



## پهنه‌بندی حساسیت و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه‌ی موردی: استان لرستان)

مهدی تیموری<sup>۱\*</sup>، امید اسدی نلیوان<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، مجتمع آموزش عالی شیروان، خراسان شمالی، ایران

۲- دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳

### چکیده

زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین خطرات طبیعی با خسارات اقتصادی و اکولوژیکی قابل توجه است. استان لرستان به دلیل شرایط کوهستانی و پرباران از جمله مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن در استان لرستان با استفاده از روش حداکثر آنتروپی و مدل MaxEnt است. جهت انجام این تحقیق از ۱۱ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارندگی و شاخص رطوبت توپوگرافیک استفاده شده است. در این تحقیق تقسیم‌بندی ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها برای اعتبارسنجی جهت تعیین حساسیت و دقت مدل مورد بررسی قرار گرفت و برای ارزیابی مدل از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. از مجموع ۱۷۶ زمین‌لغزش، با استفاده از روش فاصله ماهالانویس ۷۰ درصد به عنوان داده‌های آزمون و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های اعتبارسنجی بهترین تقسیم‌بندی شد و دقت مدل در مراحل آزمون و اعتبارسنجی بر اساس سطح زیر منحنی در سایر تقسیم‌بندی‌ها کاهش پیدا کرد. نتایج نشان داد که ۳۵/۵ درصد استان لرستان دارای حساسیت وقوع زمین‌لغزش است. همچنین بر اساس نمودار Jackknife لایه‌های بارندگی، فاصله از جاده، لیتولوژی و کاربری اراضی به ترتیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش بودند. سطح زیر منحنی (AUC) بر اساس منحنی تشخیص عملکرد نسبی، نشان‌دهنده‌ی دقت ۹۰ درصد (عالی) روش حداکثر آنتروپی در مرحله‌ی آموزش و ۸۳ درصد (خیلی خوب) در مرحله‌ی اعتبارسنجی برای تعیین مناطق دارای حساسیت وقوع زمین‌لغزش بود. نتایج این تحقیق جهت آمایش سرزمین و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش، قابل استفاده برای مدیران و مسئولان استانی خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** استان لرستان، حداکثر آنتروپی، یادگیری ماشینی، زمین‌لغزش

### ۱- مقدمه

تخریب سرزمین یکی از مشکلات عمده در کشورهای در حال توسعه است که عمدتاً به علت سوءاستفاده از منابع خاک و به تبع آن فرسایش اتفاق می‌افتد (سیمونکیس و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶: ۱۵۶۵). حرکات توده‌ای از جمله زمین لغزش از مهم‌ترین مباحث در زمینه مخاطرات طبیعی است، چرا که وقوع آن می‌تواند خسارات انسانی و اقتصادی فراوانی را به ویژه در مناطق کوهستانی در پی داشته باشد (ژانگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹: ۵؛ امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۰۸؛ محمدزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۲۸). زمین‌لغزش موجب خسارت به انواع سازه‌های مهندسی، خطوط انتقال نیرو، جنگل‌ها، مراتع، مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی می‌شود و نتیجه آن ایجاد رسوب و سیلاب‌های گل‌آلود است که باعث پرشدن مخازن سدها می‌شود (وانگ و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸: ۵؛ لیو و دوآن<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸: ۳). بخش وسیعی از کشور ایران را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد و به همین دلیل زمین‌لغزش یکی از حوادث طبیعی است که سالانه خسارات جانی و مالی فراوانی به کشور وارد می‌کند (رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷: ۱۲۱؛ کرنژادی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۷: ۱۴۶). طبق آمار تا سال ۱۳۸۷، وقوع ۲۵۹۰ زمین‌لغزش در کشور موجب مرگ ۱۶۲ نفر، تخریب ۱۷۶ خانه، ایجاد خسارات مالی به میزان ۱۸۶۶ میلیارد ریال، تخریب ۶۷۶۳ هکتار جنگل، تخریب ۱۷۰ کیلومتر راه ارتباطی و ایجاد رسوب سالانه به حجم ۹۶۳۷۰۸ مترمکعب شده است (سپهر و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۱). با توجه به تأثیرات مخرب وقوع زمین‌لغزش‌ها بر روی منابع طبیعی و سکونت‌گاه‌های انسانی و فرسایش حجم قابل توجه خاک‌های بارز، شناسایی مناطق مستعد و پهنه‌بندی پتانسیل وقوع یا حساسیت زمین‌لغزش<sup>۶</sup> بسیار ضروری و مهم می‌باشد. حساسیت زمین‌لغزش به بررسی و ارزیابی زمین‌لغزش‌های موجود

1- Symeonakis et al.,  
 2- Zhang et al.,  
 3- Wang et al.,  
 4- Liu & Duan  
 5- Kornejady et al.,  
 6- Landslide susceptibility

و یا مناطق دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، بدون توجه به زمان رویداد آن می‌پردازد (چن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۱۱). در سال‌های اخیر بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور همراه با روش‌های یادگیری ماشینی<sup>۲</sup> گامی نو در پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش ایجاد کرده است (بویی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸: ۹) و نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش با دقت مناسب و قابل قبولی تهیه می‌شوند. ژیاو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از چهار مدل ارزش اطلاعات، حداکثر آنتروپی، مدل اقلیمی بیولوژیکی و میانگین فاصله و با کمک ۱۸ لایه‌ی اطلاعاتی در جنوب‌غربی چین نسبت به تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش اقدام کردند. اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها نشان داد که مدل حداکثر آنتروپی بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها دارد و براساس نمودار چکنایف سه عامل نزدیکی به جاده‌ها، بارندگی سالانه و نزدیکی به شهرها مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز خطرات زمین‌لغزش بودند. کرکیس و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش حداکثر آنتروپی به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در رومانی پرداختند. در این مطالعه از ۷ عامل استفاده شد که نتایج آن‌ها نشان داد تأثیرگذارترین عوامل کاربری اراضی و درجه شیب بوده است. همچنین با توجه به مقدار ROC معادل ۰/۸۴ عملکرد مدل بسیار خوب ارزیابی گردید.

پاندی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) با استفاده از دو روش حداکثر آنتروپی و ماشین بردار پشتیبان و به کمک ۱۱ لایه اطلاعاتی به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در هیمالیا پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که هر دو مدل کارایی خوبی دارند و مدل ماشین بردار پشتیبان دقت بالاتری دارد. همچنین آن‌ها مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش را فاصله از گسل، فاصله از جاده و ارتفاع بیان کردند. کرنژادی و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوزه آبخیز زیارت پرداختند.

