

ارزیابی حساسیت مخاطره زمین لغزش با استفاده از مدل انتروپی شانون در زاگرس

چین خورده

مطالعه موردی: حوضه آبخیز ورن سرا

عبدالمجید احمدی^۱؛ استادیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

عبدالکریم ویسی؛ دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

چکیده

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش از جمله اقدامات اساسی در جهت مقابله و کاهش اثرات وقوع زمین لغزش می‌باشد. حوضه آبخیز ورن سرا یکی از مناطقی است که آثار زمین لغزش‌های متعدد در قسمت‌های مختلف آن مشاهده شده است. در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از شاخص انتروپی، ابتدا محدوده‌های لغزش مشخص گردید، سپس عوامل مؤثر در وقوع حرکات دامنه‌ای در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه و نقشه حساسیت زمین لغزش منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از شاخص انتروپی شانون نشان داد که لایه‌های شیب، کاربری اراضی، انحنای سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص موقعیت توپوگرافی بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش منطقه داشته‌اند. همچنین پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با مدل مذکور و ارزیابی دقت آن با استفاده از منحنی ROC بیانگر دقت خیلی خوب مدل (۷۹/۶ درصد) با انحراف استاندارد ۰/۰۲۲۸ برای منطقه مورد مطالعه است. نقشه پهنه‌بندی گویای آن است که پهنه‌های کم‌خطر فقط ۱۳ درصد از منطقه را در برمی‌گیرند و بیش از ۵۶ درصد منطقه در پهنه با خطر زیاد زمین لغزش قرار دارد که حاکی از پتانسیل بالای منطقه در رخداد زمین لغزش است. ساخت و ساز با فاصله از خطوط گسلی، آبراهه‌ها و سازند آسماری پرشیب و ایمنی مسیرهای ارتباطی مهم‌ترین اقدامات برای کاهش میزان خسارات ناشی از زمین لغزش در حوضه آبخیز ورن سرا است.

واژه‌های کلیدی: مخاطرات طبیعی، زمین لغزش، انتروپی، زاگرس چین خورده.

مقدمه

ناپایداری دامنه‌های طبیعی یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیکی است که در تغییر شکل زمین نقش مهمی دارد. زمانی که این فرایند فعالیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد به پدیده‌ای خطرناک تبدیل می‌شود. این نوع حرکات عمدتاً در نتیجه نیروی ثقل، عوامل طبیعی مانند بارش، اشباع خاک از آب، زلزله و همچنین علل انسانی از جمله تخریب پوشش گیاهی و عملیات ناصحیح مهندسی به وقع می‌پیوندند (رجبی و فیض‌اله‌پور، ۱۳۹۳). خسارات ناشی از حرکات توده‌ای در ایران تا پایان شهریور ۱۳۸۶، ۱۲/۷ میلیارد ریال برآورد شده است (کارگروه مطالعه امور زمین‌لغزش، ۱۳۸۶). به‌منظور کاهش و یا کنترل خسارت ناشی از زمین‌لغزش، تهیه نقشه‌های حساسیت، خطر و ارزیابی ریسک زمین‌لغزش امری ضروری است (Wang et al, ۲۰۱۶). به‌طور کلی حساسیت زمین‌لغزش به بررسی و ارزیابی زمین‌لغزش‌های موجود و یا مناطق دارای پتانسیل رخداد زمین‌لغزش، بدون توجه به رویداد آن بستگی می‌پردازد (Guzzetti et al, ۲۰۰۵). اعتبار نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش عمدتاً بستگی به مقدار و کمیت داده‌های موجود، مقیاس کار و انتخاب روش مناسب تحلیل و مدل‌سازی دارد (Baeza & Corominas, ۲۰۰۱). بر اساس رویکرد مدل‌سازی، روش تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش به ۴ گروه اصلی آماری، تحلیلی، قطعی و اکتشافی تقسیم می‌شود (Guzzetti et al, ۲۰۰۵) که هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند. از آنجایی که زمین‌لغزش‌ها در زمره مخاطرات محیطی ویرانگر قرار دارند، محققان زیادی در سرتاسر جهان جهت ارزیابی حساسیت و خطر زمین‌لغزش از روش‌های مختلفی استفاده کرده‌اند (Paoletti, ۲۰۱۳). محققانی در کشورهای مختلف با استفاده از مدل انتروپی به ارزیابی خطر زمین‌لغزش پرداخته‌اند (شکل ۱). از جمله آن‌ها می‌توان به محققین زیر اشاره کرد: پارک (۲۰۱۵) در کره جنوبی، فلسیمو و همکاران (۲۰۱۳) در شمال اسپانیا، چن و همکاران (۲۰۱۷) در چین، کورنژادی و همکاران (۲۰۱۷) در شمالغرب ایران، دیویس و بلسیوس (۲۰۱۳) در غرب آمریکا، دوکوتا و همکاران (۲۰۱۳) در نپال، کوئلهورنتو و همکاران (۲۰۰۹) در هند و پالاز (۲۰۲۰) در ترکیه. توزیع مطالعات زمین‌لغزش در سطح بین‌المللی حاکی از اهمیت پژوهش در این زمینه در ایران می‌باشد (شکل ۱).

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و یا بالقوه خطر از هیچ تا بسیار زیاد تقسیم می‌کند. این فرایند که بر مبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی و مدل‌سازی کمی بر پایه داده‌های ناحیه مورد مطالعه صورت می‌گیرد، می‌تواند مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و عمران در مقیاس منطقه‌ای، ناحیه‌ای، و محلی محسوب گردد (رامشت، ۱۳۷۵). کلیه روش‌های موجود در زمینه تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش مبتنی بر برخی مفروضات پذیرفته شده می‌باشند که می‌توان آن‌ها را به‌صورت زیر بیان کرد (Kanungo et al, ۲۰۰۹)

- گذشته و حال کلید آینده هستند. این مطلب بدین معنی است که زمین‌لغزش‌های آینده، به‌احتمال زیادی تحت شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی مشابه حال حاضر رخ خواهند داد.
- زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مشخص می‌توانند به هر دو روش برداشت زمینی و تفسیر تصاویر سنجش‌ازدور، شناسایی، طبقه‌بندی و نقشه‌برداری شوند.
- زمین‌لغزش‌ها به‌وسیله عوامل درونی قابل‌شناسایی (یعنی ویژگی‌های ذاتی زمین) که به‌عنوان فاکتورهای عاملی (مسبب) شناخته می‌شوند، کنترل می‌گردند که می‌توانند به روش برداشت زمینی و تفسیر تصاویر سنجش‌ازدور، بررسی شوند.

