۰-۱۵۰۰	
۰/۰۸۸	۰/۰۸۰	۳۰-۴۰				۱۵۰۰-۲۱۰۰	
-۰/۰۵۱	-۰/۰۴۰	۴۰>				>۲۱۰۰	
۰/۰۳۲	۰/۰۳۱	۰-۳	SPI	۱/۳۲۷	۰/۷۲۵	۳۰۰-۶۰۰	ارتفاع (متر)
۰/۱۲۵	۰/۱۱۰	۳-۶				۶۰۰-۹۰۰	
-۰/۱۳۲	-۰/۱۲۰	۶-۹				۹۰۰-۱۵۰۰	
۰/۰۴۹	۰/۰۴۰	۹-۱۲				۱۵۰۰-۲۱۰۰	
-۱/۰۸۱	-۰/۶۶۰	۱۲-۲۲				>۲۱۰۰	
۰/۰۴۱	۰/۰۱۰	۲۲>					

عوامل توپوگرافی

دقت نقشه‌های حساست زمین‌لغزش بر حسب شاخص AUC برای روش‌های SI و CF به ترتیب ۷۳/۸۸ و ۷۳/۰۰ درصد است (شکل ۲). با تأثیر دادن وزن هر عامل در روش فاکتور اطمینان و شاخص آماری بر اساس روش پیشنهادی، مشاهده می‌شود که حد دقت بر اساس AUC برای روش‌های IOE-CF و IOE-SI به ترتیب به ۷۶/۴۰ و ۷۶/۰۰ درصد افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش کارایی روش‌های ترکیبی نسبت به روش‌های CF و SI است.

جدول ۳. تأثیر کلاس‌های عوامل محیطی و انسان‌ساخت و زمین‌شناسی در زمین‌لغزش‌های رخ داده با استفاده از روش‌های شاخص آماری و فاکتور اطمینان

CF	SI	کلاس‌ها	فاصله از گسل (کیلومتر)	عوامل زمین‌شناسی	CF	SI	کلاس‌ها	فاصله از ریل (کیلومتر)	عوامل محیطی و انسان‌ساخت
۰/۳۴۰	۰/۴۳۰	۰/۳ - ۰			۰/۵۵۰	۰/۶۹۴	۰ - ۱		
۰/۲۷۰	۰/۳۶۱	۰/۶ - ۰/۳	۰/۴۹۰	۰/۵۷۳	۱ - ۲				
۰/۲۸۰	۰/۰۳۰	۰/۹ - ۰/۶	۰/۴۸۰	۰/۵۴۷	۲ - ۳				
-۰/۰۷۰	-۰/۰۶۶	۱/۲ - ۰/۹	-۰/۰۵۰	-۰/۱۷۱	> ۳				
-۰/۲۲۰	-۰/۲۴۴	۱/۵ - ۱/۲							
-۰/۵۲۰	-۰/۷۴۴	> ۱/۵							
-۱/۰۳۲	-۰/۶۴۰	Pd							
-۱/۰۱۶	-۰/۶۵۰	Qm							
-۱/۰۲۸	-۰/۶۸۰	Db-sh							
-۰/۱۴۸	-۰/۱۴۰	TRJs	-۰/۸۲۸	-۱/۷۶۵	< ۰/۱				
-۱/۵۸۴	-۰/۷۹۰	Pr	-۰/۳۹۵	-۰/۵۰۲	۰/۱ - ۰/۳				
۰/۵۹۶	۰/۴۴۰	Jsc	۰/۳۲۴	۰/۳۹۰	۰/۳ - ۰/۴۵				
-۲/۰۲۱	-۰/۸۶۰	Ktzi	۰/۲۰۷	۰/۲۹۷	> ۰/۴۵				
-۲/۱۷۸	-۰/۸۸۰	Qft2							
-۱/۷۲۳	-۰/۸۲۰	Tre							
۰/۳۴۵	۰/۲۹۰	pCmt2							
۱/۳۶۶	۰/۷۴۰	Mm,s,l							
-۰/۴۶۷	-۰/۳۹۰	Mc							
-۱/۵۹۶	-۰/۷۹۰	Kbv	۰/۴۱۰	۰/۵۳۰	۰/۵ - ۰				
-۱/۸۷۲	۰/۳۷۰	K2I2	-۰/۰۱۰	-۰/۰۰۹	۱ - ۰/۵				
-۱/۵۸۶	-۰/۷۹۰	Cm	-۰/۳۵۰	-۰/۴۳۵	۱/۵ - ۱				
-۰/۰۷۰	-۰/۰۷۰	JI	-۰/۲۹۰	-۰/۳۵۱	۲ - ۱/۵				
۰/۵۹۰	۰/۰۴۱	PeEm	-۰/۵۸۰	-۰/۸۷۲	۳ - ۲				
۰/۹۲۷	۰/۶۰۰	Kbvt	-۰/۶۳۰	-۱/۰۱۰	> ۳				
-۰/۱۶۴	-۰/۸۱۰	pCk							
۰/۵۲۰	۰/۴۰۰	P							