1- Chen et al.,

2- Machine learning

3- Bui et al.,

4- Pandey et al.,

آن‌ها ضمن تائید کارایی مدل جهت تعیین حساسیت زمین‌لغزش عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش را به ترتیب لیتولوژی، فاصله از جاده، بارندگی، کاربری اراضی و فاصله از گسل بیان کردند. رضوی و شیرانی (۱۳۹۷) با مقایسه سه روش نسبت فراوانی، آنتروپی و تاپسیس در حوزه‌ی فهلیان فارس به این نتیجه رسیدند که روش آنتروپی کارایی بالاتری نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر نظرات کارشناسی دارد و به ترتیب فاصله از جاده، شاخص قدرت جریان، بارندگی، کاربری اراضی و شیب عوامل مؤثرتری در وقوع زمین‌لغزش هستند. تیموری و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از روش آنتروپی شانون در استان مازندران و با کمک ۱۶ لایه مؤثر به تعیین پهنه‌های حساس به وقوع زمین‌لغزش پرداختند. آن‌ها کارایی این روش را خوب ارزیابی کردند و به ترتیب ارتفاع، شیب، انحنای سطح و کاربری اراضی را مهم‌ترین عوامل معرفی کردند. از دیگر تحقیقات در زمینه استفاده از مدل حداکثر آنتروپی جهت تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش می‌توان به مطالعات (پارک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵؛ دیویس و بلسیوس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵؛ میرزایی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸) اشاره کرد.

شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، گامی مهم و ضروری در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز به ویژه در مناطق دارای بارندگی زیاد و کوهستانی می‌باشد. با توجه به مرور منابع انجام گرفته تاکنون مطالعه جامعی در ارتباط با پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش در استان لرستان که با توجه به بارندگی زیاد و کوهستانی بودن این استان یکی از مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌باشد، انجام نشده است. بنابراین انجام پژوهش حاضر برای ارزیابی و مدیریت این استان به منظور پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش ضروری و حیاتی است. هدف از این تحقیق، تعیین مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش حداکثر آنتروپی و اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. تفاوت این تحقیق با سایر تحقیقات مشابه استفاده از روش

1- Park

2- Davis &amp; Blesius

3- Mirzaei et al.,

فاصله ماهالانوبیس<sup>۱</sup> جهت تقسیم‌بندی داده‌های اعتبارسنجی و آموزش به‌جای تقسیم‌بندی تصادفی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند جهت برنامه‌ریزی در جهت کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده سیاست‌گذاران و مسئولان قرار بگیرد.

## ۲- مواد و روش

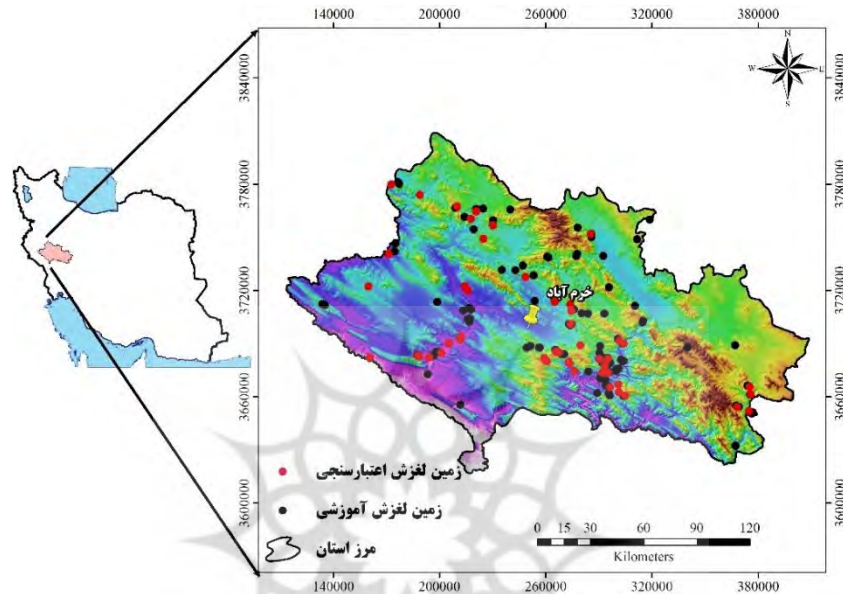
### - منطقه‌ی مورد مطالعه

استان لرستان با مساحت ۲۸۲۹۶۱۲ هکتار یکی از استان‌های بزرگ غرب کشور محسوب می‌شود. منطقه‌ی مورد مطالعه در محدوده‌ی جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه تا ۵۰ درجه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). این استان به دلیل قرار گرفتن در مسیر رشته‌کوه زاگرس دارای توپوگرافی کوهستانی است که همین امر باعث شده میزان بارندگی با متوسط ۷۸۰ میلیمتر در سال داشته باشد و بعد از گیلان و مازندران سومین کشور از نظر میزان بارندگی است.

### - عوامل مورد استفاده جهت تعیین حساسیت زمین‌لغزش

بعد از مرور منابع گسترده جهت شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش تعداد ۱۱ عامل شامل شیب، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، کاربری اراضی، لیتولوژی، انحنای سطح، بارندگی و شاخص رطوبت توپوگرافیک (هونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ پاندی و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کرنژادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷؛ امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ محمدخان و همکاران، ۱۳۹۳) جهت تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش تهیه گردید.

1- Mahalanobis distance



شکل (۱) موقعیت استان لرستان در ایران و زمین لغزش‌های آموزشی و اعتبارسنجی  
Fig (1) Location of Lorestan province in Iran and training and validation landslides

در این تحقیق از مجموع ۱۷۶ زمین لغزش، با استفاده از روش فاصله ماهالانوبیس ۵۳ زمین لغزش (۳۰ درصد) به عنوان داده‌های اعتبارسنجی و ۱۲۳ زمین لغزش (۷۰ درصد) به عنوان داده‌های آزمون (آموزش) طبقه‌بندی شدند. این نوع از فاصله توسط ماهالانوبیس (۱۹۳۶) ارائه شد. در یک محیط فیزیکی، مشاهده‌ی یک پدیده نظیر زمین لغزش وابسته به یک شرایط خاص تحت عنوان عدم پایداری می‌باشد. این شرایط خاص تحت تأثیر یک سری متغیر (عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش) در قالب بردار به صورت رابطه‌ی (۱) قابل توصیف است:

$$\text{Cell}_i = [a_{1(i)}, a_{2(i)}, \dots, a_{n(i)}; S] \quad (1)$$

که در آن  $\text{Cell}_i$ ،  $a_{n(i)}$  و  $a_{1(i)}$  متغیرهای تأثیرگذار معرف هر پیکسل (مقادیر شیب، ارتفاع و ...) بوده و  $S$  می‌تواند یک به معنای پیکسل کاملاً ناپایدار و صفر به معنای پیکسل کاملاً پایدار

باشد. حال احتمال وقوع زمین‌لغزش در سایر سلول‌ها (سلول‌های عدم حضور زمین‌لغزش) از رابطه (۲) و در قالب فاصله بیان می‌شود.

$$Dm = \sqrt{(x - m)^T \Sigma^{-1}(x - m)} \quad (2)$$

که در آن  $x$  بردار یا ماتریس هر یک از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش،  $m$  میانگین مقادیر هر یک از عوامل،  $T$  معکوس ماتریس مقادیر عوامل و  $\Sigma^{-1}$  کواریانس معکوس ماتریس می‌باشد. لازم به ذکر است که فاصله ماهالانوبیس به غنای تقسیم‌بندی داده‌ها کمک می‌کند و از تصادفی بودن انتخاب نقاط برای اعتبارسنجی جلوگیری می‌کند (کرنژادی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۵۴). همچنین تقسیم‌بندی به صورت ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد اعتبارسنجی و ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۳۰ درصد آموزش طبقه‌بندی شد تا میزان حساسیت و دقت مدل مورد بررسی قرار گیرد.

