

اولویت‌بندی عوامل موثر و پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های حداکثر آنتروپی و دمپسترشفر در حوضه دو آب صمصامی چهارمحال و بختیاری

- ❖ کورش شیرانی*؛ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
- ❖ رضا نادری‌سامانی؛ کارشناس ارشد مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

چکیده

مدل‌سازی و پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش‌ها در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی محیطی به منظور جلوگیری از تخریب عرصه‌های منابع طبیعی خصوصاً در نواحی کوهستانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این پژوهش اولویت‌بندی عوامل موثر، پهنه‌بندی و ارزیابی حساسیت نسبت به رخداد زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های آماری احتمالاتی دو متغیره حداکثر آنتروپی و دمپسترشفر در حوزه آبخیز دو آب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد. بدین منظور پس از شناسایی، تهیه و آماده‌سازی نقشه ۱۵ عامل موثر بر رخداد زمین‌لغزش به عنوان متغیرهای مستقل و نقشه پراکنش زمین‌لغزش به عنوان متغیر وابسته با استفاده از شاخص نسبت فراوانی (FR) و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در محیط ArcGIS®10.8 اقدام به وزن‌دهی یا کمی کردن آنها گردید. داده‌های پراکنش زمین‌لغزش به دو دسته داده آموزشی و آزمایشی با نسبت ۷۰ و ۳۰ درصد به ترتیب به منظور اجرا و اعتبارسنجی بصورت تصادفی تقسیم شدند. با استفاده از ۱۵ عامل موثر و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها مدل‌های حداکثر آنتروپی و دمپسترشفر اجرا و نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین‌لغزش تهیه و هر کدام به پنج رده حساسیت از خیلی کم تا خیلی زیاد تقسیم شدند. به منظور ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌ها به ترتیب از نمودار شاخص‌های نسبت فراوانی-سطح سلول هسته (FR&SCAI) و سطح زیر منحنی ویژگی عملکرد گیرنده (AUC-ROC) استفاده شد. با توجه به نتایج اجرای مدل حداکثر آنتروپی، عوامل بارش سالیانه، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده و آبراهه، به ترتیب بیش‌ترین اهمیت را در رخداد زمین‌لغزش‌ها دارند. در هر دو مدل، بیش از ۵۰ درصد زمین‌لغزش‌ها در رده‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد رخ داده‌اند. نهایتاً نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد مدل دمپسترشفر با شاخص AUC-ROC معادل ۰/۹۵ و دقت طبقه‌بندی با شاخص FR&SCAI بیش‌تر، کارآمدی و مطلوبیت بیش‌تری برای پهنه‌بندی، مدل‌سازی و پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه دارا می‌باشد.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی، حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر، دو آب صمصامی، زمین‌لغزش

۱. مقدمه

زمین لغزش‌ها از جمله رخداد‌های طبیعی هستند که به عنوان عوامل تخریب سرزمین و عرصه‌های منابع طبیعی محسوب شده و آسیب‌های خطرناکی از نظر مالی و جانی ایجاد می‌کنند. در دنیا همه ساله زمین لغزش‌ها و ناپایداری‌های دامنه‌ای اغلب سبب خسارت به عرصه‌های منابع طبیعی، از بین رفتن منابع اقتصادی، آسیب به اموال و تاسیسات می‌شوند [۴۲]. علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه در تحلیل خطر و مدیریت ریسک زمین لغزش، این پدیده همچنان تهدید جدی به جان و مال انسان‌ها در مناطق کوهستانی تمام دنیا تلقی می‌گردد [۱۱]. به عنوان مثال متوسط هزینه‌های اقتصادی سالانه رانش زمین در کانادا، ایالات متحده، ژاپن و هند بیش از چهار میلیارد دلار است [۳۷]. ایران با توجه به دارا بودن مناطق کوهستانی و شدت لرزه خیزی بالا، از جمله کشورهای با ضریب خطر بالاست، بطوری که جزء ۱۰ کشور حادثه‌خیز جهان قرار گرفته است [۱۵]. آمار ثبت شده و مستند توسط وزارت جهاد کشاورزی نشان می‌دهد که تا اوایل سال ۱۳۷۸، وقوع حدود ۲۵۹۰ حرکت توده‌ای و زمین لغزش در کشور باعث مرگ ۱۶۲ نفر، تخریب ۱۷۶ خانه و ایجاد خسارات مالی به میزان ۱۸۶۶ میلیارد ریال، تخریب ۶۷۶ هکتار جنگل، تخریب ۶۰۰۶ هکتار زمین زراعی، ۱۷۰ کیلومتر راه ارتباطی و ایجاد رسوب سالانه‌ای به حجم ۹۶۳۸۰۷ مترمکعب شده است [۱۶ و ۱۹]. بطور کلی بر اساس برآورد اولیه، سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی از طریق زمین لغزش‌ها بر کشور تحمیل می‌شود و این در صورتی است که از بین رفتن منابع طبیعی غیرقابل بازگشت به حساب آورده نشوند [۳] و [۲۴]. با توجه به موارد ذکر شده توسعه مدل‌ها و تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش به منظور کاهش تاثیر مخرب زمین لغزش‌ها بر زیرساخت‌ها، عرصه‌های منابع طبیعی و جوامع انسانی امری اجتناب ناپذیر است. به

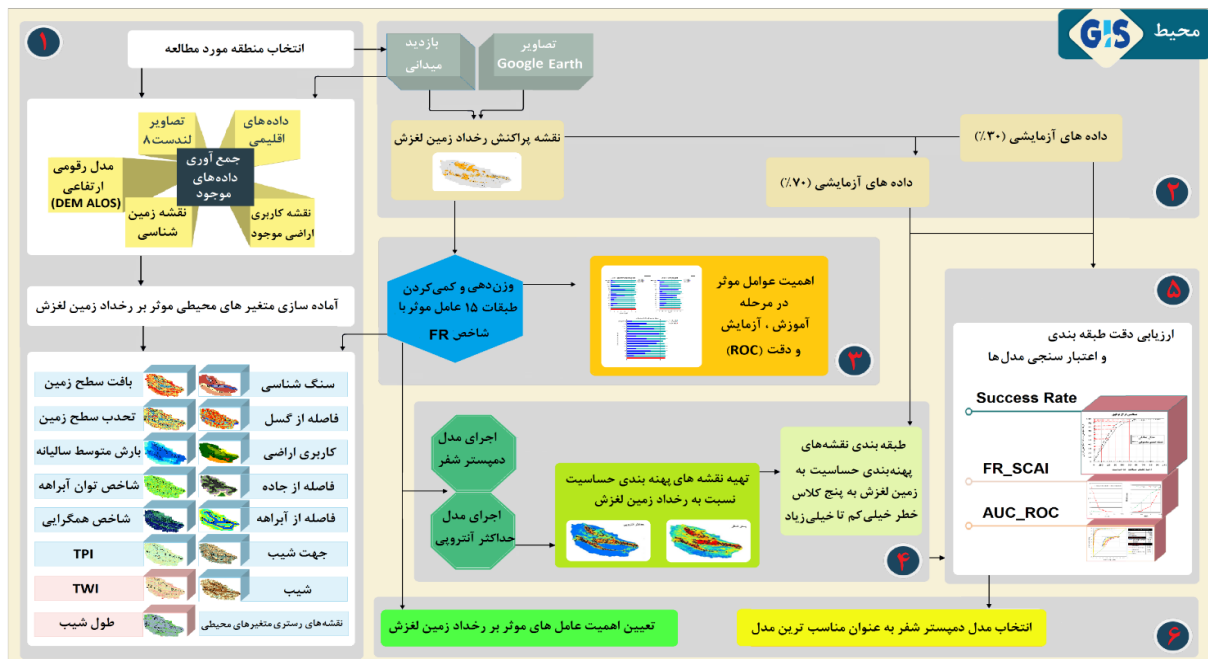
عبارت دیگر شناسایی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین لغزش گامی مهم و اساسی در ارزیابی خطرات محیطی حوزه‌های آبخیز به شمار می‌روند [۱۷]. بدین منظور بکارگیری مدل‌های ریاضی و آماری ساده اما دقیق و گویا برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد زمین لغزش‌ها می‌تواند کمک قابل توجهی برای این اهداف باشد. در سال‌های اخیر بکارگیری مدل‌های دومتغیره و بهره‌گیری از توان‌مندی‌های RS و GIS، گام جدیدی در زمینه پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد زمین لغزش علی‌رغم سادگی در کاربرد، دقت کافی را فراهم می‌نمایند [۳۶]. مدل حداکثر آنتروپی با ساختار نظریه حداکثر بی‌نظمی و همچنین مدل دمپسترشفر^۱ با یک رویکرد ریاضی متفاوت از نظریه بیزی، از جمله الگوریتم‌های هستند که با گستردگی بیش‌تری نسبت به سایر مدل‌های احتمالاتی دومتغیره مورد توجه و استفاده پژوهش‌گران قرار گرفته است [۸، ۲۸ و ۲۹] و تا به امروز پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام گرفته است [۴، ۳۵ و ۳۶]. جیانو و همکاران به کمک ۱۵ عامل محیطی و بکارگیری دو مدل ارزش اطلاعات و حداکثر آنتروپی اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش نمودند. نتایج نشان داد روش حداکثر آنتروپی با درصد مطلوبیت بالاتر به عنوان بهترین مدل معرفی شده است [۱۳]. پژوهشی در منطقه دوآب صمصامی با بررسی دو روش وزن شاهد و آنتروپی برای شناسایی مناطق دارای خطر زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفت که روش وزن شاهد با سطح زیر منحنی ۰/۷۹ به عنوان بهترین مدل معرفی شد [۲۰]. شیرانی و همکاران با استفاده از مدل دمپسترشفر اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش و اولویت‌بندی عوامل موثر در حوضه سرخون چهارمحال و بختیاری پرداخته و نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر زمین لغزش را با استفاده از این مدل برای منطقه مورد مطالعه کارآمد دانستند [۳۶]. حوزه آبخیز دوآب صمصامی واقع در استان چهارمحال و

^۱ Dempster-Shafer

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش در پنج گام اصلی به شرحی که در ادامه آمده است، اجرا شد. گام نخست انتخاب محدوده مورد مطالعه، جمع‌آوری و آماده‌سازی نقشه‌های عوامل موثر، گام دوم تهیه نقشه پراکنش رخداد زمین لغزش‌ها، گام سوم وزن‌دهی؛ کمی کردن عوامل موثر و بررسی اهمیت عوامل، گام چهارم اجرای مدل‌های حداکثر آنتروپی و دمپستر شفر، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش و طبقه‌بندی آنها به پنج رده خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد، گام پنجم ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش و گام ششم معرفی مناسب‌ترین مدل (شکل ۱).

بختیاری به دلیل دارا بودن میزان و شدت بالای بارندگی و همچنین سازندهای مستعد به لغزش (رخمون زیاد سازندهای سست مارنی شیل و مارن) به‌طور بالقوه مستعد وقوع حرکت توده‌ای می‌باشد. از طرف دیگر ویژگی‌های کوهستانی و اقلیمی متفاوت و کمربند فعال کوهستانی زاگرس در منطقه دوآب صمصامی، رخداد زمین لغزش‌ها را افزایش داده است [۲۰]. با توجه به عدم مقایسه دو مدل حداکثر آنتروپی و دمپستر شفر در تحقیقات قبلی تاکنون و ویژگی‌های محیط‌زیستی حوزه آبخیز دوآب صمصامی استان چهارمحال بختیاری، هدف این پژوهش بررسی و اولویت‌بندی عوامل موثر، پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد زمین لغزش‌ها با استفاده از این دو مدل به منظور مدیریت، برنامه‌ریزی محیطی و صیانت از عرصه‌های منابع طبیعی می‌باشد.



