

ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل حداکثر آنتروپی

(منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز کمه، جنوب استان اصفهان)

رضا ذاکری نژاد* - استادیار گروه جغرافیا طبیعی دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.
ناهید عموشاهی - دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳

چکیده

ناپایداری دامنه‌های طبیعی یکی از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی و زمین شناسی است که در تغییر شکل سطح زمین نقش موثری دارد. از بین حرکات دامنه‌ای زمین لغزش‌ها با توجه به تکرار وقوع این پدیده و خسارات زیان بار آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. شناسایی و بخش‌بندی نواحی مستعد لغزش و پهنه‌بندی خطر آن، گامی مهم در ارزیابی خطرات محیطی به شمار رفته و نقش انکارکردنی در مدیریت حوضه‌های آبخیز ایفا می‌کند. در این پژوهش با استفاده از مدل مکسنت (حداکثر آنتروپی) به پهنه‌بندی زمین لغزش در حوضه آبخیز کمه در جنوب استان اصفهان پرداخته شد. در پژوهش مورد نظر از ۱۳ متغیر (ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، تراکم پوشش گیاهی، کاربری اراضی، بافت خاک، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت آبراهه و میانگین بارش سالانه) استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که مهمترین عوامل تاثیرگذار بر مدل احتمال خطر زمین لغزش، فاصله از آبراهه (۱۷/۱ درصد)، زمین شناسی (۱۴/۱ درصد) و فاصله از جاده (۱۳ درصد) می‌باشند. همچنین نتایج حاصل از سطح زیر منحنی AUC برای داده‌های آموزشی برابر با ۰/۹۳۱ + و برای داده‌های تعلیمی ۰/۸۸۷ + به دست آمد، که نشان دهنده این است که قدرت تشخیص مدل بسیار بالا بوده است و مدل به خوبی می‌تواند مناطق مختلف خطر زمین لغزش را از یکدیگر تفکیک کند. بر اساس نتایج حاصل شده، از کل مساحت منطقه مورد مطالعه، ۱۳۹۷۶+ هکتار (۸۴/۶۹ درصد) خیلی کم خطر، ۱۵۴۴۹/۵ هکتار (۹/۳۶ درصد) کم خطر، ۶۹۰۳/۳۹ هکتار (۴/۱۸ درصد) نسبتاً کم خطر، ۲۴۵۶/۸۵ هکتار (۱/۴۸ درصد) پر خطر و ۴۴۵/۹۱ هکتار (۰/۲۷ درصد) در طبقه خیلی پر خطر قرار دارد.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، مدل مکسنت، حوضه آبخیز کمه.

مقدمه

ناپایداری دامنه‌های طبیعی یکی از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی و زمین شناسی است که در تغییر شکل سطح زمین نقش موثری دارد (مددی و همکاران، ۱۳۹۴). زمانی که این فرایندهای فعالیت‌های انسانی را تحت تاثیر قرار دهد به پدیده‌ای خطرناک تبدیل می‌شوند (پائولتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). یکی از وظایف مهم دانش ژئومورفولوژی کاربردی بررسی موقعیت مکان‌های خطرپذیر در برابر انواع مخاطرات ژئومورفولوژیک است (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۴). از میان حرکات دامنه‌ای زمین لغزش‌ها با توجه به تکرار وقوع این پدیده و خسارات زیان بار آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (محمدنیا و فلاح قالمهری، ۱۳۹۷). زمین لغزش عبارت است از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه (محمودی، ۱۳۸۷). زمین لغزش همواره در سطح جهان موجب مرگ و میر سالانه هزاران نفر و خسارت‌های سنگین مالی و اقتصادی به مناطق مسکونی می‌شود، همچنین زمین لغزش از جمله مخاطرات زمینی با فراوانی وقوع بالا در ایران است و آثار آن در بسیاری از دامنه‌های نیمه‌خشک تا مرطوب مستعد کشور دیده می‌شود (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۳). شناسایی و بخش‌بندی نواحی مستعد لغزش و پهنه‌بندی خطر آن، گامی مهم در ارزیابی خطرات محیطی به شمار رفته و نقش انکارنکردنی در مدیریت حوضه آبخیز ایفا می‌کند. تهیه نقشه وقوع خطر زمین لغزش، ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت بحران در نواحی کوهستانی است (دهال^۲، ۲۰۰۸). پهنه‌بندی زمین لغزش شامل تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی کردن این مناطق براساس درجه واقعی یا پتانسیل خطر ناشی از بروز زمین لغزش بر روی شیب دامنه‌ها است (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۳). در سال‌های اخیر با توجه به صدمات زمین لغزش در زیرساخت‌های جامعه مانند جاده‌ها و ساختمان‌ها، تلاش‌های زیادی در زمینه شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش صورت گرفته است (حسین پور میل آغاردان و همکاران، ۱۳۹۳).

در مطالعه ای در حوضه بدرانلو به پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش ANP پرداخته شد، که در این پژوهش از هشت پارامتر بارندگی سالانه، جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از مراکز مسکونی، فاصله از گسل، سنگ شناسی، میزان شیب دامنه و کاربری اراضی استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که ۳۰/۴۳ درصد از منطقه با خطر متوسط، ۳۷/۶۸ درصد با خطر زیاد و ۳/۸۹ درصد با خطر بسیار زیاد مواجه هستند (جعفری و همکاران ۱۳۹۸).

در بسیاری از مطالعات پهنه بندی از روش فازی برای تهیه نقشه خطر زمین لغزش استفاده شده که در یک مطالعه با استفاده از این روش و پارامترهای شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از جاده‌ها، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از گسل و نقشه بارندگی به بررسی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز ایلام پرداختند. در این پژوهش از گامای ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۹ استفاده شد. نتایج نشان داد که گامای ۰/۹ دارای دقت بیشتر و بهتری برای تهیه نقشه زمین لغزش دارا است (رستمی و همکاران ۱۳۹۸).

مویدی و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از روش‌های GA، ANFIS، PSO، SI و ۱۴ عامل ارتفاع، جهت شیب، کاربری اراضی، انحنای پلان، انحنای پروفیل، نوع خاک، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، بارندگی، درجه شیب،

¹- Paoletti

²- Dahal

شاخص SPI، شاخص رطوبت توپوگرافی و سنگ شناسی به بررسی خطر زمین لغزش در اردبیل پرداختند. نتایج نشان داد که GA-ANFIS دارای ROC ۰/۹۱۴ و SI دارای ROC ۰/۸۲۱ است و بهترین عملکرد را دارا هستند.

آستیوتی^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از هشت پارامتر و روش شبکه عصبی فازی به بررسی خطر زمین لغزش در اندونزی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اجرای روش عصبی فازی بر روی داده‌های لغزش با دقت ۸۱/۳۱ درصد بدست آمد. با حذف یک ویژگی بیشترین دقت در ۸۸/۴۸٪ حاصل شد.

روی و سaha^۲ (۲۰۱۹)، به بررسی خطر زمین لغزش در هند پرداختند. آن‌ها از روش Fuzzy-LNRF و Fuzzy-AHP و پارامترهای بارندگی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین شناسی، بافت خاک، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، استفاده از زمین / پوشش اراضی، NDVI و TWI استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که با استفاده از روش Fuzzy-LNRF و Fuzzy-AHP به ترتیب ۳۴ و ۲۲ درصد مناطق بسیار پرخطر زمین لغزش در این منطقه هستند. همچنین مقادیر زیر منحنی‌ها برای (Fuzzy-LNRF) مقدار ۹۱ درصد و برای (Fuzzy-AHP) مقدار ۹۰ درصد و مقادیر RMSE این مدل ۰/۱۸ و ۰/۱۴ است که نشان دهنده دقت خوب هر دو مدل در شناسایی مناطق مستعد لغزش است.

پال^۳ و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از روش AHP به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در هند پرداختند. در این پژوهش از نوع سنگ، ژئومورفولوژی، شیب، جهت شیب، تراکم زهکشی، نوع خاک، کاربری اراضی و پوشش اراضی استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که قسمت جنوبی و قسمت میانی منطقه در مقایسه با منطقه شمالی آسیب‌پذیری بسیار زیادی از زمین لغزش دارند. همچنین ۳۸/۴۸ درصد از منطقه در معرض آسیب‌پذیری بسیار کم، ۳۶/۲۶ درصد در معرض آسیب‌پذیری کم، ۱۸/۱۶ درصد در معرض آسیب‌پذیری متوسط، ۸/۵ درصد در معرض آسیب‌پذیری بالا و ۲/۵۳ درصد در معرض آسیب‌پذیری بسیار بالا قرار دارند.

کلی^۴ و همکاران (۲۰۲۰)، از پارامترهای شیب، جهت شیب، انحنای، انحنای، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه‌ها، کاربری اراضی، بارندگی و سنگ شناسی و روش فازی در جاده N11 در تونس انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که مستعد بودن زمین لغزش بر اساس عملگر گاما فازی نتیجه بسیار قابل قبولی را با قابلیت اطمینان ۸۹٪ ارائه می‌دهد.

ثنها^۵ و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از روش FR و ۸ پارامتر به بررسی خطر زمین لغزش در ویتنام پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ۶/۲۷ درصد از مساحت در منطقه بسیار کم، ۲۱/۰۳ درصد در منطقه حساس کم، ۲۷/۰۹ درصد در منطقه متوسط، ۲۷/۴۱ درصد از منطقه در منطقه زیاد و ۱۸/۲۱ درصد در منطقه دارای خطر بسیار بالا است.

چانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی مقایسه مدل‌های SVM، CHAID، Kohonen و K-means جهت بررسی خطر زمین لغزش در چین پرداختند. در این پژوهش از ۱۲ پارامتر استفاده شد. نتایج نشان داد که نتایج منحنی عملکرد گیرنده (ROC) نشان می‌دهد که SVM ۰/۸۹۲ است و کمی بیشتر از مدل CHAID ۰/۸۷۲ است. نتایج صحت نشان می‌دهد

1. Astuti

2. Roy and Saha

3. Pal

4. Klai

5. Thanh

6. Chang

که مدل SVM بیشترین دقت را با ۷۷/۸۰ درصد و پس از آن مدل CHAID ۷۴/۵۰ درصد، مدل Kohonen ۷۲/۸ درصد و مدل K-means ۶۹/۷ درصد نشان داده است.