ابتدا مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat-8 در ابعاد ۳۰ متر تهیه شد. تغییرات ارتفاع موجب تغییرات بارندگی می‌شود و در نتیجه بر میزان پوشش گیاهی، تغییرات دمایی، هوازگی و میزان نفوذ آب تأثیرگذار خواهد بود (کدوی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸: ۶؛ دینگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷: ۶۲۵). لایه‌های شیب، جهت شیب و انحنای سطح با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و به ترتیب از توابع Aspect, Slope و Plan Curvature تهیه شده‌اند. افزایش شیب زمین باعث افزایش رواناب می‌شود و در نتیجه آب در دسترس را خارج می‌کند (دنگ و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶: ۷). لایه‌ی شیب یکی از پارامترهای توپوگرافیکی خیلی مهم در کنترل وقوع زمین‌لغزش است (چن و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۱۲). جهت شیب بر میزان دریافت بارندگی اثرگذار است و بر همین اساس نوع پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. انحنای سطح در حقیقت انحنای مورفولوژیکی و توپوگرافیکی منطقه را نشان می‌دهد (رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷: ۱۲۶) و در شیب‌های مقعر باعث تجمع آب و در شیب‌های محدب باعث افزایش رواناب می‌شود (نقیبی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۴: ۱۷۵). لایه‌های فاصله از

1- Kadavi et al.,

2- Ding et al.,

3- Deng et al.,

4- Naghibi et al.,

آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها (استخراج از نرم‌افزار SAGA GIS)، فاصله از جاده بر اساس جاده‌های موجود (نقشه وزارت راه و شهرسازی کشور) و فاصله از گسل بر اساس گسل‌های موجود در منطقه (نقشه‌ی زمین‌شناسی) و با استفاده از تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و فاصله از گسل نقش بسیار مهمی در حساسیت وقوع زمین‌لغزش ایفا می‌کنند (رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷: ۱۲۶). در سازندهای مختلف شبکه‌ی زهکشی به وسیله‌ی ساختارهای تکتونیکی، لیتولوژی و توپوگرافی منطقه کنترل می‌شود و از آن‌ها به‌عنوان نقاط ضعف سازندها یاد می‌شود که باعث کاهش نفوذ آب زیرزمینی می‌شوند. جاده‌ها وضعیت طبیعی و شیب تعادل منطقه را به هم زده و باعث افزایش فشار به دامنه‌ی پایین جاده و زمین‌لغزش در نزدیکی جاده‌ها می‌شوند (اقدام و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶: ۵۵۷). جابجایی و فعالیت گسل‌ها اثرات مهمی دارد که یکی از اثرات چشمگیر آن زمین‌لغزش می‌باشد (چن و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۱۲). لایه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی منطقه استخراج شده است. نوع سنگ‌شناسی و سازندهای موجود عامل بسیار مهمی در وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شوند و واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در وقوع زمین‌لغزش هستند (اقدام و همکاران، ۲۰۱۶: ۵۵۷). کاربری اراضی بر روی رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و میزان نفوذ آب اثرگذار است و از طریق مقدار نفوذ بر وقوع زمین‌لغزش تأثیرگذار است و پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دامنه دارد (ریچن‌باچ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴: ۱۳۷۵). لایه شاخص رطوبت توپوگرافیک با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شدند. نقشه‌ی بارندگی با استفاده از اطلاعات ۷۳ ایستگاه باران‌سنجی تهیه شده است. ابتدا میانگین بارندگی ۲۰ ساله برای هر ایستگاه محاسبه شد و سپس با استفاده از روش کریجینگ معمولی (به دلیل کمترین میزان RMSE) در نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی بارندگی انجام گرفت. شاخص TWI (رابطه‌ی ۳) تأثیر توپوگرافی بر روی تولید رواناب را به

1- Aghdam et al.,

2- Reichenbach et al.,



صورت کمی بیان و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند (آرولبالاجی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹). در واقع افزایش TWI به معنی افزایش حجم آب در دسترس برای نفوذ می‌باشد.

$$TWI = \ln \frac{As}{\tan \beta} \quad (3)$$

که در آن  $As$  مساحت منطقه مشارکت‌کننده بالادست،  $\beta$  گرادیان توپوگرافی (شیب).

#### - مدل حداکثر آنتروپی

مدل حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که به صورت گسترده در سال‌های اخیر از جنبه‌های مختلف منابع طبیعی به خصوص زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته است. مدل حداکثر آنتروپی فقط بر اساس موقعیت زمین‌لغزش‌ها مدل‌سازی را انجام می‌دهد، در حالی که مدل‌های آماری و سایر روش‌ها علاوه بر موقعیت‌های وقوع زمین‌لغزش، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع زمین‌لغزش نیز هستند. این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هر یک از لایه‌های رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش را استخراج نماید. در این تحقیق همبستگی پارامترهای مؤثر بر زمین‌لغزش با نقاط مستعد زمین‌لغزش محاسبه و با همبستگی متغیرها با ۱۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه به عنوان نقاط زمینه یا شبه عدم حضور مقایسه گردید و از این طریق بی‌نظمی نسبی میان نقاط مستعد زمین‌لغزش و نقاط تصادفی کاهش می‌یابد (فیلیپس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۳۷). از سوی دیگر از آنجا که یافتن نقاط عدم مستعد زمین‌لغزش و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات در پی خواهد داشت، استفاده از مدل MaxEnt به عنوان یک روشی که فقط وابسته به نقاطی هستند که مستعد زمین‌لغزش هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور گردد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۳۸). ارزیابی این مدل با استفاده از منحنی ROC امکان‌پذیر است و سطح زیر نمودار AUC بدست آمده به عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص

1- Arulbalaji et al.,

2- Phillips et al.,

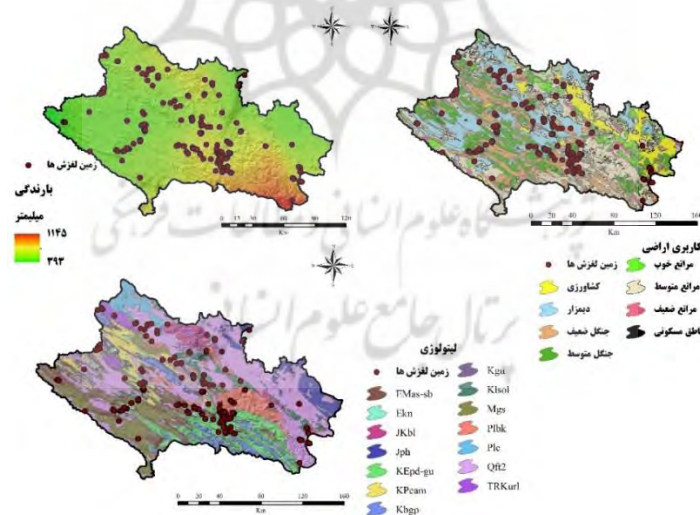
نقاط حضور و عدم حضور مورد توجه قرار می‌گیرد (الیت و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱: ۵۰). با توجه به مرور منابع انجام شده مقدار AUC دامنه ۰/۵ تا ۱ را دارد که به ترتیب نشان از دقت ضعیف تا عالی (شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۱۹) مدل برای پیش‌بینی و آموزش است. همچنین یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری الگوریتم حداکثر آنتروپی به کمک نرم‌افزار MaxEnt، قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر شناسایی مناطق زمین‌لغزش و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife می‌باشد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۳۷). در این روش پس از ایجاد مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شده و هر بار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف می‌گردد. بدین ترتیب میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### ۳- بحث و نتایج

شکل (۲) نقشه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش را نشان می‌دهد. بر اساس نقشه مدل راقومی ارتفاع، ارتفاع از سمت غرب به شرق در حال افزایش است و در مرکز حوزه به خصوص جنوب بیشترین میزان شیب را دارد و به سمت غرب و شرق شیب در حال کاهش می‌باشد. با توجه به شرایط توپوگرافی تراکم آبراهه بسیار بالاست. میزان بارندگی در بخش از جنوب حوزه بیشترین میزان را دارد. همچنین منطقه‌ی مورد مطالعه دارای ۵ نوع کاربری شامل جنگل (ضعیف و متوسط)، مراتع (خوب، متوسط و ضعیف)، کشاورزی، دیمزار و مناطق مسکونی می‌باشد. ۱۴ نوع واحد لیتولوژی در این منطقه قابل شناسایی است. شکل (۳) تأثیر پارامترهای مورد استفاده جهت تعیین مناطق دارای حساسیت وقوع زمین‌لغزش و اثر آن‌ها بر روی پیش‌بینی مدل MaxEnt را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل با افزایش ارتفاع تا ۷۰۰ متر، حساسیت وقوع زمین‌لغزش افزایش و از ۷۰۰ متر به بالا حساسیت کاهش پیدا کرده است. از دلایل افزایش حساسیت زمین‌لغزش در ارتفاع

1- Elith et al.,

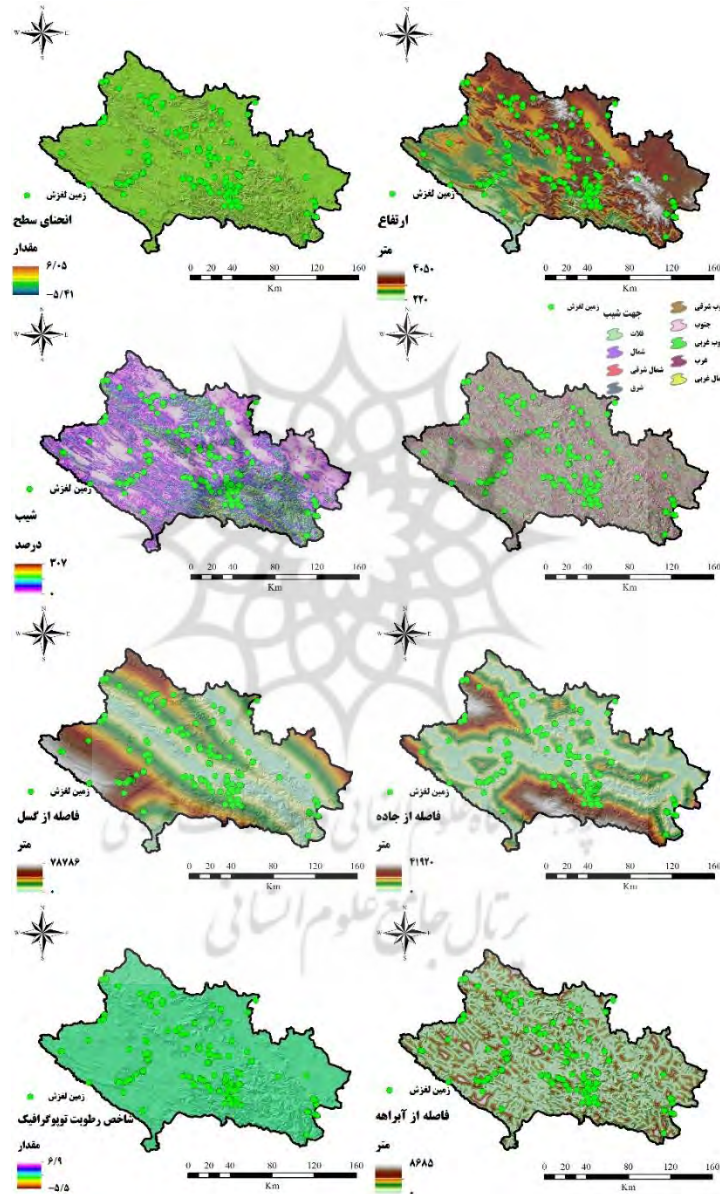
پایین خاک‌های عمیق و وجود دره‌های با شرایط اشباع در این مناطق است (کرنزادی و همکاران، ۲۰۱۷، پورقاسمی و روسی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶). در ارتفاعات بالا به علت اینکه نوع نزولات بیشتر به صورت برف است و در این مناطق خاکزایی به کندی صورت می‌گیرد و همچنین کاهش دخالت‌های انسانی، از دلایل کاهش وقوع زمین‌لغزش در ارتفاعات بالادست می‌باشد که با نتایج پارک (۲۰۱۵)، سالاریان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴)، رضوی و شیرانی (۱۳۹۷) همخوانی دارد. انحنای سطح در بازه‌ی ۱- تا ۰/۳ باعث افزایش حساسیت وقوع زمین‌لغزش شده است و در خارج از این دامنه با افزایش مقدار عددی انحنای سطح، حساسیت زمین‌لغزش با کاهش همراه بوده است. بیشتر مناطق حساس به زمین‌لغزش در شیب‌های محدب واقع شده است که این امر به علت واگرایی جریان آب در این دامنه‌ها و انبساط و انقباض خاک، دامنه‌های محدب می‌باشد که با نتایج چن و همکاران (۲۰۱۸) و تیموری و همکاران (۱۳۹۶) در یک راستا می‌باشند.