شکل ۱. نمودار گردش روش تحقیق

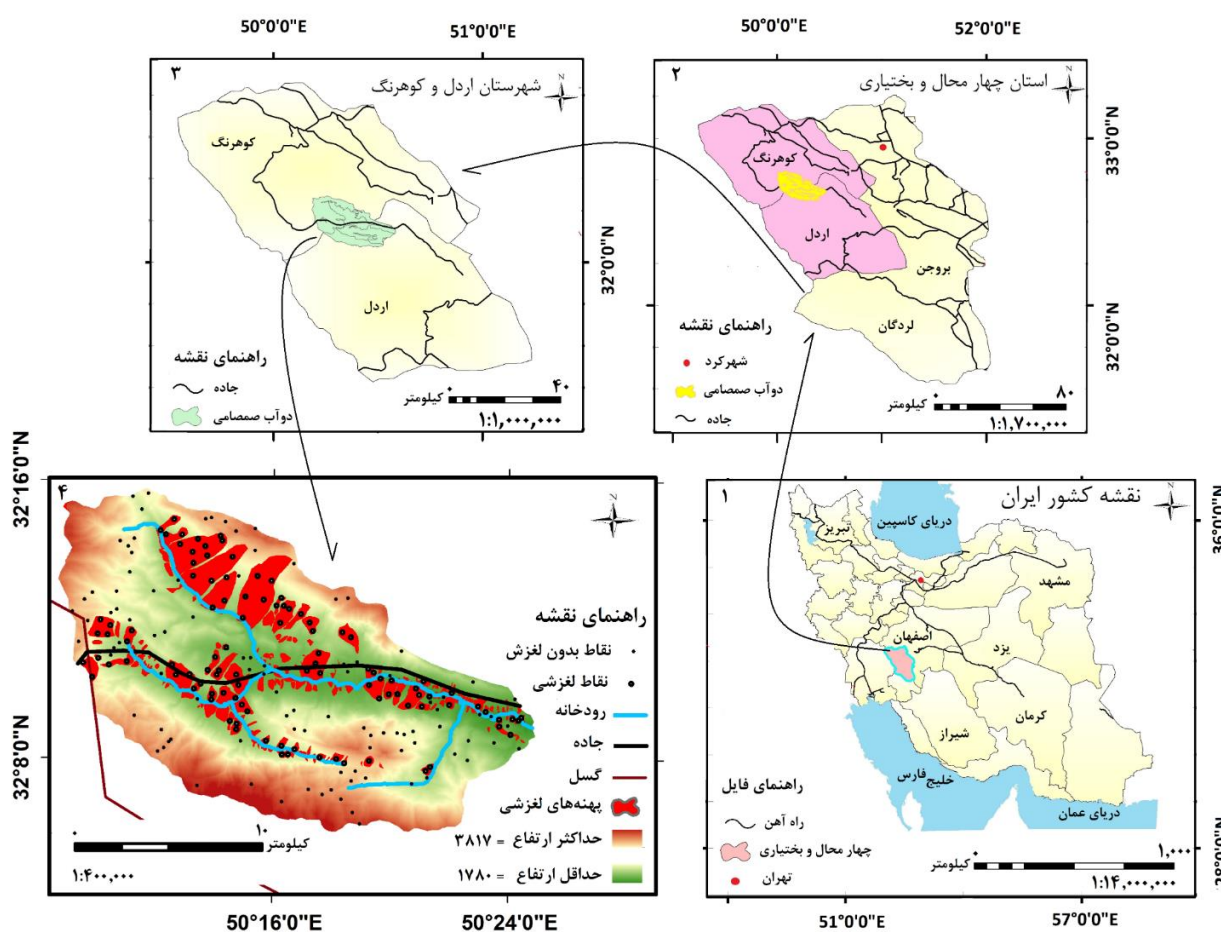
شهرستان کوهرنگ و ما بین طول‌های جغرافیایی 12° و 11° و 50° تا 24° و 26° و 50° شرقی و عرض‌های 42° و 08° و 32° تا 33° و 10° و 32° شمالی قرار دارد.

۱.۲. موقعیت جغرافیایی

حوزه آبخیز دوآب صمصامی با مساحتی بالغ بر ۲۷۶ کیلومتر مربع در باختر استان چهارمحال و بختیاری در

متوسط حوضه ۱۷ درصد، ارتفاع متوسط ۲۵۵۳ متر از سطح دریا با حداکثر ارتفاع ۴۲۲۱ متر و ضریب برف‌گیری ۳۴ تا ۵۹ درصد در سال‌های مختلف می‌باشد. دو جاده اصلی شهرکرد-مسجد سلیمان و شهرکرد-ایذه مسیرهای دسترسی به منطقه مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۲).

این حوزه آبخیز با عرصه‌های منابع طبیعی غنی از تنوع ژنتیکی گیاهی، از نظر هیدرولوژیکی حوزه ی آبخیز کشیده با روند شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد. رودخانه بزرگ دوآب صمصامی به عنوان زهکش اصلی حوضه پس از پیوستن دو رودخانه مهم این منطقه شامل آب کوفی و دزداران در شمال غرب حوضه تشکیل می‌گردد. شیب



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه

کمک دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، نقشه حاصل از پردازش تصاویر راداری سنجنده اروپایی ایسار بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱، تصاویر گوگل ارث به منظور ترسیم و تدقیق، تعداد ۱۷۰ پهنه لغزشی شناسایی شد (شکل ۲). زمین لغزش‌های شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از نوع زمین لغزش‌های سطحی، چرخشی، انتقالی، سنگ‌افت

۲.۲. نقشه پراکنش زمین لغزش

در این پژوهش به منظور استفاده از روش‌های احتمالاتی دومتغیره و مدل‌سازی در پهنه‌بندی حساسیت به رخداد زمین لغزش از داده‌های مکانی و نقشه پراکنش زمین لغزش به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد. در راستای تهیه این نقشه با استفاده از مشاهدات میدانی، ثبت مکانی لغزش‌ها به

کاملاً تصادفی با استفاده از ابزارهای Create Random Points, Subset Features در محیط ArcGIS@10.8 تقسیم و تهیه شدند [۵ و ۲۲].

و مرکب می‌باشند (شکل ۳). داده‌های مکانی پراکنش زمین لغزش در قالب دو دسته آموزشی و آزمایشی به ترتیب به نسبت ۷۰ درصد (۱۲۰ لغزش) به منظور اجرا و توسعه و ۳۰ درصد (۵۰ لغزش) به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها بصورت



شکل ۳. تصاویر انواع زمین لغزش رخ داده در منطقه مورد مطالعه. الف. جریان‌های واریزه‌ایی در دامنه ارتفاعات سازند سروک، ب. زمین لغزش انتقالی واریزه‌ایی حاشیه جاده در سازند گورپی، پ. زمین لغزش چرخشی انتقالی مرکب در سازند رازک، ت. زمین لغزش مرکب پلکانی در سازند پابده، ث. زمین لغزش چرخشی در سازند شهبازان، ج. زمین لغزش انتقالی در رسوبات کواترنری

۳.۲. جمع‌آوری، آماده‌سازی داده‌های مکانی

عوامل موثر بر رخدادهای زمین‌لغزش

پیش‌نیاز توسعه و برازش تمامی مدل‌های داده‌کاوی برای ایجاد نقشه‌های پهنه‌بندی، تهیه و آماده‌سازی متغیرهای مستقل (نقشه عوامل موثر بر رخداد زمین‌لغزش) و وابسته (نقشه پراکنش لغزش‌ها) می‌باشد. به منظور جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی مورد نیاز برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد زمین‌لغزش ابتدا تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۲۰ لندست (OLI) ۸ با دقت ۱۵ متر، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور، کاربری اراضی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه مورد بررسی و پردازش قرار گرفت. مدل رقمی ارتفاعی DEM پالسار ۲ سال ۲۰۰۶ با دقت ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS ژاپن از جمله داده‌های مکانی است که نقش موثری در تهیه و آماده‌سازی عوامل ژئومورفومتریکی تاثیرگذار بر ناپایداری و زمین‌لغزش ایفاء می‌کند. لذا به منظور تهیه ۱۰ عامل از بین ۱۵ عامل موثر انتخابی شامل گرادیان شیب، جهت و طول شیب، شاخص‌های رطوبت و وضعیت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، شاخص هم‌گرایی، بافت و تحدب سطح زمین و فاصله از آبراهه، از مدل رقمی ارتفاعی DEM پالسار ماهواره آلوس ژاپن و نرم‌افزار SAGA GIS@7.7.1 استفاده شد (جدول ۱). پنج عامل دیگر شامل عوامل ذاتی سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، کاربری اراضی، فاصله از جاده و بارش متوسط با استفاده از نقشه‌های موجود و تدقیق آنها به‌شریحی که در ادامه آمده است، تهیه شد. نقشه سنگ‌شناسی و فاصله از گسل و تراکم خطواره با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه گردیدند. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات و نقشه‌های کاربری اراضی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان و همچنین تدقیق آنها با استفاده از تصاویر رقمی ماهواره لندست ۸ سال ۲۰۲۰ تهیه گردید. برای تهیه نقشه هم‌بارش سالیانه از آمار بارش متوسط

سالانه ایستگاه‌های هواشناسی اداره هواشناسی و وزارت نیرو شامل ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن، بن، سامان، کوهرنگ، لردگان، اورگان، امام قیس، بلداجی، دوآب صمصامی، شلمزار و ناغان و همبستگی رگرسیونی با ارتفاع به منظور تهیه نقشه بارش متوسط منطقه مورد مطالعه استفاده شد. نقشه حاصل از پردازش تصاویر راداری سنجنده ایسار از ماهواره اروپای انویست بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱، تصاویر گوگل ارث به منظور تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه شناسایی، ترسیم و تدقیق شدند (شکل ۴). کلیه نقشه‌های عوامل موثر و پراکنش رخداد زمین‌لغزش در محیط ArcGIS@10.8 در قالب فرمت سلولی (رستری) با اندازه سلولی ۳۰*۳۰ متر مربع بصورت یکسان و مشابه برای تمامی عوامل طبقه‌بندی مجدد به روش شکست طبیعی و فاصله هندسی منحنی فراوانی پیکسل‌ها، مدیریت و پردازش شدند. همچنین به منظور آماده‌سازی، ورود، برازش و مدل‌سازی از نرم‌افزارهای بانک اطلاعاتی Excel2016 استفاده شد. نهایتاً ۱۵ عامل موثر بر رخداد زمین‌لغزش بر اساس سابقه پژوهش و رابطه‌های منطقی بین آنها با رخداد زمین‌لغزش به عنوان عوامل یا متغیرهای مستقل در محیط SAGA GIS@7.7.1 و ArcGIS@10.8 تهیه و طبقه‌بندی شدند (۳۴ و ۳۵) (شکل ۴).

