

کارایی تئوری بی‌نظمی سامانه‌های طبیعی در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه فهلیان

حمید بابلی مؤخر^۱، کورش شیرانی^{۲*} و علیرضا تقیان^۳

^۱دانشجوی دکترا، گروه جغرافیا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

^۳استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶

چکیده

پدیده‌هایی همچون زمین لغزش‌ها در حوضه‌های آبخیز به‌عنوان سامانه‌های طبیعی، از جمله مخاطرات طبیعی هستند که به‌عنوان عامل بی‌نظمی در ایجاد شرایط نامتعادل و برهم زدن رفتار انرژی و ایجاد فرسایش و رسوب نقش اساسی دارند. مجموعه عوامل مؤثر در ناپایداری دامنه‌ها به‌عنوان پاسخ‌ها و واکنش‌های سامانه به بازخوردهای مثبت است. هدف این پژوهش استفاده از روابط ریاضی تئوری بی‌نظمی سامانه‌های طبیعی در قالب به‌کارگیری شاخص آنتروپی شانون به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آنها در حوضه آبریز فهلیان است. به‌همین منظور ابتدا لایه‌های اطلاعاتی شامل سنگ‌شناسی، بارش، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و طبقات ارتفاعی به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) رومی شدند. در ادامه پس از شناسایی زمین لغزش‌های منطقه، اجرای مدل و تعیین وزن هر یک از عوامل، نقشه پهنه‌بندی بر اساس اوزان محاسبه شده تهیه شد. نتایج نشان داد که عامل شیب و جهت شیب به ترتیب با وزن نهایی 0.308 و 0.1662 (w_j) بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش‌های حوضه داشته‌اند. بر اساس نقشه حساسیت زمین لغزش بیش از نیمی از سطح حوضه (۵۶/۹۷) در پهنه حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. نمودار مقادیر SCAI و FR نشانگر دقت خیلی خوب مدل در تشکیک و تشخیص پهنه‌ها و رده‌های حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به‌منظور اجرای مدل و ارزیابی آن از داده‌های پراکنش زمین لغزش به ترتیب به نسبت ۷۰ و ۳۰ درصد استفاده شد. بر این اساس مقدار سطح زیر منحنی (AUC) نمودار ROC معادل 0.87 بدست آمد که بیانگر دقت خیلی خوب مدل می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زمین لغزش، پهنه‌بندی حساسیت، آنتروپی شانون، سامانه‌های طبیعی، حوضه آبخیز فهلیان.

*نویسنده مسئول: کورش شیرانی

E-mail: k_sh424@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

عوامل طبیعی شامل ویژگی‌های سطح زمین، اقلیم، لیتولوژی و زمین‌ساخت، نقش انسان به اشکال مختلف از جمله ساخت و سازها و ایجاد سکونتگاه‌های غیراصولی، تخریب جنگل‌ها، گسترش دیم‌زارهای کم‌بازده و ... نیز قابل توجه است. شناخت این عوامل و پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، استعدادهای بالقوه ناحیه را بهتر می‌سنجد و یک ناحیه را از نظر خطرپذیری به چند زیرناحیه تقسیم می‌کند تا کار برنامه‌ریزی آسان‌تر شود. تاکنون مطالعات ارزشمندی در زمینه پهنه‌بندی و همچنین تجزیه و تحلیل محرک‌های اصلی در وقوع زمین لغزش انجام شده و با توجه به نقشی که عوامل طبیعی و انسانی در ایجاد این مخاطره دارند نقشه‌های پهنه‌بندی خطر با مدل‌ها و روش‌های مختلف تهیه شده است. کارایی هر کدام از این روش‌ها در مناطق مختلف متفاوت است (اشق‌لی‌فراهانی، ۱۳۸۰). شناسایی و انتخاب مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در یک محدوده باعث می‌شود با اطمینان بالاتری به نتایج برای پیشگیری یا بهبود شرایط اقدامات لازم انجام شود. استفاده از مدل آنتروپی در پهنه‌بندی زمین لغزش از رویکردهای نسبتاً جدید در دانش ژئومورفولوژی است و بهره‌گیری از این مدل در انجام پژوهش‌های مربوط به زمین لغزش در حال افزایش بوده و تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گرفته است؛ Constantin et al. (2011) به منظور ارزیابی حساسیت زمین لغزش حوضه آبخیز Sibiciu کشور رومانی از آنالیز آماری دومتغیره و شاخص آنتروپی شانون استفاده کردند. نتایج نشان داد که کاربری ارضی و لیتولوژی بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش منطقه داشته است. Davis and Blesius (2015) نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه San Pedro Creek را در آمریکا با استفاده از مدل‌های ترکیبی فیزیکی و ماکزیمم آنتروپی تهیه کردند. نتایج نشان می‌دهد که نقشه شاخص پایداری از لحاظ پتانسیل حساسیت اغراق‌آمیز است. Hong et al. (2016) به منظور مدل‌سازی مکانی زمین لغزش در شهر Guanzhou چین از ۴ مدل تئوری تابع اطمینان، نسبت فراوانی،