هو^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از ارتفاع، جهت شیب، انحناء، سنگ شناسی، فاصله از گسل، شیب، بارش، کاربری اراضی و NDVI به پیش بینی زمین لغزش در حوضه جینشا در چین پرداختند. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که نمونه‌های منفی (مناطق غیر لغزشی) که بر اساس مدل FT تولید می‌شوند معقول تر هستند و روش ترکیبی پشتیبانی شده توسط مدل‌های FT و ML بالاترین بازده پیش حدود ۹۴٪ دقت کلی تولید شده توسط سناریو-FT و پس از آن سناریو-SS (۸۷٪) و سناریو-RS (۶۵٪) دارند.

ژائو^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، از ۲۶۳ نقطه زمین لغزش شناسایی شد و نقشه موجودی لغزش زمین ایجاد شد و مکان‌های لغزش به طور تصادفی به ۷۰ درصد (داده های آموزشی) و ۳۰ درصد (داده های اعتبار سنجی) تقسیم شدند. آن‌ها از چهار مدل FT، BFT، RFFT و DFT و ۱۴ پارامتر برای تهیه نقشه زمین لغزش استفاده کردند. نتایج نشان که سطح زیر منحنی (AUC) برای چهار مدل بزرگتر از ۰/۷۴ بود. در بین آن‌ها، مدل BFT از سه مدل دیگر بهتر است.

ووجتکوا و ووجتک^۳ (۲۰۲۰)، با استفاده از روش AHP و پارامترهای زاویه شیب، زمین شناس، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه‌ها، فاصله از گسل و کاربری اراضی به تهیه نقشه خطر زمین لغزش در اسلواکی پرداختند. بر اساس نقشه حساسیت به دست آمده ۵۱/۹۸ درصد از کل منطقه مورد مطالعه دارای کلاس حساسیت بالا و بسیار بالا است. همچنین ۶۰/۸ درصد از نقشه خطر ایجاد شده با واقعیت همخوانی داشته و صحت متوسطی دارد.

این مطالعه با هدف شناسایی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه کمه در جنوب شهرستان سمیرم انجام شده است. شهرستان سمیرم به علت قرار داشتن بر روی پهنه لرزه زمین‌ساخت زاگرس از نواحی حساس به لغزش زمین می‌باشد. وقوع زمین لغزش‌های فراوان گواه حساسیت این نواحی می‌باشد که ضرورت این مطالعه را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

روش تحقیق

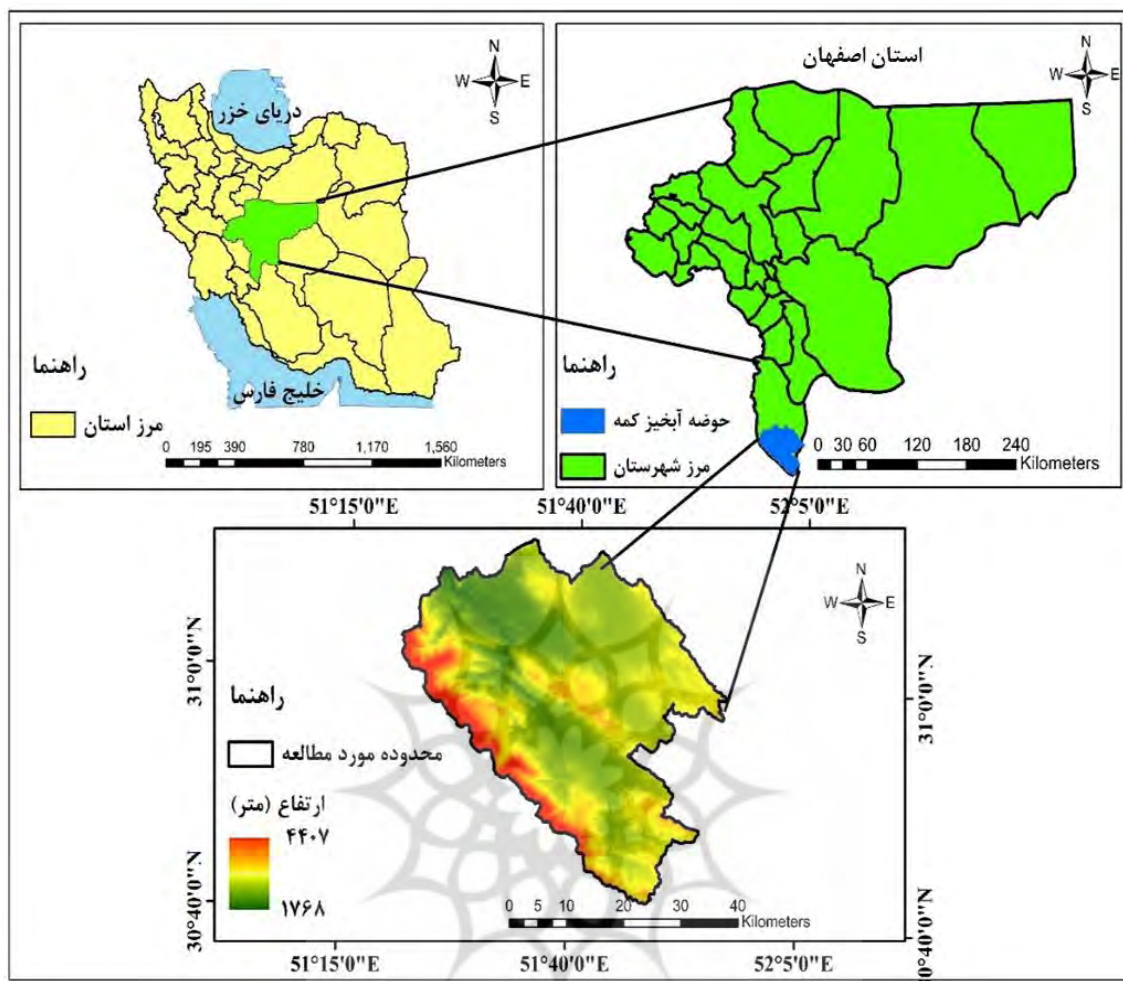
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز کمه با مساحت ۱۶۵۰۱۵/۶۵ هکتار در مختصات ۳۰ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی در جنوب اصفهان و در مرز با استان‌های فارس و کهگیلویه و بویر احمد قرار دارد که از نظر تقسیمات سیاسی بخشی از شهرستان سمیرم در استان اصفهان است. این حوضه آبخیز دارای ارتفاع متوسط ۲۵۰۰ متری از سطح دریا و شیب متوسط ۲۸ درصدی در کوهپایه‌های شرقی کوهستان دنا قرار گرفته و منطقه‌ای سردسیر است. منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

1. Hu

2. Zhao

3. Vojteková & Vojtek



شکل ۱: منطقه حوضه مورد مطالعه در جنوب شهرستان سمیرم

منابع داده ها و ابزارها

نقشه های که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند شامل: نقشه مدل های رقومی ارتفاع ASTER GDEM، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس های هوایی ۱:۴۰۰۰۰، داده های بارش سازمان هواشناسی، تصاویر گوگل ارث، می باشد که در ادامه به معرفی هر یک از شاخص های تهیه شده با استفاده از این داده ها پرداخته می شود.

مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)

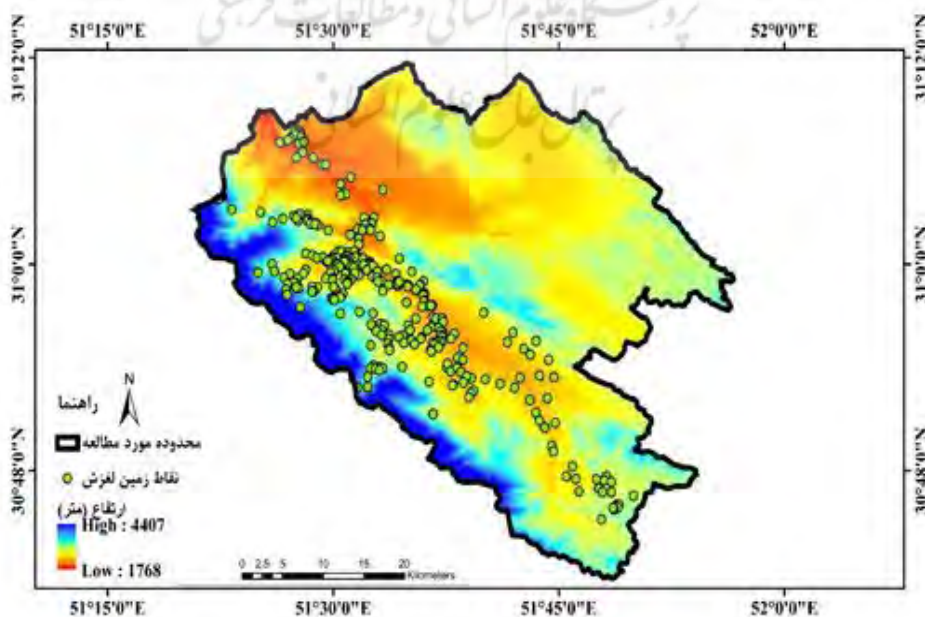
مدل مکسنت یکی از الگوریتم های بسیار رایج یادگیری ماشینی است. اصل این روش به حداکثر آنتروپی یا نزدیک به واقعیت بر می گردد. ماکزیمم آنتروپی یا حداکثر آشفستگی نام قانون دوم ترمودینامیک است، که آن را به نام قانون افزایش آشفستگی نیز می شناسند. اولین کسی که از این قانون در جایی غیر از مباحث ترمودینامیک صحبت کرد ادوین تامپسون بود. اصل ماکزیمم آنتروپی بیان می دارد که در تخمین یک توزیع نامعلوم توزیعی نزدیک به واقعیت است که دارای حداکثر آشفستگی است (زیدی و همکاران، ۱۳۹۲).

این روش به ویژه در مواردی که تنها داده‌های وقوع وجود دارند و سایر روش‌ها مانند رگرسیون لجستیکی کارآمد نیستند، استفاده می‌شوند و در این حالت پیش‌بینی‌های حاصل از این مدل بسیار قابل اعتمادتر بوده و از پشتوانه تحلیلی بالایی برخوردار است. در نرم‌افزار مکسنت، لایه‌های ورودی همان اطلاعات وقوع زمین لغزش و لایه‌های تاثیرگذار بر وقوع زمین لغزش هستند. فرمت لایه‌های محیط‌زیستی باید با پسوند ASCII وارد شوند. نقاط وقوع زمین لغزش، در یک فایل اکسل و با فرمت CSV. در نرم‌افزار قابل استفاده خواهد بود. در اکسل نقاط زمین لغزش به همراه (X) مختصات طول جغرافیایی و (Y) مختصات عرض جغرافیایی از وقوع زمین لغزش ثبت می‌شود.