۴.۲. اجرای مدل‌ها

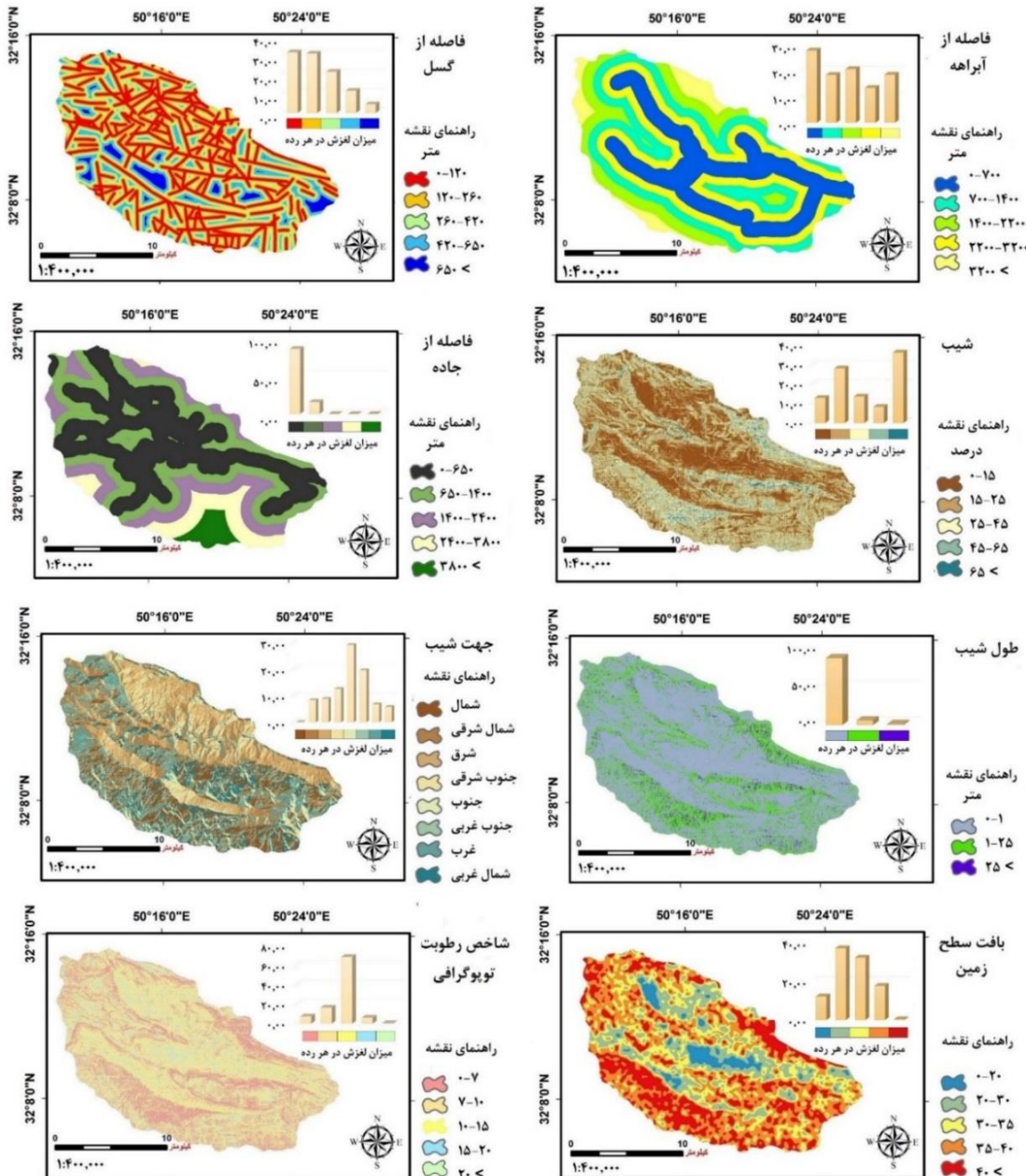
به منظور افزایش دقت و سهولت کار، ۱۰ عامل موثر ژئومورفومتریکی با استفاده از دستورها و الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزار SAGA GIS@7.7.1 و ۵ عامل ذاتی از ابزارهای موجود در نرم‌افزار ArcGIS@10.8 آماده‌سازی، تهیه و طبقه‌بندی شدند. کلیه ۱۵ عامل یا متغیر مستقل و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها یا متغیر وابسته در محیط ArcGIS@10.8 بصورت یک ژئودیتابیس واحد رسترمینا با اندازه سلولی ۲۰ متر و سیستم مختصات جغرافیایی UTM39 تشکیل داده شد. با استفاده از نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و هم‌پوشانی آن با هر یک از عوامل موثر و به

$$LSI = \sum Fr \quad (2)$$

LSI^۲: شاخص حساسیت نسبت به زمین لغزش در هر طبقه و Fr نسبت فراوانی وقوع زمین لغزش در هر طبقه می‌باشد.

کمک رابطه نسبت فراوانی (FR) نقشه‌های عوامل موثر طبقه‌بندی شده، وزندهی و کمی گردید (رابطه‌های ۱ و ۲).

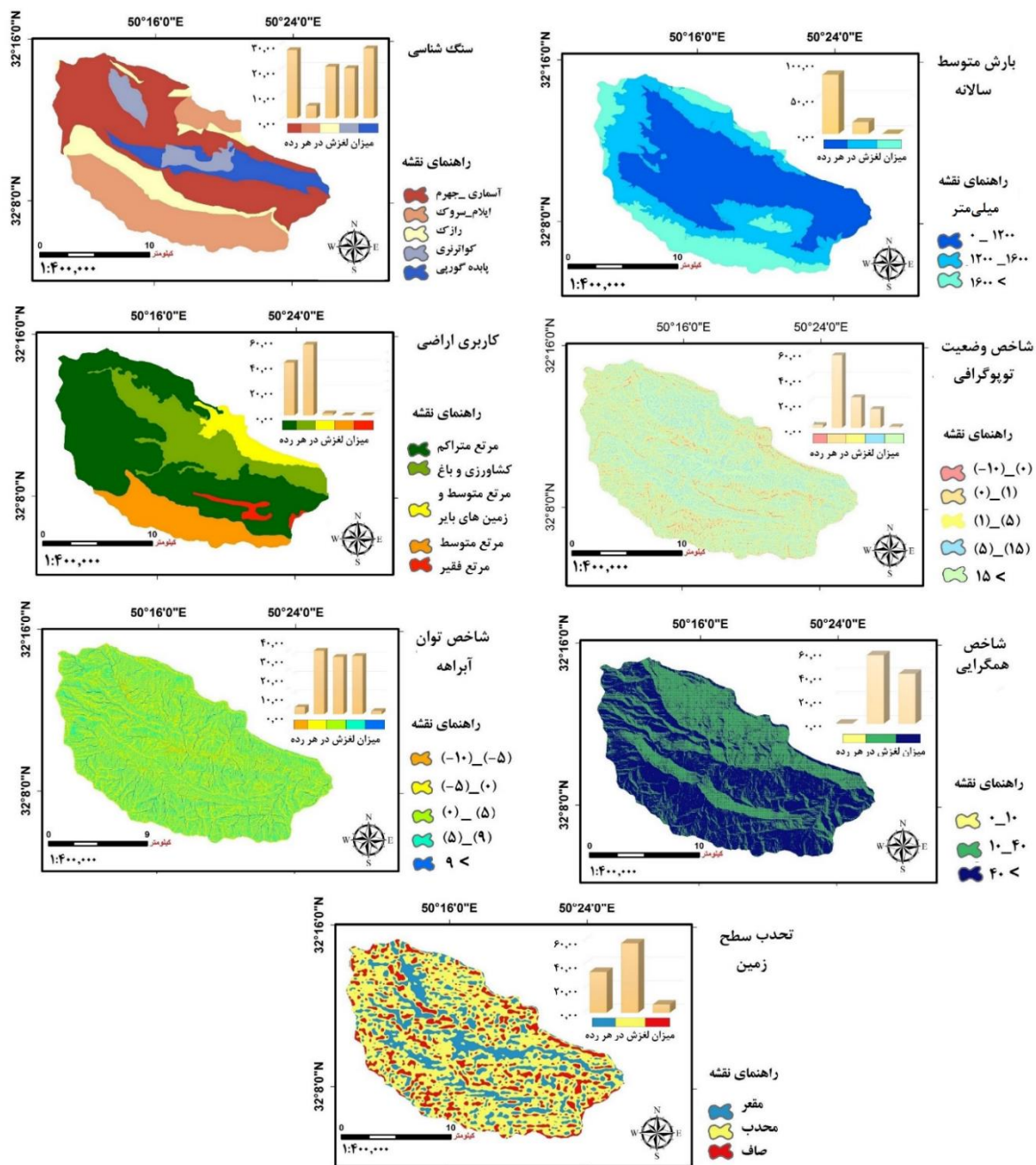
$$Fr = \frac{\text{درصد پیکسل‌های لغزشی}}{\text{درصد پیکسل‌های کل هر رده}} \quad (1)$$



شکل ۴. نقشه‌های عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش

¹ Frequency Ratio

² Landslide Susceptibility Index



ادامه شکل ۴.

$$\lambda = (Tp)E_{ij} = \frac{\frac{N(LnE_{ij})}{N(L)}}{N(E_{ij}) - N(LnE_{ij})} \quad (3)$$

وزن یا نمره منفی با علامت $\lambda(\bar{T}_p)E_{ij}$ نشان داده می‌شود که بصورت رابطه ۴ تعریف می‌شود.

تئوری دمپسترشفر به‌عنوان تابع اعتقادات خود تعمیمی از تئوری بیزین و مبتنی بر احتمالات است. این مدل برای وزن دهی رده های عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش در قالب رابطه های ۳ تا ۷ اجرایی می‌شود [۸] (رابطه ۳).

متغیرهای مستقل وزن نیز محاسبه می‌گردد [۹ و ۲۹] (رابطه ۹).

$$q_{\lambda} = (x) = \frac{e^{\lambda f(x)}}{Z_{\lambda}} \quad (9)$$

که در آن $q_{\lambda}(x)$ تابع توزیع Gibbs، λ وزن متغیر مورد نظر، Z_{λ} ثابت نرمال کننده تابع Gibbs هستند [۱۰، ۲۹، ۳۰ و ۳۱].

پس از کمی نمودن متغیرها یا عوامل موثر، آموزش مدل‌های حداکثر آنتروپی و دمپسترشفر با استفاده از ۱۵ عامل موثر بر رخداد زمین لغزش و نقشه پراکنش زمین لغزش (۷۰٪) به عنوان داده‌های ورودی مدل‌ها اجرا و نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش تهیه گردید. در نهایت ارزیابی دقت طبقه‌بندی با استفاده شاخص‌های نسبت فراوانی (FR)، سطح سلول‌هسته (SCAI^۱) و با استفاده از ۳۰ درصد مابقی داده‌های پراکنش لغزش، نرخ توفیق^۲، مقدار سطح زیر منحنی (AUC^۳) و ویژگی عملکرد گیرنده (ROC^۴) محاسبه و اقدام به اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها صورت گرفت [۳۶ و ۳۸].

۳. نتایج

۳.۱. ارتباط بین عوامل موثر و رخداد زمین لغزش

نتایج حاصل از هم‌پوشانی نقشه پراکنش لغزش و هریک از ۱۵ نقشه طبقه‌بندی شده عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش، بر اساس شاخص نسبت فراوانی (FR) و اجرای مدل دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی در جدول (۱) آمده است. همان‌طور که در این جدول ارائه شده است، رده‌های ۱۵ تا ۲۵ درصد گرادیان شیب با وزن ۲/۱۵، رده جنوب غرب جهت شیب با وزن ۱/۹۸، رده ۰ تا ۱ متر طول شیب با وزن

$$\lambda = (\overline{Tp})E_{ij} = \frac{\frac{N(L)-N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{N(A)-N(L)-N(E_{ij})+N(L \cap E_{ij})} \quad (4)$$

که در آن Tp : وضعیت هدف مربوط به ویژگی‌های موثر در ایجاد زمین لغزش است، \overline{Tp} : مربوط به عواملی است که روی زمین لغزش تأثیری ندارند، $N(L \cap E_{ij})$: تعداد یا مساحت زمین لغزش در هر طبقه، $N(L)$: تعداد یا مساحت کل زمین لغزش منطقه، $N(E_{ij})$: تعداد یا مساحت فاقد زمین لغزش در هر طبقه، $N(A)$: تعداد یا مساحت فاقد زمین لغزش منطقه است. به‌طور کلی مقدار وزن‌های بدست آمده در محدوده صفر تا بی‌نهایت متغیر است. از این رو برای استانداردسازی محدوده مذکور از رابطه‌های ۵، ۶، ۷ استفاده شد [۱، ۸ و ۲۳].

$$m = (Tp)E_{ij} = \frac{\lambda(Tp)E_{ij}}{\sum \lambda((Tp)E_{ij})} \quad (5)$$

$$m = (\overline{Tp})E_{ij} = \frac{\lambda(\overline{Tp})E_{ij}}{\sum \lambda((\overline{Tp})E_{ij})} \quad (6)$$

$$m = (\theta)1 - m(Tp)E_{ij} - m(\overline{Tp})E_{ij} \quad (7)$$

مدل حداکثر آنتروپی بر اساس اصل آنتروپی، شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین نموده و بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن، تأثیر و منحنی پاسخ آن بدست آید. مدل آنتروپی این نوع توزیع‌ها بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود [۲۷].

$$H = (\hat{\pi}) = - \sum x \in X \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (8)$$

که در آن $H(\hat{\pi})$ مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر مورد نظر، \ln لگاریتم طبیعی، x ارزش هر سلول و X مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. در ادامه با استفاده از روش توزیع احتمالاتی Gibbs برای هر یک از

¹ Seed Core Area Index

² Success rate

³ Area Under Curve

⁴ Receiver Operating Characteristic

شاخص وضعیت توپوگرافی با تراکم زمین لغزش ابتدا افزایش و از مقدار مشخصی به بعد کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از اولویت‌بندی و بررسی اهمیت عوامل موثر ژئومورفومتریک بر رخداد زمین لغزش در این پژوهش مطالعات بابلی و همکاران را تایید می‌نماید [۴]. ارتباط بین رده‌های هر پارامتر یا عامل موثر با زمین لغزش علاوه بر شاخص وزن‌های نسبت‌فراوانی توسط تابع باور^۱ مدل دمپسترشفر مشخص و با روند مشابه تایید شد (جدول ۱).