شکل (۲) نقشه‌ی عوامل مؤثر بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش  
 Fig (2) Map of the factors affecting landslide susceptibility

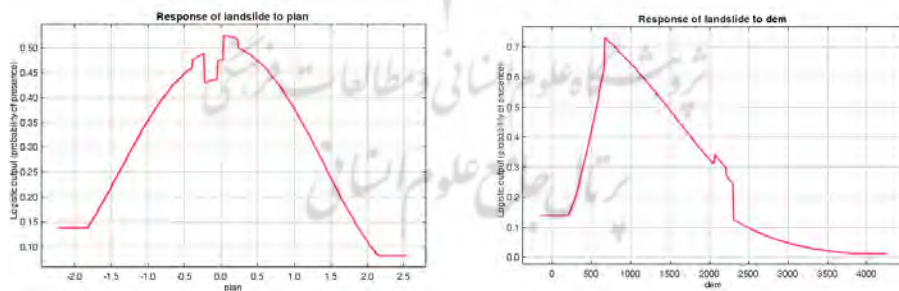
1- Pourghasemi & Rossi  
 2- Salarian et al.,

به علت دریافت بارش بیشتر دامنه‌های رو به جنوب (رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷)، جنوب غربی و غرب بیشترین حساسیت وقوع زمین‌لغزش را دارند. در حالت کلی با افزایش بارندگی میزان حساسیت وقوع زمین‌لغزش نیز افزایش پیدا کرده است که از دلایل آن می‌توان به افزایش نفوذ و در نتیجه افزایش آب زیرزمینی و فشار هوا اشاره کرد (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۸؛ کرنژادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ دیویس و بلسیوس، ۲۰۱۵). نتایج نشان داد که با افزایش شیب تا حدود ۳۰ درصد حساسیت وقوع زمین‌لغزش نیز افزایش پیدا کرده است و از شیب ۳۰ درصد به بالا روند ثابت نزولی حساسیت وقوع زمین‌لغزش اتفاق افتاده است که به دلیل کاهش فعالیت‌های انسانی می‌باشد و با نتایج پارک (۲۰۱۵) همخوانی دارد. این در حالی است که یوسف و همکاران (۲۰۱۶) به دلیل برتری نیروی برشی در مقابل نیروی مقاوم شیب‌های بیشتر را در وقوع زمین‌لغزش مؤثر می‌دانند. عامل فاصله از جاده بیانگر کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش با افزایش فاصله از جاده بوده است. این روند کاملاً نزولی بوده است که با نتایج زارع و همکاران (۲۰۱۳)، امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد. از دلایل افزایش حساسیت در مناطق نزدیک به جاده تغییر شیب دامنه‌ها، جاده‌های فرعی و خاک‌برداری می‌باشند (پورقاسمی و روسی، ۲۰۱۶). فاصله از گسل در حساسیت وقوع زمین‌لغزش نقشی دوگانه داشته است و در برخی موارد با افزایش فاصله از گسل، کاهش و افزایش حساسیت وقوع زمین‌لغزش رخ داده است. ولی در حالت کلی روند نزولی کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش اتفاق افتاده است که پارک (۲۰۱۵) و امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۶) به نتایج مشابه دست یافته‌اند. نتایج نشان‌دهنده روند نزولی کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش با افزایش فاصله از آبراهه بود که از دلایل آن می‌توان به ناپایداری دامنه‌های مشرف به آبراهه بر اثر فرسایش کنار رودخانه‌ای اشاره کرد که با نتایج چن و همکاران (۲۰۱۸)، کرنژادی و همکاران (۲۰۱۷)، رضوی و شیرانی (۱۳۹۷)، امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. با افزایش رطوبت توپوگرافی انتظار افزایش زمین‌لغزش وجود دارد (گائو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵)، ولی در این مطالعه با افزایش TWI کاهش حساسیت اتفاق افتاده است که با نتایج تیموری و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد.



