

## ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص آنتروپی و الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کن)

عزت اله فنواتی\* - دانشیار ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران.  
علی احمدآبادی - استادیار ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران.  
معصومه غلامی - کارشناسی ارشد، هیدروژئومورفولوژی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه خوارزمی.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۱      تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹

### چکیده

زمین لغزش یکی از فرایندهای دامنه‌ای حاکم بر البرز جنوبی و به ویژه حوضه آبریز کن است. به دلیل نزدیکی این حوضه به شهر بزرگ تهران، جنبه گردشگری و همچنین وجود استقرارگاه‌ها و سکونتگاه‌های انسانی در این حوضه، شناسایی نقاطی که مستعد زمین لغزش هستند از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف از این پژوهش، مشخص کردن مناطق حساس به زمین لغزش در حوضه کن با استفاده از الگوریتم SVM و شاخص آنتروپی، بازدید میدانی و اعتبارسنجی مدل‌ها است. معیارهای موثر در بروز زمین لغزش در این تحقیق شامل توپوگرافی، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده هستند. لایه‌های مکانی پارامترهای اثرگذار به پایگاه مکانی داده وارد شده و استاندارد سازی معیارها انجام شد. هر یک از پارامترها با توجه به میزان تأثیر بر وقوع مخاطره لغزش، طبق نظرات کارشناسی امتیازدهی شده و به صورت رستری به عنوان لایه‌های اصلی در پهنه بندی حساسیت لغزش با استفاده از شاخص آنتروپی بکار گرفته شده‌اند. ماتریس آنتروپی برای هر یک از عوامل محاسبه شده و سپس در محیط GIS نقشه پهنه‌بندی حساسیت لغزش منطقه، تهیه شده است. در الگوریتم پشتیبان بردار از تابع حلقوی استفاده شده است. بر اساس این الگوریتم هر یک از لایه‌های موثر در بروز زمین لغزش وزن دهی شده و سپس لایه‌ها هم پوشانی شده و نقشه حساسیت زمین لغزش بر اساس الگوریتم پشتیبان بردار تهیه شده است. جهت اعتبارسنجی مدل‌ها، با استفاده از  $30\%$  درصد نقاط لغزشی، منحنی ROC، ترسیم شده و مساحت زیر منحنی (AUC) محاسبه شده است. نتایج اعتبارسنجی نشان داده که الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار (SVM-SIGMOID) ( $AUC = 0.91$ ) در برآورد حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه نسبت به مدل شاخص آنتروپی ( $AUC = 0.86$ ) از صحت بیشتر و در نتیجه قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار است.

واژگان کلیدی: حساسیت زمین لغزش، حوضه کن، شاخص آنتروپی، الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار، SVM-SIGMOID.

## مقدمه

زمین لغزش به عنوان رویدادی طبیعی نقش مهمی در تکامل منظره، فرسایش و انتقال رسوبات بازی می‌کند اما در عین حال نیز تعریف کننده یک مخاطره طبیعی مهم است، مخاطره ای که در مقیاس های زمانی - فضایی متفاوت در دامنه ی کوهستان ها روی می دهد (فرجی سبکبار و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴: ۲۵). مطالعات درمورد زمین لغزش حاکی از این است که زمین لغزش مخاطره ای است که اغلب به فراوانی روی می دهد، و در همه قاره ها وجود دارد و تهدید جهانی برای انسان ها، زیرساخت ها و محیط زیست است (بروک و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸: ۱۲۵). اخیرا بر اساس گزارش وقایع زینبار جهانی به طور متوسط زمین لغزش ها باعث میلیاردها دلار تلفات اقتصادی در کشورهایی همچون ژاپن، هند، ایتالیا و ایالات متحده آمریکا می شود (باس و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹: ۱۲۵۵). در ایران نیز خسارات ناشی از زمین لغزش ها آمار و ارقام قابل توجهی را به خود اختصاص داده اند. اگرچه آگاهی از مکانیسم های ناپایداری دامنه ای و تکنیک های کاهش آن افزایش یافته است، همچنان زمین لغزش ها یکی از دلایل تلفات مالی و انسانی هستند (فرجی سبکبار و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۲). یک زمین لغزش تحت مجموعه ای از شرایط روی می دهد و ممکن است توسط فاکتورهای زمین محیطی همچون شیب، ارتفاع، لیتولوژی، ژئومورفولوژی و غیره تحت تاثیر قرار گیرد. علاوه بر این عوامل خارجی مانند بارندگی، زلزله و فعالیت های انسانی مانند ترانشه برای ساخت و ساز جاده ها و شهر سازی نیز بر روی فراوانی وقوع زمین لغزش تاثیر می گذارد (برا و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸: ۴۵). بررسی موجودی زمین لغزش ها، تیپولوژی و توزیع فضایی آنها ابزارهای ضروری برای تحدید نشانه های فضایی و زمانی زمین لغزش ها است. این امر به درک روند تکاملی زمین لغزش ها و نیز تعیین حساسیت زمین لغزش ها در یک منطقه کمک می کند. در نتیجه، کاهش خطر زمین لغزش ها بدون ارزیابی اولیه امکان پذیر نیست (جیکوب و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۷). مفهوم حساسیت زمین لغزش براساس پیش بینی فضایی رخدادهای زمین لغزش است. نقشه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در هر مکانی، مناطق تحت تاثیر خطر بالقوه و بالفعل زمین لغزش ها را نشان می دهد. بدین ترتیب نقاط امن و خطرناک تحت تاثیر رخداد زمین لغزش شناسایی می شود. در طول دو دهه گذشته محققین طیف وسیعی از فرایندهای مدل سازی و روش هایی را برای بهبود پیش بینی و تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش ها توسعه داده اند (پویراد<sup>۶</sup>، ۲۰۱۴). تکنیک های ارزیابی حساسیت زمین لغزش ها به دو دسته کمی و کیفی تقسیم می شوند (وانگ و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۴: ۳۱۹). تکنیک های کمی برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش شامل مدل رگرسیون لجستیک (نفسلیگلو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۷۱؛ چوهان<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۰: ۴۱۶)، مدل وزن شاهد (داهال<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۹۹؛ ایلیا<sup>۱۱</sup> و

<sup>۱</sup> faraji sabokbar et al<sup>۲</sup> broeck et al<sup>۳</sup> basu et al<sup>۴</sup> bera et al<sup>۵</sup> jacobe<sup>۶</sup> poiraud<sup>۷</sup> wang<sup>۸</sup> Nefeslioglu<sup>۹</sup> Chauhan<sup>۱۰</sup> Dahal<sup>۱۱</sup> Ilia

سانگاراتوس<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶: ۳۸۰)، نسبت فراوانی (عمر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۲۶؛ ریس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۰۶۳؛ وو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۲)، مدل شاخص آنتروپی (دوکوتا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۳۶)، فازی لجستیک (رستمی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۶۸۵) و ماشین‌های پشتیبان بردار (تین بوی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۶۱) هستند. مدل‌های کیفی موضوعی هستند، و به صورت متداول از موجودی لغزش جهت تشخیص مکان‌هایی با ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی مشابه که در معرض وقوع زمین لغزش هستند استفاده می‌کنند. برخی از مدل‌های کیفی نظیر فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مفهوم وزن دهی و رتبه بندی را نیز در نظر می‌گیرند، و ممکن است نیمه کمی نیز نامیده شوند (خان<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). از جمله مدل‌های کمی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته و جهت تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش بکار گرفته شده اند مدل‌های ماشین‌های پشتیبان بردار و آنتروپی هستند. الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار بر اساس نظریه یادگیری آماری و شامل یک مرحله آموزشی با ورودی همراه و ارزش‌های اهداف خروجی است (یو<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۵۲۸). تحقیقات بسیاری با استفاده از مدل ماشین‌های پشتیبان بردار انجام شده است. از جمله تحقیقات خارجی می‌توان به مرجانویچ<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، ژو<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، پنگ<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵) و تین بای<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد. در ایران نیز با استفاده از الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار، به تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش پرداخته شده است از جمله این تحقیقات می‌توان به یمانی و همکاران (۱۳۹۱)، قاسمیان و همکاران (۱۳۹۶) اشاره نمود.