۲.۳. نتایج حاصل از بکارگیری مدل

حداکثر آنتروپی

نتایج حاصل از اجرای مدل حداکثر آنتروپی به منظور اولویت‌بندی عوامل موثر بر زمین لغزش بر اساس منحنی پاسخ^۲ مشخص شد (شکل ۵). همانطور که در شکل (۵) آمده است با افزایش گرادیان شیب تا ۲۵ درصد، میزان رخداد زمین لغزش ابتدا افزایش (تا شیب ۲۵ درصد) و سپس کاهش می‌یابد. این افزایش رخداد زمین لغزش‌ها در شیب‌های تا ۲۵ درصد بدلیل حضور و رخنمون سازندهای سست زمین‌شناسی در این شیب‌ها می‌باشد. بدیهی است با افزایش مقدار شیب (شیب‌های بالاتر از ۲۵ درصد) بدلیل عدم حضور یا رخنمون واحدهای سنگی سست و وجود سازندهای سنگی مستحکم، رخداد زمین لغزش‌ها کاهش یافته است. رده جنوب غرب و جنوب جهت شیب بیش‌ترین رخداد زمین لغزش را دارا می‌باشد. بطور کلی با افزایش شاخص تحذب، بافت و هم‌گرایی سطح زمین، میزان رخداد زمین لغزش کاهش می‌یابد. با این تفاوت که در شاخص تحذب سطح زمین، ابتدا روند کاهشی و سپس کمی افزایش از خود نشان می‌دهد. شاخص وضعیت توپوگرافی بصورت متقارن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار طول شیب به مقدار کم، میزان رخداد زمین لغزش کاهش چشم‌گیر نشان داده و سپس تقریباً ثابت می‌گردد. با افزایش شاخص توان آبرهه،

۱/۲۱، رده مقعر تحذب سطح زمین با وزن ۱/۳۸، رده ۰ تا ۱۰ شاخص هم‌گرایی با وزن ۱/۶۹، رده ۰ تا ۲۰ بافت سطح زمین با وزن ۲/۴۱، رده ۱ تا ۵ شاخص وضعیت توپوگرافی با وزن ۱/۳۷، رده ۱۰ تا ۱۵ شاخص رطوبت توپوگرافی با وزن ۱/۵۴، رده ۱۰- تا ۵- شاخص توان آبراهه با وزن ۱/۵۳، رده ۰ تا ۷۰۰ متر فاصله از آبراهه با وزن ۱/۶۹، رده ۰ تا ۶۵۰ متر فاصله از جاده با وزن ۲/۳۲، رده کوتاه‌تری مربوط به عامل سنگ‌شناسی با وزن ۲/۹۳، رده بیش‌تر از ۶۵۰ متر فاصله از گسل با وزن ۱/۲۸، رده کشاورزی و باغ مربوط به کاربری اراضی با وزن ۲/۶۲ و رده ۰ تا ۱۲۰۰ میلی متر بارش با وزن ۲/۰۲ نسبت به دیگر رده‌های همان عامل دارای بیش‌ترین وزن یا اهمیت را دارا می‌باشند (جدول ۱). بطور کلی با توجه به مقادیر وزنی (FR) حاصل در جدول (۱) مربوط به رده‌های عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش، می‌توان چنین نتیجه گرفت با فاصله گرفتن از عوارض خطی آبراهه و جاده میزان رخداد زمین لغزش کاهش می‌یابد که از این نظر با مطالعات شیرانی و همکاران [۳۴ و ۳۶] مطابقت دارد. دامنه‌های شیب به سمت جنوب غرب، طول شیب کم و شیب‌های مناطق دامنه کوه (۰ تا ۲۵ درصد) به دلیل میزان و ماندگاری رطوبت بیش‌تر، دامنه‌های با طول شیب کم و وجود خاک سست بیش‌تر در شیب‌های تا ۲۵ درصد (دشت سر لخت و کوهستان) برای رخداد زمین لغزش مستعدتر از دیگر رده‌های خود می‌باشند. این نتایج توسط منصوری و همکاران [۲۰] و شیرانی و همکاران [۳۶] نیز تایید می‌شود. کاربری اراضی کشاورزی و باغ و رسوبات سست کوتاه‌تری به دلیل شرایط مناسب برای کاهش مقاومت برشی توده خاک دارای رخداد زمین لغزش بیش‌تر نسبت به دیگر رده‌های خود است که با نتایج رضوی و شیرانی تطابق دارد [۳۲]. افزایش میزان شاخص توان آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی با میزان رخداد زمین لغزش رابطه مشخص منظمی ندارد. افزایش تحذب، هم‌گرایی و بافت سطح زمین با تراکم رخداد زمین لغزش کمتر انطباق دارد. رابطه میزان

¹ Belief function

² Response curve

میزان رخداد زمین‌لغزش دارای روند کاهشی می‌باشد.

جدول ۱. ارتباط بین هر یک از پارامترهای موثر با زمین‌لغزش‌ها و روش‌های حداکثر آنتروپی و دمپسترشفر

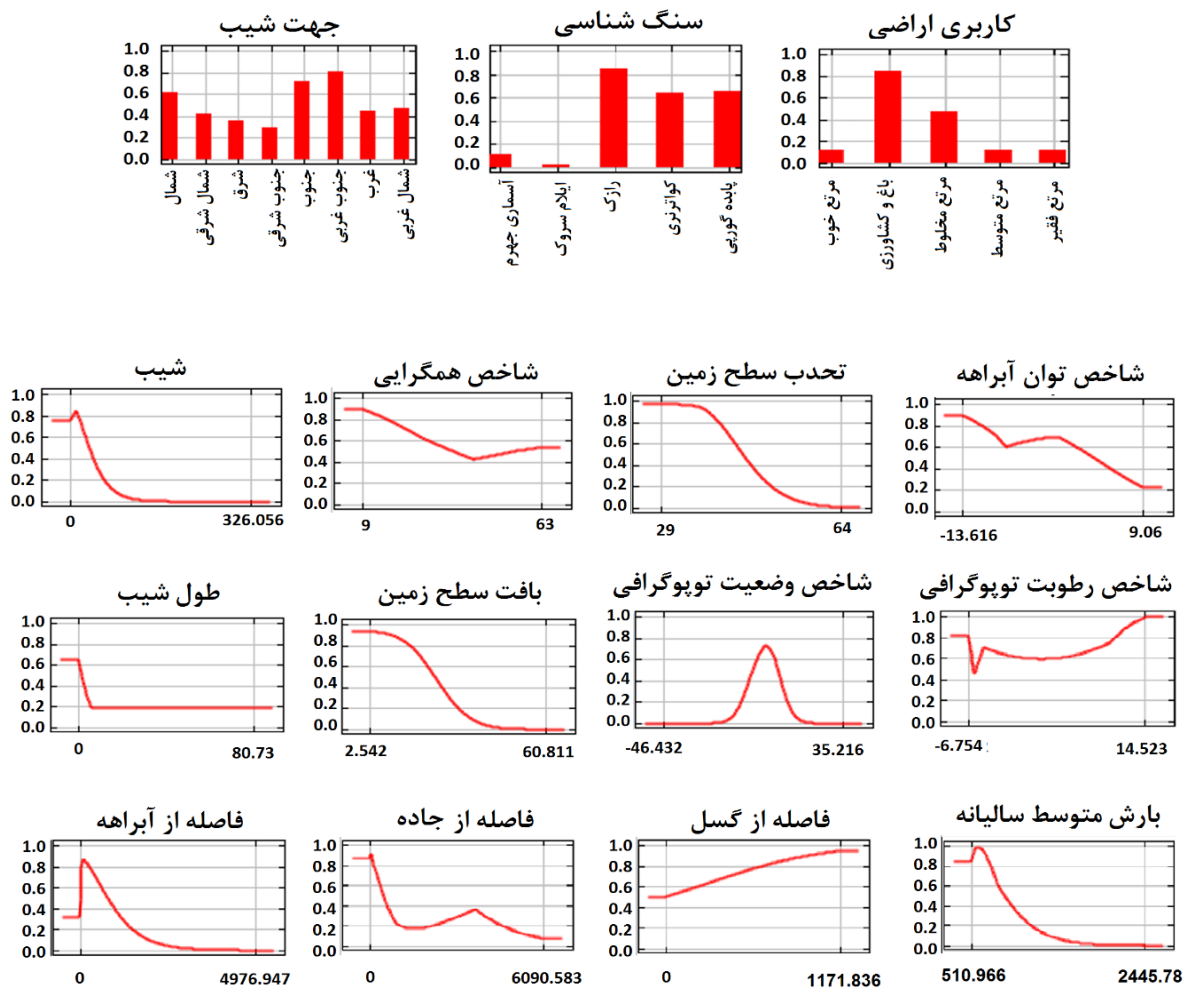
حداکثر آنتروپی	دمپسترشفر				نسبت فراوانی (FR)	مساحت لغزش (هکتار)	مساحت رده (هکتار)	نام رده	عامل موثر بر لغزش
	مطلوبیت	ابهام	ناباوری	باور					
۱۰۵/۱	۰/۸۵۳	۰/۸۱۸	۰/۱۴۷	۰/۰۳۵	۰/۵۱	۴۶۸/۷۵	۵۰۸۹/۴۰	شمال	جهت شیب
	۰/۸۵۳	۰/۸۱۷	۰/۱۴۷	۰/۰۳۶	۰/۵۲	۴۸۵/۱۴	۵۱۴۶/۹۷	شمال شرقی	
	۰/۸۶۹	۰/۸۱۶	۰/۱۳۱	۰/۰۵۳	۰/۷۰	۳۷۲/۸۸	۲۹۳۳/۴۳	شرق	
	۰/۸۷۶	۰/۷۸۹	۰/۱۲۴	۰/۰۸۷	۰/۹۹	۴۴۶/۲۵	۲۴۷۵/۸۴	جنوب شرقی	
	۰/۸۹۳	۰/۷۱۳	۰/۱۰۷	۰/۱۸۰	۱/۴۸	۱۱۸۹/۳۹	۴۴۲۵/۰۹	جنوب	
	۰/۹۰۴	۰/۵۰۹	۰/۰۹۶	۰/۳۹۵	۱/۹۸	۱۳۶۵/۲۰	۳۷۹۹/۰۳	جنوب غربی	
	۰/۸۸۲	۰/۷۱۲	۰/۱۱۸	۰/۱۷۰	۱/۴۴	۴۶۷/۳۱	۱۷۸۴/۹۶	غرب	
	۰/۸۷۰	۰/۸۲۵	۰/۱۳۰	۰/۰۴۵	۰/۶۲	۲۲۲/۰۹	۱۹۷۱/۲۸	شمال غربی	
۱۲/۴۷۳	۰/۷۲۱	۰/۷۵۵	۰/۲۷۹	-۰/۰۳۴	۰/۶۲	۱۳۵۳/۱۵	۱۱۹۵۳/۳۰	آسماری جهرم	سنگ‌شناسی
	۰/۷۰۸	۰/۷۱۶	۰/۲۹۲	-۰/۰۰۸	۰/۱۸	۲۴۸/۴۷	۷۶۹۷/۶۶	ایلام سروک	
	۰/۸۵۰	۱/۲۰۷	۰/۱۵۰	-۰/۳۵۷	۲/۰۸	۱۰۳۰/۹۴	۲۷۳۲/۳۶	رازک	
	۰/۸۵۶	-۱/۰۸۸	۰/۱۴۴	۱/۹۴۴	۲/۹۳	۹۹۴/۴۳	۱۸۷۰/۰۵	کواترنری	
	۰/۸۶۴	۱/۴۰۹	۰/۱۳۶	-۰/۵۴۵	۲/۲۷	۱۳۹۰/۰۲	۳۳۷۲/۶۳	پابده گورپی	
۳۹/۶۷۲	۰/۸۵۸	-۰/۰۱۱	۰/۱۴۲	۰/۸۶۹	۲/۰۲	۲۹۶۰/۸۲	۸۰۷۶/۱	۱۲۰۰-۰	بارش سالیانه (میلی‌متر)
	۰/۵۸۵	۰/۴۵۵	۰/۴۱۵	۰/۱۳۰	۰/۸۰	۲۰۴۳/۶۷	۱۴۰۲۹/۸۷	۱۶۰۰-۱۲۰۰	
	۰/۵۵۸	۰/۵۵۶	۰/۴۴۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۱۲/۵۱	۵۵۲۰/۰۳	۱۶۰۰<	
۴/۷۲۱	۰/۸۱۳	۰/۶۱۸	۰/۱۸۷	۰/۱۹۵	۱/۵۷	۱۰۰/۱۱	۳۵۱/۶۱	۱۵-۰	شیب (درصد)
	۰/۸۴۸	۰/۳۲۰	۰/۱۵۲	۰/۵۲۸	۲/۱۵	۱۱۲۴/۵۷	۲۸۷۷/۱۳	۲۵-۱۵	
	۰/۸۷۳	۰/۶۷۱	۰/۱۲۷	۰/۲۰۲	۱/۵۹	۲۲۸۲	۷۸۹۲/۹۱	۴۵-۲۵	
	۰/۷۸۷	۰/۷۲۸	۰/۲۱۳	۰/۰۶۰	۰/۷۹	۱۰۷۶/۰۵	۷۴۷۵/۴۸	۶۵-۴۵	
	۰/۶۷۸	۰/۶۶۳	۰/۳۲۲	۰/۰۱۶	۰/۲۶	۴۳۴/۲۷	۹۰۲۸/۸۷	۶۵<	
۲/۶۱۳	۰/۷۹۰	۰/۶۲۷	۰/۲۱۰	۰/۱۶۳	۰/۹۱	۱۲۳۱/۸۴	۷۴۵۸/۶۱	۱۲۰-۰	فاصله از گسل (متر)
	۰/۷۹۷	۰/۶۳۱	۰/۲۰۳	۰/۱۶۶	۰/۹۲	۵۱۶/۸۲	۳۰۸۷/۰۶	۲۶۰-۱۲۰	
	۰/۸۰۰	۰/۶۱۳	۰/۲۰۰	۰/۱۸۷	۱/۰۰	۱۱۰۶/۲۱	۶۱۱۸/۲۲	۴۲۰-۲۶۰	
	۰/۸۰۵	۰/۶۰۷	۰/۱۹۵	۰/۱۹۹	۱/۰۴	۱۶۳۰/۴۰	۸۶۷۰/۶۷	۶۵۰-۴۲۰	
	۰/۸۰۸	۰/۵۲۲	۰/۱۹۲	۰/۲۸۶	۱/۲۸	۵۳۱/۷۴	۲۲۹۱/۴۴	۶۵۰<	
۰/۰۰۱	۰/۶۹۹	۰/۶۱۸	۰/۳۰۱	۰/۰۱۹	۰/۷۴	۲۰۵۶/۹۵	۱۵۴۰۶/۲۸	مرتع متراکم	کاربری اراضی
	۰/۹۲۰	-۰/۰۵۴	۰/۰۸۰	۰/۹۷۴	۲/۶۲	۲۸۶۵/۲۵	۶۰۳۲/۳۲	کشاورزی و باغ	
	۰/۸۰۳	۰/۷۹۸	۰/۱۹۷	۰/۰۰۶	۰/۲۷	۸۶/۲۵	۱۷۲۸/۲۳	مرتع متوسط و زمین بایر	
	۰/۷۶۵	۰/۷۶۵	۰/۲۳۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۸۱	۳۹۴۹/۴۴	مرتع متوسط	
	۰/۸۱۲	۰/۸۱۱	۰/۱۸۸	۰/۰۰۲	۰/۰۸	۷/۷۳	۵۰۹/۷۳	مرتع فقیر	
۶/۶۰۱	۰/۸۶۸	۰/۳۶۹	۰/۱۳۲	۰/۴۹۹	۱/۶۹	۲۲۰۸/۲۷	۷۱۹۸/۶۹	۷۰۰-۰	فاصله از آبراهه (متر)
	۰/۸۰۴	۰/۶۱۰	۰/۱۹۶	۰/۱۹۴	۱/۰۵	۶۱۷/۲۷	۳۲۳۶/۵۵	۱۴۰۰-۷۰۰	
	۰/۷۸۴	۰/۶۵۶	۰/۲۱۶	۰/۱۲۸	۰/۸۰	۸۶۵/۳۸	۵۹۷۶/۷۴	۲۲۰۰-۱۴۰۰	
	۰/۷۶۶	۰/۶۵۳	۰/۲۳۴	۰/۱۱۳	۰/۷۳	۱۰۳۳/۰۹	۷۸۳۱/۰۴	۳۲۰۰-۲۲۰۰	
	۰/۷۷۸	۰/۷۱۲	۰/۲۲۲	۰/۰۶۶	۰/۴۸	۲۹۲/۹۹	۳۳۸۲/۹۸	۳۲۰۰<	