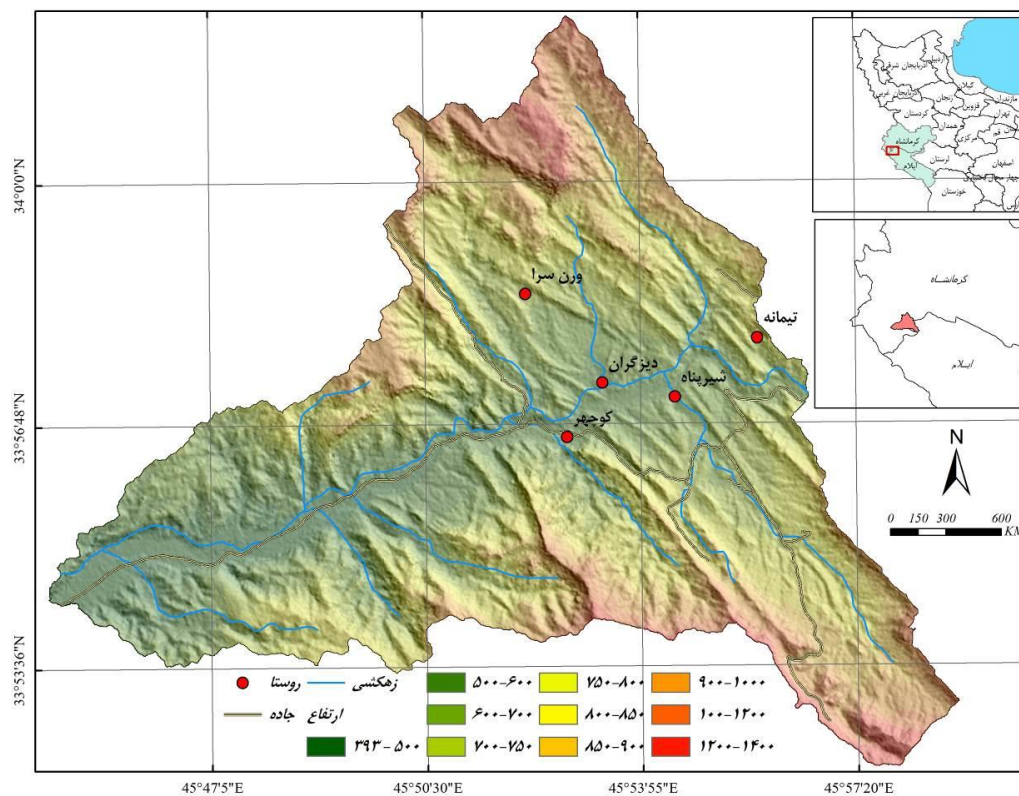
تاکنون مطالعه جامعی در ارتباط با تجزیه و تحلیل حساسیت زمین لغزش در حوضه آبخیز ورن سرا که یکی از مناطق مستعد وقوع زمین لغزش هست، انجام نشده است. احداث سد شرفشاه، وجود زیرساخت‌های نظامی و همچنین اهمیت مسیر مواصلاتی سومار به عراق دال بر اهمیت بررسی مخاطرات محیطی در این حوضه است. بنابراین انجام پژوهش حاضر برای ارزیابی و مدیریت محیطی در منطقه مورد مطالعه به منظور پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لغزش، ضروری است. هدف از پژوهش حاضر، تعیین عرصه‌های حساس به وقوع زمین لغزش با استفاده از روش انتروپی شانون در حوضه آبخیز ورن سرا و ارزیابی میزان دقت مدل مذکور در منطقه مورد مطالعه هست.



شکل ۱. موقعیت مناطقی که به مطالعه زمین لغزش با استفاده از روش انتروپی پرداخته شده است.

داده‌ها و روش کار

حوضه آبخیز ورن سرا در جنوب غربی استان کرمانشاه و در طول جغرافیایی $13^{\circ} 43' 45''$ تا $12^{\circ} 02' 46''$ شرقی و عرض جغرافیایی $12^{\circ} 35' 33''$ تا $24^{\circ} 57' 33''$ شمالی واقع شده است (شکل ۲). مساحت این حوضه در حدود ۱۷۵ کیلومتر مربع است بخش اعظم جاده مواصلاتی و همچنین پروژه‌های تأسیساتی و مکان‌های نظامی در این محدوده احداث شده است. شهر سومار در سمت جنوب غربی و سکونتگاه‌های روستایی و پادگان‌های نظامی مهم‌ترین سکونتگاه‌های انسانی منطقه مورد مطالعه می‌باشند. در این منطقه ناپایداری‌های دامنه‌ای به ویژه به صورت زمین لغزش‌های بزرگ و کوچک و همچنین ریزش نقش مهمی در تحول دامنه‌ها ایفا می‌کند. این گونه ناپایداری‌های دامنه‌ای علاوه بر تخریب اراضی و رسوب زایی، به عنوان یک مخاطره ژئومورفولوژیکی نیز مطرح می‌باشد که در برخی از موارد تهدیدی جدی برای سکونت‌گاه‌ها و تأسیسات زیربنایی منطقه محسوب می‌شود.



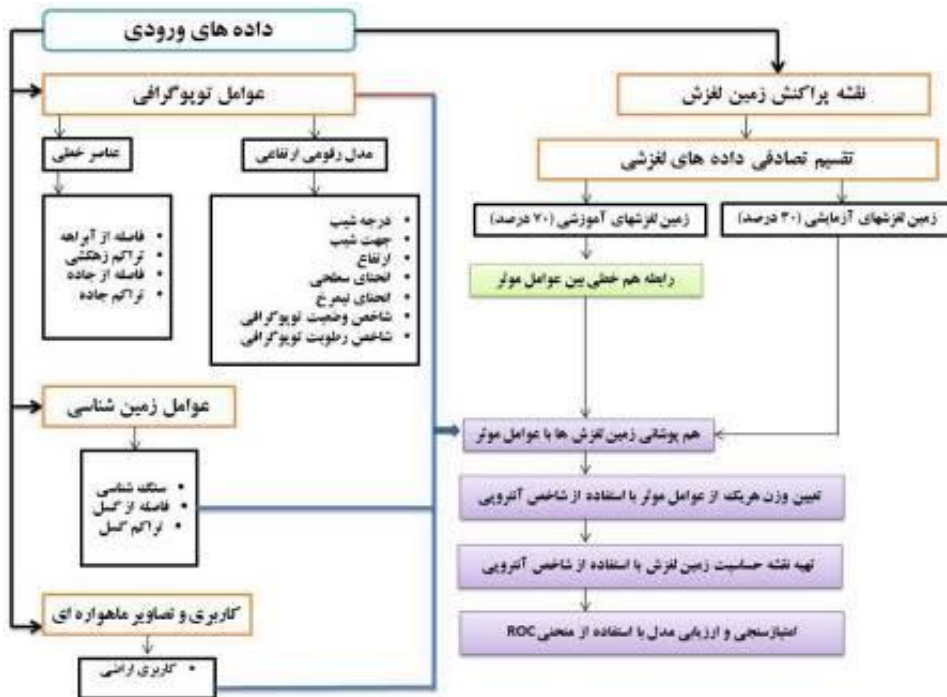
شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه

تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش ۴ مرحله را شامل می شود که به شرح زیر است (شکل ۴): (۱) آماده سازی داده ها (۲) تجزیه و تحلیل همبستگی لایه ها (۳) مدل سازی حساسیت زمین لغزش ۴- اعتبارسنجی مدل (۱) آماده سازی لایه ها: اولین گام در تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش، آماده سازی نقشه پراکنش زمین لغزش های رخ داده در گذشته است. این مرحله به عنوان مهم ترین بخش و پیش نیاز مطالعات حساسیت و خطر زمین لغزش محسوب می گردد (Regmi et al, ۲۰۱۴). عمده زمین لغزش های منطقه از نوع انتقالی و ساده می باشد (شکل ۳). بر اساس عملیات میدانی، تفسیر عکس های هوایی سال ۱۳۷۴ و تفسیر تصاویر ماهواره ای گوگل ارث (با دقت تقریباً ۱ متر) و آرشو زمین لغزش های قدیمی گردآوری شده توسط سازمان جنگل ها، مراتع و آبخیزداری در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، موقعیت زمین لغزش ها به صورت دقیق و معتبر با ۳۷ زمین لغزش تهیه گردید. زمین لغزش های شناسایی شده به صورت تصادفی به دو گروه داده های مدل سازی (۲۶ موقعیت زمین لغزش) و داده های اعتبارسنجی (۱۱ موقعیت زمین لغزش) تقسیم گردیدند که به ترتیب شامل ۷۰ درصد و ۳۰ درصد از کل موقعیت زمین لغزش ها می باشد. نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از داده های مدل سازی زمین لغزش تهیه گردید. داده های اعتبارسنجی زمین لغزش برای ارزیابی دقت حساسیت زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفت.

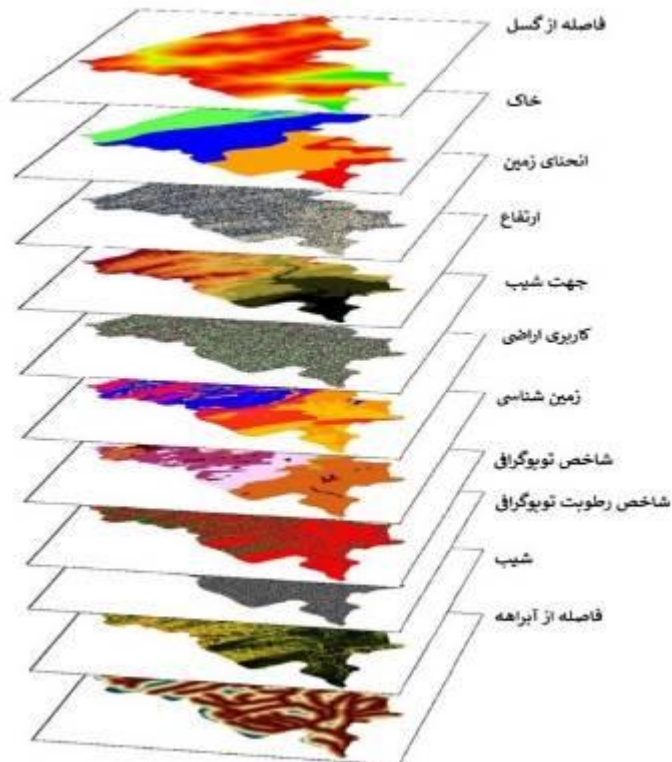


شکل ۳. زمین لغزش بزرگ دامنه شمالی کوه شیرپناه (رخ داده در فروردین ۱۳۹۵)

(۲) تهیه لایه‌های مؤثر در زمین لغزش: در این پژوهش ابتدا با استفاده از مطالعات پیشینه پژوهش، عملیات میدانی گسترده و خصوصیات محیطی منطقه مورد مطالعه ۱۱ عامل مؤثر در زمین لغزش شناسایی گردید، در گام بعدی آزمون هم‌خطی با استفاده از شاخص‌های تحول و تورم واریانس بر روی عوامل اعمال گردید. عوامل کنترل‌کننده ناپایداری در این تحقیق شامل شیب، جهت شیب، انحنای سطح، طبقات ارتفاعی، رطوبت توپوگرافی، شاخص وضعیت توپوگرافی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از جاده و خاک است (شکل ۵). هریک از این نقشه‌های موضوعی به شرح ذیل تهیه گردید: از تصاویر مدل رقومی ارتفاعی منطقه با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALUS-PALSAR، پارامترهای مورفومتریک شیب، جهت شیب، انحنای سطح، انحنای نیمرخ، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص وضعیت توپوگرافی به دست آمد. لایه کاربری اراضی از سازمان جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری تهیه شد و پس از به‌روزرسانی و انجام اصلاحات با استفاده از تصاویر گوگل ارث (با قدرت تفکیکی تقریباً ۱ متر) مورد استفاده قرار گرفت. نقشه زمین‌شناسی منطقه از رقومی کردن نقشه زمین‌شناسی ورقه سومار و ایلام در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. دیگر لایه‌ها از نقشه‌های توپوگرافی استخراج گردید.



شکل ۴. فرایند انجام تحقیق



شکل ۵. داده های ورودی برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه

• عوامل مؤثر بر وقوع لغزش

در این تحقیق، از روش نسبت فراوانی (FR) جهت تعیین ارتباط بین زمین لغزش‌ها و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها استفاده شد. روش نسبت فراوانی (FR) روشی احتمالاتی است که بر پایه رابطه بین توزیع زمین لغزش‌ها و هریک از عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش بنا نهاده شده است (Tay et al, ۲۰۱۴). نسبت فراوانی با استفاده از رابطه (۳) به دست آمد (Ozdemir, ۲۰۱۱).

$$FR = \frac{Al}{Acl} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن A_1 : درصد زمین لغزش در هر طبقه از عوامل مؤثر، A_{cl} : درصد مساحت همان طبقه از عوامل مؤثر و FR: نسبت فراوانی است.

• بررسی هم خطی بین متغیرهای مستقل

زمانی که دو متغیر مستقل بسیار به یکدیگر وابسته باشند، بیانگر وجود هم خطی بین آن‌ها است. برای تشخیص این مسئله، از دو شاخص ضریب تحمل^۱ و عامل تورم واریانس^۲ استفاده می‌شود. مقادیر ضریب تحمل کمتر از ۰/۱ یا ۰/۲ و عامل تورم واریانس بالاتر از ۵، نشان‌دهنده مسئله هم خطی و همبستگی زیاد بین دو متغیر است (Obrien, ۲۰۰۷).