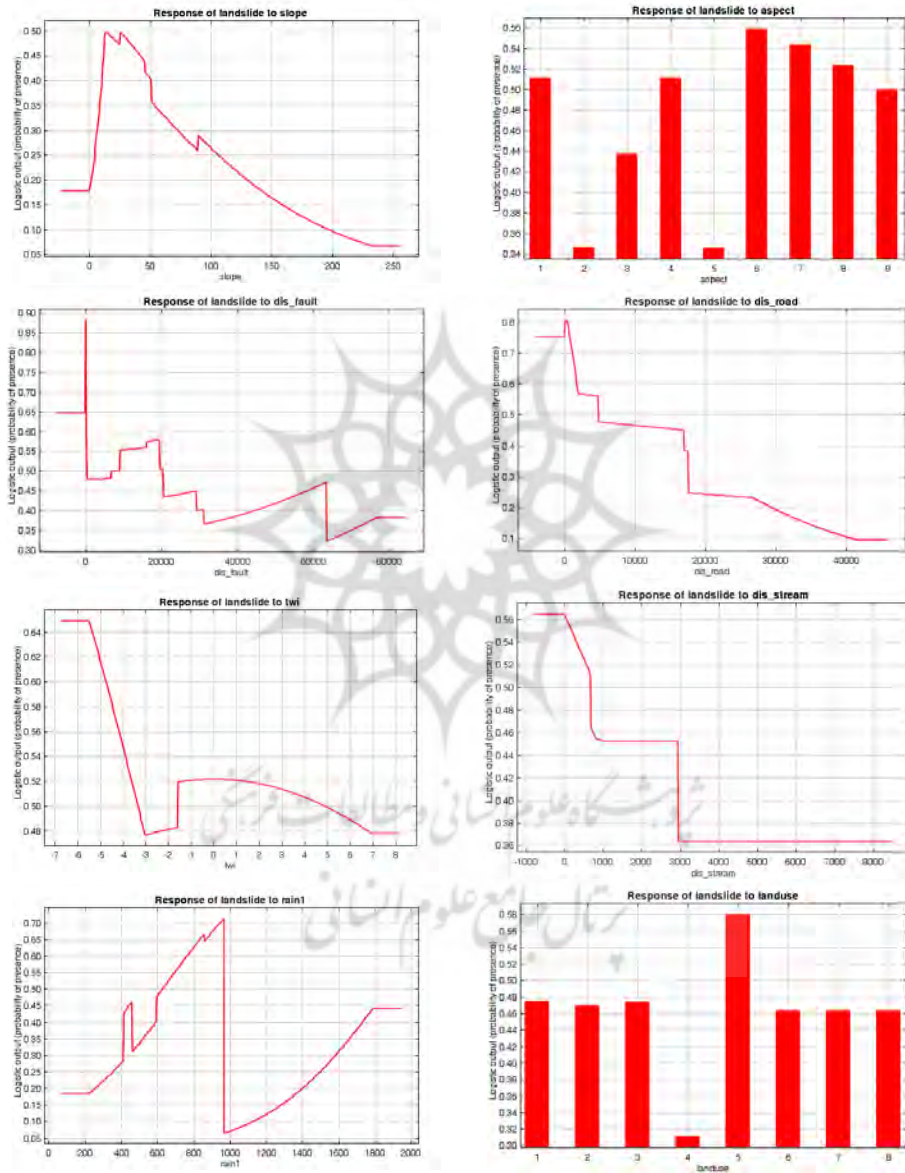
شکل (۲) ادامه  
Fig (2) continued

از دلایل این امر می‌توان به وجود سازندهای حساس به زمین‌لغزش و برهم خوردن تعادل شیب در اثر فعالیت‌های انسانی اشاره کرد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۶). جنگل‌های با تراکم ضعیف (کم تراکم) به علت فعالیت‌های جنگل‌زدایی، مناطق مناسب جهت وقوع فرسایش و زمین‌لغزش هستند و بیشترین میزان اثر را بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش داشته‌اند که با نتایج ریچن‌باچ و همکاران (۲۰۱۴) و کرنژادی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. با توجه به این که ریشه درختان باعث افزایش مقاومت برشی خاک و تقویت خاک می‌شوند، کاهش آن‌ها از دلایل افزایش حساسیت زمین‌لغزش می‌باشد. کاربری دیمزار نیز به دلیل نقش انسان در تخریب پوشش گیاهی و خاک در دامنه‌های شیب‌دار دومین کاربری مهم در وقوع زمین‌لغزش بوده است (امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۶). بر اساس نتایج واحدهای سنگی کنگلومرا، ماسه سنگ، شیل و رسوبات آبرفتی کواترنر با ضخامت زیاد به ترتیب بیشترین میزان تأثیر را بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش داشته‌اند که از دلایل آن می‌توان به جذب آب در این واحدها اشاره کرد (کرنژادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ تیموری و همکاران، ۱۳۹۶؛ امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین درز و شکاف‌ها و شکستگی‌هایی که در این منطقه وجود دارد بیشتر سازندها را مستعد زمین‌لغزش کرده است.



شکل (۳) تأثیر پارامترهای مورد استفاده بر پیش‌بینی مدل MaxEnt

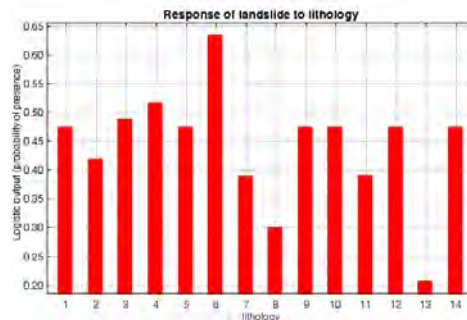
Fig (3) The impact of the parameters used on the MaxEnt model prediction



شکل (۳) ادامه

Fig (3) continued



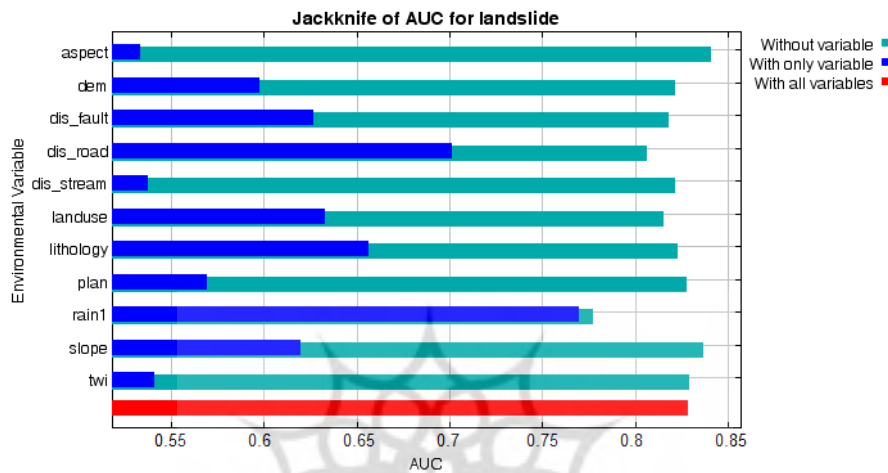


شکل (۳) ادامه

Fig (3) continued

شکل (۴) نتایج حاصل از نمودار جکنایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها را در پیش‌بینی مدل MaxEnt نشان می‌دهد. با توجه به این شکل بارندگی ۷۷ درصد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷)، فاصله از جاده ۷۰ درصد (پاندی و همکاران، ۲۰۱۸؛ کرنژادی و همکاران، ۲۰۱۷)، لیتولوژی ۶۶ درصد (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۸)، کاربری اراضی ۶۴ درصد (تیموری و همکاران، ۱۳۹۶)، فاصله از گسل ۶۳ درصد (پاندی و همکاران، ۲۰۱۸؛ پارک، ۲۰۱۵)، شیب ۶۲ درصد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۹)، ارتفاع ۵۹ درصد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ تیموری و همکاران، ۱۳۹۶)، انحنای سطح ۵۷ درصد (تیموری و همکاران، ۱۳۹۶)، شاخص رطوبت توپوگرافی ۴۸ درصد، فاصله از آبراهه ۴۷ درصد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷) و جهت شیب ۴۶ درصد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۹) در پیش‌بینی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش تأثیرگذار بوده‌اند. این نتایج بیانگر این است که تمامی عوامل بر حساسیت زمین‌لغزش تأثیرگذار هستند و در هر منطقه‌ای با توجه به شرایط محیطی یکی یا چندتا از عوامل نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند که نشان‌دهنده‌ی پیچیدگی حساسیت وقوع زمین‌لغزش و تأثیرپذیری از عوامل مختلف است.