لایه‌ها (Layers) شامل تعدادی فایل‌های شبکه‌ای با قالب (ESRI.asc) است که هر کدام توصیف کننده یک پارامتر محیطی است و سلول‌ها همگی باید یک رمز داشته باشند (به این معنی که رمز بیرونی لایه‌ها باید بر هم منطبق باشد و اندازه سلول در تمام لایه‌ها با هم برابر باشد). این لایه‌ها می‌بایستی به صورت لایه‌های رستری، در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده باشند.

تهیه نقشه نقاط زمین لغزش

در ابتدای این پژوهش جهت اجرای مدل نیاز به داده‌های آموزشی به مدل می‌باشد که در این تحقیق نقاط زمین لغزش‌های به وقوع پیوسته در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. به منظور انجام این پژوهش، نقاط مشاهداتی زمین لغزش با استفاده از مطالعات میدانی، استفاده از عکس‌های هوایی و همچنین استفاده از مجموع داده‌های زمین لغزش معاونت آبخیزداری سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور استخراج و مورد استفاده قرار گرفت (www.fwr.ir) (شکل ۲). در این پژوهش از نرم‌افزار مکسنت نسخه ۳,۴,۱ k برای ترسیم مدل و تهیه نقشه احتمال وقوع زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است. از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS 10.8) برای تهیه و آماده‌سازی لایه‌ها استفاده شده است.



شکل ۲: نقاط زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه

تهیه نقشه پارامترهای موثر بر وقوع زمین لغزش

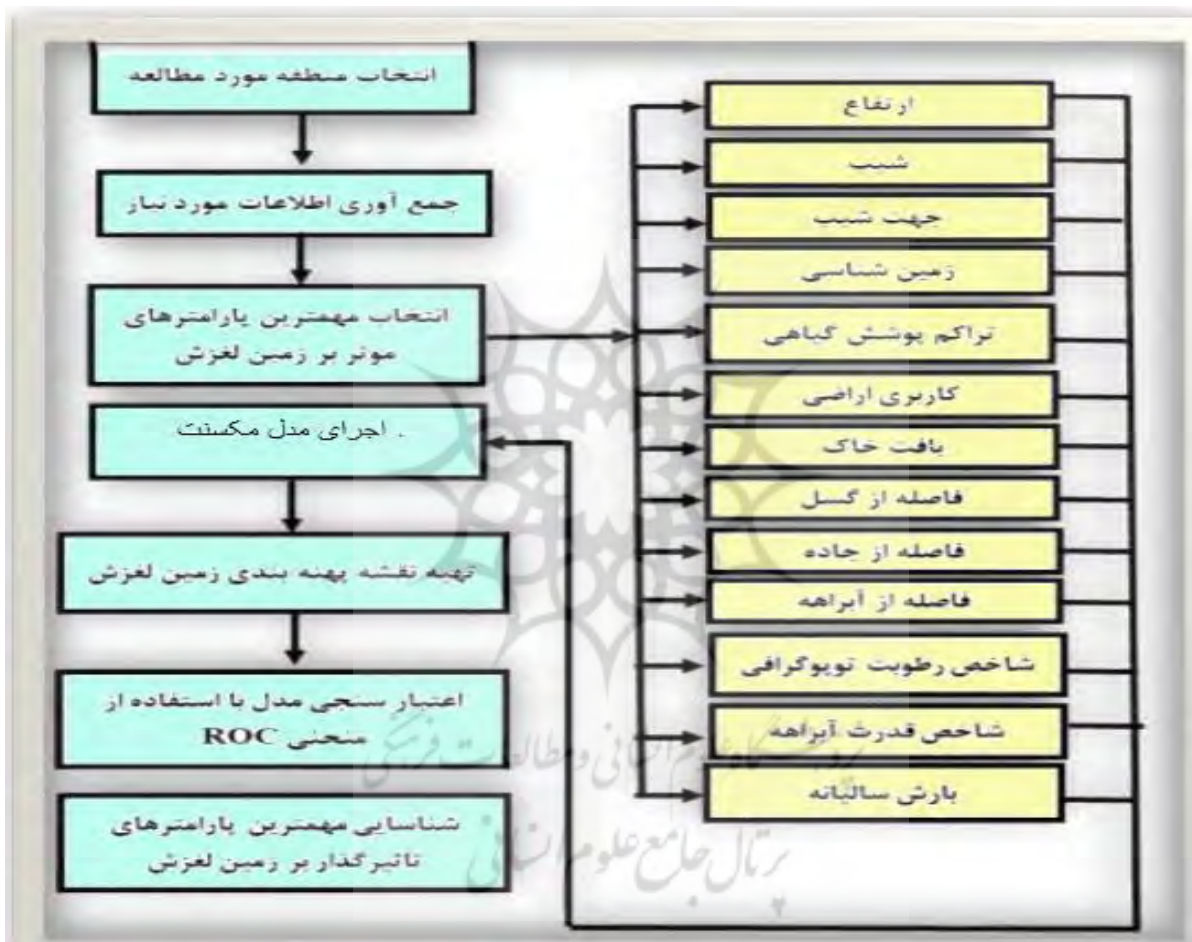
همانطور که در فلوچارت شکل ۳، روش کار این تحقیق مشاهده می‌گردد، برای تعیین عوامل موثر بر وقوع خطر زمین لغزش ۱۳ پارامتر محیطی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، تراکم پوشش گیاهی، کاربری اراضی، بافت خاک، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت آبراهه و میانگین بارش سالانه) (جدول ۱) انتخاب شدند، که این شاخص‌ها نشان دهنده شرایط توپوگرافی، عوامل انسانی و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه بودند که باتوجه به نظرات کارشناسی، مطالعات پیشین در حوضه‌های با شرایط اقلیمی و محیطی نزدیک به منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. شایان ذکر هست این شاخص‌ها به عنوان متغیر مستقل و نقاط زمین لغزش به عنوان نقاط وابسته در مدل مورد استفاده قرار گرفت (نوجوان و همکاران ۱۳۹۸، عابدینی و همکاران ۱۳۹۹، ذاکری نژاد ۱۳۹۹ حنیفی نیا و همکاران ۱۳۹۹) (شکل ۳).

در این پژوهش شاخص‌های شیب، جهت شیب و ارتفاع، شاخص قدرت فرساینده‌گی و شاخص رطوبت خاک با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع ASTERGDDEM به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و در نرم افزار SAGAGIS تهیه گردید. شایان ذکر هست قبل از استفاده از این مدل رقومی تصحیحات و خطاهای هیدرولوژیک نیز در نرم افزار SAGAGIS اصلاح گردید. نقشه تراکم پوشش گیاهی نیز با استفاده از داده‌های ماهواره ای لندست و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی تهیه گردید. نقشه فاصله از آبراهه، گسل و جاده نیز در محیط نرم افزار ArcGIS 10.8 و با استفاده از دستور Euclidean distance تهیه گردید. لایه زمین شناسی نیز از اطلاعات سازمان زمین شناسی برای حوضه مورد مطالعه استفاده شد. شایان ذکر هست که برای تهیه شاخص میانگین بارش سالانه نیز از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مجاور منطقه و بصورت میان بابی از داده‌های نقطه ای تهیه گردید. برای آماده‌سازی متغیرهای محیطی از نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی ArcGIS 10.8 استفاده و اندازه پیکسل ۳۰ متر برای ساخت لایه‌ها در نظر گرفته شد (شکل ۴).

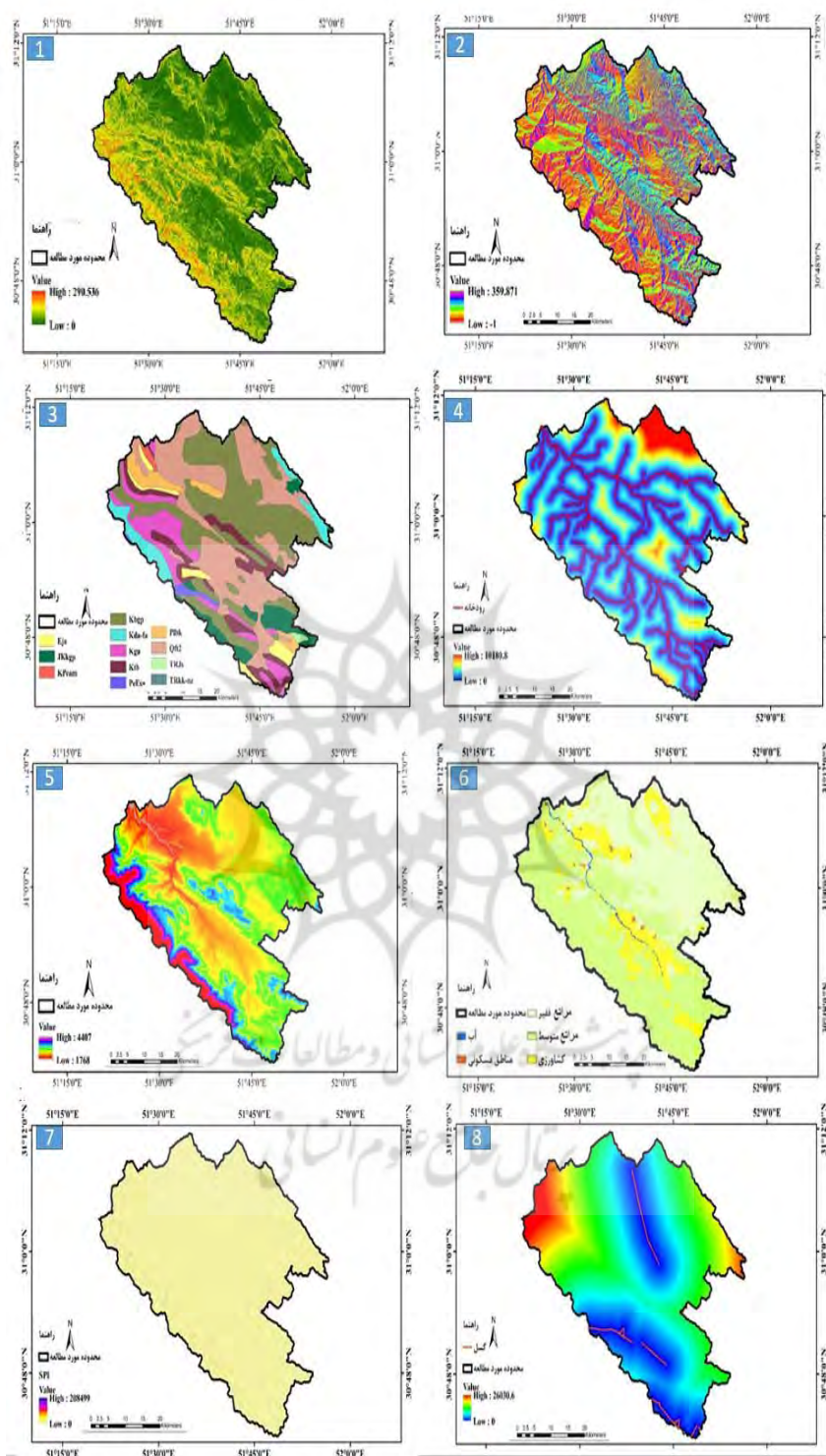
جدول ۱: معیارهای انتخاب شده برای پهنه‌بندی زمین لغزش