• شاخص انتروپی

انتروپی روشی جهت اندازه‌گیری یک سیستم بی‌نظم، ناپایدار، نامتعادل و دارای عدم قطعیت است. مقدار انتروپی یک سیستم با درجه بی‌نظمی آن سیستم، مرتبط است. اندازه‌گیری مقدار انتروپی ابتدا توسط بولتزمن ارائه شد که تحت عنوان اصل بولتزمن برای توصیف وضعیت ترمودینامیکی سیستم به کار گرفته شد. شانون^۳ (۱۹۴۸) اصل بولتزمن را اصلاح و مدل انتروپی را در نظریه اطلاعات پایه‌گذاری کرد. انتروپی قادر به اندازه‌گیری عدم قطعیت منابع اطلاعات است (Yufeng et al, ۲۰۰۹) این شاخص نشان‌دهنده میزان بی‌نظمی در محیط است (Bednarik et al, ۲۰۱۰)، تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص انتروپی امکان محاسبه وزن مربوط به هر یک از متغیرهای ورودی را فراهم می‌کند (Devkota, ۲۰۱۳) مقدار وزن هر یک از عوامل به‌طور جداگانه تحت عنوان شاخص انتروپی بیان می‌گردد، در نتیجه با استفاده از این شاخص، می‌توان عواملی که بیشترین تأثیر را در رخداد زمین لغزش یا هر پدیده‌ای دارند، شناسایی کرد. به‌منظور تعیین وزن مربوط به هر یک از عوامل مؤثر از روابط ۴ تا ۸ استفاده شد (Bednarik et al, ۲۰۱۳; Pourghasemi et al, ۲۰۱۳; Devkota, ۲۰۱۳; Wang et al, ۲۰۱۶).

$$W_f = I_c * FR \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$I_c = \frac{Env_{max} - En}{Env_{max}} \quad c = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$En_{max} = \log_2 N_c, N_c - N_{class} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$P_d = \frac{FR}{\sum_{N_c=1}^{FR}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$FR = \frac{A_l}{A_{cl}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

۱. Tolerance

۲. Variance inflation factor

۳. Shanon

که در آن A_1 درصد پیکسل‌های لغزشی در هر طبقه از عوامل مؤثر، A_{c1} درصد پیکسل‌های (مساحت) مربوط به هر طبقه از عوامل مؤثر، FR : نسبت فراوانی لغزش هر طبقه از عوامل مؤثر، P_d چگالی احتمال، En_v مقدار انتروپی، En_{max} : حداکثر انتروپی، I_c : ضریب اطلاعات و W : وزن نهایی هر عامل است.

در نهایت شاخص حساسیت زمین لغزش (LS) با جمع مقادیر وزن حاصل از شاخص انتروپی هر یک از عوامل مؤثر با استفاده از معادله ۹ به دست آمد:

$$LS = \sum_i^n W_f \times C_f \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن C_f : عامل مؤثر در رخداد زمین لغزش است.

• ارزیابی نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص آنترپی

پس از تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص آنترپی، جهت ارزیابی و تعیین دقت نقشه از ۳۰ درصد (۱۱) داده‌های لغزشی آزمایشی و اعتبارسنجی که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند، استفاده گردید. سپس با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی ROC دقت مدل تهیه شده مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی ROC و محاسبه سطح زیر منحنی یکی از روش‌های استاندارد اعتبارسنجی به منظور مقایسه عملکرد پیش‌بینی انواع مدل‌ها است. در این منحنی، در محور X مقدار خطای مثبت و بر روی محور Y و مقدار خطای منفی نمایش داده می‌شود. این منحنی، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای نمایش کیفیت مدل است که سطح زیر منحنی مقدار (AUC) پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد. مقدار AUC بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است (Romer and Ferentinu, ۲۰۱۶).

شرح و تفسیر نتایج

نتایج حاصل از بررسی رابطه هم خطی بین متغیرها با استفاده از دو شاخص ضریب تحمل و عامل تورم واریانس در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار عامل تورم واریانس و کمترین مقدار ضریب تحمل به ترتیب ۲/۴۲۳ و ۰/۲۷۵ می‌باشد؛ از این رو، هیچ هم خطی بین متغیرهای مستقل مشاهده نشد (جدول ۱).

جدول ۱. رابطه هم خطی بین متغیرهای مستقل با یکدیگر

عامل	ضریب تحمل	عامل تورم واریانس
ارتفاع	۰/۲۷۵	۲/۴۲۳
شیب	۰/۶۵۲	۱/۴۲
جهت شیب	۰/۴۲۳	۱/۹۵
لیتولوژی	۰/۸۶۵	۱/۲۱
کاربری	۰/۵۳۱	۲/۰۲
فاصله از غسل	۰/۴۶۷	۲/۰۶
فاصله از جاده	۰/۴۳۱	۲/۳۶
خاک	۰/۴۱۲	۲/۳۷۱
انحنای سطح	۰/۷۰۶	۱/۴
شاخص وضعیت توپوگرافی	۰/۵۱۸	۱/۸۷
شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۵۶۹	۱/۷۱

بررسی ارتباط زمین لغزش با عوامل تأثیرگذار بر رخداد زمین لغزش با استفاده از روش نسبت فراوانی (FR) در منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که در منطقه مورد مطالعه، بیشترین رخداد زمین لغزش در طبقه ارتفاعی کمتر از ۱۲۰۰ متر (نسبت فرکانس برابر با ۰/۴۱) رخ داده و با افزایش ارتفاع از فراوانی لغزش‌ها کاسته شده است. هرچند انتظار می‌رود با افزایش ارتفاع، بر فراوانی لغزش‌ها افزوده شود، اما در منطقه مورد مطالعه، به علت وجود خاک‌های عمیق‌تر در ارتفاعات پایین و همچنین دخالت عوامل انسانی در پایین دست مناطق کوهستانی شرایط جهت وقوع زمین لغزش فراهم است که با نتایج محمدخان و همکاران (۱۳۹۳)، پورقاسمی و روسی (۲۰۱۶) مطابقت دارد. پایداری دامنه به اثر متقابل زاویه شیب با ویژگی‌های مواد دامنه (زاویه اصطکاک، نفوذپذیری و چسبندگی وابسته است (یوسف و همکاران، ۲۰۱۵). در منطقه مورد مطالعه با افزایش میزان شیب، فراوانی لغزش‌ها افزایش یافته است. در دامنه‌های پرشیب برتری تنش برشی بر نیروی مقاوم و همچنین به علت دخالت عوامل انسانی از طریق جاده‌سازی و تغییر کاربری بر ناپایداری دامنه‌ها افزوده شده و شرایط جهت وقوع لغزش فراهم شده است که با نتایج رگمی و همکاران (۲۰۱۴) و یوسف و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. بیشتر زمین لغزش‌ها در کاربری مرتع و جنگل (با نسبت فرکانس ۲/۶۶) اتفاق افتاده است و کاربری کشاورزی (با نسبت فرکانس ۰/۶) در رتبه بعدی قرار دارد. علت این امر، مساحت بیش از ۵۰ درصدی کاربری جنگل و مرتع در منطقه مورد مطالعه و دخالت عوامل انسانی در این مناطق است. اکثر لغزش‌هایی که در منطقه مورد مطالعه در کاربری مرتع رخ داده‌اند، در حاشیه جاده‌های داخل مرتع و مناطق پرشیب دیده می‌شوند که جهت دسترسی به تأسیسات زیربنایی، شرکت‌های شن و ماسه و مناطق روستایی احداث شده‌اند که با نتایج شهبایی و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد.