ادامه جدول ۱.

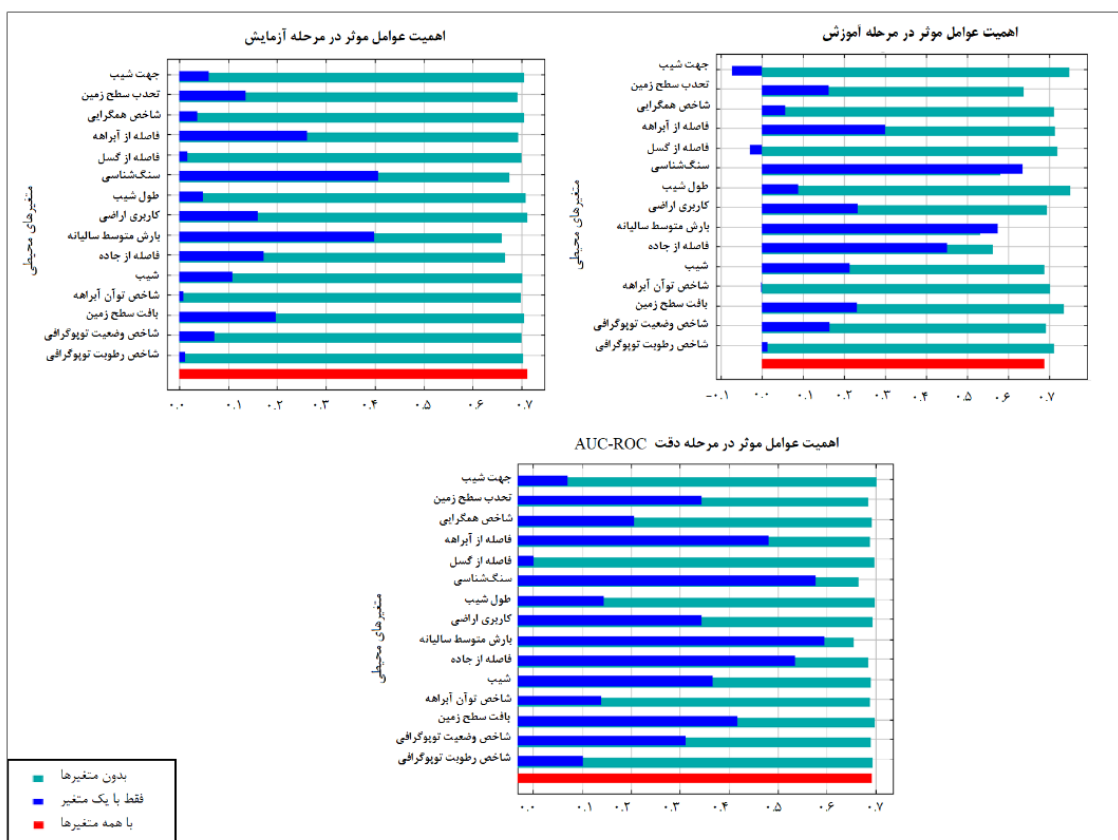
عامل موثر بر لغزش	نام رده	مساحت رده (هکتار)	مساحت لغزش (هکتار)	نسبت فراوانی (FR)	دمپسترشفر			حداکثر آنتروپی
					باور	ناباوری	ابهام	
فاصله از جاده (متر)	۶۵۰-۰	۴۱۸۷/۸۷	۱۷۶۲/۶۸	۲/۳۲	۰/۷۲۰	۰/۱۲۹	۰/۱۵۰	۰/۸۷۱
	۱۴۰۰-۶۵۰	۶۵۳۸/۲۶	۲۰۳۳/۹۹	۱/۷۱	۰/۲۲۰	۰/۱۳۳	۰/۶۴۷	۰/۸۶۷
	۲۴۰۰-۱۴۰۰	۸۲۱۶/۲۵	۹۹۰/۰۲	۰/۶۶	۰/۰۴۲	۰/۲۳۹	۰/۷۱۹	۰/۷۶۱
	۳۸۰۰-۲۴۰۰	۶۳۰۶/۶۸	۱۳۸/۹۴	۰/۱۲	۰/۰۰۶	۰/۲۸۴	۰/۷۱۰	۰/۷۱۶
شاخص توان آبراهه	۳۸۰۰<	۲۳۸۵/۹۴	۹۱/۳۷	۰/۲۱	۰/۰۱۱	۰/۲۱۵	۰/۷۷۴	۰/۷۸۵
	(-۱۰)-(-۵)	۴۹۲۰/۱۷	۱۳۷۱/۳۶	۱/۵۳	۰/۳۸۵	۰/۱۶۴	۰/۴۵۰	۰/۸۳۶
	(-۵)-(۰)	۵۵۳۲/۹۷	۵۰۵/۸۹	۰/۵۰	۰/۰۶۸	۰/۲۴۰	۰/۶۹۲	۰/۷۶۰
	(۰)-(۵)	۷۱۰۳/۶۴	۱۸۸۶/۶۰	۱/۱۵	۰/۲۲۰	۰/۱۸۲	۰/۵۹۸	۰/۸۱۸
شاخص رطوبت توپوگرافی	(۵)-(۹)	۹۴۱۲/۰۷	۱۵۳۲/۱۵	۰/۹۰	۰/۱۴۸	۰/۲۱۵	۰/۶۳۷	۰/۷۸۵
	۹<	۶۵۷/۱۶	۱۲۰/۹۹	۱/۰۱	۰/۱۷۸	۰/۱۹۸	۰/۶۲۴	۰/۸۰۲
	۷-۰	۲۸۷/۵۶	۲۶/۶۰	۰/۵۱	۰/۰۷۹	۰/۲۰۱	۰/۷۲۱	۰/۷۹۹
	۱۰-۷	۵۲۱۱/۰۵	۴۶۸/۰۱	۰/۴۹	۰/۰۷۶	۰/۲۳۸	۰/۶۸۶	۰/۷۶۲
توپوگرافی	۱۵-۱۰	۴۷۸۴/۳۷	۱۳۴۱/۳۳	۱/۵۴	۰/۴۴۳	۰/۱۶۶	۰/۳۹۱	۰/۸۳۴
	۲۰-۱۵	۷۶۸۲/۳۶	۱۰۹۹/۷۴	۰/۷۹	۰/۱۳۹	۰/۲۲۶	۰/۶۳۵	۰/۷۷۴
	۲۰<	۹۶۶۰/۶۶	۲۰۸۱/۳۲	۱/۱۹	۰/۲۶۳	۰/۱۶۹	۰/۵۶۸	۰/۸۳۱
	(-۱۰)-(۰)	۱۲۶۱/۲۳	۷۴/۲۱	۰/۳۲	۰/۰۶۳	۰/۲۱۳	۰/۷۲۴	۰/۷۸۷
شاخص وضعیت توپوگرافی	(۰)-(۱)	۶۰۹۲/۲۹	۹۰۲/۳۵	۰/۸۲	۰/۱۹۹	۰/۲۲۰	۰/۵۸۱	۰/۷۸۰
	(۱)-(۵)	۱۱۱۰۷/۸۲	۲۷۵۸/۷۸	۱/۳۷	۰/۴۶۷	۰/۱۳۴	۰/۳۹۹	۰/۸۶۶
	(۵)-(۱۵)	۷۳۷۰/۳۷	۱۲۱۷/۰۸	۰/۹۱	۰/۲۳۳	۰/۲۱۳	۰/۵۵۳	۰/۷۸۷
	۱۵<	۱۷۹۴/۲۹	۶۴/۵۸	۰/۲۰	۰/۰۳۷	۰/۲۲۱	۰/۷۴۳	۰/۷۷۹
بافت سطح زمین	۲۰-۰	۲۶۴۱/۱۵	۱۱۵۷/۴۴	۲/۴۱	۰/۷۸۹	۰/۱۵۳	۰/۰۵۸	۰/۸۴۷
	۳۰-۲۰	۷۶۲۳/۰۷	۲۱۴۵/۹۷	۱/۵۵	۰/۱۴۳	۰/۱۳۸	۰/۷۱۹	۰/۸۶۲
	۳۵-۳۰	۸۵۴۵/۷۱	۱۳۳۳/۵۶	۰/۸۶	۰/۰۵۰	۰/۲۱۶	۰/۷۳۴	۰/۷۸۴
	۴۰-۳۵	۶۲۴۶/۴۸	۳۲۸/۴۰	۰/۲۹	۰/۰۱۳	۰/۲۶۸	۰/۷۱۹	۰/۷۳۲
طول شیب (متر)	۴۰<	۲۵۶۹/۵۹	۵۱/۶۳	۰/۱۱	۰/۰۰۵	۰/۲۲۵	۰/۷۷۰	۰/۷۷۵
	۱-۰	۲۱۹۸۳/۵۱	۴۸۳۲/۰۶	۱/۲۱	۰/۸۵۲	۰/۰۵۱	۰/۰۹۷	۰/۹۴۹
	۲۵-۱	۲۲۰۹/۸۲	۶۰/۶۳	۰/۱۵	۰/۰۶۳	۰/۴۶۰	۰/۴۷۷	۰/۵۴۰
	۲۵<	۳۴۳۲/۶۷	۱۲۴/۳۱	۰/۲۰	۰/۰۸۵	۰/۴۸۹	۰/۴۲۶	۰/۵۱۱
تحدب سطح زمین	مقعر	۵۶۶۱/۸۸	۱۴۱۹/۹۱	۱/۳۸	۰/۵۱۳	۰/۲۸۰	۰/۲۰۷	۰/۷۲۰
	محدب	۱۲۷۳۵/۳۰	۲۴۰۸/۷۰	۱/۰۴	۰/۳۱۰	۰/۳۱۰	۰/۳۸۰	۰/۶۹۰
	صاف	۹۲۲۸/۸۲	۱۱۸۸/۳۹	۰/۷۱	۰/۱۷۷	۰/۴۱۰	۰/۴۱۳	۰/۵۹۰
شاخص هم‌گرایی	۱-۰	۸۷۹۷/۴۲	۲۷۰۲/۹۲	۱/۶۹	۰/۷۰۱	۰/۱۷۹	۰/۱۲۰	۰/۸۲۱
	۲۵-۱	۸۴۰۲/۹۶	۱۲۵۳/۶۰	۱/۸۲	۰/۱۸۷	۰/۳۵۳	۰/۴۶۰	۰/۶۴۷
۲۵<	۱۰۴۲۵/۶۲	۱۰۶۰/۴۸	۰/۵۶	۰/۱۱۲	۰/۴۶۸	۰/۴۲۰	۰/۵۳۲	