ردیف	معیارهای موثر بر وقوع زمین لغزش	روش و منبع مورد استفاده
۱	ارتفاع (Elevation)	مدل رقومی ارتفاع ASTERGDDEM
۲	شیب (Slope)	Zevenbergen & Thorn, 1987
۳	جهت شیب (Aspect)	Zevenbergen & Thorn, 1987
۴	زمین شناسی (Geology)	استفاده از نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور
۵	تراکم پوشش گیاهی (Vegetation Density Index)	شاخص NDVI (شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست با توان تفکیک ۳۰ متر
۶	کاربری اراضی (Land use)	استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست با توان تفکیک ۳۰ متر و عکس‌های هوایی (طبقه بندی نظارت شده-الگوریتم حداکثر احتمال)
۷	بافت خاک (Soil texture)	نمونه برداری خاک و تیه نقشه بافت خاک در آزمایشگاه
۸	فاصله از گسل (Distance to fault)	تهیه شده در محیط ArcGIS 10.8
۹	فاصله از جاده (Distance to road)	تهیه شده در محیط ArcGIS 10.8
۱۰	فاصله از آبراهه (Distance to Stream)	تهیه شده در محیط ArcGIS 10.8

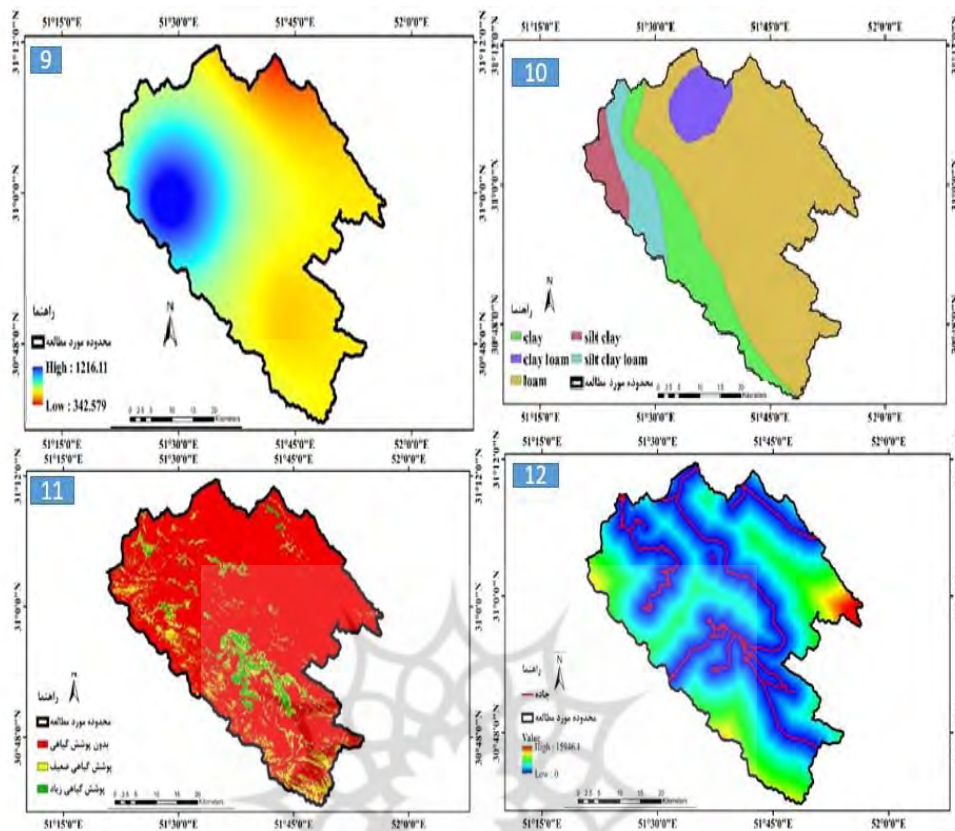
Olaya & Conrad, 2008	شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic Wetness Index)	۱۱
Olaya & Conrad, 2008	شاخص قدرت آبراهه (Stream Power Index)	۱۲
استفاده از داده های بارندگی سازمان هواشناسی و میان یابی در نرم افزار ArcGIS10.8	میانگین بارش سالانه (Average annual rainfall)	۱۳



شکل ۳: فلوجارت روش تحقیق



شکل ۴: نقشه شاخص‌های تهیه شده در پهنه بندی خطر زمین لغزش (۱: شیب، ۲: جهت شیب، ۳: زمین‌شناسی، ۴: فاصله از رودخانه، ۵: ارتفاع، ۶: کاربری اراضی، ۷: شاخص رطوبت توپوگرافی، ۸: فاصله از کسل)



ادامه شکل ۴: نقشه شاخص های تهیه شده در پهنه بندی خطر زمین لغزش (۹: متوسط بارندگی ۱۰: بافت خاک ۱۱: تراکم پوشش گیاهی ۱۲: فاصله از راه ها)

بررسی اعتبار مدل (Validity)

منحنی ROC (Receiver Operating Characteristics) یکی از متداول ترین روش های آماری است که به طور گسترده برای ارزیابی مدل های پیش بینی استفاده می شود (ذاکری نژاد ۱۳۹۹، پالیالیکسیس^۱ و همکاران، ۲۰۰۹). سطح زیر منحنی برابر است با احتمال این که مدل برای یک نقطه زمین لغزش تصادفی انتخاب شده، احتمال وقوع زمین لغزش بالاتری از یک نقطه عدم لغزش انتخاب شده در نظر بگیرد (پیرس و فریبر^۲، ۲۰۰۲). سطح زیر منحنی (Area Under Curve) برابر با احتمال قدرت تشخیص میان نقاط وقوع زمین لغزش و عدم وقوع زمین لغزش توسط یک مدل است (فیلیپس^۳ و همکاران، ۲۰۰۴). به عبارت دیگر احتمال این است که یک نقطه وقوع زمین لغزش تصادفی انتخاب شده، احتمال حضور بالاتری از یک نقطه عدم وقوع زمین لغزش تصادفی انتخاب شده در نظر بگیرد. مقادیر مختلف سطح زیر منحنی بین ۰/۵ تا ۱ است. چنانچه سطح زیر منحنی برابر با ۰/۵ باشد بیان کننده تصادفی بودن مدل است. اگر این مقدار برابر با ۱ باشد، مدل به بهترین نحو می تواند حضور و عدم حضور را از یکدیگر تفکیک نماید. اگر مقدار سطح زیر منحنی بین ۰/۷ تا ۰/۸ باشد، مدل به عنوان یک مدل خوب در نظر گرفته می شود. اگر بین ۰/۸ تا ۰/۹ باشد، یک مدل عالی است

1- Palialexis

2- Pearce and Freeber

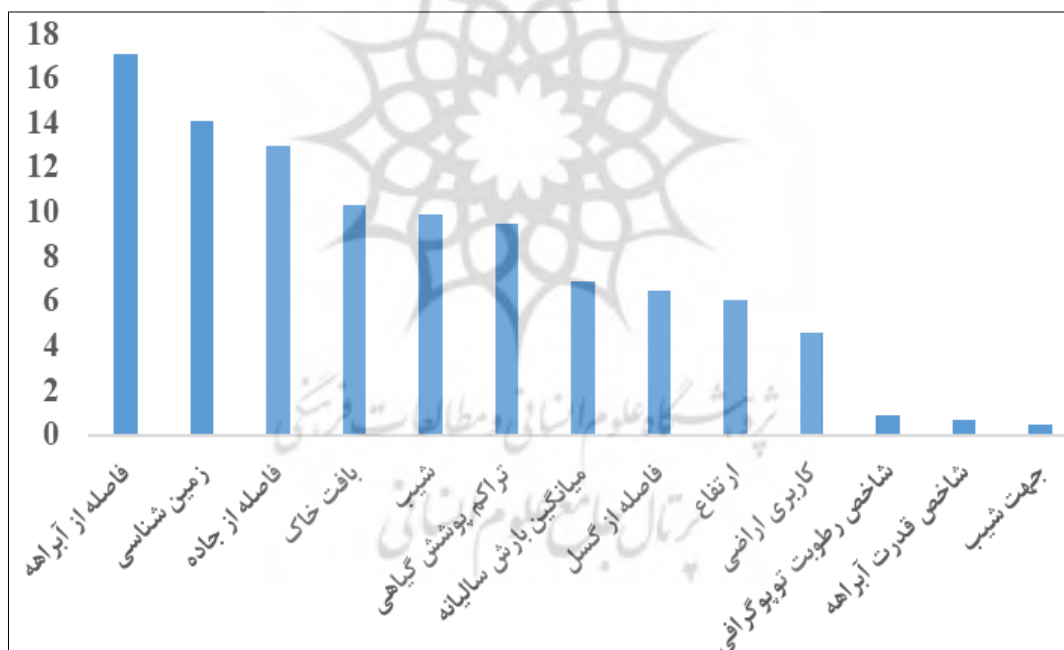
3- Phillips

و چنانچه سطح زیر منحنی بیش از ۰/۹ باشد، قدرت تشخیص مدل بسیار بالا در نظر گرفته می‌شود. منحنی ROC توسط نرم‌افزار مکسنت ترسیم می‌شود (پیرسون^۱، ۲۰۰۷).