-۰/۰۸۷	-۰/۰۸۰	Pel							
۱/۳۱۳	۰/۷۳۰	Plc			۰/۲۶۰	۰/۳۰۱	جنگل	کاربری اراضی	
-۱/۶۸۸	۰/۰۰۴	TRe1			۰/۲۱۰	۰/۱۵۲	شهری		
۰/۴۱۸	۰/۴۰۰	K2I1			-۱	Nan	آب		
-۱/۱۴۵	-۰/۵۲۰	Ek			۰/۱۵۰	۰/۱۷۰	کشاورزی		
۱/۹۴	۰/۸۵۰	Olc,s			-۰/۷۵۰	-۱/۳۹۲	کوه		
۱/۱۸۸	۰/۶۹۰	Jd			۰/۱۵۰	۰/۰۱۵	خاک		
-۲/۱۵۲	-۰/۸۸۰	Qabv							

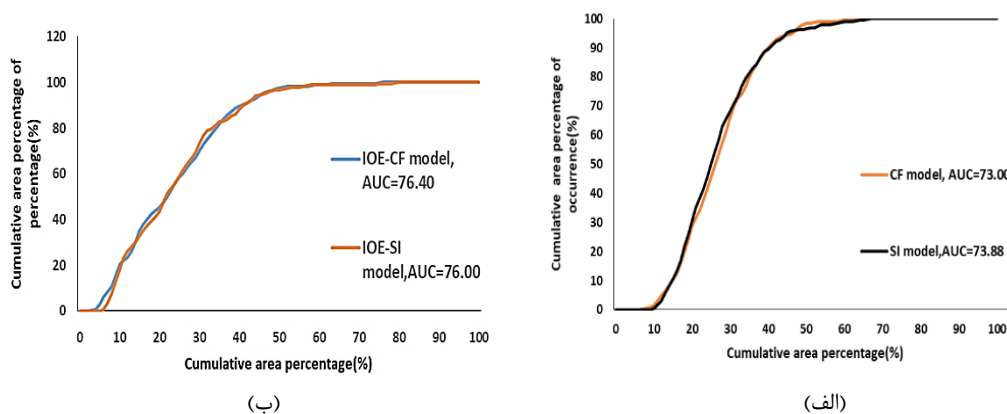
برای بررسی و تحلیل بهتر، نقشه‌های حساسیت به دست آمده با روش‌های آماری مختلف با استفاده از روش Natural break به پنج طبقه با حساسیت لغزش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شده‌اند که نتایج در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که بیان شد استان مازندران از مناطق بسیار مستعد لغزش در ایران است و نتایج نشان می‌دهد که براساس روش‌های آماری به کار برده شده حدود ۴۰ درصد مناطق در ناحیه‌های لغزش زیاد و خیلی زیاد قرار دارند و براساس روش ترکیبی IOE-SI و IOE-CF به ترتیب ۳۰ و ۳۵ درصد مناطق حساسیت زیاد دارند.

جدول ۴. تأثیرگذاری عوامل چهارگانه در زمین لغزش با استفاده از روش شاخص آنترپی

عوامل توپوگرافی					
ارتفاع		شیب		جهت شیب	
۰/۳۳۱		۰/۱۰۸		۰/۰۴۱	
عوامل زمین‌شناسی					
سنگ‌شناسی			فاصله از گسل		
۰/۲۱۹			۰/۰۳۸		
عوامل هیدرولوژی					
SPI	STI	TWI	فاصله تا رودخانه	منحنی طرح	منحنی پروفیل
۰/۰۲۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۶	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰	۰/۱۵۰
عوامل محیطی و انسان‌ساخت					
فاصله از جاده		فاصله از ریل		کاربری اراضی	
۰/۰۶۳		۰/۰۶۶		۰/۱۳۵	
NDVI		۰/۱۲۹			