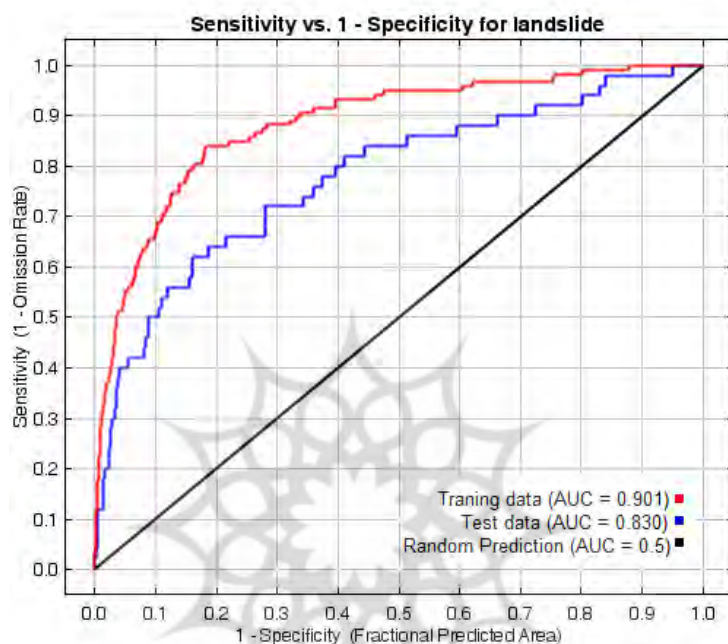




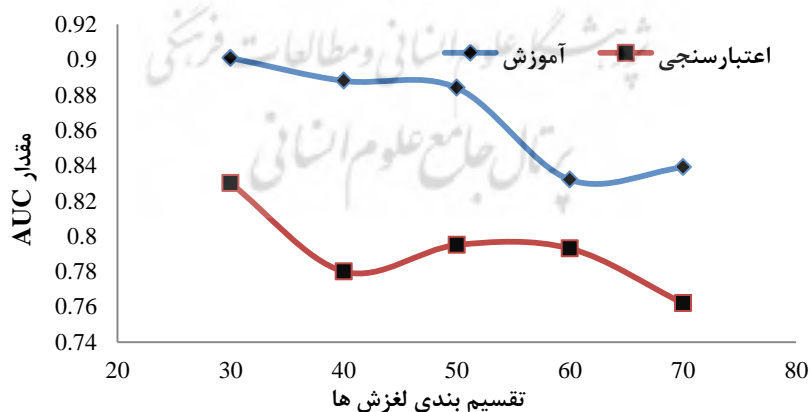
شکل (۴) نتایج حاصل از آزمون جک‌نایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترها

Fig (4) The results of the Jackknife test to determine the most important parameters

بعد از تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش، اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی ROC انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است. در این تحقیق از تقسیم‌بندی‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد نقاط زمین‌لغزش جهت اعتبارسنجی استفاده شد که با توجه به مقدار AUC تقسیم‌بندی ۳۰ درصد اعتبارسنجی و ۷۰ درصد آموزش بیشترین میزان دقت مدل را برای پیش‌بینی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش داشت. بر این اساس مدل در مرحله آموزش دقت ۹۰ درصد (عالی) و در مرحله اعتبارسنجی دقت ۸۳ درصد (خیلی خوب) را داشت. شکل (۶) نتایج میزان AUC را در سایر تقسیم‌بندی‌ها برای مراحل آزمون و اعتبارسنجی نشان می‌دهد.

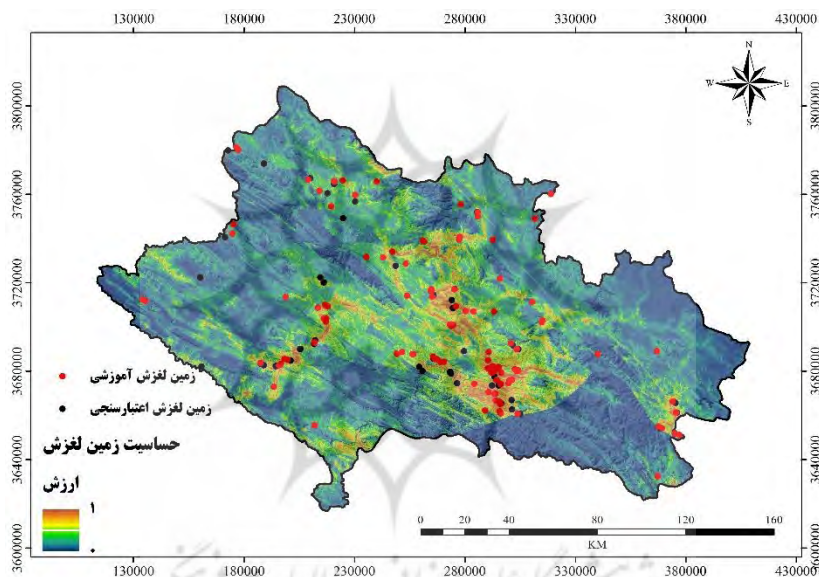


شکل (۵) منحنی ROC و مقدار AUC محاسبه شده برای ارزیابی عملکرد مدل  
Fig (5) The ROC curve and the AUC value for model performance evaluation



شکل (۶) مقدار AUC مدل در تقسیم بندی های مختلف نقاط لغزش اعتبارسنجی  
Fig (6) Value of AUC model in different subdivisions of validation landslides

شکل (۷) نقشه نهایی مناطقی دارای حساسیت وقوع زمین‌لغزش را در استان لرستان نشان می‌دهد. بر اساس این شکل ۳۵/۵ پهنه استان دارای پتانسیل حساسیت زمین‌لغزش می‌باشد. در این شکل هر چقدر به سمت عدد ۱ (رنگ قرمز) نزدیک می‌شویم، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش بیشتر است.



شکل (۷) نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش در استان لرستان  
Fig (7) Landslide susceptibility map of Lorestan province

#### ۴- نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش به عنوان یکی از پرمخاطره‌ترین بلاهای طبیعی در جهان محسوب می‌شود. با توجه به اینکه شناسایی مناطقی دارای حساسیت زمین‌لغزش مبتنی بر روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت قابل قبولی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشینی مثل حداکثر آنتروپی امری ضروری است. در این مطالعه با در نظر گرفتن عوامل محیطی و انسانی تأثیرگذار (۱۱ عامل) و با استفاده از روش حداکثر آنتروپی نقشه‌ی

حساسیت وقوع زمین لغزش استان لرستان تهیه گردید. نتایج نشان داد که عوامل بارندگی، فاصله از جاده، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل و شیب از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت زمین لغزش با مشارکت بالای ۶۰ درصد هستند که مدیریت کاربری اراضی و رعایت اصول جاده سازی به عنوان فعالیت های انسانی را می طلبد. منحنی ROC رسم شده نشان داد که دقت مدل در برآورد مناطق دارای حساسیت زمین لغزش هم در مرحله ی آزمون و هم در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب عالی و خیلی خوب بوده است که بر اساس نظر فیلیپس و همکاران (۲۰۰۶) به معنای عملکرد عالی مدل می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت که مدل MaxEnt توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای حساسیت زمین لغزش دارد و با توجه به سرعت و دقت بالای مدل پیشنهاد می شود که در تحقیقات مشابه به خصوص در کشورهای در حال توسعه به دلیل کمبود امکانات و منابع مالی و همچنین زمان بر بودن شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین لغزش مورد استفاده قرار بگیرد. محققان دیگر از جمله میرزایی و همکاران (۲۰۱۸)، پاندی و همکاران (۲۰۱۸)، کرنژادی و همکاران (۲۰۱۷)، پارک (۲۰۱۵)، دیویس و بلسیوس (۲۰۱۵) و کونورتینو و همکاران (۲۰۱۳) نیز توانایی این مدل را تأیید کرده اند. علاوه بر عوامل طبیعی برخی عوامل انسانی نظیر جاده سازی نقش مهمی بر وقوع زمین لغزش دارد که جهت کاهش نسبی خطرات لازم است از تغییر اکوسیستم به عنوان محرک بلایای طبیعی اجتناب نمود. نتایج این تحقیق در تصمیم گیری و آمایش سرزمین استانی و همچنین برنامه ریزی شهری قابل استفاده خواهد بود و نقش بسزایی در پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لغزش خواهد داشت.