بحث و یافته‌ها

بررسی نقش پارامترها

برای تعیین میزان تأثیر هر متغیر بر میزان خطر زمین لغزش در منطقه از روش درصد مشارکت هر متغیر با استفاده از خروجی بدست آمده از مدل مکسنت استفاده شد (این میزان تأثیر با استفاده از میزان مشارکت متغیرهای مستقل در پهنه بندی نقشه خطر بدست می‌آید). درصد مشارکت در مدل نشان دهنده آن است که بیشترین پارامترهای تأثیرگذار بر مدل خطر وقوع زمین لغزش، به ترتیب فاصله از آبراهه (۱۷/۱ درصد)، زمین شناسی (۱۴/۱ درصد) و فاصله از جاده (۱۳ درصد) می‌باشند و کمترین پارامترهای تأثیرگذار نیز به ترتیب جهت شیب (۰/۵ درصد)، شاخص قدرت آبراهه (۰/۷ درصد) و شاخص رطوبت توپوگرافی (۰/۹ درصد) می‌باشند (شکل ۵ جدول ۲).



شکل ۵: سهم هر شاخص در مشارکت مدل خطر وقوع زمین لغزش

^{۱-} Pearson

جدول ۲: سهم هر شاخص در مشارکت مدل خطر وقوع زمین لغزش

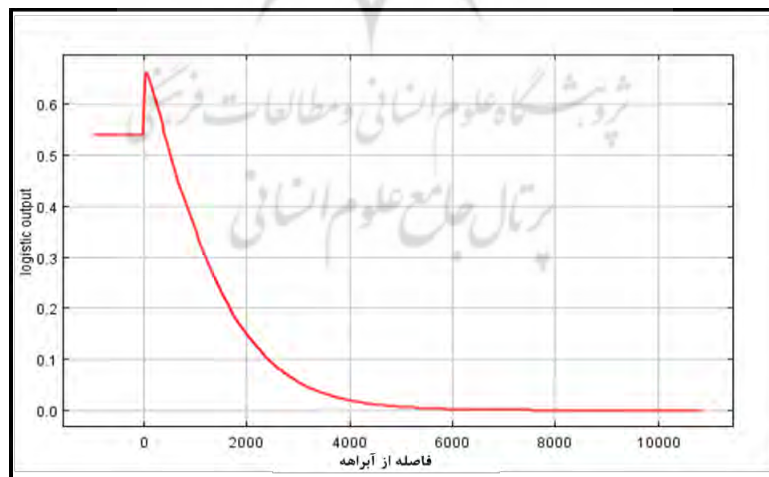
درصد مشارکت	نام پارامتر
۱۷/۱	فاصله از ابراهه (Distance to river)
۱۴/۱	زمین شناسی (Geology)
۱۳	فاصله از جاده (Distance to road)
۱۰/۳	بافت خاک (Soil pattern)
۹/۹	شیب (Slope)
۹/۵	تراکم پوشش گیاهی (NDVI)
۶/۹	میانگین بارش سالیانه (Average annual rainfall)
۶/۵	فاصله از گسل (Distance to fault)
۶/۱	ارتفاع (Elevation)
۴/۶	کاربری اراضی (Land use)
۰/۹	شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic Wetness Index)
۰/۷	شاخص قدرت ابراهه (Stream Power Index)
۰/۵	جهت شیب (Aspect)

تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان خطر زمین لغزش

در این قسمت به جهت خلاصه کردن نتایج تنها به منحنی‌های پاسخ ۵ شاخص مهم تاثیرگذار بر خطر زمین لغزش که به ترتیب اهمیت که شامل: ترتیب فاصله از ابراهه، زمین شناسی، فاصله از جاده، بافت خاک و شیب می باشند مورد تحلیل قرار می گیرند.

شاخص فاصله از ابراهه

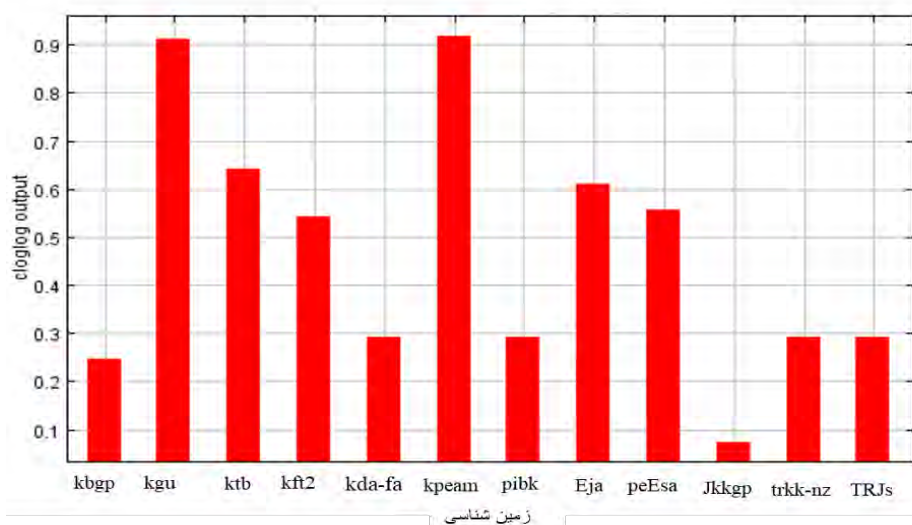
منحنی پاسخ پارامتر فاصله از ابراهه نشان می‌دهد که فاصله از ابراهه تا حدود ۱۰۰ متر، بیشترین احتمال خطر زمین لغزش وجود دارد و با افزایش فاصله از آن، میزان خطر زمین لغزش با کاهش چشمگیر مواجه شده است (شکل ۶).



شکل ۶: منحنی پاسخ پارامتر فاصله از ابراهه در خطر زمین لغزش

شاخص زمین شناسی

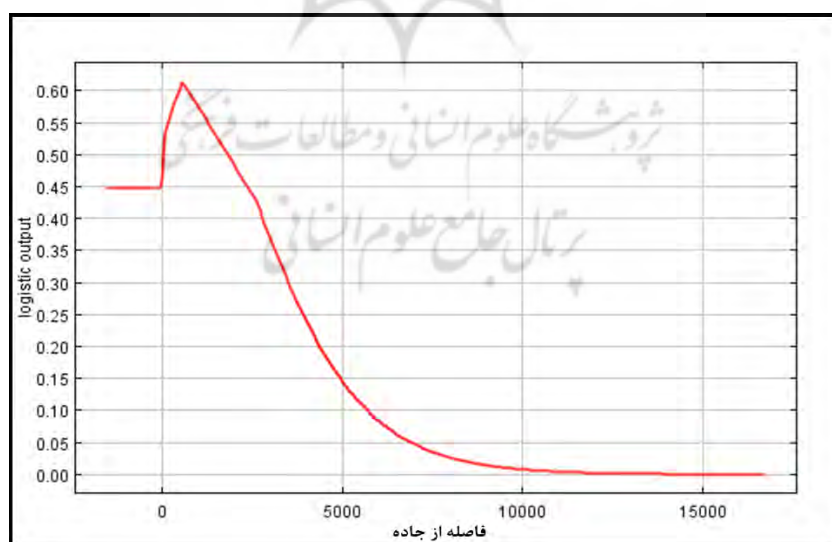
منحنی پاسخ پارامتر زمین شناسی نشان می‌دهد که بیشترین واحد زمین شناسی تاثیرگذار بر خطر زمین لغزش در منطقه واحد kpeam (فهلپیان) و kgu (گورپی) است و بعد از آن واحدهای ktb (تاربور)، Eja (جهرم)، و peEsa است. کمترین واحدهای زمین شناسی تاثیرگذار نیز واحدهای jkkgp (گروه خامی) و kbgp (گروه بنگستان) است (شکل ۷).



شکل ۷: منحنی پاسخ پارامتر زمین شناسی در خطر زمین لغزش

شاخص فاصله از جاده

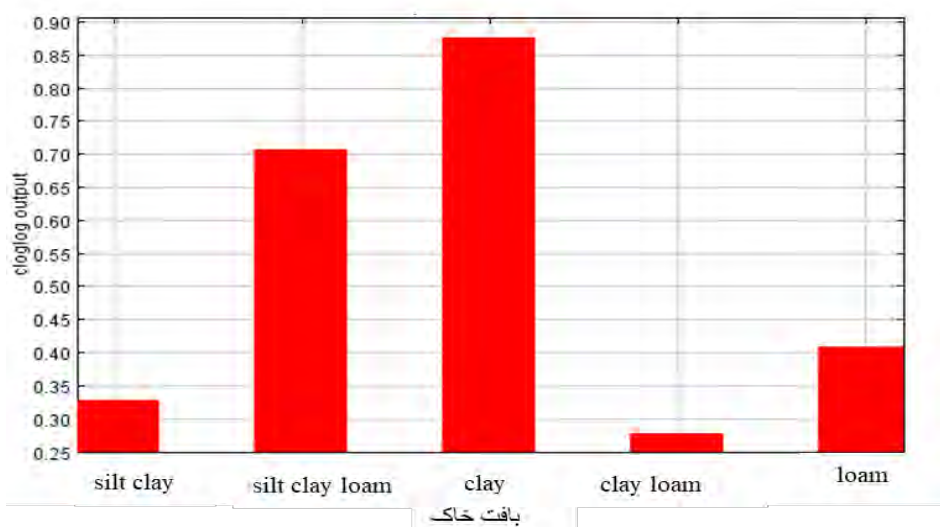
منحنی پاسخ پارامتر فاصله از جاده نشان می‌دهد که فاصله از جاده تا حدود ۱۰۰ متر، بیشترین احتمال خطر زمین لغزش وجود دارد و با افزایش فاصله از آن، میزان خطر زمین لغزش تا فاصله ۱۰۰۰ متر نیز افزایش نسبتاً کمتری داشته و با افزایش فاصله از جاده وقوع زمین لغزش با کاهش چشمگیر مواجه شده است (شکل ۸).