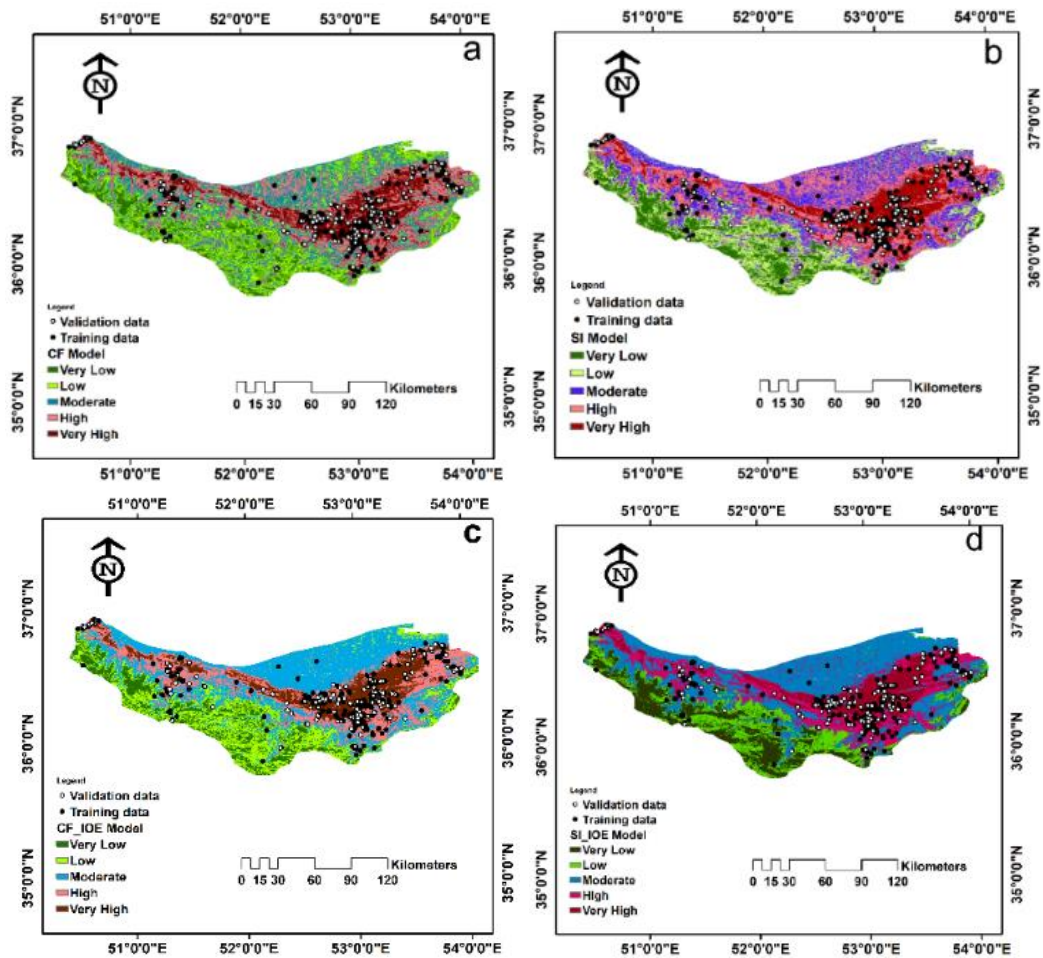
### نتیجه‌گیری

در این پژوهش پانزده عامل در چهار گروه به‌عنوان عوامل مؤثر در لغزش در نظر گرفته شدند. برای ارزیابی نقشه‌های حساسیت تولیدشده توسط روش‌های مختلف از اطلاعات ۵۸۵ زمین‌لغزش رخ داده در استان مازندران استفاده شد. بررسی نتایج عامل‌های مؤثر در رخداد زمین‌لغزش با روش SI و CF نشان داد که بیشتر لغزش‌های گزارش شده در نزدیکی رودها، مسیرهای حمل‌ونقل و گسل‌ها رخ داده است. همچنین دامنه‌های جنوب و جنوب غربی، مناطقی با پوشش گیاهی متوسط و مناطقی با ارتفاع ۳۰۰ تا ۹۰۰ متر یا دارای شیب ۷ تا ۱۶ درجه بیشترین احتمال رخداد زمین‌لغزش را دارند. دقت نقشه‌های حاصل از روش‌های SI و CF برحسب شاخص AUC به ترتیب ۷۳/۸۸ و ۷۳/۰۰ درصد به‌دست آمد که بیشتر از دقت متوسط است.