آنتروپی معیاری برای اندازه‌گیری اختلال، بی‌ثباتی، عدم تعادل، و عدم اطمینان یک سیستم است (یوفنگ<sup>۱۴</sup> و فنسیانگ<sup>۱۵</sup>، ۲۰۰۹). مقدار آنتروپی یک سیستم دارای یک رابطه یک به یک با درجه‌ی اختلال است؛ این رابطه، به نام اصل بولتزمن، به توصیف وضعیت ترمودینامیکی یک سیستم می‌پردازد (یوفنگ و فنسیانگ، ۲۰۰۹) (برای شناسایی بیشتر با این مدل می‌توانید به تحقیقات محمد خان و همکاران، ۱۳۹۳؛ شکاری بادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مقیمی و همکاران، ۱۳۹۱؛ یوفنگ و فنسیانگ، ۲۰۰۹؛ لی<sup>۱۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۲: ۳۵۲؛ یانگ<sup>۱۷</sup> و کیائو<sup>۱۸</sup>، ۲۰۰۹: ۵۲۰).

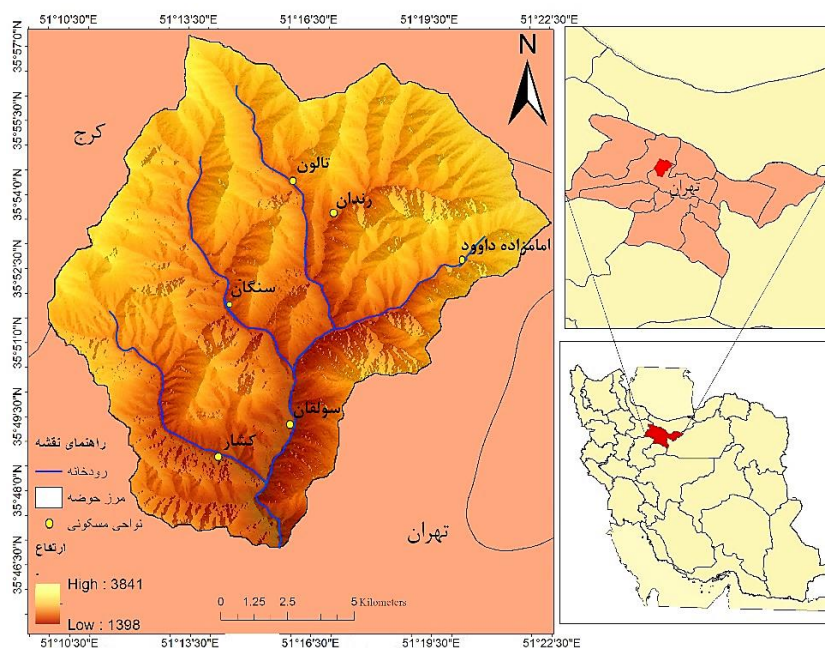
<sup>۱</sup> Tsangaratos<sup>۲</sup> Umar<sup>۳</sup> Reis<sup>۴</sup> Wu<sup>۵</sup> Devkota<sup>۶</sup> Rostami<sup>۷</sup> Tien Bui<sup>۸</sup> Khan<sup>۹</sup> Xu<sup>۱۰</sup> Marjanović<sup>۱۱</sup> Xu<sup>۱۲</sup> Pang<sup>۱۳</sup> Tien Bui<sup>۱۴</sup> Yuffeng<sup>۱۵</sup> Fengxiang<sup>۱۶</sup> Li<sup>۱۷</sup> Yang<sup>۱۸</sup> Qiao

زمین لغزش یکی از فرایندهای دامنه ای حائز اهمیت در دامنه های جنوبی البرز به ویژه حوضه کن است. به دلیل نزدیکی این حوضه به شهر بزرگ تهران، جنبه گردشگری و همچنین وجود استقرارگاه ها و سکونتگاه های انسانی در این حوضه، شناسایی نقاطی که مستعد زمین لغزش هستند از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، به مقایسه ی دو مدل کمی الگوریتم ماشین های پشتیبان بردار و مدل شاخص آنتروپی جهت تهیه ی نقشه ی حساسیت زمین لغزش در حوضه کن پرداخته شده است. تشخیص میزان صحت برآورد حساسیت زمین لغزش با هر یک از مدل ها (با استفاده از سطح زیر منحنی ROC)، معیاری مفید جهت انتخاب مدل بهینه در تشخیص نواحی در معرض خطر زمین لغزش است.

### داده ها و روش کار

حوضه آبخیز کن در ناحیه کوهستانی البرز مرکزی واقع شده است. از نظر جغرافیایی در عرض ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و طول ۵۱ دقیقه و ۱۰ درجه تا ۵۱ دقیقه و ۲۳ درجه شرقی در استان تهران واقع گردیده است. این محدوده در ناحیه کوهستانی البرز مرکزی واقع شده و ارتفاعات مهم آن از شرق به غرب به ترتیب عبارتند از: -کوه فررا در شرق و جنوب شرقی، کوه بند عیش، کوه رندان در شرق، کوه شمال طالون در شمال، کوه چال ناجی در شمال غربی، کوه های بند حصار، سبلان، امامزاده عقیل و بند حصار در گستره میانی حوضه، کوه لیمنه در غرب، کوه اون دست در جنوب غرب، کوه رلهک دره در جنوب محدوده ی مورد مطالعه.

این تحقیق نتیجه ی یک پژوهش کاربردی است که در آن از روش های کتابخانه ای، بازدیدهای میدانی و مدل سازی استفاده شده است. نقشه های توپوگرافی 1:50000، نقشه ی زمین شناسی 1:100000 و تصاویر IRS سال ۲۰۱۴ منطقه، به عنوان ابزار اصلی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته اند. لغزش های رخ داده در این منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره ای، نقشه ی توپوگرافی، نقشه ی گسل های منطقه تشخیص داده شده، سپس از طریق بازدیدهای میدانی و تصاویر موجود نقاط لغزشی کنترل شدند. لایه های اطلاعاتی ژئولوژی، توپوگرافی، فاصله از گسل ها، شرایط آب و هوایی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده جهت ارزیابی خطر زمین لغزش در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. فرایند تولید و نیز مشخصات هر یک از لایه ها در ذیل عنوان شده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

شیب

شیب عمدتاً توزیع فضایی و شدت زمین لغزش را تعیین می‌کند (شافیگو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۶۹). شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع DEM ۱۲ متر در محیط نرم افزار Arc GIS 10.3 محاسبه شد. شیب با استفاده از الگوریتم باروف و مک دونالد (۱۹۹۸) محاسبه شد (خان و همکاران، ۲۰۱۸). نقشه شیب استخراج شده به ۹ طبقه شامل  $> 10$ ،  $10-20$ ،  $20-30$ ،  $30-40$ ،  $40-50$ ،  $50-60$ ،  $60-70$  و  $< 80$  کلاسه بندی شده است (شکل ۲ (۳)).

### جهت شیب

جهت شیب به دلیل تاثیر قابل توجهی که بر پوشش گیاهی و مقاومت خاک دارد، می‌تواند بر تحریک زمین لغزش تاثیر بگذارد (بشارت<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۰۳). جهت شیب با استفاده از DEM 12m در Arc GIS 10.3 برای منطقه مورد مطالعه حاسبه شده است. جهت شیب به انواع شناور، شمال (۲۲/۵-۳۳۷/۵ درجه)، شمال شرق (۲۲/۵ - ۶۷/۵ درجه)، شرق (۶۷/۵ - ۱۱۲/۵ درجه)، جنوب شرق (۱۱۲/۵ - ۱۵۷/۵ درجه)، جنوب (۱۵۷/۵ - ۲۰۲/۵ درجه)، جنوب غرب (۲۰۲/۵ - ۲۴۷/۵ درجه)، غرب (۲۴۷/۵ - ۲۹۲/۵ درجه)، و شمال غرب (۲۹۲/۵ - ۳۳۷/۵ درجه)، تقسیم شده است (شکل ۲ (۲)).