شکل ۸: منحنی پاسخ پارامتر فاصله از جاده در خطر زمین لغزش

شاخص بافت خاک

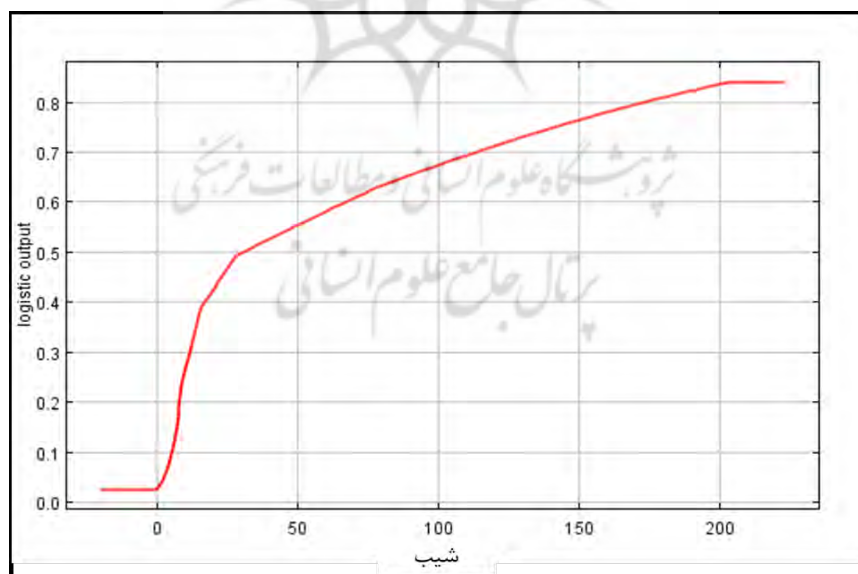
منحنی پاسخ پارامتر بافت خاک نشان می‌دهد که بافت رسی (clay) بیشترین میزان خطر زمین لغزش وجود دارد. پس از آن لوم رسی و سیلتی (silt clay loam)، لوم (loam)، رسی سیلت (silt clay) و لوم رسی (clay loam)، به ترتیب بیشترین میزان احتمال خطر زمین لغزش را دارا می‌باشند (شکل ۹).



شکل ۹: منحنی پاسخ پارامتر بافت خاک در خطر زمین لغزش

شاخص شیب

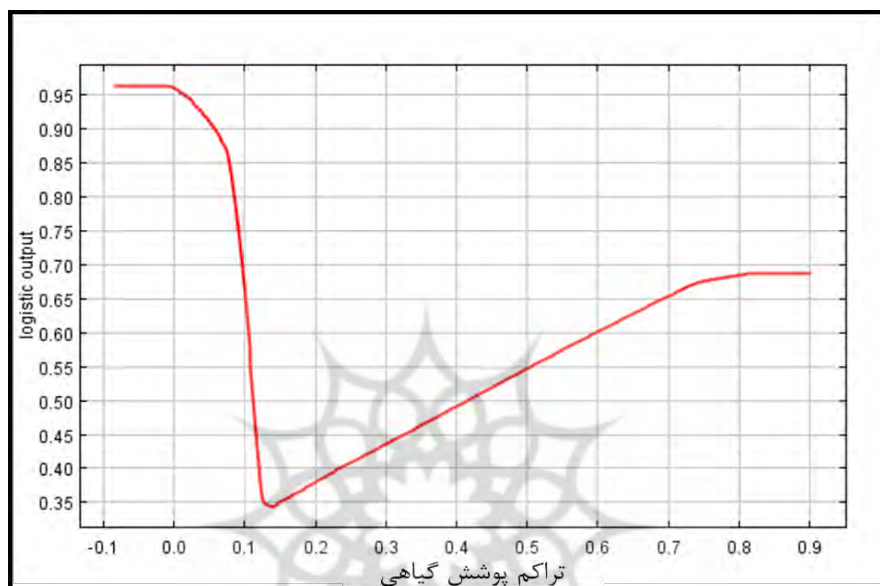
تحلیل منحنی پاسخ در خطر زمین لغزش در منطقه نشان می‌دهد که در شیب صفر درصد میزان احتمال زمین لغزش بسیار کم است اما از شیب صفر تا شیب انتهایی میزان احتمال زمین لغزش نیز به طور ناگهانی افزایش داشته است بطوری که از صفر درصد تا شیب تقریباً ۳۵ درصد میزان احتمال زمین لغزش بصورت نمایی افزایش یافته است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: منحنی پاسخ پارامتر شیب در خطر زمین لغزش

شاخص تراکم پوشش گیاهی

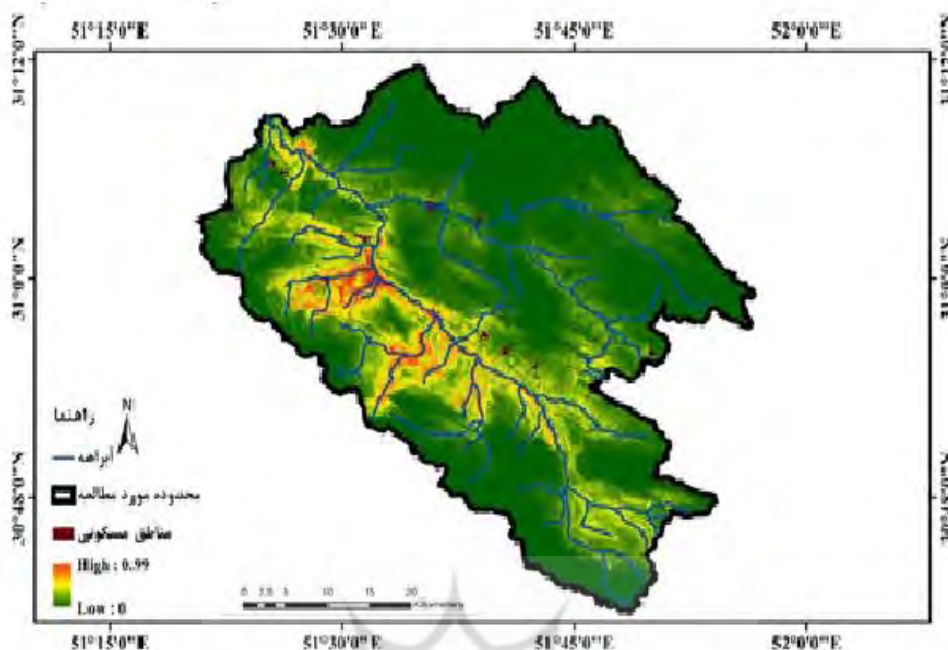
منحنی پاسخ تراکم پوشش گیاهی نشان می‌دهد که بیشترین میزان احتمال خطر زمین لغزش در تراکم $0/1$ الی صفر است و پس از آن به طور ناگهانی میزان خطر زمین لغزش از صفر الی $0/12$ به شدت کاهش پیدا کرده است و پس از آن دوباره با شیب ملایم میزان احتمال خطر زمین لغزش افزایش داشته است (شکل ۱۱).



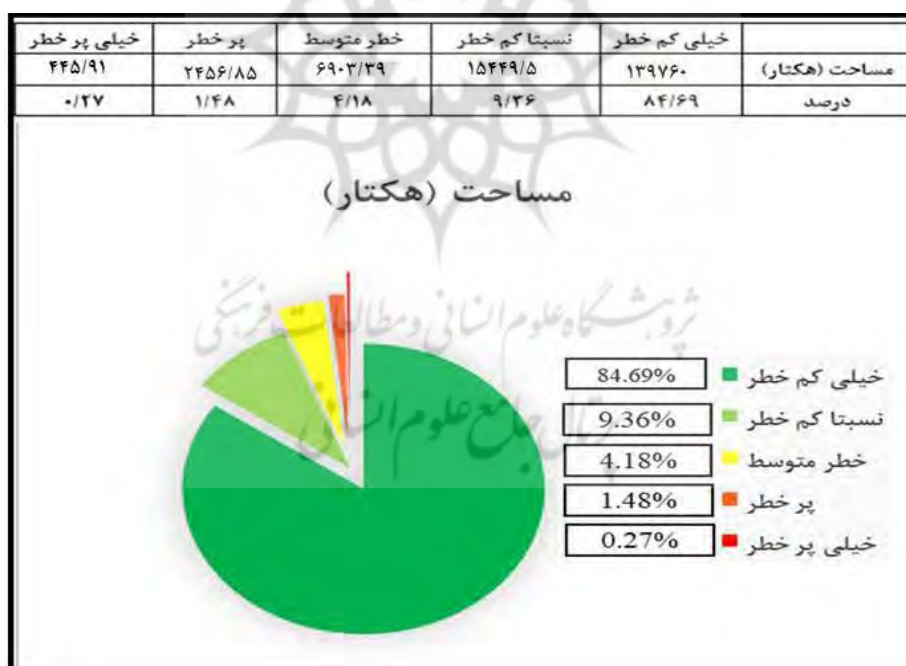
شکل ۱۱: منحنی پاسخ پارامتر تراکم پوشش گیاهی در خطر زمین لغزش

نقشه خطر زمین لغزش

نقشه خطر وقوع زمین لغزش حاصل از مدل مکسنت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هرچه ارزش به سمت صفر میل می‌کند، میزان احتمال وقوع زمین لغزش کاهش پیدا می‌کند و هر چه به سمت عدد یک میل می‌کند، میزان احتمال وقوع زمین لغزش افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد بیشترین مناطق پرخطر در بخش‌های میانی و غرب منطقه قرار دارد و بخش‌های دیگر منطقه از جمله شمال و شرق دارای خطرپذیری کمی است. با توجه به این که قابلیت پیش‌بینی مدل برای دامنه‌های مختلف خطر زمین لغزش یکسان نیست، از نقشه طبقه‌بندی شده خطر زمین لغزش استفاده می‌شود. نقشه نهایی پهنه بندی خطر زمین لغزش حوضه آبخیز کمه، در این مطالعه جهت شناخت و تفسیر بهتر بر اساس فراوانی رخداد نقاط زمین لغزشی به پنج کلاس طبقه بندی گردید. این پنج کلاس‌های خطر شامل طبقات خیلی کم خطر، نسبتاً کم خطر، با خطر متوسط، پرخطر و خیلی پرخطر در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد که بر اساس نتایج حاصل شده، از کل مساحت منطقه مورد مطالعه، 139760 هکتار ($84/69$ درصد) خیلی کم خطر، $15449/5$ هکتار ($9/36$ درصد) کم خطر، $6903/39$ هکتار ($4/18$ درصد) نسبتاً کم خطر، $2456/85$ هکتار ($1/48$ درصد) پر خطر و $445/91$ هکتار ($0/27$ درصد) در طبقه خیلی پرخطر قرار دارد (شکل ۱۳).