شکل ۲. منحنی‌های ROC و دقت نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش برحسب AUC (الف) برای روش‌های شاخص آماری و فاکتور اطمینان، (ب) برای مدل‌های ترکیبی

در روش پیشنهادی، ابتدا وزن هر عامل توسط روش شاخص آنتروپی محاسبه شد. بررسی این وزن‌ها نشان داد که عوامل توپوگرافی، محیطی و انسان‌ساخت، زمین‌شناسی و در نهایت هیدرولوژی به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل در رخداد زمین‌لغزش‌اند. دقت نقشه‌های به‌دست آمده با استفاده از روش پیشنهادی IOE-CF و IOE-SI برحسب شاخص AUC به ترتیب به ۷۶/۰۰ و ۷۶/۴۰ درصد افزایش یافت که نشان از توانمندی روش پیشنهادی در تولید نقشه‌های حساسیت با دقت زیاد دارد. با توجه به افزایش دقت نقشه‌های حاصل از روش‌های ترکیبی نسبت به روش‌های متداول آماری، از آنها می‌توان به‌عنوان روشی مناسب و مطمئن برای تحقیقات لغزش زمین و مخاطرات آنها استفاده کرد.



شکل ۳. نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش تولیدشده با استفاده از روش (a) CF، روش (b) SI، روش (c) CF-IOE، روش (d) SI-IOE.

### تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان تهیه شده که بدین وسیله تشکر می‌شود.

## منابع

- [۱] دلسوز، سوسن؛ محمودی، طیبه؛ رامشت، محمدحسین؛ و انتظاری، مژگان (۱۳۹۳). «مفهوم زمان و تکنیک‌های پیش‌بینی مخاطرات طبیعی»، مدیریت مخاطرات محیطی، (۱)، ص ۹۷-۱۰۹.
- [۲] صدوق ونینی، حسن؛ ثروتی، محمدرضا؛ نصرتی، کاظم؛ اسدی، میترا؛ و قربانی، محمد صدیق، (۱۳۹۴). «پهنه‌بندی لغزش زمین در منطقه کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات»، مدیریت مخاطرات محیطی، (۱)۲، ص ۱۱۶-۱۰۵.
- [3] Anis, Zorgati; Wissem, Gallala; Vali, Vakhshoori; Smida, Habib; & Essghaier, Gaied Mohamed, (2019). "GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia", *Open Geosciences*, 11,(1), pp 708-726, doi: DOI:10.1515/geo-2019-0056.
- [4] Azareh, Ali; Rahmati, Omid; Rafiei-Sardooi, Elham; Sankey, Joel B; Lee, Saro; Shahabi, Himan; & Ahmad, Baharin Bin (2019). "Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models", *Science of the Total Environment*, 655,(pp 684-696, doi: DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.11.235.
- [5] Basu, Tirthankar & Pal, Swades, (2019). "A GIS-based factor clustering and landslide susceptibility analysis using AHP for Gish River Basin, India", *Environment, Development and Sustainability*, pp: 1-33, doi: DOI: 10.1007/s10668-019-00406-4.
- [6] Bui, Dieu Tien; Pradhan, Biswajeet; Lofman, Owe; Revhaug, Inge; & Dick, Oystein B, (2012). "Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS", *Computers & Geosciences*, 45, pp: 199-211, doi: DOI:10.1016/j.cageo.2011.10.031.
- [7] Chen, Wei; Shahabi, Himan; Zhang, Shuai; Khosravi, Khabat; Shirzadi, Ataollah; Chapi, Kamran; Pham, Binh Thai; Zhang, Tingyu; Zhang, Lingyu; & Chai, Huichan, (2018). "Landslide susceptibility modeling based on gis and novel bagging-based kernel logistic regression", *Applied Sciences*, 8,(12), p. 2540, doi: DOI:10.3390/app8122540
- [8] Chen, Wei; Shahabi, Himan; Shirzadi, Ataollah; Hong, Haoyuan; Akgun, Aykut; Tian, Yingying; Liu, Junzhi; Zhu, A-Xing; & Li, Shaojun, (2019). "Novel hybrid artificial intelligence approach of bivariate statistical-methods-based kernel logistic regression classifier for landslide

susceptibility modeling”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78,(6), pp: 4397-4419.