نتایج حاصل از بررسی ارتباط بین زمین لغزش‌ها با انحنای سطح، بیانگر آن است که بالاترین مقدار FR متعلق به دامنه‌های محدب بوده است. این امر به علت واگرایی جریان آب در این دامنه‌ها و انبساط و انقباض خاک دامنه‌های محدب می‌باشد که شرایط را جهت فرسایش و وقوع زمین لغزش‌ها فراهم کرده است که با نظرات چن و همکاران (۲۰۱۶) و هونگ و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. توزیع مکانی رطوبت لایه بالایی خاک، روند پیچیده‌ای دارد که به عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی بستگی دارد. از آنجایی که اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک، کار پرزحمتی است، می‌توان از شاخص رطوبت توپوگرافی که از ترکیب مساحت حوزه بالادست و شیب به دست می‌آید و توانایی توصیف الگوی مکانی رطوبت را دارد، استفاده کرد. در منطقه مورد مطالعه با افزایش رطوبت توپوگرافی افزایش رخداد لغزش را داریم که با نتایج گیو (۲۰۱۵) همخوانی دارد. بررسی ارتباط زمین لغزش با زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی زمین لغزش‌ها در گروه ۳ رخ داده (نسبت فرکانس ۱/۶) گروه‌های ۲ و ۴ که شامل سازندهای آسماری و تیزکوه می‌شود با نسبت فراوانی ۱/۳ و ۱/۰۲ در رتبه‌های بعدی قرار دارند، علت آن حساس بودن این گروه‌ها نسبت به وقوع زمین لغزش می‌باشد. این گروه‌ها متشکل از سنگ‌آهک با میان لایه‌های شیل و مارن می‌باشند که در صورت نفوذ آب در آن‌ها شرایط برای وقوع زمین لغزش فراهم می‌شود. نمونه واضح آن به زمین لغزش رخ داده در سال ۱۳۹۵ در بخش غربی منطقه برمی‌گردد (شکل ۶). بررسی رخداد زمین لغزش با فاصله از آبراهه، بیانگر وقوع بیشتر زمین لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری از شبکه آبراهه است (FR: ۱/۷۴) و با افزایش فاصله از آبراهه از فراوانی رخداد زمین لغزش کاسته شد. این بدان دلیل است که محدوده‌های نزدیک به شبکه زهکشی آب محتوی بیشتری نسبت به مناطق دور از شبکه زهکشی دارند که با نظرات وان (۲۰۰۹) و جعفری و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. با افزایش تراکم شبکه زهکشی، فراوانی

رخداد زمین‌لغزش در حال افزایش است. آبراهه‌ها با فرسایش و پاشویی‌های مداوم و یا اشباع نواحی پایین دست دامنه‌ها تأثیر منفی بر روی پایداری دامنه‌ها می‌گذارند و موجب افزایش احتمال رخداد زمین‌لغزش می‌گردند.



شکل ۶. زمین‌لغزش کوچک در بالادست روستای نیان که در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری آبراهه قرار دارد.

نتایج حاصل از بررسی ارتباط زمین‌لغزش با شاخص وضعیت توپوگرافی، بیانگر فراوانی بیشتر زمین‌لغزش‌های منطقه، در دره‌ها است. شاید دلیل این امر نقش آبراهه‌ها در فرسایش و پاشویی باشد که شرایط را برای وقوع زمین‌لغزش فراهم کرده است. فراوانی زمین‌لغزش‌ها در جهت‌های مختلف جنوبی توزیع نسبتاً یکسانی دارد (جدول ۲) و اندکی حساسیت بیشتر در دامنه‌های رو به جنوب دیده می‌شود. این مسئله می‌تواند به علت دریافت و توزیع نسبتاً یکسان رطوبت در جهت‌های مختلف دامنه‌ها و همچنین اثرگذاری عوامل دیگر بر وضعیت رطوبت و پایداری جهت‌های مختلف شیب باشد که با نتایج رومر و فرن‌تینو (۲۰۱۶) مطابقت دارد. فعالیت‌های انسانی همچون جاده‌سازی، یکی از مهم‌ترین عوامل رخداد زمین‌لغزش در مناطق شیب‌دار به شمار می‌آید. جاده‌ها به‌خصوص در مناطق کوهستانی به علت سیستم زهکشی نامناسب و بی‌ثباتی مکانیکی در دامنه‌ها یکی از عوامل شناخته‌شده در افزایش وقوع زمین‌لغزش می‌باشند (Brenning et al, ۲۰۱۴). ارتباط بین رخداد زمین‌لغزش با عامل فاصله از جاده، بیانگر وقوع بیشتر زمین‌لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری جاده‌ها است (نسبت فرکانس ۱/۳۲). این روند کاهش تا فاصله ۳۰۰ متری از جاده‌ها ادامه دارد، اما در فاصله ۴۰۰-۳۰۰ متری از جاده‌ها نسبت فراوانی رخداد زمین‌لغزش افزایش قابل‌توجهی می‌یابد (نسبت فرکانس ۰/۸۳) بیشتر زمین‌لغزش‌هایی که در نزدیکی جاده‌ها رخ داده‌اند. (متأثر از عملیات باربرداری و بارگذاری ناشی از جاده‌سازی)، لغزش‌های جدید و کوچک می‌باشند، اما بیشتر زمین‌لغزش‌هایی که در فواصل دور از جاده‌ها رخ داده‌اند، زمین‌لغزش‌های بزرگ و قدیمی می‌باشند که متأثر از عواملی دیگر همچون حساسیت بالای سازندهای زمین‌شناسی این مناطق به همراه شیب زیاد و وجود رطوبت فراوان ناشی از بارش زیاد می‌باشند که با نتایج یوسف و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

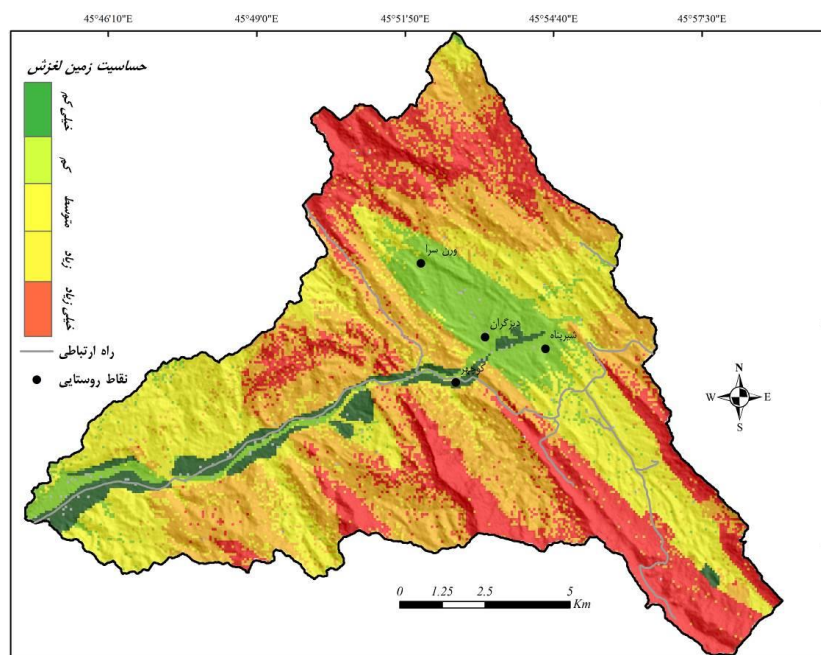
جدول ۲. ارتباط مکانی بین زمین‌لغزش و عوامل مؤثر در رخداد لغزش با استفاده از شاخص انتروپی