### لیتولوژی

ویژگی‌های لیتولوژیک به صورت گسترده‌ای بر خصوصیات فیزیکی همچون استحکام و نفوذپذیری مواد سطحی و زیر سطحی تاثیر می‌گذارد؛ و بنابراین بر احتمال وقوع زمین لغزش تاثیر می‌گذارد. لیتولوژی به همراه شیب، ماهیت و شدت زمین لغزش را تعیین می‌کند (خان و همکاران، ۲۰۱۸). نقشه لیتولوژی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ (۵) نشان داده شده است.

### کاربری اراضی

پوشش زمین تاثیر زیادی بر توزیع زمین لغزش دارد. اغلب مناطق مسکونی زمین لغزش‌های کمتری نسبت به مناطق بدون پوشش دارند. اراضی دارای پوشش گیاهی با سیستم‌های ریشه‌ای قوی، اثرات مکانیکی و هیدرولوژیک را ارائه می‌دهند که اغلب دامنه‌های را پایدار می‌سازد (خان و همکاران، ۲۰۱۸). کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه به ۵ طبقه تقسیم بندی شده است که شامل: شهر، باغ، مرتع متوسط، مرتع ضعیف و کشاورزی آبی می‌باشد (شکل ۲ (۷)).

### گسل

توزیع فضایی و ماهیت گسل، توزیع و شدت زمین لغزش‌های لرزه‌ای را تعیین می‌کند. نقشه خطوط گسلی منطقه با استفاده از نقشه‌ی ژئولوژی منطقه استخراج شد. فاصله تا گسل به ۶ کلاسه فاصله‌ای با ۲۰۰ متر فاصله با استفاده از نرم افزار Arc GIS 10.3 تقسیم شد (شکل ۲ (۸)).

### توپوگرافی

تغییرات ارتفاعی هر منطقه به عنوان عامل موثر در ایجاد حرکات توده‌ای محسوب می‌شود. عامل ارتفاع نقش حیاتی در تغییر فضایی شرایط هیدرولوژیک از قبیل رطوبت خاک، جریان آب‌های زیرزمینی، و ثبات شیب دارد (قاسمیان و همکاران،

<sup>۱</sup> Shafique

<sup>۲</sup> Basharat

۱۳۹۶). نقشه طبقات ارتفاعی منطقه از DEM منطقه استخراج شده و در پنج طبقه بر پایه natural breaks طبقه بندی شده است (شکل ۲ (۱)).

### شبکه جاده ای

در مناطق کوهستانی، ساختار شبکه ارتباطات شامل جاده ها و خطوط راه آهن است، که اغلب به ناپایداری دامنه‌ای و متعاقبا زمین لغزش می انجامد (شافیگو و همکاران، ۲۰۱۶: ۶۹). جهت بکارگیری شبکه جاده ها در برآورد نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش، فاصله از شبکه جاده‌ای در فواصل ۱۰۰ متر با استفاده از Arc GIS 10.3 به دست آمد (شکل ۲ (۲)).

### شبکه رودخانه ای

رودخانه ها می توانند نقش منفی را در پایداری یک دامنه بازی کنند، از طریق برش در نتیجه فرسایش و اشباع دامنه‌ها در نتیجه افزایش نفوذ آب (گوران<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). برای ارزیابی تاثیر جریان‌ها بر توزیع زمین لغزش ها، شبکه رودخانه‌ها برای منطقه مورد مطالعه از DEM ASTER با استفاده از ابزار ArcHydro محاسبه شده است (ESRI, 2017). جریان با مساحت بیش از ۲۰ کیلومتر مربع استخراج شد. فاصله از جریان ها در نرم افزار Arc GIS 10.3 به ۶ منطقه با فاصله ۲۰۰ متر تقسیم شد (شکل ۲ (۳)).

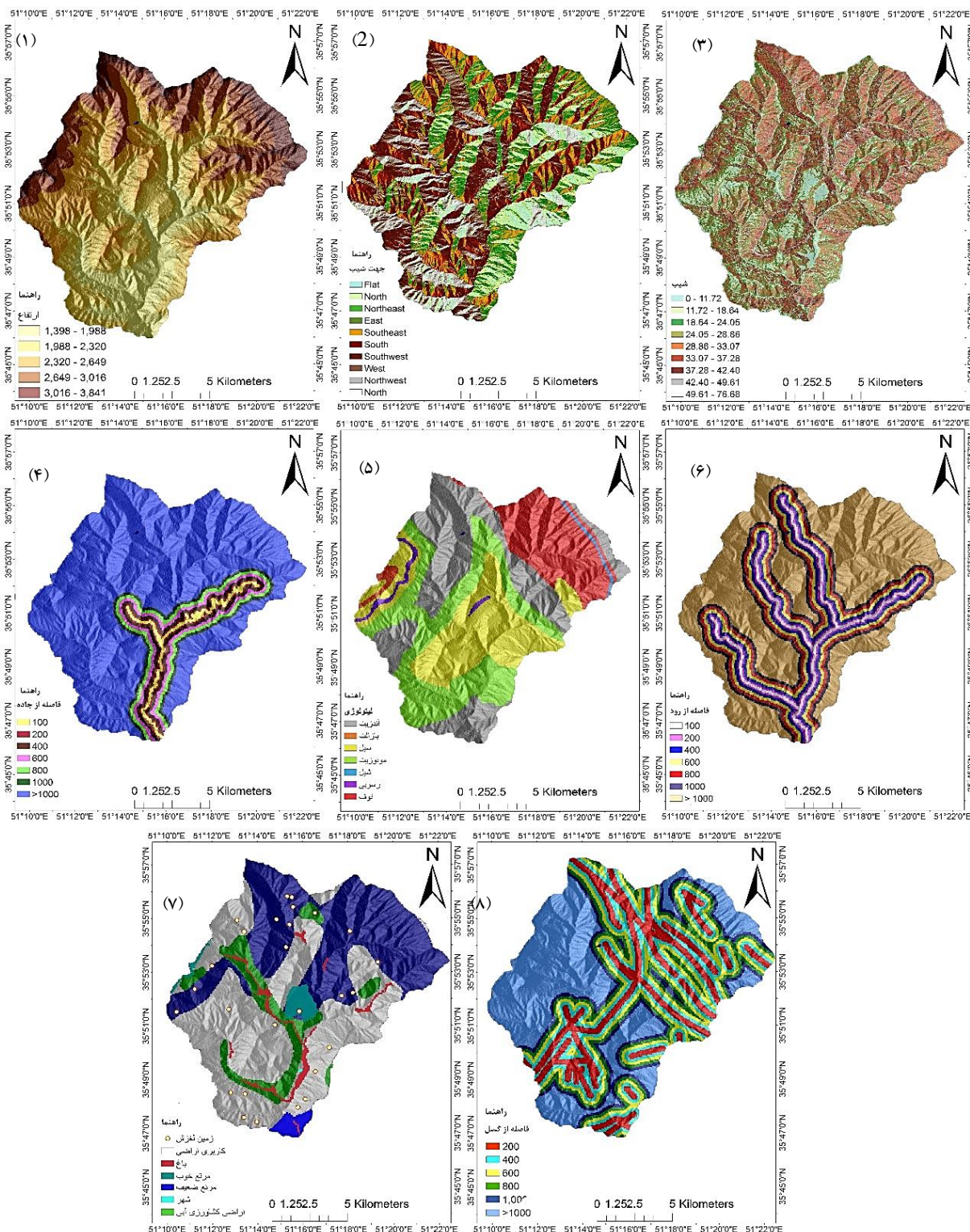
پارامترهای شرح داده شده، به عنوان ورودی هر یک از مدل ها در این تحقیق می باشند.

### روش آنتروپی

روش آنتروپی برای نخستین بار توسط شخصی به نام شنون ایجاد شده و توسط ویلسون (۱۹۷۹) مورد تجدیدنظر و اصلاح قرار گرفت. آنتروپی یک مفهوم عمده در علوم فیزیک، علوم اجتماعی و تئوری اطلاعات است، به گونه‌ای که نشان دهنده مقدار عدم اطمینان (درجه توزیع نامتعادل پدیده‌ها) موجود از محتوای مورد انتظار اطلاعاتی از یک پیام است (مقیمی و نگهبان، ۱۳۹۱). روش آنتروپی جهت برآورد حساسیت زمین لغزش در حوضه کن مورد استفاده قرار گرفته است. آنتروپی یک لغزش به تأثیر عوامل مختلف مؤثر بر وقوع این مخاطره اشاره دارد. چندین عامل مهم مؤثر به صورت جمعی، شاخص آنتروپی سیستم را فراهم می کنند. نتیجه مدل آنتروپی می تواند برای تعیین وزن شاخص‌های سیستم مورد استفاده قرار گیرد (یانگ و کیو، ۲۰۰۹: ۵۲۲).