- [9] Chen, Xi and Chen, Wei, (2021). “GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods”, *Catena*, 196, p. 104833.
- [10] Dahal, Ranjan Kumar; Hasegawa, Shuichi; Nonomura, Atsuko; Yamanaka, Minoru; Dhakal, Santosh; and Paudyal, Pradeep, (2008). “Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence”, *Geomorphology*, 102,(3-4), pp: 496-510, doi: DOI:10.1016/j.geomorph.2008.05.041.
- [11] Devkota, Krishna Chandra; Regmi, Amar Deep; Pourghasemi, Hamid Reza; Yoshida, Kohki; Pradhan, Biswajeet; Ryu, In Chang; Dhital, Megh Raj; and Althuwaynee, Omar F, (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”, *Natural hazards*, 65,(1), pp: 135-165, doi: DOI:10.1007/s11069-012-0347-6.
- [12] Feizizadeh, Bakhtiar; Roodposhti, Majid Shadman; Blaschke, Thomas; & Aryal, Jagannath, (2017). “Comparing GIS-based support vector machine kernel functions for landslide susceptibility mapping”, *Arabian Journal of Geosciences*, 10,(5), p. 122, doi: DOI 10.1007/s12517-017-2918-z.
- [13] Gentilucci, Matteo; Materazzi, Marco; & Pambianchi, Gilberto, (2021). “Statistical Analysis of Landslide Susceptibility, Macerata Province (Central Italy)”, *Hydrology*, 8,(1), p. 5.
- [14] Jaafari, A; Najafi, A; Pourghasemi, HR; Rezaeian, J; & Sattarian, A, (2014). “GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11,(4), pp: 909-926, doi: DOI: 10.1007/s13762-013-0464-0.
- [15] Juliev, Mukhiddin; Mergili, Martin; Mondal, Ismail; Nurtaev, Bakhtiar; Pulatov, Alim; & Hübl, Johannes, (2019). “Comparative analysis of statistical methods for landslide susceptibility mapping in the Bostanlik District, Uzbekistan”, *Science of the total environment*, 653, pp: 801-814, doi: DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.10.431.
- [16] Lai, Jhe-Syuan & Tsai, Fuan, (2019). “Improving GIS-based landslide susceptibility assessments with multi-temporal remote sensing and machine learning”, *Sensors*, 19,(17), p. 3717, doi:



DOI:10.3390/s19173717.

- [17] Luo, Xiangang; Lin, Feikai; Zhu, Shuang; Yu, Mengliang; Zhang, Zhuo; Meng, Lingsheng; & Peng, Jing, (2019). "Mine landslide susceptibility assessment using IVM, ANN and SVM models considering the contribution of affecting factors", *PloS one*, 14,(4), doi: DOI:10.1371/journal.pone.0215134.
- [18] Mahdadi, Fatna; Boumezbeur, Abederrahmane; Hadji, Riheb; Kanungo, Debi Prasanna; & Zahri, Farid, (2018). "GIS-based landslide susceptibility assessment using statistical models: a case study from Souk Ahras province, NE Algeria", *Arabian Journal of Geosciences*, 11,(17), p. 476, doi: DOI: 10.1007/s12517-018-3770-5.
- [19] Ngo, Phuong Thao Thi; Panahi, Mahdi; Khosravi, Khabat; Ghorbanzadeh, Omid; Kariminejad, Narges; Cerda, Artemi; & Lee, Saro, (2021). "Evaluation of deep learning algorithms for national scale landslide susceptibility mapping of Iran", *Geoscience Frontiers*, 12,(2), pp: 505-519.
- [20] Nohani, Ebrahim; Moharrami, Meisam; Sharafi, Samira; Khosravi, Khabat; Pradhan, Biswajeet; Pham, Binh Thai; Lee, Saro; & M Melesse, Assefa, (2019). "Landslide susceptibility mapping using different GIS-based bivariate models", *Water*, 11,(7), p. 1402.
- [21] Nourani, Vahid; Pradhan, Biswajeet; Ghaffari, Hamid; & Sharifi, Seyed Saber, (2014). "Landslide susceptibility mapping at Zonouz Plain, Iran using genetic programming and comparison with frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models", *Natural hazards*, 71,(1), pp: 523-547.
- [22] Pham, Binh Thai; Prakash, Indra; Singh, Sushant K; Shirzadi, Ataollah; Shahabi, Himan; & Bui, Dieu Tien, (2019). "Landslide susceptibility modeling using reduced error pruning trees and different ensemble techniques: Hybrid machine learning approaches", *Catena*, 175, pp: 203-218, /j.catena.2018.12.018.
- [23] Pham, Binh Thai; Bui, Dieu Tien; Pourghasemi, Hamid Reza; Indra, Prakash; & Dholakia, MB. (2017). "Landslide susceptibility assessment in the Uttarakhand area (India) using GIS: a comparison study of prediction capability of naïve bayes, multilayer perceptron neural networks, and functional trees methods", *Theoretical and Applied Climatology*, 128,(1-2), pp: 255-273, doi: DOI: 10.1007/s00704-015-1702-9.
- [24] Pourghasemi, Hamid Reza; Pradhan, Biswajeet; Gokceoglu, Candan;