شکل ۱۲: نقشه نهایی پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه

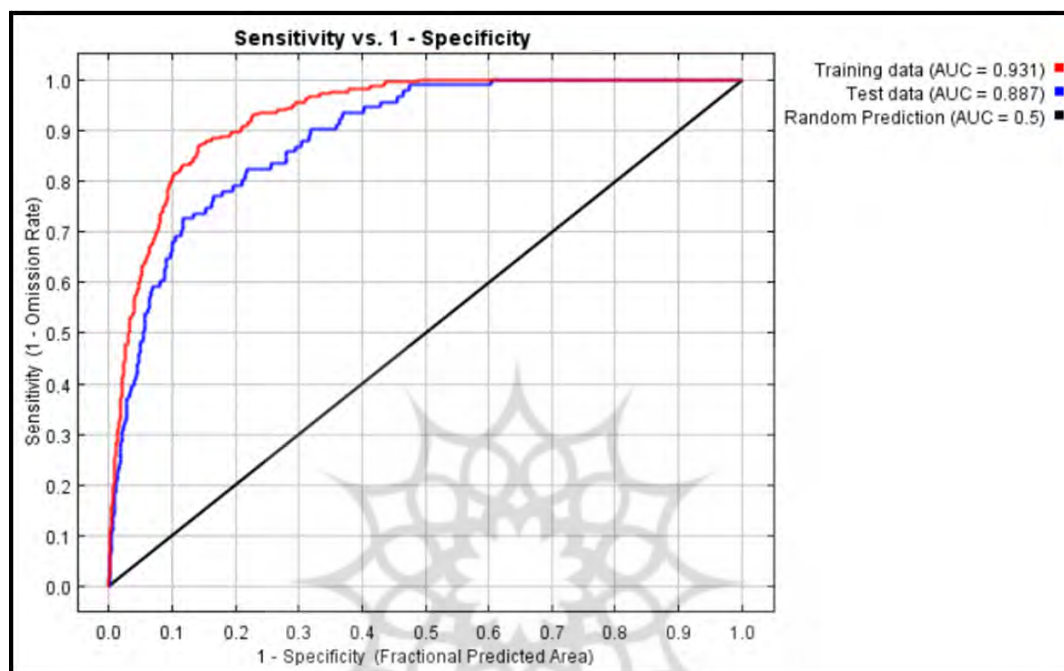


شکل ۱۳: مساحت (هکتار) و درصد طبقه بندی احتمال خطر زمین لغزش

اعتبار سنجی مدل

در این تحقیق همانطور که در قسمت قبلی بیان گردید، برای بررسی اعتبار مدل نهایی از شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای منحنی ROC استفاده شد. سطح زیر منحنی برای داده های آموزشی و آزمایشی محاسبه شد. چنانچه سطح زیر منحنی بیش از ۰/۹ باشد، قدرت تشخیص مدل بسیار بالا در نظر گرفته می شود (پیرسون، ۲۰۰۷). که این مقدار برای

داده‌های آموزشی برابر با ۰/۹۳۱ و برای داده‌های آزمایشی ۰/۸۸۷ به دست آمد و نشان دهنده این است که قدرت تشخیص مدل بسیار بالا در نظر گرفته می‌شود و مدل به خوبی می‌تواند مناطق مختلف خطر زمین لغزش را از یکدیگر تفکیک کند (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: منحنی بررسی اعتبار مدل خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز کمه

نتیجه گیری

در این تحقیق استفاده از مدل حداکثر انتروپی (Maxent) احتمال خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز کمه در جنوب استان اصفهان مدل‌سازی شد. برای مدل‌سازی احتمال خطر زمین لغزش، ۱۳ پارامتر مورد استفاده قرار گرفت است که عبارتند از ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، تراکم پوشش گیاهی، کاربری اراضی، بافت خاک، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت آبراهه و میانگین بارش سالانه استفاده شده است. در ابتدا لایه های اطلاعاتی این ۱۳ فاکتور تهیه شد. سپس تمامی لایه‌ها بصورت رستر تهیه و بصورت فایل ASCII ذخیره شد و نقاط زمین لغزش نیز بصورت فایل CSV تهیه شد و در نهایت در نرم افزار مکسنت برای ایجاد مدل سازی وارد شد. همچنین در این پژوهش نیز ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان داده‌های تعلیمی و ۳۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار در نهایت لایه نهایی در نرم افزار ArcGIS10.5 به پنج طبقه خیلی کم خطر، نسبتاً کم خطر، با خطر متوسط، پرخطر و خیلی پر خطر طبقه بندی شد.

بر اساس طبقه بندی تصاویر، مساحت مناطق خیلی کم خطر تا خیلی پر خطر به ترتیب ۸۴/۶۹ درصد، ۹/۳۶ درصد، ۴/۱۸ درصد، ۱/۴۸ درصد و ۰/۲۷ درصد بودند. برای بررسی اعتبار مدل نهایی از شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای منحنی ROC استفاده شد. چنانچه سطح زیر منحنی بیش از ۰/۹ باشد، قدرت تشخیص مدل بسیار بالا در نظر گرفته می‌شود که این مقدار در این مطالعه برابر با ۰/۹۳۱ به دست آمد و نشان دهنده این است که قدرت تشخیص مدل بسیار بالا در نظر گرفته می‌شود و مدل به خوبی می‌تواند مناطق مختلف خطر زمین لغزش را از یکدیگر تفکیک کند. منحنی

پاسخ پارامتر فاصله از آبراهه نشان می‌دهد که فاصله از آبراهه تا حدود ۱۰۰ متر، بیشترین احتمال خطر زمین لغزش وجود دارد و با افزایش فاصله از آن، میزان خطر زمین لغزش با کاهش چشمگیر مواجه شده است. همچنین نتایج نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) نیز نشان می‌دهد که بیشترین زمین لغزش در فاصله ۱۰۰ متری از آبراهه و عابدینی و قاسمیان (۱۳۹۴) تا فاصله ۱۰۰ متر از آبراهه اتفاق افتاده است. در این مطالعه شاخص زمین شناسی نیز دومین شاخص تاثیر گذار بر وقوع زمین لغزش می باشد که بیشترین وقوع زمین لغزش در سازند گورپی (KGU) که دارای شیل آبی رنگ مایل به خاکستری، مارن و میان لایه‌های ماسه سنگ گلوکونیتی است اتفاق افتاده است. سازند مارن از نظر وقوع زمین لغزش بسیار حساس می باشد که با نتایج محمدخان و همکاران (۱۳۹۳)، عسگری و همکاران (۱۳۹۷) همخوانی دارد.

منحنی پاسخ پارامتر فاصله از جاده نیز نشان می‌دهد که فاصله از جاده تا حدود ۱۰۰ متر، بیشترین احتمال خطر زمین لغزش وجود دارد و با افزایش فاصله از آن وقوع زمین لغزش با کاهش چشمگیر مواجه شده است. نتایج نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) نیز نشان می‌دهد که بیشترین وقوع زمین لغزش در فاصله کمتر از ۱۰۰ متر بیشترین زمین لغزش اتفاق افتاده و با افزایش فاصله از ۲۰۰۰ متر میزان وقوع زمین لغزش کاهش پیدا کرده است. در مورد عامل بافت خاک نیز بیشترین وقوع زمین لغزش در خاک‌های لوم سیلت رسی و رسی اتفاق افتاده است و آن هم به این دلیل است که لوم رسی و سیلتی (Silty- Clay-Loam) دارای مقدار رس ۲۷ تا ۴۰ درصد و مقدار شن نیز از ۲۰ درصد کمتر است و رسی (Clay) مقدار رس بیش از ۴۰ درصد و مقدار شن و سیلت آن به ترتیب از ۴۵ تا ۴۰ درصد کمتر است و دارای بافت درشت است.

با توجه به نقش پوشش گیاهی در بروز زمین لغزش، میتوان بیان نمود که نبود پوشش گیاهی منجر به سهولت در شستشوی دامنه‌ها هنگام بارندگی میشود، همچنین به علت قرار گرفتن خاک دامنه‌ها در معرض مستقیم هوا، به سهولت دچار هوازدگی خواهند شد که این امر منجر به ناپایدار شدن خاک می‌شود (عابدینی و یعقوب نژاد اصل، ۱۳۹۶). در این پژوهش نیز به دلیل اینکه در منطقه پوشش گیاهی بصورت ضعیف مرتعی و کشاورزی قرار دارد لذا میزان زمین لغزش نیز زیاد است. نتایج این پژوهش نشان داد که از شیب صفر درصد تا شیب تقریباً ۳۵ درصد میزان احتمال زمین لغزش بصورت نمایی افزایش یافته است و پس از آن با شیب ملایم تر میزان زمین لغزش افزایش یافته است. در شیب‌های صفر تا ۳۵ درصد که مناطق انسان ساخت و کاربری کشاورزی غالب کاربری در منطقه است نشان دهنده تأثیر زیاد انسان بر وقوع زمین لغزش است (بسطامی ۱۳۹۶؛ فام و همکاران^۱، ۲۰۱۹؛ حنیفی نیا و همکاران ۱۳۹۹). عامل جهت شیب در منطقه نشان می‌دهد که بیشترین اثرگذاری شیب در جهت شمالی منطقه به دلیل برخورداری از بارش و رطوبت، نقش مؤثری در ایجاد حرکات لغزشی منطقه ایفا می‌کنند که با نتایج نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) همخوانی دارد. با توجه به نقش پوشش گیاهی در بروز زمین لغزش، میتوان بیان نمود که نبود پوشش گیاهی منجر به سهولت در شستشوی دامنه‌ها هنگام بارندگی میشود، همچنین به علت قرار گرفتن خاک دامنه‌ها در معرض مستقیم هوا، به سهولت دچار هوازدگی خواهند شد که این امر منجر به ناپایدار شدن خاک می‌شود (عابدینی و یعقوب نژاد اصل، ۱۳۹۶). منحنی پاسخ پارامتر بارش نشان می‌دهد که احتمال افزایش زمین لغزش با افزایش میزان بارش تا ۱۱۵۰ میلی‌متر روند صعودی داشته و با سپس با شیب ملایم، با افزایش بارش تا ۱۲۰۰ میلی‌متر میزان خطر زمین لغزش کاهش پیدا کرده است. دوام و شدت بارش نقش عمده‌ای در وقوع زمین لغزش به عهده دارد که به عوامل مختلف دیگری از جمله