[۳۵]، گرادیان شیب ۶۸ درصد [۴ و ۱۲]، کاربری اراضی ۶۷/۳ درصد [۴۰ و ۴۱]، شاخص هم‌گرایی ۶۷/۲ درصد [۴ و ۳۵]، شاخص وضعیت توپوگرافی ۶۶ درصد [۴]، شاخص تحدب سطح زمین ۶۰ درصد [۳۵]، طول شیب ۵۷/۳ درصد [۴ و ۳۵]، شاخص توان آبراهه ۵۷ درصد [۳۵ و ۴۱]، شاخص رطوبت توپوگرافی ۵۵ درصد [۴۱]، جهت شیب ۵۴ درصد [۱۲] و فاصله از گسل ۵۰ درصد [۲۵ و ۲۷] به ترتیب در پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش‌ها اهمیت دارند (شکل ۶). این نتایج نشان‌دهنده آن است تمامی عوامل بر حساسیت زمین‌لغزش تأثیرگذار می‌باشند.

رابطه میزان شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، جاده و مقدار بارش میانگین سالانه با رخداد زمین‌لغزش معکوس می‌باشند. میزان رخداد زمین‌لغزش در رده کواترنری از عامل سنگ‌شناسی و کاربری کشاورزی و باغ نسبت به دیگر رده‌های خود بیش‌ترین مقدار را دارا می‌باشند (شکل ۵). بر اساس شاخص اهمیت مدل حداکثر آنتروپی، اهمیت نسبی عوامل موثر نسبت به همدیگر تعیین شد (شکل ۶). بر این اساس بارش سالیانه ۸۰ درصد [۱۲، ۳۶ و ۴۱]، سنگ‌شناسی ۷۹ درصد [۱۸]، فاصله از جاده ۷۷ درصد [۲۵، ۳۲ و ۴۱]، فاصله از آبراهه ۷۴ درصد [۱۲ و ۴۱]، بافت سطح زمین ۷۱/۴ درصد



شکل ۵. نمودار پاسخ تأثیر عوامل موثر مورد استفاده حاصل از اجرای مدل حداکثر آنتروپی



شکل ۶. نتایج اهمیت عوامل موثر در مرحله آموزش، آزمایش و دقت (ROC) بکارگیری آنها با استفاده از آزمون جک‌نایف و اجرای مدل حداکثر آنتروپی

حداکثر آنتروپی، رده‌های حساسیت خیلی کم تا کم به ترتیب ۳/۴۹ و ۲۳/۷۶ درصد (کمتر از ۲۵ درصد) و رده‌های حساسیت زیاد تا خیلی زیاد به ترتیب ۸۰/۵۶ و ۵۱/۷۰ درصد (بیشتر از ۵۰ درصد) از مساحت لغزش‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. به عبارت دیگر در هر دو مدل رده‌های حساسیت خیلی کم تا کم، سطح کمی از زمین لغزش‌های رخ داده (کمتر از ۲۵ درصد) و رده‌های حساسیت زیاد تا خیلی زیاد سطح زیادی (بیشتر از ۵۰ درصد) از زمین لغزش‌های رخ داده را پوشش می‌دهند (جدول ۳، شکل ۸). این میزان پوشش در مدل دمپسترشفر نسبت به حداکثر آنتروپی بیشتر می‌باشد (شکل ۸). در هر دو مدل تراکم رخداد زمین لغزش از رده‌های حساسیت خیلی کم تا زیاد افزایش و در رده خیلی زیاد اندکی کاهش می‌یابد (جدول ۳، شکل ۸).

۳.۳. نتایج حاصل از تهیه نقشه‌های پهنه بندی

حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش

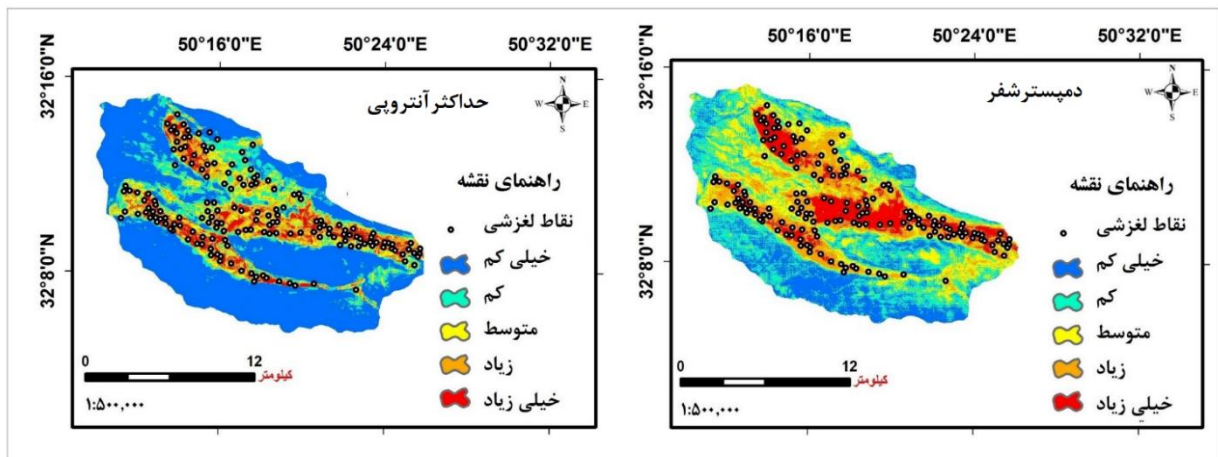
نتایج حاصل از طبقه بندی نقشه‌های پهنه بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش نشان داد (شکل ۷) در مدل دمپسترشفر سطح رده‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، خیلی کم به ترتیب با نسبت‌های ۱۲/۵۳، ۱۸/۹۰، ۲۲/۱۳، ۲۷/۵۹ و ۱۸/۸۵ درصد و در مدل حداکثر آنتروپی به ترتیب ۸/۲۴، ۱۱/۳۵، ۱۱/۵۹، ۱۳/۴۶ و ۵۵/۳۷ درصد از سطح ۲۷۶ کیلومتر مربعی منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند (جدول ۳، شکل ۸). همچنین از هم پوشانی نقشه پراکنش زمین لغزش با نقشه طبقه بندی پهنه بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش مشخص شد در مدل دمپسترشفر و

۴.۳. نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی

مدل‌ها

نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های نسبت‌فراوانی (FR) و سطح سلول‌هسته (SCAI) به منظور ارزیابی دقت تفکیک طبقه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین‌لغزش حاصل از اجرای مدل‌ها نشان می‌دهد مدل دمپسترشفر در مقایسه با مدل حداکثر آنتروپی از مطلوبیت مناسب‌تری برخوردار است.

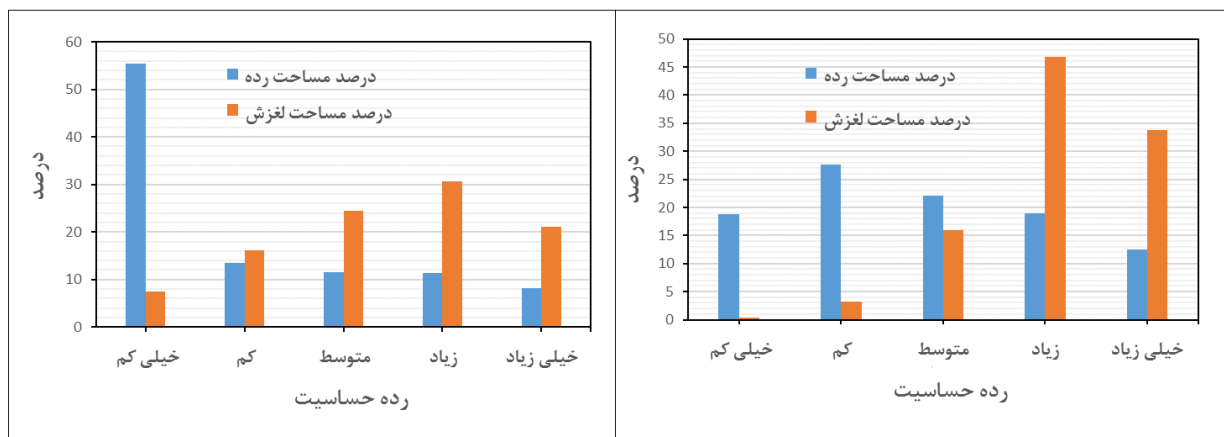
(جدول ۳ و شکل ۹). همانطور که شکل (۹) نشان می‌دهد روند صعودی شاخص نسبت‌فراوانی (FR) و نزولی شاخص سطح سلول‌هسته (SCAI) بصورت معکوس نسبت به همدیگر از رده‌های حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد می‌باشند. در هر دو مدل شاخص SCAI کاهش نشان می‌دهد ولی در مدل دمپسترشفر از رده خیلی کم به کم میزان کاهش بسیار زیادتر از مدل حداکثر آنتروپی می‌باشد. مقدار شاخص نسبت‌فراوانی در هر دو مدل از رده خیلی کم تا خیلی زیاد، دارای روند افزایشی است.