## ۵- منابع

**-Reference**

- Aghdam, I.N., Varzandeh, M.H.M., Pradhan, B. (2016). Landslide susceptibility mapping using an ensemble statistical index (Wi) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model at Alborz Mountains (Iran). *Environmental Earth Sciences*. 75(7), 553-563.
- Amir ahmadi, A., Naemi Tabar, M., Gholkar, B. (2017). Prioritize and zoning factors affecting the landslide model entropy (Case study: Bajgiran, Ghochan). *Hydrogeomorphology*. 3(11), 105-125.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques Based Delineation of Groundwater potential Zones: a case study from southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*. 9: 2082, doi:10.1038/s41598-019-38567-x.
- Bui, T.D.; Shahabi, H.; Shirzadi, A.; Chapi, K.; Alizadeh, M.; Chen, W.; Mohammadi, A.; Ahmad, B.; Panahi, M.; Hong, H.; Tian, Y. (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(1527), 1-32.
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., Shahabi, H. (2018). Performance evaluation of the gis-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve bayes tree for landslide susceptibility modeling. *Science of the Total Environment*. 644, 1006-1018.
- Convertino, M., Troccoli, A., Catani, F. (2013). Detecting ifingerprints of landslide drivers: A MaxEnt model. *JGR: Earth Surface*. 118, 1367-1386.
- Davis, J., Blesius, L. (2015). A Hybrid Physical and Maximum-Entropy Landslide Susceptibility Model. *Entropy*. 17(6): 4271-4292.
- Deng, F., Deng, Z., Lv, D., Wang, D., Duan, H., Xing, Z. (2016). Application of Remote Sensing and GIS analysis in groundwater potential estimation in west Liaoning Province, China. *Journal of Engineering Research*. 4(3), 1-17.

- Ding, Q., Chen, W., Hong, H. (2017). Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*. 32(6), 619-639.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers Distribution*. 17(1), 43-57.
- Guo, C., Montgomery, D. R., Zhang, Y., Wang, K., Yang, Z. (2015). Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*. 248, 93-110.
- Hong, H., Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B. (2016). GIS-based landslide spatial modeling in Ganzhou City, China. *Arabian Journal Geosciences*. 9(2), 1-26.
- Hong, H., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., Chapi, K., Ahmad, B., Shadman, M., Yari, A., Tian, Y., 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, 173-212.
- Jiao, Y., Zhao, D., Ding, Y., Liu, Y., Xu, Q., Qiu, Y., Liu, C., Liu, Z., 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.
- Kadavi, P., Lee, C.W., Lee, S. (2018). Application of ensemble-based machine learning models to landslide susceptibility mapping. *Remote Sensing*. 10(8), 1252.
- Kerekes, A.H., Poszet, S.L., Gal, A. (2018). Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj-Napoca Municipality, Romania. *Revista de Geomorfologie*. 20: 130-146.
- Kornejady, A., Ownegh, M., Bahremand, A. (2017). Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*. 152, 144-162.
- Liu, J., Duan, Z. (2018). Quantitative Assessment of Landslide Susceptibility Comparing Statistical Index, Index of Entropy, and Weights of Evidence in the Shangnan Area, China. *Entropy*. 20(868), 1-22.

- Mahalanobis, P.C. (1936). On the generalized distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences (Calcutta)*. 2, 49–55.
- Mirzaei, G., Soltani, A., Soltani, M., 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.
- Mohammadkhan, S., Veisi, A., Bagheri, K. (2015). Feasibility of landslide risk using Entropy model, case study: (Shirpna mountainous region in South West Kermanshah Province). *Geographical journal of Territory*. 11(44), 89-103.
- Mohammadzadeh, K., Bahmani, S., Fathi, M.H. (2017). Logistic Regression Assessment in the Investigation of the Landslide Potential (Case Study: From Nasirabad to Sattar Khan Dam). *Hydrogeomorphology*. 3(11), 127-148.
- Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S., Rezaei, A. (2014). Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Journal of Earth Sciences*. 8, 171-186.
- Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R., Sharma, M.C. (2018). Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. *Geocarto International*. DOI:10.1080/10106049.2018.1510038.
- Park, N.W. (2015). Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*. 73, 937-949.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*. 190, 231–259.
- Pourghasemi, H.R., Rossi, M. (2016). Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theoretical and Applied Climatology*. 1–25.

- Razavi, V., Shirani, K. (2019). Landslide hazard zoning using frequency ratio, entropy methods and TOPSIS decision making methods (Case study: Fahliyan basin, Fars). *RS&GIS for Natural Resources*. 9(4), 119-138.
- Reichenbach, P., Mondini, A., Rossi, M. (2014). The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: the Briga catchment test site (Messina, Italy). *Environmental Management*. 54(6), 1372-1384.
- Salarian, T., Zare, M., Jouri, M.H., Mirrostami, S., Mahmoudi, M. (2014). Evaluation of shallow landslides hazard using artificial neural network of Multi-Layer Perceptron method in Subalpine Grassland (Case study: Glandrood watershed Mazandaran). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 7(11), 795-804.
- Sepehr, A., Behniafar, A., Mohammadian, A., Abdollahi, A. (2013). Mapping of landslide susceptibility map of northern slopes of Binalood based on Vikor agreement optimization algorithm. *Geomorphological Research*. 2(1), 19-36.
- Shirzadi, A., Shahabi, H., Chapi, K., Bui, D.T., Pham, B.T., Shahedi, K., Ahmad, B.B. (2017). A comparative study between popular statistical and machine learning methods for simulating volume of landslides. *CATENA*. 157, 213-226.
- Symeonakis, E., Karathanasis, N., Koukoulas, S., Panagopoulos, G. (2016). Monitoring sensitivity to land degradation and desertification with the environmentally sensitive area index: the case of Iesvos island. *Land Degradation and Development*. 27, 1562-1573.
- Teimoori, Z., Hosseinzadeh, R., Kaviani, A., Pourghasemi, H.R. (2017). Determination of sensitive areas to Landslide Occurrence Using Shannon Entropy Model (Case Study: Chahardangeh Basin, Mazandaran Province). *Geography and Environmental Hazards*. 6(22), 183-204.
- Wang, P., Bai, X., Wu, X., Yu, H., Hao, Y., Hu, B.X. (2018). GIS-Based Random Forest Weight for Rainfall-Induced Landslide Susceptibility Assessment at a Humid Region in Southern China. *Water*. 10(1019), 1-20.
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z., Al-Katheeri, M.M. (2016). Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and



comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*. 13(5), 839-856.

Zare, M., Pourghasemi, H.R., Vafakhah, M., Pradhan, B. (2013). Landslide susceptibility mapping at Vaz Watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multilayer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms. *Arabian Journal of Geosciences*. 6(8), 2873-2888.

Zhang, T., Han, L., Han, J., Li, X., Zhang, H., Wang, H. (2019). Assessment of Landslide Susceptibility Using Integrated Ensemble Fractal Dimension with Kernel Logistic Regression Model. *Entropy*. 21(218), 1-23.