<sup>۱</sup> Gorum





شکل ۲: نقشه عوامل مؤثر بر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه: (۱) ارتفاع، (۲) جهت شیب، (۳) شیب، (۴) فاصله از جاده، (۵) لیتولوژی، (۶) فاصله از آبراهه، (۷) کاربری اراضی، (۸) فاصله از گسل.

معادلات مورد استفاده برای تعیین وزن اعضای سیستم به صورت زیر است:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

ارزش آنتروپی مقدار  $E_j$  است که از تابع زیر تعیین می‌شود:

$$E_j = -k + \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه  $m$  تعداد زمین لغزش و  $k$  ضریب ثابتی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K = c(\ln m)^{-1} \quad \text{رابطه (۳)}$$

عدم اطمینان یا درجه انحراف هر معیار ( $d_j$ ) از کسر مقدار  $E_j$  از عدد یک به دست می‌آید:

$$d_j = E_j - 1 \quad \text{رابطه (۴)}$$

پس از محاسبه وزن کل ( $w_j$ ) با استفاده از رابطه ۵، خطر زمین لغزش منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته است؛

$$H_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه ( $H$ ) ضریب خطر رخداد زمین لغزش،  $w_j$  وزن نهایی تمامی عوامل و  $X_{ij}$  وزن هر یک از عوامل است (زونگجی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۲۰). رابطه بیان شده، بیانگر مدل ناحیه‌ای خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

### الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار

الگوریتم ماشین پشتیبان بردار بر اساس نظریه یادگیری آماری تهیه شده است. بر اساس این نظریه یادگیری آماری، می‌توان کران نرخ خطای ماشین یادگیری را برای داده‌های طبقه بندی نشده، به عنوان نرخ خطای تعمیم یافته در نظر گرفت. این کران‌ها به عنوان تابعی از مجموعه نرخ خطاهای آموزش هستند که میزان پیچیدگی طبقه بندی کننده‌ها را نشان می‌دهند (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲). این الگوریتم در سال‌های اخیر، توجه زیادی را به دلیل عملکرد خوب طبقه بندی و قابلیت تعمیم مناسب به خود جلب کرده است. بنابراین، الگوریتم SVM برای تهیه نقشه زمین لغزش و تفکیک طبقات لغزشی از یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم SVM به عنوان یکی از محبوب‌ترین روش‌ها جهت حل مشکلات رگرسیونی نتایج قابل توجهی در زمینه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش داشته است (قاسمیان و همکاران، ۱۳۹۶؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۰؛ پورقاسمی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). دو ایده اصلی زمینه مدل سازی SVM برای مشخص کردن نوع مشکلات آماری وجود داشته است. اولین آن یک فراطرح مجزای خطی بهینه است که الگوهای داده‌های مجزا هستند. دومین ایده استفاده از توابع هسته ای برای تبدیل الگوهای داده‌های غیرخطی اصلی به فرمتی است که

<sup>۱</sup> zongji

<sup>۲</sup> Pourghasemi



خطی مجزا در یک فضای ویژه ابعاد بالا می باشد. جزییات توضیحی درباره مدلسازی SVM در این پژوهش به صورت زیر می باشد:

اگر  $X_i$  مجموعه ای از سلول های آموزشی به صورت رابطه (۶) باشد:

$$x_i = (i = 1.2 \dots n) \quad \text{رابطه (۶)}$$

سلول های آموزشی شامل دو کلاس  $Y_i = \pm$  (زمین لغزش و عدم وقوع زمین لغزش) بوده که به وسیله شکاف حداکثری آن ها مشخص می شود. این معادله از نظر ریاضی به صورت رابطه (۷) بیان می گردد:

$$1/2 = \|w^2\| \quad \text{رابطه (۷)}$$

که منوط به محدود کردن رابطه (۸) است:

$$Y_i = ((W \cdot X_i) + b) \geq 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

که  $\|w^2\|$  قاعده ای از فراترحد نرمال بوده که ۱ پایه عددی بوده و صفر مشخص کننده عمل تولید عددی است و ارزش آن با استفاده از چند ضریبی لاگرانژیان محاسبه می شود که عملکرد آن به صورت زیر تعریف شود:

$$L = \frac{1}{2} \|w^2\| - \sum_{i=1}^n Y_i ((W \cdot X_i) + b) - 1 \quad \text{رابطه (۹)}$$

که  $Y_i$  چند ضریبی لاگرانژیان است و می تواند صفر یا غیر صفر باشد و فقط مجموعه داده هایی که ضرایب آن ها غیر صفر است در معادله نهایی وارد می شوند و این مجموعه داده ها به عنوان بردارهای پشتیبان شناخته می شوند. توابع مختلفی همچون تابع کرنل و توابع هسته ای در مدل SVM مورد استفاده قرار می گیرند. انتخاب توابع مختلف کرنل در مدل SVM خیلی مهم است اگر چه توابع هسته ای  $K(X_i, X_j)$  زیادی قبلا پیشنهاد و استفاده شده اند. تنها برخی از آن ها برای کار در طیف گسترده ای از کاربردها مفید شناخته می شوند. آن هایی که این مهارت ها را نشان می دهند عبارتند از:

$$K(X_j, X_i) = X_j^T \cdot X_i \quad \text{تابع خطی:}$$

$$K(X_j, X_i) = (\gamma \cdot X_j^T + r) \cdot X_i \quad \gamma > 0 \quad \text{تابع چند جمله ای:}$$

$$K(X_j, X_i) = e^{-\gamma(X_i - X_j)^2} \quad \gamma > 0 \quad \text{تابع پایه شعاعی:}$$

$$\tanh(\gamma \cdot X_i^T \cdot X_j + r) \quad \text{تابع حلقوی:}$$

که  $d$  و  $y$ ،  $r$  پارامترهای توابع هسته ای هستند و به صورت دستی وارد می شوند (شولکوف<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۲۱۰). در تحقیق حاضر تابع حلقوی از مدل پشتیبان بردار مورد استفاده قرار گرفت (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱). ۸ عامل جهت تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است که مقادیر هر یک از فاکتورها با استفاده از الگوریتم SVM محاسبه شدند. مقادیر هر یک از پارامترها در موقعیت نقاط لغزشی استخراج شده و با توجه به تاثیر هر یک، وزن هر فاکتور در محیط نرم افزار WELA محاسبه شده است. نقشه های وزنی طیفی از ۱ تا صفر را پوشش می دهند. لایه های مربوط به هر یک از فاکتورها با هم جمع شده و از تلفیق آن ها نقشه زمین لغزش منطقه مورد مطالعه تهیه شده است. الگوریتم SVM میزان حساسیت را بین عدد ۰ تا ۱ نمایش می دهد. هر چه میزان این عدد به یک نزدیکتر باشد، حساسیت زیادی

<sup>۱</sup> Scholkoph

به وقوع زمین لغزش وجود دارد. نقشه خروجی حاصل از مدل SVM در پنج طبقه (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد) ترسیم شده است.

مرحله‌ی بعدی اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده است. کیفیت حساسیت یک مدل در برآورد ریسک زمین لغزش معمولاً با استفاده از اطلاعات مستقلی که برای ساخت مدل در دسترس است برآورد می‌شود. در این مقاله، برای اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده از منحنی ROC استفاده شده است. منحنی ROC میزان دقت مدل را به صورت کمی نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی (ROC(AUG) بیانگر مقدار پیش بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین لغزش) و عدم تخمین آن است. در تهیه نقشه‌های زمین لغزش با استفاده از مدل‌های قید شده از ۷۰ درصد نقاط لغزشی و جهت اعتبارسنجی از ۳۰ درصد نقاط لغزشی استفاده شده است. مقادیر AUG از ۰/۵-۱ است و ایده آل ترین نتیجه صحت سنجی زمانی است که سطح زیر منحنی برابر با یک باشد. همبستگی کیفی - کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین بدین صورت است: (۱-۰/۹، عالی؛ ۰/۸-۰/۹، متوسط؛ ۰/۷-۰/۶، خوب و ۰/۶-۰/۵، ضعیف) (ننویتسکی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲: ۳۹۴).

#### یافته‌ها

در اجرای مدل آنتروپی، پس از بررسی ویژگی‌های مختلف منطقه، و شناخت عوامل مؤثر در زمین لغزش‌های ایجاد شده، به کلاس‌های هر یک از عوامل بر اساس نظرات کارشناسی امتیازاتی تعلق گرفته است. به این ترتیب لایه‌های رستری امتیاز دهی شده، به عنوان لایه‌های اصلی در تشکیل ماتریس مدل آنتروپی مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱). در این پژوهش از مقیاس دو قطبی برای تبدیل مقادیر کیفی به کمی استفاده شده است. در مقیاس دو قطبی صفر کمترین ارزش ممکن و ده حداکثر ارزش ممکن از شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Negnevitsky

جدول ۱: ماتریس عوامل ۸ گانه موثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

شماره لغزش	شیب (درجه)	جهت شیب	ارتفاع (متر)	فاصله از جاده (متر)	فاصله از رود (متر)	نوع لیتولوژی	کاربری اراضی	فاصله از گسل (متر)
۱	۱۲-۳۰	N	۱۹۸۸	>۱۰۰۰	۲۰۰	توف	مرتع ضعیف	۱۸۰
۲	۵-۱۲	SE	۲۰۰۰	>۱۰۰۰	۱۱۵۰	توف	مرتع ضعیف	۴۵۰
۳	۱۲-۳۰	E	۲۲۲۵	>۱۰۰۰	۸۵۰	توف	مرتع ضعیف	۱۸۰
۴	۱۲-۳۰	S	۲۷۵۰	>۱۰۰۰	۸۲۴	توف	مرتع ضعیف	۱۵۰
۵	۱۲-۳۰	SW	۲۰۱۰	>۱۰۰۰	۱۷۸۰	توف	کشاورزی آبی	۳۹۰
۶	۱۲-۳۰	SW	۲۱۵۰	>۱۰۰۰	۲۰۱۲	آذرین آرسویی	مرتع ضعیف	۶۱۰
۷	۵-۱۲	W	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۱۳۸۰	آذرین آرسویی	مرتع ضعیف	۱۸۰
۸	۱۲-۳۰	SW	۲۳۰۰	۱۰۰	۱۱۰۰	توف	مرتع ضعیف	۵۹۰
۹	۵-۱۲	W	۲۲۸۹	۱۰۰۰	۱۲۸۰	آندزیت	مرتع متوسط	۴۳۰
۱۰	۵-۱۲	W	۱۹۰۰	۶۰۰	۹۵۰	آندزیت	مرتع خوب	۳۹۶
۱۱	۵-۱۲	NW	۱۸۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	توف	مرتع متوسط	۲۱۰
۱۲	۱۲-۳۰	W	۱۷۵۰	۱۰۰۰	۷۵۰	تیل	مرتع متوسط	۱۱۵۰
۱۳	۱۲-۳۰	S	۱۸۰۰	۸۰۰	۶۲۸	توف	مرتع متوسط	۸۰۰
۱۴	۱۲-۳۰	S	۱۹۸۸	>۱۰۰۰	۱۳۸۰	توف	مرتع متوسط	۹۲۰
۱۵	۱۲-۳۰	W	۱۸۵۰	>۱۰۰۰	۹۲۰	تیل	مرتع متوسط	۹۵۰
۱۶	۱۲-۳۰	NE	۱۷۶۰	>۱۰۰۰	۱۴۰۰	تیل	مرتع متوسط	۱۴۰۰
۱۷	۵-۱۲	SE	۲۱۵۰	۱۰۰۰	۶۰۰	آندزیت	مرتع متوسط	۲۰۰
۱۸	-۵	E	۲۴۵۰	>۱۰۰۰	۱۳۲۰	تیل	مرتع متوسط	۹۰۰
۱۹	۱۲-۳۰	SW	۲۶۴۰	>۱۰۰۰	۱۳۶۰	بازالت	مرتع ضعیف	۳۱۰۰
۲۰	۱۲-۳۰	S	۲۴۲۰	>۱۰۰۰	۱۱۴۰	تیل	مرتع متوسط	۱۲۰۰
۲۱	۳۰-۶۰	NE	۲۸۰۰	>۱۰۰۰	۱۲۰۰	بازالت	مرتع ضعیف	۳۲۰۰
۲۲	۵-۱۲	NE	۲۸۵۰	>۱۰۰۰	۱۵۸۰	آندزیت	مرتع ضعیف	۳۲۰۰
۲۳	۱۲-۳۰	SE	۱۹۸۸	>۱۰۰۰	۱۵۰	توف	مرتع ضعیف	۲۸۰۰
۲۴	۱۲-۳۰	E	۱۸۰۰	>۱۰۰۰	۵۶۰	تیل	مرتع متوسط	۲۷۵۰
۲۵	۳۰-۶۰	SW	۱۸۹۰	>۱۰۰۰	۷۲۰	توف	مرتع ضعیف	۳۸۰
۲۶	۱۲-۳۰	E	۱۹۰۰	۴۰۰	۱۱۰۰	تیل	مرتع ضعیف	۷۹۰

پس از تبدیل معیارها به عدد صحیح و تشکیل ماتریس اولیه مقدار  $p_{ij}$  با استفاده از رابطه (۱) و مقدار  $(k)$  با استفاده از رابطه دو محاسبه شده است. با استفاده از رابطه چهار، وزن هر یک از معیارهای استفاده شده در ماتریس آنتروپی زمین لغزش  $(wi)$  که شامل فاصله از گسل  $(۰/۷۴)$ ، شیب  $(۰/۵۴)$ ، ارتفاع  $(۰/۰۸۲)$ ، فاصله از جاده  $(۰/۰۴۸)$ ، کاربری اراضی  $(۰/۱۶)$ ، جهت شیب  $(۰/۰۶۶)$  و فاصله از رود  $(۰/۵۱)$ ، لیتولوژی  $(۰/۰۰۶۴)$  می‌باشد، حاصل شده است. در این رابطه،  $E$  توزیع احتمال  $p_i$ ؛ بر اساس سازوکار آماری محاسبه شده است و مقدار آن در صورت تساوی  $p_i$  ها با یکدیگر، بیشترین مقدار ممکن خواهد بود. سپس عدم اطمینان یا درجه انحراف هر معیار  $d_j$  از کسر  $E_j$  از عدد یک به دست آمده است (جدول ۲).

جدول ۲: مقادیر شاخص‌های محاسبه شده برای عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش

فاصله از گسل	کاربری اراضی	لیتولوژی	فاصله از رود	فاصله از جاده	ارتفاع	جهت شیب	شیب	شاخص‌های محاسبه شده
۰/۹۹۸	۰/۹۸۱	۰/۹۳۵	۰/۹۶۸	۰/۹۲۱	۰/۹۴۳	۰/۹۸۸	۰/۹۹۶	Ej
۰/۰۰۲	۰/۰۳۹	۰/۰۶۵	۰/۰۳۲	۰/۰۷	۰/۰۵۷	۰/۰۱۲	۰/۰۵۷	Dj
۰/۷۴	۰/۱۶	۰/۰۰۶۴	۰/۵۱	۰/۰۴۸	۰/۰۸۲	۰/۰۶۶	۰/۵۴	Wj

در نهایت، مدل ناحیه‌ای خطر زمین لغزش در محدوده مورد مطالعه با استفاده از ضرایب به دست آورده شده در رابطه (۶) به شکل زیر محاسبه شده است:

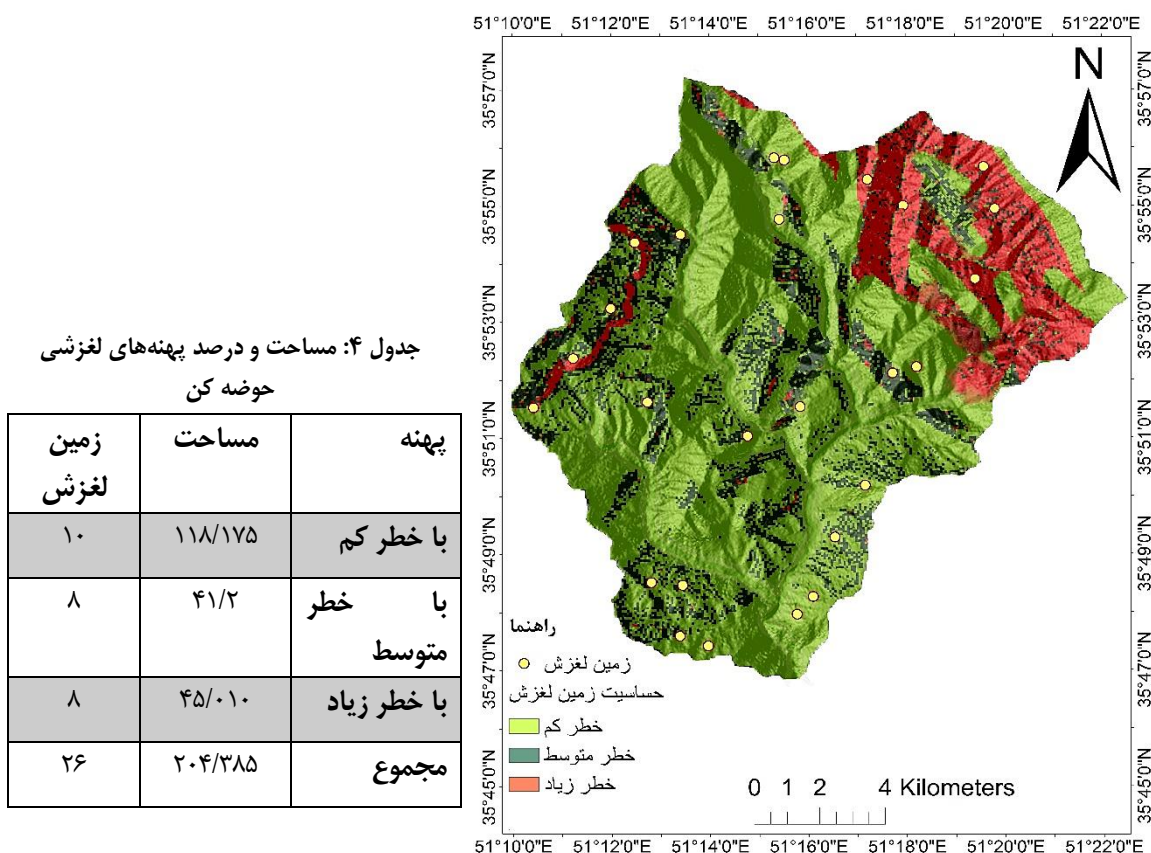
$$H = (S \times 0/54) + (Df \times 0/74) + (E \times 0/082) + (Dr \times 0/51) + (Dri \times 0/51) + (A \times 0/066) + (lu \times 0/16) + (Lt \times 0/0064)$$

با توجه به نتایج مدل آنتروپی، میزان تأثیر هر یک از عوامل به ترتیب زیر می‌باشد:

جدول ۳: میزان تأثیر عوامل مؤثر بر زمین لغزش منطقه دالاهو

فاصله از گسل	کاربری اراضی	لیتولوژی	فاصله از رود	فاصله از جاده	ارتفاع	جهت شیب	شیب	عوامل مؤثر
۲۰/۸	۱۴/۲۵	۱۰/۱	۱۶/۲	۶/۹۰	۱۰/۵۶	۷/۴۵	۱۸/۵۹	درصد تأثیر

بیشترین تأثیر بر وقوع زمین لغزش به ترتیب مربوط به عوامل فاصله از گسل (۲۰/۸) و شیب (۱۸/۵۹) است. پارامترهای ارتفاع (۱۰/۵۶) و لیتولوژی (۱۰/۱) دارای تأثیر گذاری مشابه هستند که این امر بدین دلیل است که زمین لغزش‌ها در طبقات ارتفاعی و نیز کلاس‌های لیتولوژیک مشابه قرار گرفته‌اند. بر اساس انطباق موقعیت نقاط لغزشی با نقشه‌ی پهنه‌بندی حاصل از مدل آنتروپی، تعداد ۱۰ زمین لغزش در پهنه‌ی با خطر کم، ۸ زمین لغزش در پهنه‌ی با خطر متوسط و ۸ زمین لغزش نیز در پهنه‌ی با خطر زیاد قرار گرفته‌اند. با توجه به نقشه‌ی نهایی خطر زمین لغزش، سمت شمال شرقی و محدوده‌هایی با مساحت پراکنده در بخش غربی و نیز در سطح منطقه در محدوده خطر زیاد قرار دارد. منطقه پرخطر شیب‌های ۱۲ تا ۳۰ درجه را با ارتفاع متوسط ۲۲۰۰ متر، فاصله‌ی کمتر از ۴۰۰ متر از گسل‌ها، بیشتر از ۱۰۰۰ متر از جاده و ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از رودخانه را در بر می‌گیرد. کاربری اراضی این پهنه مرتع ضعیف است. منطقه خطر متوسط، ۴۵/۰۱۰ مساحت منطقه را در بر می‌گیرد و در سطح حوضه پراکنده است و طیف متنوعی از مشخصه‌های پارامترهای تأثیر گذار بر لغزش را در بر می‌گیرد. محدوده با ارتفاع کم نیز بیشترین وسعت منطقه‌ی مورد مطالعه را به خود اختصاص می‌دهد (۱۱۸/۱۷۵) (شکل ۳، جدول ۴).



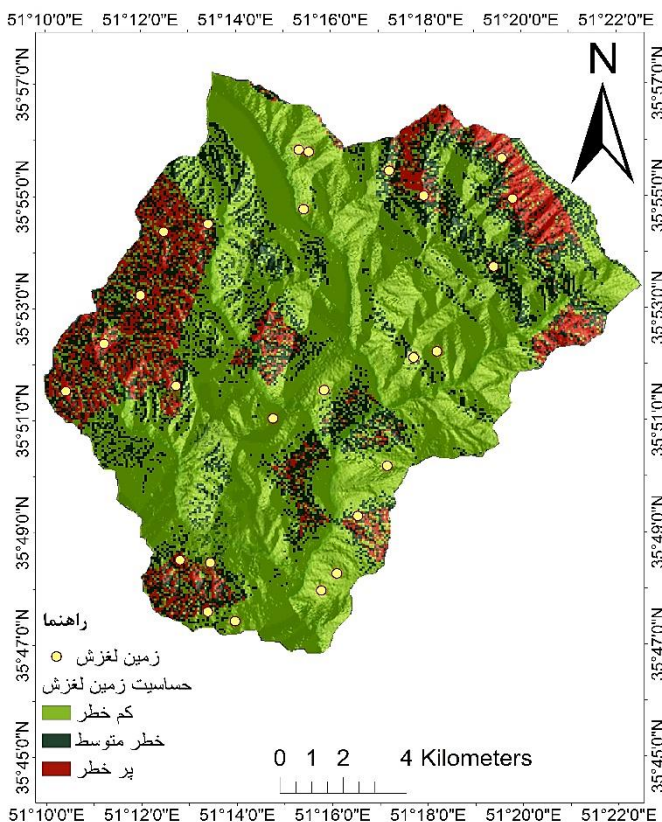
شکل ۳: نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه کن بر اساس مدل اتروپی