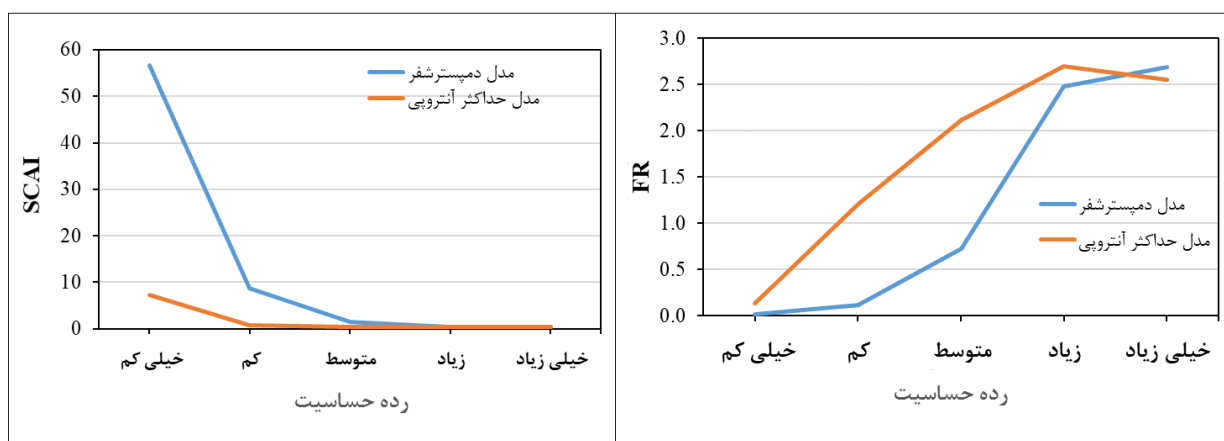
شکل ۷. نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به رخداد زمین‌لغزش با دو مدل دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی

جدول ۳. نتایج حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین‌لغزش و مقادیر FR و SCAI

مدل	رده حساسیت لغزش	مساحت لغزش (هکتار)	درصد مساحت لغزش	مساحت رده حساسیت (هکتار)	درصد مساحت رده	نسبت فراوانی FR	درصد SEED	SCAI شاخص
مدل دمپسترشفر	خیلی کم	۱۶/۷۱	۰/۳۳	۵۲۰۸/۶۲	۱۸/۸۵	۰/۰۲	۰/۳۳	۵۶/۶۰
	کم	۱۵۸/۷۷	۳/۱۶	۷۶۲۰/۷۲	۲۷/۵۹	۰/۱۱	۳/۱۶	۸/۷۲
	متوسط	۸۰۰/۱۳	۱۵/۹۵	۶۱۱۳/۲۸	۲۲/۱۳	۰/۷۲	۱۵/۹۵	۱/۳۹
	زیاد	۲۳۵۰/۲۵	۴۶/۸۵	۵۲۲۱/۷۰	۱۸/۹۰	۲/۴۸	۴۶/۸۵	۰/۴۰
	خیلی زیاد	۱۶۹۱/۱۴	۳۳/۷۱	۳۴۶۱/۶۸	۱۲/۵۲	۲/۶۹	۳۳/۷۱	۰/۳۷
مدل حداکثر آنتروپی	خیلی کم	۳۷۸/۱۹	۷/۵۴	۱۵۲۹۵/۶۳	۵۵/۳۷	۰/۱۴	۷/۵۴	۷/۳۴
	کم	۸۱۳/۹۹	۱۶/۲۲۱	۳۷۱۷/۳۲	۱۳/۴۶	۱/۲۱	۱۶/۲۲	۰/۸۳
	متوسط	۱۲۳۰/۹۴	۲۴/۵۴	۳۲۰۲/۳۳	۱۱/۵۹	۲/۱۲	۲۴/۵۴	۰/۴۷
	زیاد	۱۵۳۷/۸۹	۳۰/۶۵	۳۱۳۵/۴۲	۱۱/۳۵	۲/۷۰	۳۰/۶۵	۰/۳۷
	خیلی زیاد	۱۰۵۵/۹۹	۲۱/۰۵	۲۲۷۵/۳۰	۸/۲۴	۲/۵۶	۲۱/۰۵	۰/۳۹



شکل ۸. درصد مساحت زمین لغزش رخ داده و رده‌های حساسیت عوامل موثر در مدل دمپسترشفر (سمت راست) و مدل حداکثر آنتروپی (سمت چپ)



شکل ۹. نمودار SCAI و FR

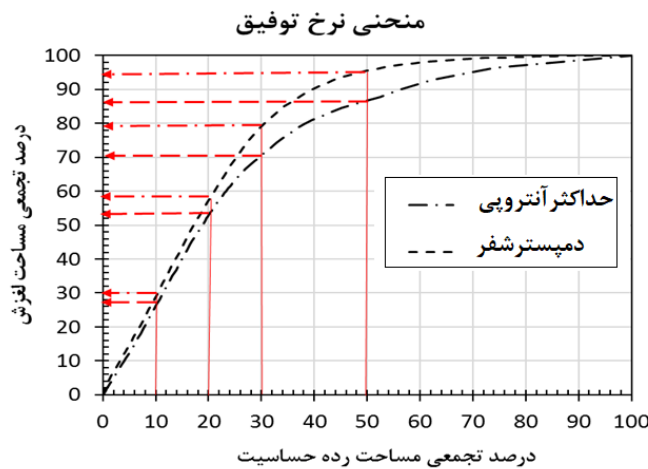
تجمعی مساحت رده‌های حساسیت در مقابل درصد تجمعی مساحت زمین لغزش رده‌های مختلف برای دو مدل نشان می‌دهد برای مقادیر تجمعی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد از مساحت رده‌های حساسیت در مدل دمپسترشفر به ترتیب ۳۰، ۵۸، ۸۰ و ۹۵ درصد و در مدل حداکثر آنتروپی به ترتیب ۲۶، ۵۴، ۷۰ و ۸۶ درصد رخداد زمین لغزش‌ها پوشش داده می‌شوند (شکل ۱۰). بنابراین در مدل دمپسترشفر با توجه به پوشش بالاتر رخداد زمین لغزش‌ها در رده‌بندی‌های مختلف حساسیت، می‌توان چنین نتیجه گرفت که این مدل از دقت بهتری در

در مدل حداکثر آنتروپی از رده زیاد به خیلی زیاد کمی شاخص نسبت فراوانی کاهش نشان می‌دهد. این درحالیست که شاخص FR در مدل دمپسترشفر از رده خیلی کم تا خیلی زیاد بصورت پیوسته افزایش از خود نشان می‌دهد. بنابراین مدل دمپسترشفر در مجموع بر اساس روندهای منظم و معکوس میزان FR در مقابل با SCAI، از مطلوبیت و دقت طبقه‌بندی بهتری برای رده‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش برخوردار می‌باشد.

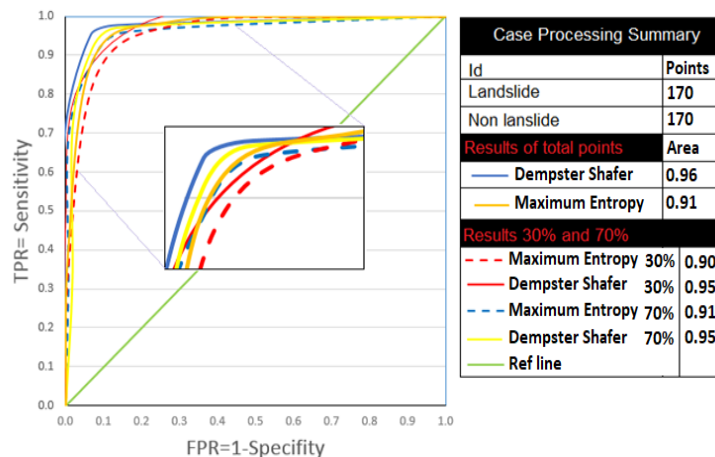
همچنین همانطور که منحنی نرخ توفیق نمودار درصد

کارآمدی و مطلوبیت بیش تری در پیش بینی رخداد زمین لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشد (شکل ۱۱). این نتیجه با نتایج دیویس و بلسیوس [۷]، کرنژادی و همکاران [۱۴]، میرزائی و همکاران [۱۸]، پانندی و همکاران [۲۵]، پوزنادر و همکاران [۲۶]، پارک [۲۷] و تیموری و اسدی [۴۱] هم‌خوانی دارد.

پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش برخوردار می‌باشد. نتایج منحنی ROC به منظور اعتبارسنجی، ارزیابی، مقایسه و پیش‌بینی مدل‌های دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی نشان داد مدل دمپسترشفر در مرحله آموزش ($AUC=0/95$) و آزمایش ($AUC=0/95$) نسبت به مدل حداکثر آنتروپی در مرحله آموزش ($AUC=0/91$) و آزمایش ($AUC=0/90$) از



شکل ۱۰. منحنی نرخ توفیق برای کارآمدی پهنه‌بندی حساسیت رخداد زمین لغزش مدل‌های دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی



شکل ۱۱. سطح زیر منحنی ROC برای پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش مدل‌های دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی

۴. نتیجه گیری

به مدل حداکثر آنتروپی با سطح زیر منحنی ۰/۹۱ و سطح سلول هسته نزولی با شیب کم و نسبت فراوانی صعودی نامنظم از رده‌های حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد از کارآمدی بهتری برخوردار می‌باشد. مدل حداکثر آنتروپی با استفاده از بسته نرم افزاری متن باز مکسنت با سرعت و دقت خوب در ارزیابی عوامل موثر و اعتبارسنجی پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش می‌تواند بکار گرفته شود. روش‌های احتمالاتی دو متغیره دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی بطور کلی با سطح زیر منحنی ۰/۹۶ و ۰/۹۱ به ترتیب با مقادیر ۰/۹۵ و ۰/۹۱ در حالت توسعه مدل و مقادیر ۰/۹۵ و ۰/۹۰ در حالت اعتبارسنجی می‌توانند در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد زمین لغزش‌ها کارآمد باشند. در پایان با توجه به نتایج حاصل شده برای مدل‌های دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی به ترتیب از جمله روش‌های داده کاوی دو متغیره به روش یادگیری ماشین هستند که به منظور مدیریت و حفاظت آب و خاک و توسعه پایدار در منطقه مورد مطالعه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند.

سپاس‌گزاری

این پژوهش بر اساس بخشی از اطلاعات پایه پروژه تحقیقاتی ملی با عنوان "ارزیابی کارایی فن تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PSInSAR) در شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها" با کد مصوب ۹۴۱۲۰-۲۹-۳۸-۰ انجام شده است. لذا نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به خاطر حمایت‌های مالی و ستادی ابراز می‌نمایند.