عامل	کلاس	درصد پیکسل	درصد لغزش	نسبت فراوانی	چگالی احتمال	مقدار انتروپی	حداکثر انتروپی	ضریب اطلاعات	وزن
ارتفاع	۶۰۰-۴۰۰	۹/۳	۳/۵	۰/۰۳	۰/۰۷	۱/۲۴	۲	۰/۴۱	۰/۲۰۷
	۸۰۰-۶۰۰	۱۰/۲۸	۳/۹۱	۰/۰۶۸	۰/۰۹				

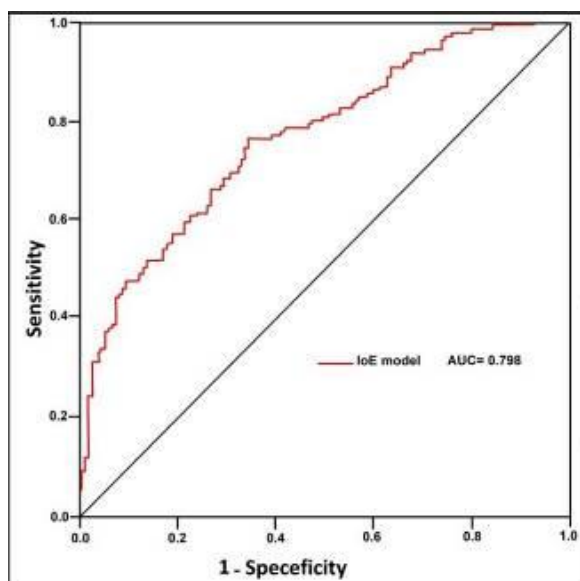
وزن	ضریب اطلاعات	حداکثر انتروپی	مقدار انتروپی	چگالی احتمال	نسبت فراوانی	درصد لغزش	درصد پیکسل	کلاس	عامل
				۰/۱۲	۰/۹	۶/۳	۱۲/۲۷	۱۰۰۰-۸۰۰	
				۰/۱۹	۰/۴۱	۱۱/۰۶	۲۳/۰۳	۱۲۰۰-۱۰۰۰	
				۰/۲۹	۰/۳۷	۴۵/۲۸	۲۷/۲	۱۴۰۰-۱۲۰۰	
				۰/۲۳	۰/۲۶	۳۰/۰۹	۱۸/۱۳	۱۴۰۰<	
۰/۵۴	۰/۳۶	۱/۷۲	۱/۶۴	۰/۰۲	۰/۰۶	۷/۲۴	۱۰/۴	۵-۰	شیب
				۰/۰۹۴	۰/۴۱	۱۱/۱۶	۱۲/۰۳	۱۵-۵	
				۰/۱۸	۱/۳	۳۹/۰۳	۳۲/۷۱	۳۰-۱۵	
				۰/۷۱	۳/۲۱	۴۲/۱۳	۴۵/۰۳	۳۰<	
۰/۰۷۴	۰/۰۹	۳/۰۶	۲/۲۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۴	هموار	جهت شیب
				۰/۲۱	۰/۸۳	۲۰/۰۳	۱۴/۴	شمال	
				۰/۰۹	۰/۶۲	۸/۵	۹/۵۶	شمالغرب	
				۰/۱۴	۱/۲	۱۴/۷	۱۳/۶	غرب	
				۰/۱۱	۰/۵۶	۱۲/۳۴	۱۱/۶۵	جنوبغرب	
				۰/۱۴	۱/۴۷	۱۵/۶	۱۳/۲۳	جنوب	
				۰/۱۳	۱/۰۳	۱۲/۸۶	۱۱/۰۶	جنوبشرق	
				۰/۱۵	۱/۱۹	۱۳/۴۲	۱۶/۰۱	شرق	
				۰/۰۹	۱/۰۴	۴/۶۸	۹/۳۴	شمالشرق	
۰/۰۹	۰/۰۹	۱/۴۷	۱/۲۹	۰/۲۵	۰/۷۴	۳۱	۳۷/۶	گروه ۱	خاک
				۰/۲۹	۰/۸۸	۳۸/۵۴	۴۲/۰۳	گروه ۲	
				۰/۴۶	۱/۳۲	۳۰/۲۱	۲۰/۰۱	گروه ۳	
۰/۱۹۲	۰/۰۱۴	۲/۱۶	۱/۹۷	۰/۴۶	۱/۳۳	۳۰/۳۹	۳۴/۴	جنگل	کاربری
				۰/۴۶	۱/۳۳	۴۹/۵	۴۳/۰۸	مرتع	
				۰/۱۹	۰/۶	۱۹/۱	۱۲/۸	کشاورزی	
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	آبی	
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۹	برونزد سنگی	
۰/۱۲۰	۰/۲۳	۲	۱/۳	۰/۱۹	۰/۸۱	۲۷/۲۵	۳۵	یال	شاخص وضعیت توپوگرافی
				۰/۷۱	۱/۶۲	۴۸/۱۴	۳۹/۲۳	خط القعر	
				۰/۱۱	۰/۴۵	۲۴/۶	۲۵/۷۷	دامنه	
۰/۱۲۴	۰/۲۳	۱/۸۴	۱/۳	۰/۵۱	۱/۲۲	۷۲/۴	۶۰/۳	۴/۲۳>	شاخص رطوبت توپوگرافی
				۰/۳۵	۰/۷۳	۱۳/۵	۱۹/۰۳	۴/۸-۲۳	
				۰/۱۴	۰/۴۴	۱۰/۰۹	۱۷/۷	۱۲-۸	
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۸	۱۷-۱۲/۰۶	
۰/۱۰۸	۰/۱۸۷	۲/۳۴	۱/۹	۰/۳۸	۱/۰۹	۸۳/۸	۷۷/۰۳	۲۰۰>	فاصله از غسل
				۰/۲۴	۰/۷۳	۱۲/۹۴	۱۷/۸۷	۴۰۰-۲۰۰	
				۰/۲۷	۰/۷۴	۲/۹۵	۳/۹۵	۶۰۰-۴۰۰	
				۰/۱۲	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۸۷	۶۰۰-۸۰۰	
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۸	۸۰۰<	
۰/۰۶۲	۰/۰۶۱	۲/۲۶	۲/۰۸	۰/۳۹	۱/۹۴	۳۶/۷۴	۱۹/۷	۱۰۰>	فاصله از جاده
				۰/۱۳	۰/۶۴	۱۲/۲	۱۳/۶	۲۰۰-۱۰۰	

عامل	کلاس	درصد پیکسل	درصد لغزش	نسبت فراوانی	چگالی احتمال	مقدار آنتروپی	حداکثر آنتروپی	ضریب اطلاعات	وزن
	۳۰۰-۲۰۰	۱۲/۸۵	۹/۰۴	۰/۷۵	۰/۱۱				
	۴۰۰-۳۰۰	۱۰/۷	۹/۳۶	۰/۹۸	۰/۲۳				
	۴۰۰<	۴۴/۰۳	۳۳/۱	۰/۸۳	۰/۱۵				
لیتولوژی	کواترنری	۱/۸	۰/۵۷	۰/۳۱	۰/۰۷				
	آسماری	۲۱/۱	۲۸/۸	۱/۳۶	۰/۲۰				
	پابده	۲۶/۰۳	۴۰/۰۲	۱/۶	۰/۲۹				۰/۱۰۸
	تیزکوه	۱۴/۱	۱۷/۰۳	۱/۰۲	۰/۱۹		۳/۴۸	۰/۱۸	
	گوری	۴/۲۸	۱/۷۹	۰/۴۲	۰/۰۸				
	گچساران	۲/۲۴	۳/۲۱	۱/۳۲	۰/۱۷				
انحنای سطح	مقعر	۴۶/۶	۴۲	۰/۸۷	۰/۴۰				
	محدب	۴۶/۲	۵۸/۴	۱/۳۵	۰/۶۴		۱/۵	۰/۴۳	۰/۲۷۴
	یکنواخت	۴/۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰				

بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در حوضه ورن سرا نشان داد که عوامل شیب، انحنای سطح، ارتفاع، کاربری اراضی، رطوبت توپوگرافی، وضعیت توپوگرافی، لیتولوژی، فاصله از گسل به ترتیب با ۰/۱۹۲، ۰/۰، ۰/۲۰۷/۲۰۷، ۰/۵۴، ۰/۱۲۴، ۰/۱۲۰، ۰/۱۰۸ و ۰/۱۰۸ دارای بیشترین وزن می باشند. پس از بررسی اهمیت عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش، نقشه حساسیت زمین لغزش، بر اساس روابط مدل آنتروپی، تهیه و به چهار طبقه حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید. مساحت مربوط به هر یک از کلاس ها به ترتیب ۴، ۹، ۲۸/۵، ۳۲/۶ و ۲۴/۵ درصد می باشد (شکل ۷). نتایج ارزیابی نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از ۳۰ درصد داده های لغزشی که جهت اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. (شکل ۸) نشان داد که نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده با استفاده از شاخص آنتروپی با سطح زیر منحنی ۷۹/۶ درصد، دارای دقت مطلوب و مناسبی می باشد.



شکل ۷. نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه ورن سرا



شکل ۸. منحنی تشخیص عملکرد نسبی نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص انترویی

نتیجه گیری

در این پژوهش خطر وقوع زمین لغزش برای حوضه آبخیز ورن سرا در جنوب غرب استان کرمانشاه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارزیابی و پهنه بندی گردید. در این رابطه از مدل انترویی شانون استفاده شد. مدل انترویی یکی از مناسب ترین رویکردها در زمینه پیش بینی مکانی خطر زمین لغزش می باشد و به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به نتایج پهنه بندی می توان بیان داشت که در حدود ۵۶ درصد از منطقه مورد مطالعه در معرض خطرات ناشی از رخداد زمین لغزش می باشد. این امر نشان دهنده اهمیت ناپایداری های دامنه ای در تحول چشم اندازها، عرضه رسوب و تخریب منابع طبیعی حوضه مورد مطالعه می باشد. از این رو ناپایداری های دامنه ای به صورت تخریب توده ای باید در هر گونه برنامه ریزی و آمایش فضا در این منطقه مدنظر قرار گیرند. در حدود ۲۳ کیلومترمربع از منطقه مورد مطالعه در زمره منطقه با خطر کم واقع شده است که در بخش های مرکزی و غربی حوضه وسعت بیشتری دارد و به طور پراکنده در قسمت های شمالی حوضه مشاهده می شود. این مناطق در ارتفاع پایین منطبق بر سازندهای گچساران و آبرفت های کواترنری است که به سبب شیب کم و دوری از خطوط گسلی و در ارتفاعات بالاتر به سبب سختی سازند و شیب کمتر از ۱۵ درجه، خطر بروز لغزش در آن ها کم است. بررسی محل زمین لغزش های برداشت شده نشان می دهد که هیچ یک از این نقاط در این پهنه قرار نگرفته اند که خود، تناسب مدل را برای بررسی چنین موضوعاتی نشان می دهد.

از آنجایی که گسل ها یکی از عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه است و با همپوشانی لایه های مربوط به لیتولوژی منطقه و گسل ها مشخص شد که در محل تغییر جنس و سختی سازندها پدیده گسل مشاهده می شود. به این معنی که دو سازندی که دارای مقاومت متفاوتی هستند، یکی از آن ها دارای مقاومت خیلی بیشتری از سازند دیگری است. در منطقه مورد مطالعه در محل تقاطع و شکستگی ها، سازند پابده که تحت تأثیر فعالیت هوازدگی و گسل خوردگی می باشد، مستعد فرسایش و وقوع ناپایداری دامنه ای است که با نتایج تحقیقات یمانی و همکاران (۱۳۹۳) و مقیمی و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی دارد. بیشتر زمین لغزش های منطقه در دو کاربری مرتع و جنگل رخ داده اند که می توان دلیل آن را در تغییر کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه دانست. این شرایط زمانی تشدید می شود که ویژگی های فیزیوگرافی حوضه نظیر درجه شیب نیز مزید بر علت گردیده و حرکت های توده ای از نوع زمین لغزش را در نبود ریشه

درختان، تشدید کرده است. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با مدل انتروپی و ارزیابی دقت آن با استفاده از منحنی ROC بیانگر دقت خیلی خوب مدل (۷۹/۶) درصد برای منطقه مورد مطالعه است. با توجه به نتایج پژوهش، عامل شیب مهم‌ترین عامل در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه قلمداد می‌شود، از این رو پرهیز از هرگونه ساخت‌وساز در مناطق پرشیب و همچنین مناطق دارای سازند آسماری با شیب‌های تند و به کاربردن عملیات ایمن‌سازی برای مسیرهای ارتباطی که از چنین مناطقی عبور داده شده‌اند، اقداماتی اساسی برای کاهش خطرات جانی و مالی زمین‌لغزش در محدوده‌های ذکر شده است. با توجه به اینکه کلاس‌های دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد عمدتاً در بخش‌های جنوب-غربی و شمال‌غربی منطقه مورد مطالعه واقع شده است، پیشنهاد می‌گردد هرگونه اقدام عمرانی و یا تغییر کاربری اراضی در این منطقه با احتیاط کامل صورت گیرد. با توجه به دقت بالای نقشه تهیه‌شده، نقشه حساسیت زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی می‌تواند به‌عنوان اطلاعات پایه برای اجتناب و یا کاهش خطرات ناشی از زمین‌لغزش‌های موجود و آینده، مورد استفاده مهندسين، تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان قرار گیرد.