روش دیگر جهت برآورد حساسیت زمین لغزش حوضه کن، الگوریتم SVM-SIGMOID است. نقاط زمین لغزش به الگوریتم SVM آموزش داده شده‌اند. مقادیر هر یک از پارامترها بر اساس الگوریتم SVM-SIGMOID محاسبه شده و سپس بر اساس موقعیت نواحی دارای زمین لغزش و نیز فاقد زمین لغزش، مقدار هر یک از پارامترها استخراج شده است. وزن هر یک از عوامل با استفاده از نرم افزار WEKA محاسبه شد. وزن پارامترهای تأثیر گذار بر زمین لغزش طیفی از صفر تا ۱ را به خود اختصاص می دهد. هر چقدر مقدار این عدد به ۱ نزدیک تر باشد بیانگر اهمیت بیشتر فاکتور در حساسیت زمین لغزش است. وزن هر یک از عوامل در لایه های مربوطه اعمال شده و در محیط Arc GIS 10.3 با هم تلفیق شده اند و بدین ترتیب نقشه ی نهایی حساسیت زمین لغزش بر اساس الگوریتم SVM-SIGMOID تهیه شده است. نقشه ی حاصل از الگوریتم SVM-SIGMOID طیفی از صفر تا ۱ را به خود اختصاص می دهد. نقشه ی LSI به ۳ کلاس حاوی پهنه های کم خطر، با خطر متوسط و پر خطر تقسیم شده است. نتایج خروجی حاصل از اجرای تابع حلقوی نیز نشان دهنده حساسیت بیشتر قسمت غربی و شمال غربی و نیز بخش کوچکی از مرکز حوضه می باشد (شکل ۴). در بخش جنوب غربی نیز که پایاب حوضه محسوب می شود بخشی از پهنه ی با خطر زیاد مشاهده می شود. طبق این الگوریتم فاصله از گسل و شیب در وهله اول دارای تأثیر بیشتری بر حساسیت لغزش حوضه هستند. در نقشه حاصل از الگوریتم SVM-SIGMOID عامل کاربری اراضی و لیتولوژی نیز دارای تأثیر قابل توجهی بر حساسیت پذیری لغزش هستند.



جدول ۵: مساحت و درصد پهنه‌های لغزشی حوضه کن

پهنه	مساحت	زمین لغزش
با خطر زیاد	۵۶/۲	۱۳
با خطر متوسط	۳۸/۷	۵
با خطر کم	۱۰۹/۴۸۵	۸
مجموع	۲۰۴/۳۸۵	۲۶



شکل ۴: نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه کن بر اساس الگوریتم SVM-SIGMOID

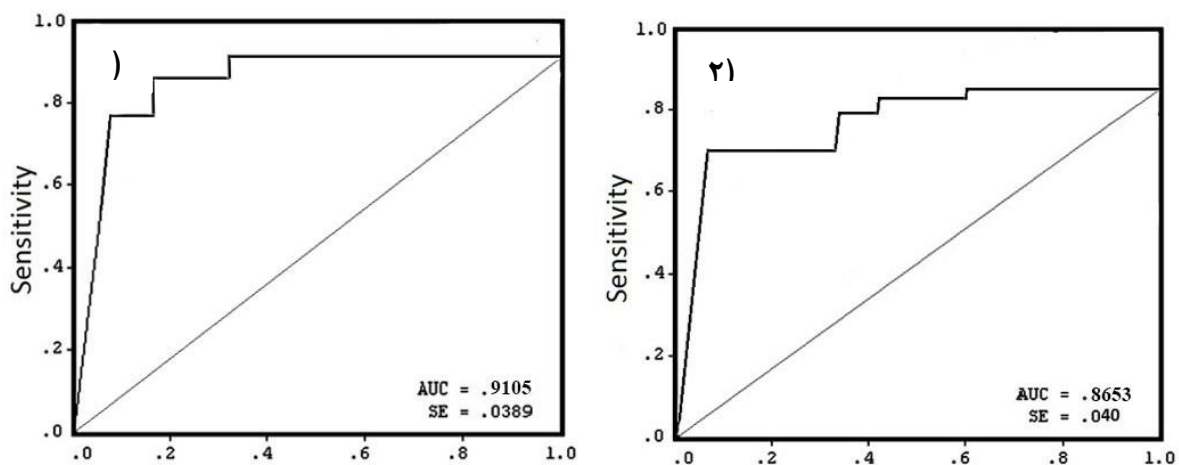
### اعتبار سنجی مدل‌ها

یک استراتژی مهم در مدل‌های پیش‌بینی اعتبارسنجی نتایج است که می‌تواند تفسیر معناداری نتایج را ارائه دهد (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳). برای اعمال این اعتبارسنجی موقعیت زمین لغزش‌های موجود را با نقشه‌های حساسیت زمین لغزش مقایسه نمودیم و حساسیت زمین لغزش با داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی با استفاده از شاخص‌های نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. در حال حاضر قابلیت پیش‌بینی حساسیت زمین لغزش‌های حوضه کن با استفاده از سطح زیر منحنی مورد بررسی قرار گرفت و از مقدار AUC، درصد نرخ موفقیت و قابلیت پیش‌بینی هر دو مجموعه داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی به دست آمد. هنگامی که از داده‌های آموزشی و یا تعلیمی استفاده می‌شود منحنی نرخ موفقیت نام دارد و هنگامی که از داده‌های صحت‌سنجی استفاده شود، منحنی نرخ پیش‌بینی اطلاق می‌گردد (شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۷). مقادیر AUC بین صفر تا ۱ است و ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. ارزیابی صحت نتایج حاصل از مدل‌ها، با استفاده از منحنی ROC (شکل ۵) نشان داده که در نقشه پهنه‌بندی با استفاده از مدل آنتروپی، سطح زیر منحنی ۰/۸۶ و در مدل SVM-SIGMOID ۰/۹۱ است. پس بر این اساس، استفاده از مدل SVM-SIGMOID در تهیه نقشه LSM از قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار است.

### نتیجه‌گیری

شناسایی عوامل موثر در وقوع زمین لغزش‌های موجود در یک منطقه و پهنه‌بندی خطر آن یکی از فاکتورهای اساسی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و انتخاب مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین گزینه موثر می‌باشد. ارزیابی حساسیت

زمین لغزش یک فرآیند پیچیده و چند مرحله ای است که توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. تا به امروز روش‌های مختلفی جهت برآورد حساسیت زمین لغزش‌ها و عملکرد آن‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های مختلف آماری مطرح شده است. در این تحقیق مدل آنتروپی، و الگوریتم SVM-SIGMOID جهت ارزیابی حساسیت زمین لغزش‌ها و عملکرد آن‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های مختلف آماری مطرح شده است. این پژوهش با استفاده از شش ۸ فاکتور جهت شیب، شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده انجام شده است. نتایج بررسی عوامل اثرگذار بر حساسیت زمین لغزش حاکی از این است که پارامترهای فاصله از گسل و شیب در دو مدل آنتروپی و الگوریتم SVM-SIGMOID تاثیر بیشتری نسبت به سایر عوامل بر زمین لغزش داشته‌اند.



شکل ۵: منحنی ROC الگوریتم SVM-SIGMOID (۱) و مدل شاخص آنتروپی (۲)

در نقشه LSM حاصل از هر دو مدل مورد بررسی در این تحقیق بیشترین مساحت را پهنه‌های با خطر کم و متوسط و کمترین مساحت را نیز پهنه با خطر زیاد در بر گرفته است. در نقشه LSM حاصل از مدل آنتروپی پهنه‌ی با خطر زیاد (۴۵/۱۰) در بخش شمال شرقی قرار گرفته است و نیز بخش‌هایی به صورت پراکنده از این پهنه لغزشی در سراسر حوضه دیده می‌شود. پهنه با خطر متوسط (با مساحت ۴۱/۲ کیلومتر مربع) در بخش‌های میانی حوضه و نیز شمال غربی وجود دارند این پهنه‌ها بیشتر منطبق بر فاصله‌های ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر از مسیرهای آبراهه و گسل‌ها هستند. در نقشه حساسیت زمین لغزش حاصل از الگوریتم SVM-SIGMOID بخش گسترده‌ای از پهنه‌ی با خطر زیاد (۵۶/۲ کیلومتر مربع) در غرب حوضه، شمال شرقی و نیز بخش‌هایی از پایاب حوضه در جنوب را در بر گرفته است. بیشترین تعداد لغزش‌ها در پهنه‌ی با خطر زیاد قرار دارد (۱۲ زمین لغزش). پهنه‌ی با خطر متوسط کمترین مساحت را در بر گرفته (۳۸/۷ کیلومتر مربع) و به صورت پراکنده در سراسر حوضه و کمترین تعداد لغزش‌ها (۵ زمین لغزش) نیز در این پهنه قرار گرفته است. همچون خروجی حاصل از مدل شاخص آنتروپی، بیشترین وسعت منطقه منطبق بر پهنه‌ی کم خطر با مساحت ۱۰۹/۴۸۵ کیلومتر مربع است. بر اساس نتایج حاصل از اعتبارسنجی نقشه‌های حاصل از مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق (با استفاده از ۳۰٪ زمین لغزش‌ها)، الگوریتم SVM-SIGMOID قابلیت اعتماد بالاتری در ارزیابی و ارائه نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش دارد. نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش ارائه شده می‌تواند جهت‌گیری اقدامات مدیریتی و تصمیم‌گیری مطلوب در برنامه‌ریزی کاربری اراضی، شناسایی نقاط خطر و پیش‌گیری از وقوع خسارات مرتبط با مخاطره‌ی زمین لغزش مفید واقع شود.