- Mohammadi, Majid; & Moradi, Hamid Reza, (2013). "Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, 6,(7), pp: 2351-2365, doi: DOI: 10.1007/s12517-012-0532-7.
- [25] Pourghasemi, Hamid Reza & Kerle, Norman (2016). "Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran", *Environmental earth sciences*, 75,(3), p. 185, doi: DOI: 10.1007/s12665-015-4950-1.
- [26] Pourghasemi, Hamid Reza; Jirandeh, Abbas Goli; Pradhan, Biswajeet; Xu, Chong; & Gokceoglu, Candan, (2013). "Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran", *Journal of Earth System Science*, 122,(2), pp: 349-369, doi: DOI: 10.1007/s12040-013.
- [27] Pourghasemi, HR; Moradi, HR; and Aghda, SM Fatemi, (2013). "Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances", *Natural hazards*, 69,(1), pp: 749-779, doi: DOI: 10.1007/s11069-013-0728-5.
- [28] Razavizadeh, Samaneh; Solaimani, Karim; Massironi, Matteo; and Kavian, Ataollah, (2017). "Mapping landslide susceptibility with frequency ratio, statistical index, and weights of evidence models: a case study in northern Iran", *Environmental Earth Sciences*, 76,(14), p. 499, doi: DOI: 10.1007/s12665-017-68.
- [29] Regmi, Amar Deep; Devkota, Krishna Chandra; Yoshida, Kohki; Pradhan, Biswajeet; Pourghasemi, Hamid Reza; Kumamoto, Takashi; and Akgun, Aykut, (2014). "Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya", *Arabian Journal of Geosciences*, (2),7, pp: 725-742, doi: DOI: 10.1007/s12517-012-08.
- [30] Shirzadi, Ataollah; Bui, Dieu Tien; Pham, Binh Thai; Solaimani, Karim; Chapi, Kamran; Kavian, Ataollah; Shahabi, Himan; and Revhaug, Inge, (2017). "Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach", *Environmental Earth Sciences*, 76,(2), p. 60.
- [31] Vahidnia, Mohammad H; Alesheikh, Ali A; Alimohammadi, Abbas; and Hosseinali, Farhad, (2010). "A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping", *Computers & Geosciences*, 36,(9), pp: 1101-1114, doi:

DOI:10.1016/j.cageo.2010.04.004.

- [32] Van Westen, CJ, (1997). "Statistical landslide hazard analysis", *ILWIS*, 2, pp: 73-84.
- [33] Wang, Qiqing & Li, Wenping, (2017). "A GIS-based comparative evaluation of analytical hierarchy process and frequency ratio models for landslide susceptibility mapping", *Physical Geography*, 38,(4), pp: 318-337, doi: DOI:10.1080/02723646.2017.1294522.
- [34] Wu, Zhiyong; Wu, Yanli; Yang, Yitian; Chen, Fuwei; Zhang, Na; Ke, Yutian; and Li, Wenping, (2017). "A comparative study on the landslide susceptibility mapping using logistic regression and statistical index models", *Arabian Journal of Geosciences*, 10,(8), p. 187, doi: DOI: 10.1007/s12517-017-2961-9.
- [35] Xiao, Ting; Yin, Kunlong; Yao, Tianlu; & Liu, Shuhao, (2019). "Spatial prediction of landslide susceptibility using GIS-based statistical and machine learning models in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir, China", *Acta Geochimica*, 38,(5), pp: 654-669, doi: DOI: 10.1007/s11631-019-00341-1.
- [36] Yufeng, Shi & Fengxiang, Jin, "Landslide stability analysis based on generalized information entropy", in *2009 international conference on environmental science and information application technology*, 2009, vol. 2: IEEE, pp: 83-85, doi: DOI:10.1109/ESIAT.2009.258.
- [37] Zhao, Xia & Chen, Wei, (2020). "Gis-based evaluation of landslide susceptibility models using certainty factors and functional trees-based ensemble techniques", *Applied Sciences*, 10,(1), p. 16, doi: DOI:10.3390/app10010016.