منابع

- رجبی، معصومه، مهدی فیض اله پور. ۱۳۹۳. پهنه‌بندی لغزش‌های حوضه رودخانه گیوی چای با استفاده از مدل پرسپترون چندلایه از نوع پیش‌خور پس انتشار (BP). *جغرافیا و توسعه*، ۳۶: ۱۶۱-۱۸۰.
- گروه مطالعه امور زمین‌لغزش ۱۳۸۶. فهرست زمین‌لغزش‌های کشور. *سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور*، معاونت آبخیزداری. یمانی، مجتبی، ابوالقاسم گورابی و پریسا پیرانی، ۱۳۹۳. ارزیابی ژئومورفولوژیکی پتانسیل زمین‌لغزش تاقدیس سیاه‌کوه غرب ایران، برنامه‌ریزی آمایش فضا، دوره هجدهم، شماره ۳، صص ۱۴۷-۱۷۰.
- مقیم، ایراهیم، سجادباقری سیدشکری و طاهر صفرآباد. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی تاقدیس نثار زاگرس شمال غربی، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۷۹، صص ۷۷-۹۰.
- محمدخان، شیرین، عبدالکریم ویسی و کیوان باقری. ۱۳۹۳. پتانسیل سنجی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی مطالعه موردی: (منطقه کوهستانی شیرپناه در جنوب غرب استان کرمانشاه). *مجله جغرافیایی سرزمین*، ۴۴: ۸۹-۱۲۰.
- Baeza, C.; and J. Corominas. ۲۰۰۱. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, ۲۶: ۱۲۵۱-۱۲۶۳.
 - Bednarik, M.; B. Magulová, B. M. Matys and M. Marschalko. ۲۰۱۰. Landslide susceptibility assessment of the Kraovany Liptovsk Mikul railway case study. *Physics and Chemistry of the Earth*. ۳۵: ۱۶۲-۱۷۱.
 - Brenning, A.; M. Schwinn, A.P. Ruiz-Páez and J. Muenchow. ۲۰۱۴. Landslide susceptibility near highways is increased by one order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja province. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, ۲: ۱۹۴۵-۱۹۷۵.
 - Chen, W.; W. Li, E. Hou, H. Bai, H. Chai, D. Wang and Q. Wang. ۲۰۱۵. Application of frequency ratio, statistical index, and index of entropy models and their comparison in landslide susceptibility mapping for the Baozhong Region of Baoji, China. *Arabian Journal of Geosciences*, ۸: ۱۸۲۹-۱۸۴۱.
 - Chen, W.; H.R. Pourghasemi, M. Panahi, A. Kornejady, J. Wang, X. Xi and S. Cao. ۲۰۱۷. Spatial prediction of landslide susceptibility using an adaptive neuro-fuzzy inference system combined with frequency ratio, generalized additive model, and support vector machine techniques. *Geomorphology*, ۲۹۷: ۶۹-۸۵.
 - Coelho-Netto, A. L.; A. de Souza Avelar and W.A. Lacerda. ۲۰۰۹. Landslides and disasters in southeastern and southern Brazil. *Developments in Earth Surface Processes*, ۱۳: ۲۲۳-۲۴۳.
 - Davis, J and L. Blesius. ۲۰۱۵. A hybrid physical and maximum-entropy landslide susceptibility model. *Entropy*, ۱۷: ۴۲۷۱-۴۲۹۲.
 - Devkota, K. C.; A.D. Regmi, H.R. Pourghasemi, K. Yoshida, B. Pradhan, I.C. Ryu and O.F. Althuwaynee. ۲۰۱۳. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural hazards*, ۶۵: ۱۳۵-۱۶۵.
 - Felicísimo, Á. M.; A. Cuartero, J. Remondo and E. Quirós. ۲۰۱۳. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*, ۱۰: ۱۷۵-۱۸۹.
 - Guo, C.; D.R. Montgomery, Y. Zhang, K. Wang and Z. Yang. ۲۰۱۵. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*, ۲۴۸: ۹۳-۱۱۰.
 - Guzzetti, F.; A. Carrara, M. Cardinali, M and P. Reichenbach. ۱۹۹۹. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, ۳۱: ۱۸۱-۲۱۶.
 - Hong, H.; H.R. Pourghasemi and Z.S. Pourtaghi. ۲۰۱۶. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): a comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models. *Geomorphology*, ۲۵۹: ۱۰۵-۱۱۸.

- Kanungo, D. P.; M.K. Arora and R.Gupta. ۲۰۰۹. Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping - A Review. *Journal of South Asia Disaster Studies*. ۱: ۸۱- ۱۰۵.
- Kornejady, A.; M. Ownegh and A. Bahremand. ۲۰۱۷. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, ۱۵۲: ۱۴۴-۱۶۲.
- Jaafari, A.; A. Najafi, H.R. Pourghasemi, J. Rezaeian and A.Sattarian. ۲۰۱۴. GIS based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, ۱۱: ۹۰۹-۹۲۶.
- Obrien, R. M., ۲۰۰۷. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity*, ۴۱: ۶۷۳-۶۹۰.
- Ozdemir, A., ۲۰۱۱. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology*, ۴۱۱: ۲۹۰-۳۰۸.
- Palaz, E. B.; H.S. ATLI and S.A.R.I. Selver. ۲۰۲۰. Landslide Susceptibility Assessment by Information Entropy Model, Uzundere NE Turkey. *UMTEB Intrnational Congress Vocational & Technical Sciences*, ۱۰۵-۱۱۲.
- Paoletti, V.; D. Tarallo, F. Matano and A. Rapolla . ۲۰۱۳. susceptibility zoning on seismic induced landslides: An application to Sannio and Irpinia areas, Southern Italy. *Physics and Chemistry of the Earth*. ۶۳: ۱۴۷-۱۵۹.
- Park, N. W. ۲۰۱۵. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, ۷۳: ۹۳۷-۹۴۹.
- Pourghasemi, H. R and M. Rossi. ۲۰۱۶. 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*, ۷۴: ۱-۲۵.
- Pourghasemi, H. R.; H.R. Moradi and S.F. Aghda. ۲۰۱۳. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural hazards*, ۶۹: ۷۴۹- ۷۷۹.
- Regmi, A. D.; K.C. Devkota, K. Yoshida, B. Pradhan, H.R. Pourghasemi, T. Kumamoto and A. Akgun. ۲۰۱۴. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, ۷(۲), ۷۲۵-۷۴۲.
- Romer, C.; and M. Ferentinou. ۲۰۱۶. Shallow landslide susceptibility assessment in a semiarid environment A Quaternary catchment of KwaZulu-Natal, South Africa. *Engineering Geology*, ۲۰۱: ۲۹-۴۴.
- Shahabi, H.; S. Khezri, B.B. Ahmad and M.Hashim. ۲۰۱۴. Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. *Catena*, ۱۱۵: ۵۵-۷۰.
- Tay, L. T.; H. Lateh, M.K. Hossain and A.A. Kamil. ۲۰۱۴. Landslide hazard mapping using a poisson distribution: a case study in Penang Island, Malaysia. *Springer*, ۱۱۴: ۵۲۱-۵۲۵
- Wan, S. ۲۰۰۹. A spatial decision support system for extracting the core factors and thresholds for landslide susceptibility map. *Engineering Geology*, ۱۰۸: ۲۳۷-۲۵۱.
- Wang, Q.; W. Li, Y. Wu, Y. Pei and P. Xie. ۲۰۱۶. Application of statistical index and index of entropy methods to landslide susceptibility assessment in Gongliu (Xinjiang, China). *Environmental Earth Sciences*, ۷۵: ۵۹۹.
- Yufeng, S.; and J. Fengxiang. ۲۰۰۹. Landslide stability analysis based on generalized information entropy. In *Environmental Science and Information Application Technology. ESIAT International Conference*, ۲: ۸۳-۸۵.