## منابع

- شکاری بادی. علی، معتمدی راد. محمد، محمدنیا. ملیحه، ۱۳۹۴، تلفیق مدل *ANP* و شاخص آنتروپی شانون در برآورد عوامل موثر در وقوع و پهنه بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه فاروب روان نیشابور)، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال ششم، شماره ۲۲، صص: ۸۹-۱۰۳.
- شیرزادی. عطالله، سلیمانی. کریم، حبیب نژاد. محمود، کاویان. عطالله، چپی. کامران، ۱۳۹۶، معرفی یک مدل جدید ترکیبی الگوریتم مینا به منظور پیش بینی حساسیت زمین لغزش های سطحی اطراف شهر بیجار، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۶، صص: ۲۲۵-۲۴۶.
- صدوق ونینی. حسن، ثروتی. محمد رضا، نصرتی. کاظم، اسدی. میترا، قربانی. صدیق، ۱۳۹۴، پهنه بندی زمین لغزش در منطقه ی کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات، فصلنامه دانش مخاطرات، دوره ۲، شماره ۱، صص: ۱۰۵-۱۱۶.
- قاسمیان، بهاره، عابدینی، موسی، روستایی، شهرام، ۱۳۹۶، ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره ۳، صص: ۱۵-۳۶.
- محمد خان. شیرین، ویسی. عبدالکریم، باقری. کیوان، پتانسیل سنجی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی، مطالعه موردی: (منطقه کوهستانی شیرپناه در جنوب غرب استان کرمانشاه)، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، سال یازدهم، شماره ۴۴، صص: ۸۹-۱۰۲.
- مقیمی، ابراهیم؛ سجاد باقری و طاهر صفرراد. ۱۳۹۱. پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاقدیس نثار زاگرس شمال غربی). پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۷۹: ۹۰-۷۷.
- یمانی، مجتبی، احمدآبادی، علی، زارع، غلام رضا، ۱۳۹۱، به کار گیری الگوریتم ماشین های پشتیبان بردار در پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز درکه)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سوم، صص ۱۲۵-۱۴۲.
- Basharat, M., Rohn, J., Baig, M.S., Khan, M.R., 2014. Spatial distribution analysis of mass movements triggered by the 2005 Kashmir earthquake in the Northeast Himalayas of Pakistan. *Geom* 206, 203–214.
- Basu. Tirthankar, Pal. Swades, 2019, RS-GIS based morphometrical and geological multi- criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal, India, *Advances in Space Research, Issue 3*: 1253-1269.
- Bera. Somnath, Guru. Balamurugan, V. Ramesh, 2019, Evaluation of landslide susceptibility models: a comparative study on the part of Western Ghat Region, India, *Remote Sensing Applications: Society and Environment, PII: S2352-9385(17)30309-9, p:39-52*, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.010>.
- Broeckx. Jente, Vanmarcke. Matthias, Duchateau. Rica, Poesen. Jean, 2018, A data-based landslide susceptibility map of Africa, *Earth-Science Reviews, October 2018*: 102-121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.002>.
- Chauhan, S., Sharma, M., Arora, M.K., 2010. Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides* 7 (4), 411–423.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., Paudyal, P., 2008. Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology* 102 (3–4), 496510.
- Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Dhital, M.R., Althuwaynee, O.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. *Nat. Hazards* 65 (1), 135–165.
- ESRI. (2017). "Arc Hydro Overview." Retrieved 15 September 2017, from <http://resources.arcgis.com/en/communities/hydro/01vn000000s000000.htm>.
  - Faraji Sabokbar, H., Shadman Roodposhti, M., Tazik, E., 2014. Landslide susceptibility mapping using geographically-weighted principal component analysis. *Geomorphology* 226, 15–24.
  - Gorum, T., Fan, X., van Westen, C., Huang, R., Xu, Q., Tang, C., Wang, G., 2011. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology* 133 (3–4), 152–167.
  - H. Khan, M. Shafique, M. A. Khan et al., 2018, Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.004>.
  - Ilija, I., Tsangaratos, P., 2016. Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map. *Landslides* 13 (2), 379–397.
  - Kamp, U., Growley, B.J., Khattak, G.A., Owen, L.A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology* 101 (4), 631–642.
  - Katz. Oded, Morgan. Julia K, Aharonov. Einat, Dugan. Brandon, 2018, Controls on the size and geometry of landslides: Insights from discrete element numerical simulations, *Geomorphology* 220 (2014) 104–113, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.021>.
  - Khan. H, Shafique. M, Khan. A, Mian. A. Bacha, Safeer U. Shah, Chiara. Calligaris, 2018, Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 10 December 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.004>.
  - Lee, S., Talib, J.A., 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environ. Geol.* 47 (7), 982–990.
  - Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Eng. Geol.* 97 (3–4), 171–191.
  - Negnevitsky, M. 2002. *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Addison Wesley/Pearson Education, Harlow, England, p: 394.
  - Peng Ling, Ruiqing Niu Bo Huang, Xueling Wua, Yannan Zhao, Runqing Ye, 2014. Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China. *Geomorphology* 204 287–301.
  - Pourghasemi.H. R. Moradi H. R.. Fatemi Aghda, S. M B. Gokceoglu Pradhan .2013. GISbased landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arab J Geosci*, DOI 10.1007/s12517-012-0825-
  - Rostami, Z.A., Al-modaresi, S.A., Fathizad, H., Faramarzi, M., 2016. Landslide susceptibility mapping by using fuzzy logic: a case study of Cham-gardalan catchment, Ilam, Iran. *Arab. J. Geosci.* 9 (17): 685- 6۹5.
  - Scholkoph, B., Smola, A.J., Williamson, R.C., Bartlett, P.L., 2000. New support vectoralgorithms. *Neural Computation* 12, 1207–1245
  - Shafique, M., van der Meijde, M., Khan, M.A., 2016. A review of the 2005 Kashmir earthquake-induced landslides; from a remote sensing prospective. *J. Asian Earth Sci.* 118, 68–80
  - Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B., Revhaug, I., 2016. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the

- efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. Landslides 13 (2), 361–378*
- Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., Jebur, M.N., Tehrany, M.S., 2014. Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. *CATENA* 118, 124–135.
  - Wang, Q., Li, W., 2017. A GIS-based comparative evaluation of analytical hierarchy process and frequency ratio models for landslide susceptibility mapping. *Phys. Geogr.* 38 (4), 318–337.
  - Wu, Y., Li, W., Wang, Q., Liu, Q., Yang, D., Xing, M., Pei, Y., Yan, S., 2016. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. *Arab. J. Geosci.* 9 (2), 1–16.
  - Xu C, XiweiXu a,n, FuchuDai b, ArunK. Saraf, 2012. Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008Wenchuan earthquake in China. *Computers & Geosciences* 46, 317–329.
  - Yang, Z; J. Oiao. 2009. Entropy- Based Hazard Degree Assessment for Typical landslides in the three gorges area, China. *Environmental science and engineering*, 15 may 2009: 519-529. DOI: 10.1007/978-3-642-00132-1\_25
  - Yang, Z; J. Oiao. 2009. Entropy- Based Hazard Degree Assessment for Typical landslides in the three gorges area, China. *Environmental science and engineering*, 15 may 2009: 519-529. DOI: 10.1007/978-3-642-00132-1\_25.
  - Yufeng, S; J. Fengxiang. 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
  - Zongji, Y. 2010. Regional Landslide Zonation Based on Entropy Method in Three Gorges Area, China. 2010. *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, (FSKD 2010)*.