^۱. Pham

شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ساختمان زمین شناسی شیب‌ها و نفوذپذیری دامنه بستگی دارد (اسپی‌زیو و بنگوکیا، ۲۰۰۲؛ سونگ و همکاران ۲۰۱۴). در منطقه مورد مطالعه نیز روند بارندگی با زمین لغزش در قسمت‌هایی افزایش و سپس کاهش و سپس دوباره افزایش یافته است و این به دلیل آن است که در مناطقی که زمین لغزش بیشتر بوده است دارای بافت خاک لوم، رسی و شنی بوده است که با وقوع بارندگی در مناطق دارای خاک‌های سیلتی رسی خطر وقوع زمین لغزش نیز افزایش می‌یابد (لیبورگ و همکاران ۲۰۱۰). حتی پاسخ پارامتر فاصله از آبراهه نشان می‌دهد که فاصله از آبراهه تا حدود ۱۰۰ متر، بیشترین احتمال خطر زمین لغزش وجود دارد و با افزایش فاصله از آن، میزان خطر زمین لغزش با کاهش چشمگیر مواجه شده است. همچنین نتایج نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) نیز نشان می‌دهد که بیشترین زمین لغزش در فاصله ۱۰۰ متری از آبراهه و عابدینی و قاسمیان (۱۳۹۴) تا فاصله ۱۰۰ متر از آبراهه اتفاق افتاده است. در این پژوهش نیز به دلیل اینکه در منطقه پوشش گیاهی بصورت ضعیف مرتعی و کشاورزی قرار دارد لذا میزان زمین لغزش نیز زیاد است. با توجه به احتمال خطر زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه، که در موارد زیادی از این حرکات لغزشی به دلیل تاثیر آب بوده که با انجام کارهای حفاظتی و آبخیزداری از ورود از ورود آب به مناطق پرخطر و یا زهکش نمودن آب اضافی مناطق لغزشی، میتواند تا حدودی از اثر این حرکات کاست و باعث کم شدن و یا تثبیت حرکات زمین لغزشی شد. ساخت دیواره‌های حایل، جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی و کاشت گونه‌های مرتعی و جنگلی بومی، ممانعت از فعالیت‌ها و کاربری ناصحیح منطقه، ممانعت از گسترش مناطق مسکونی و یا مراکز عمومی در مناطق پرخطر لغزشی و همچنین پایداری سازی سکوه‌های دامنه‌ای به عنوان نمونه‌های از راهکارهای پیشنهادی برای کاهش این نوع مخاطره در منطقه مورد مطالعه می‌باشند.

منابع

- ابراهیمی، م.، حبیب‌اللهیان، م.، امیراحمد، ا.، زنگنه‌اسد، م.، ۱۳۹۴. بررسی اثر جاده سازی بر وقوع زمین لغزش‌های سطحی با استفاده از مدل پایداری دامنه‌ها. مطالعه موردی: حوضه آبخیز کلات، مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۱۵(۱۵): ۱۵۶-۱۴۳.
- جعفری، ت.، گلی مختاری، ل.، ناعمی تبار، م.، ۱۳۹۸، پهنه بندی خطر لغزش در حوضه آبریز بدرانلو با استفاده از روش فرایند تحلیل شبکه ای (ANP). فضای جغرافیایی. ۱۹(۶۶): ۱۷-۱.
- حنیفی نیا، ع.، نظرنژاد، ح.، نجفی، س.، کرنزادی، آ.، ۱۳۹۹. اولویت بندی عامل‌های موثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی حساسیت آن در آبخیز چریک آباد ارومیه با استفاده از مدل آنتروپی شانون، پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۳(۴)، ۳۲-۴۸.

¹-Espizua and Bengochea

²- Xiang

³- Lebourg

- مددی، ع.، عطا غفاری گ و پیروزی، ا.، ۱۳۹۴، ارزیابی و پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل ویکور (مطالعه موردی: حوضه آبخیز آق لاقان چای)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی. ۳(۴): ۱۴۱-۱۲۴.
- محمدنیا، م.، فلاح قاله‌ری، غ.، ۱۳۹۷، شبیه سازی احتمال وقوع زمین لغزش با استفاده از منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (مورد مطالعه: حوضه آبخیز پیوهژن - ارتفاعات جنوبی بینالود). نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۸(۴۸): ۱۳۰-۱۱۵.
- محمدخان، ش.، ویسی، ع.، باقری، ک.، ۱۳۹۳، پتانسیل سنجی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی، مطالعه موردی: منطقه کوهستانی شیرپناه در جنوب غرب استان کرمانشاه. جغرافیای سرزمین. ۱۱(۴۴): ۱۰۳-۸۹.
- محمودی، ف.، ۱۳۸۷، ژئومورفولوژی دینامیک، چاپ دوم، انتشارات پیام نور، ۱۴۱ ص.
- زیدی، ا.، زمانی، ن.، و مومنی اصل، م.، کولیوند، ح.، ۱۳۹۲، معرفی روش *MaxEnt* برای ارزیابی زیستگاه حیات وحش در ایران، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران.
- ذاکری نژاد، ر.، ۱۳۹۹، ارزیابی مدل های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان).
- نوجوان، م.، سادات شاه زیدی، س.، د داودی، م.، امین الرعایایی، ه.، ۱۳۹۸، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان). پژوهش های ژئومورفولوژی کمی. ۷(۲۸): ۱۵۹-۱۴۲.
- عابدینی، م.، قاسمیان، ب.، شیرزادی، ع.، ۱۳۹۳، مدل سازی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک مطالعه موردی: استان کردستان، شهرستان بیجار. جغرافیا و توسعه. ۱۲(۳۷): ۱۰۲-۸۵.
- عسگری، ش.، قنواتی، ع.، شادفر، ص.، ۱۳۹۷، تحلیل فضایی شاخصهای تاثیرگذار زمین لغزشها بر بار رسوبی حوضه سد ایلام. فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی. ۱۸(۶۳): ۳۱۸-۲۹۹.
- بسطامی، ش.، ۱۳۹۶، پهنه بندی زمین لغزش در حوضه آبخیز با استفاده از مدل تلفیقی فیزیکی بنیان و حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: بخشی از زون زمین شناسی کپه داغ-هزارمسجد). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست. دانشگاه بیرجند.
- حسینپور میل آغاردان، ا.، عباسپور، ر.ع.، ۱۳۹۳، بهبود نتایج پیش بینی وقوع زمین لغزش با استفاده از تئوری آنتروپی شانون. دانش مخاطرات. ۱(۲): ۲۶۸-۲۵۳.
- رستمی، ز.، المدرسی، س.ع.، جمالی، ع.ا.، ۱۳۹۸، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه ی موردی: حوضه ی آبخیز سد چم گردلان ایلام)، مخاطرات محیط طبیعی سال هشتم، ۲۲: ۱-۱۸.
- *Astuti, W. T., Muslim, M. A., & Sugiharti, E. (2019). The Implementation of The Neuro Fuzzy Method Using Information Gain for Improving Accuracy in Determination of Landslide Prone Areas. Scientific Journal of Informatics, 6(1), 95-105.*
- *Espizua, L. E., & Bengochea, J. D. (2002). Landslide hazard and risk zonation mapping in the Rio Grande Basin, Central Andes of Mendoza, Argentina. Mountain Research and Development, 22(2), 177-185*

- Chang, Z., Du, Z., Zhang, F., Huang, F., Chen, J., Li, W., & Guo, Z. (2020). Landslide Susceptibility Prediction Based on Remote Sensing Images and GIS: Comparisons of Supervised and Unsupervised Machine Learning Models. *Remote Sensing*, 12(3), 502.
- Klai, A., Haddad, R., Bouzid, M. K., & Rabia, M. C. (2020). Landslide susceptibility mapping by fuzzy gamma operator and GIS, a case study of a section of the national road n° 11 linking Mateur to Béja (Nortshern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(2), 58.
- Thanh, D. Q., Nguyen, D. H., Prakash, I., Jaafari, A., Nguyen, V. T., Van Phong, T., & Pham, B. T. (2020). GIS based frequency ratio method for landslide susceptibility mapping at Da Lat City, Lam Dong province, Vietnam. *Vietnam J. Earth Sci*, 42, 55-66.
- Hu, Q., Zhou, Y., Wang, S., & Wang, F. (2020). Machine learning and fractal theory models for landslide susceptibility mapping: Case study from the Jinsha River Basin. *Geomorphology*, 351, 106975.
- Olaya, V., Conrad, O. (2008). *Geomorphometry in SAGA*. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier, Amsterdam, 293-308
- Roy, J., & Saha, S. (2019). Landslide susceptibility mapping using knowledge driven statistical models in Darjeeling District, West Bengal, India. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 11.
- Paoletti, V., Tarallo, D., Matano, F., & Rapolla, A. (2013). Level-2 susceptibility zoning on seismic-induced landslides: An application to Sannio and Irpinia areas, Southern Italy. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 63, 147-159.
- Pal, S. C., Das, B., & Malik, S. (2019). Potential Landslide Vulnerability Zonation Using Integrated Analytic Hierarchy Process and GIS Technique of Upper Rangit Catchment Area, West Sikkim, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(10), 1643-1655.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Phillips, S.J., Dudik, M, and Schapire, R.E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceeding of the twenty-first international conference on Machine learning* (p.83).ACM.
- Pham, B. T., Jaafari, A., Prakash, I. & Bui, D. T. (2019). A novel hybrid intelligent model of support vector machines and the MultiBoost ensemble for landslide susceptibility modeling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78 (4), 2865-2886.

- Pearson, R.G. (2007). *Species distribution modeling for conservation educators and practitioners. Synthesis. American Museum of Natural History*, 50, 54-89.
- Xiang, W., Li, G. F., & Li, Y. R. (2014). *Hainan Tropical Rainforest Landslide Analysis and Prevention Measures. Applied Mechanics and Materials*, 638-640, 648-651.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R. (1987). *Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.
- 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), 496-510.
- Lebourg, T., Hernandez, M., Zerathe, S., El Bedoui, S., Jomard, H., & Fresia, B. (2010). *Landslides triggered factors analysed by time lapse electrical survey and multidimensional statistical approach. Engineering Geology*, 114(3), 238-250.
- Vojteková, J., & Vojtek, M. (2020). *Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia. Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 131-148.