روش‌های آماری احتمالاتی دو متغیره در اولویت بندی، پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد زمین لغزش در عین سادگی از نظر کاربرد، دارای دقت خوبی می‌باشند. در این پژوهش با استفاده از مقادیر نسبت فراوانی، مدل‌های حداکثر آنتروپی و دمپسترشفر، اقدام به ارزیابی عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش‌ها، پهنه‌بندی، پیش‌بینی و اعتبارسنجی حساسیت رخداد زمین لغزش گردید. ۱۵ عامل موثر شامل بارش سالیانه، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده و آبراهه، شاخص وضعیت توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص هم‌گرایی، گرادیان شیب، شاخص توان آبراهه، فاصله از گسل، طول شیب، تحذب سطح زمین، جهت شیب، بافت سطح زمین و کاربری اراضی بررسی، وزن دهی و کمی شدند و نتایج نشان داد که آنها به ترتیبی که ذکر شد در رخداد زمین لغزش‌ها اهمیت دارند. بیش از نیمی از منطقه مورد مطالعه دو آب صمصامی چهارمحال و بختیاری در پهنه حساسیت خیلی زیاد و زیاد قرار دارد. عمده زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه از نوع چرخشی، انتقالی و مرکب یا مختلط می‌باشند. بدلیل رخنمون‌های مارنی شیلی و سازندهای سست کواترنری، تراکم رخداد زمین لغزش‌ها زیاد می‌باشد. نقشه پهنه‌بندی حاصل از برازش مدل دمپسترشفر دارای کارآمدی و دقت بالاتر نسبت به مدل حداکثر آنتروپی می‌باشد. یک سوم مساحت پهنه‌های با حساسیت بالا توسط این مدل، بیش از ۸۰ درصد زمین لغزش‌های منطقه را در بر می‌گیرند. همچنین مدل دمپسترشفر در پیش‌بینی رخداد زمین لغزش‌ها از اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد. مدل دمپسترشفر با سطح زیر منحنی ۰/۹۶ و با منحنی سطح سلول هسته نزولی با شیب زیاد و نسبت فراوانی صعودی نامنظم از رده‌های حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد نسبت

References

- [1] An, P., Moon, W.M., and Bonham-Carter, G.F. (1994). Uncertainty management in integration of exploration data using the belief function. *Nonrenewable Resources*, 3 (1), 60-71.
- [2] Arabameri, A., Shirani, K., and Heydari, F. (2018). Comparison of a comparison of artificial neural network and multivariate regression methods in landslides hazard zonation. *Watershed Engineering and Management*, 9 (4), 451-64 (in Persian).
- [3] Baharvand, S., and Soori, S. (2016). Prioritization of landslide effective factors and its hazard mapping using fuzzy logic. *Journal of Engineering Geology*, 9 (4), 3093-3112 (in Persian).
- [4] Baboli moakher, H., Shirani, K., and Taghian. A.R. (2018). Performance of chaos theory on natural systems in landslide hazard zonation in Fahlian River Basin. *Journal of Geoscience*, 28 (109), 187-200 (in Persian).
- [5] Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M.C., and Vlaicu, M. (2010). Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin Romania. *Environmental Earth Science*, 63 (2), 397-406.
- [6] Convertino, M., Troccoli, A., and Catani, F. (2013). Detecting fingerprints of landslide drivers: A MaxEnt model. *JGR: Earth Surface*, 118 (3), 1367-1386.
- [7] Davis, J., and Blesius, L. (2015). A hybrid physical and maximum-entropy landslide susceptibility model. *Entropy*, 17 (6), 4271-4292.
- [8] Dempster, A.P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multi valued mapping. *Ann Math Stat*, 38 (2), 325-339.
- [9] Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., and Yates, C.J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17 (1), 43-57.
- [10] Gibbs, H.K., Ruesch, A.S., Achard, F., Clayton, M.K., Holmgren, P., Ramankutty, N., and Foley, J.A. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (38), 16732-16737.
- [11] Goetz, J. N., Guthrie, R. H., and Brenning, A. (2011). Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology*, 129 (3-4), 376-386.
- [12] Hong, H., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., Chapi, K., Ahmad, B., Shadman, M., Yari, A., Tian, Y., and Bui, D. (2019). Landslide susceptibility assessment at the Wuning area, China: a comparison between multi-criteria decision making, bivariate statistical and machine learning methods. *Natural Hazards*, 96 (1), 173-212.
- [13] Jiao, Y., Zhao, D., Ding, Y., Liu, Y., Xu, Q., Qiu, Y., Liu, C., Liu, Z., and Zha, Z., Li, R. (2019). Performance evaluation for four GIS-based models purposed to predict and map landslide susceptibility: A case study at a World Heritage site in Southwest China. *Catena*, 183, 104221.
- [14] Kornejady, A., Ownegh, M., and Bahremand, A. (2017). Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, 152, 144-162.
- [15] Karam, A., and Mahmoudi, F. (2005). the Quantitative modelling and the zonation of landslide risk in the folded Zagros (Case study of Sarkhoun Watershed-Chaharmahal and Bakhtiari province). *Geographical Research Quarterly* 1,1 (in Persian).
- [16] Landslide studies group Ministry of Jihad Sazandegi. LSG. (2000). (in Persian)
- [17] Mehrotra, G.S., Sarkar, S., and Dharmaraju, R. (1992). Landslide hazard assessment in Rishikesh-Tehri area, Garhwal Himalaya, India. *International Symposium on Landslides*, 1001-1007.

- [18] Mirzaei, G., Soltani, A., Soltani, M., and Darabi, M. (2018). An integrated data mining and multi-criteria decision-making approach for hazard-based object ranking with a focus on landslides and floods. *Environmental Earth Sciences*, 77, 581.
- [19] Mirsanei, S., and Rahmatullah, K. (1999). An analytical approach to the characteristics of landslides in the country. *The First Iranian Conference on Engineering Geology and Environment*, (in Persian).
- [20] Mansouri, M., Shirani, K., Ghazifard, A., and Emami, N. (2017). Application of probabilistic methods in landslide hazard zonation Mapping (Case study: Doab Samsami Region in Chaharmahal and bakhtiari province). *Geosciences*, 26 (102), 267–80 (in Persian).
- [21] Mansouri, M., Shirani, K., and Ghazifard, A. (2015). Landslide risk zoning of Doab Samsami area of Chaharmahal and Bakhtiari province by AHP method. *The Second National Conference on New Horizons in Empowerment and Sustainable Development of Architecture, Civil Engineering, Tourism, Energy and Urban and Rural Environment*, (in Persian).
- [22] Mohammadi, M., Moradi, M., Feyznia, S., and Pourghasemi, H. (2008). Effects of rangeland vegetation on slope stability in a part of haraz watershed using gis. *Journal of Rangeland*, 289-300 (in Persian).
- [23] Neuhäuser, B., and Terhorst, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using (weights-of-evidence) applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86 (1/2), 12–24.
- [24] Nasiri, S., and Ehteshami Moinabadi. M. (2004). An Overview to Iranian Landslide. *Distribution and Occurrence of Landslides in Iran. Case Study in Haraz Highway Alborz Mountain Iran*, 166/2-62.
- [25] Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R., and Sharma, M.C. (2018). Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor. *Garhwal Himalaya. Geocarto International*, 35 (2), 168-187.
- [26] Pournader, M., Feiznia, S., Ahmadi, H., Karimi, H., and Peirovan, H. (2020). Assessing the stability of maximum entropy prediction for rill erosion modelling. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 9 (2), 123-139.
- [27] Park, N.W. (2015). Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, 73 (3), 937-949.
- [28] Phillips, S.J., Dudík, M., and Schapire, R.E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 83.
- [29] Phillips, S.J., Anderson, R.P., and Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190 (3/4), 231-259.
- [30] Phillips, S.J., and Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent. new extensions and a comprehensive evaluation, *Ecography*, 31 (2), 161-175.
- [31] Rajabzadeh, F., ghiasi, S., and Rahmati. O. (2019). The performance of the maximum entropy algorithm and geographic information system in shallow landslide susceptibility assessment. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 8 (2), 57-73 (in Persian).
- [32] Razavi Tameh, S.V., and Shirani, K. (2019). Landslide hazard zoning using frequency ratio, entropy methods and TOPSIS decision-making methods (Case study: Fahliyan Basin, Fars). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9 (4), 119-138 (in Persian).
- [33] Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*. Princeton university press, (Vol. 42).
- [34] Shirani, K., Seif, A., and Nasr, A. (2013). Investigation of effective's parameters on Mass movement by using of landslide hazard zonation Maps (Case Study: Northern's Karoon Basin). *Journal of Geoscience*, 23 (89) , 3-10 (in Persian).

- [35] Shirani, K., and Arabameri, A.R. (2015). Landslide hazard zonation using logistic regression method (Case study: Dez-e-Oulia basin). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 19 (72), 321-335.
- [36] Shirani, K., Pasandi, M., and Arabameri, A.R. (2018). Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran, *Natural Hazards*, 93 (3), 1379-1418.
- [37] Sidle, R.C., and Ochiai, H. (2006). Landslides processes, prediction, and land use.: *Water Resources Monograph*, 18. American Geophysical Union, Washington D.C, 322-326.
- [38] Swets, J.A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240 (4857), 1285–1293.
- [39] Tien Bui, D., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Alizadeh, M., Chen, W., Mohammadi, A., Ahmad, B. Bin, Panahi, M., and Hong, H. (2018). Landslide detection and susceptibility mapping by airsar data using support vector machine and index of entropy models in cameron highlands, malaysia. *Remote Sensing*, 10 (10), 1527.
- [40] Teimoori, Y., Hosseinzadeh, S.R., Kavian, A., and Pourghasemi, H. (2017). Determination of Sensitive Areas to Landslide Occurrence Using Shannon Entropy Model (CaseStudy: Chahardangeh Basin, Mazandaran province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6 (2), 183-204 (in Persian).
- [41] Teimouri, M., and Asadi nalivan, O. (2020). Susceptibility zoning and prioritization of the factors affecting landslide using maxent, geographic information system and remote sensing models (Case study: Lorestan province). *Hydrogeomorphology*, 6 (2), 155-79 (in Persian).
- [42] Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: A Review of Principles and Practice*, (Issue 3).

Prioritization of effective parameters and landslide susceptibility zonation using maximum entropy and Dempster-Shafer in Doab Samsami, Chaharmahal Bakhtiari

- ❖ **Kouros Shirani***; Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
- ❖ **Reza Naderi Samani**; Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

Abstract

It is important effective factors prioritization, landslide susceptibility zonation, modeling and predicting in environmental decision-making and planning in order to prevent the destruction and protection of natural resources in mountainous areas, specially. The aim of this study is to prioritize effective factors, landslide susceptibility zonation assessment using two-variable probability methods of maximum entropy (MaxEnt) and Dempster-Shafer in Doab Samsami watershed of Chaharmahal and Bakhtiari province. For this purpose, 15 factor maps affecting landslide occurrence as independent variables and landslide distribution map as a dependent variable were prepared using existing maps, ALOS digital elevation model, Landsat 8 satellite images and field survey. After preparing the required geomorphometric maps in SAGA GIS®7.7.1 software, classification of independent variables was performed using frequency ratio index (FR) and landslide distribution map in the environment ArcGIS® 10.8 and they were weighed or quantitated them. In order to implementation and validation of models, landslide distribution data were randomly divided into two categories of training and test data in the proportion of 70 and 30%, respectively. Using 15 effective factors and landslide distribution map, Max Entropy (MAXENT) and Dempster-Shafer models are performed and landslide susceptibility zonation maps are prepared and each model is divided into five very low, low, moderate, high and very high. In order to evaluate the classification accuracy and validation of the models, the frequency ratio and seed cell area index (FR&SCAI) and the area under receiver characteristic curve (AUC-ROC) were used, respectively. According to the results of the maximum entropy model, annual precipitation factors, lithology, distance to road and drainage, topographic position index, topographic wetness index, convergence index, slope gradient, stream power index, distance to fault, slope length, Convexity of land surface, slope direction, surface texture, and land use are important in landslide occurrence, respectively. According to landslide susceptibility zonation maps in both models, more than 50% of landslides occurred in high and very high susceptibility categories. Finally, the validation results of the models showed that the Dempster-Shafer model with AUC-ROC index of 0.95 and classification accuracy with higher FR & SCAI index, greater efficiency and desirability for zoning, modeling and landslide prediction in the study area.

Keywords: Dempster-Shafer, Doab Samsami, Landslide, Maximum entropy, Zonation.