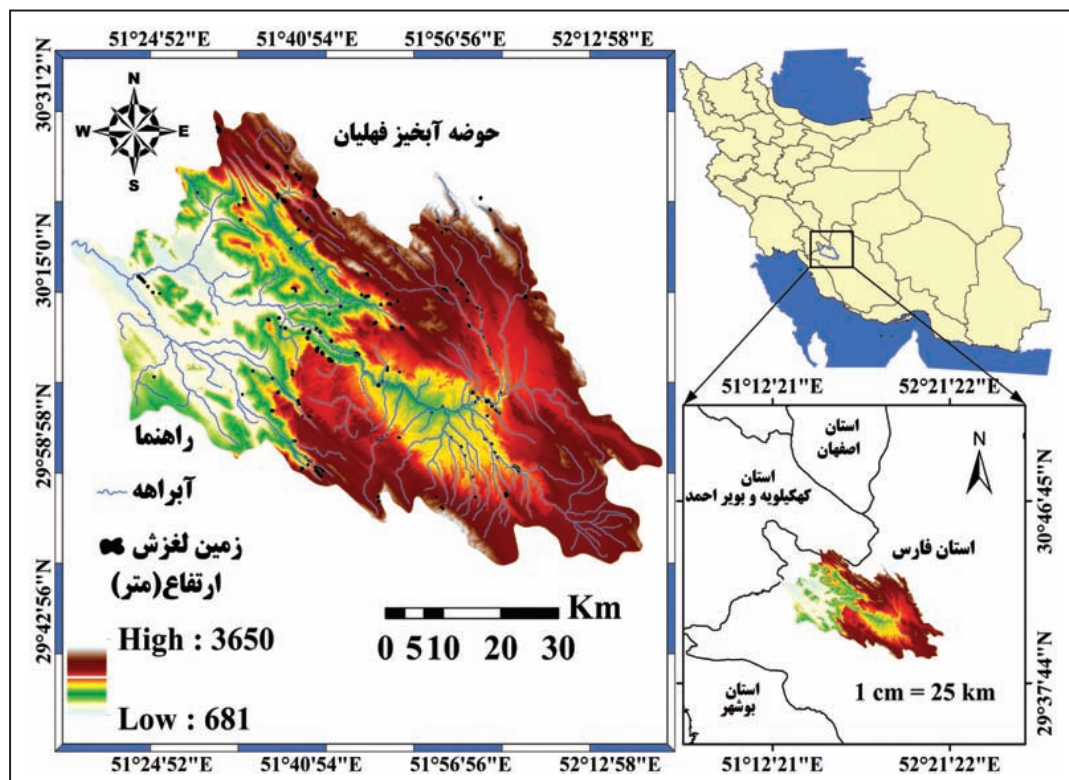
زمین لغزش عبارت است از حرکت مواد تشکیل‌دهنده شیب شامل صخره‌های طبیعی، خاک، انباشته‌های مصنوعی و یا مخلوطی از آنها که توسط نیروی ثقل به سمت پایین جابه‌جا می‌شوند (Varnes, 1984). اصطلاح زمین لغزش کلیه حرکات توده‌ای در شیب‌ها شامل افتان‌ها، واژگونی‌ها و سیلاب واریزه‌ای را نیز شامل می‌شود (Terzaghi, 1950). زمین لغزش‌ها در نتیجه از دست دادن تعادل خود در سطح دامنه به حرکت در می‌آیند (شیرانی، ۱۳۹۶؛ Shirani et al. 2018). از آنجا که ژئوسیسستم‌ها در شرایط عدم تعادل در نزدیکی آستانه‌ها، شرایط ناپایدار لحظه‌ای را تجربه می‌کنند، کوچک‌ترین تغییر در پارامترهای سیستم که می‌تواند ناشی از اغتشاشات بیرونی باشد جریان انرژی سیستم را در گون و سیستم را دچار آشوب می‌کند و پاسخ سیستم برای یافتن نقطه تعادلی جدید با آنتروپی بالا، چشم‌انداز جدیدی از ژئوسیسستم ارائه می‌دهد. مخاطرات ژئومورفیک خروجیهایی از عدم تعادل سیستم‌های ژئومورفولوژیکی هستند. زمین لغزش را میتوان نمود تغییر تعادلی سطوح شیب‌دار، به دنبال اغتشاشات محیطی وارد بر ژئوسیسستم تلقی کرد (سپهر و همکاران، ۱۳۹۲). عوامل خارجی از جمله عوامل طبیعی و انسانی میتواند باعث به وجود آمدن عدم تعادل در سیستم‌های ژئومورفولوژیکی شود. سیستم‌های تعادل بر اساس بازخورد مثبت و منفی عمل میکنند و وقتی این ارتباط به هم میخورد سیستم از حالت تعادل خارج و ناپایداری و عدم تعادل ایجاد میشود. زیرا بازخورد منفی از بین میرود و بازخورد مثبت ایجاد خواهد شد که آثار آن به‌صورت انواع حرکت توده‌های نظیر لغزش، ریزش و ... خواهد بود (ثروتی و همکاران، ۱۳۸۲). زمین لغزش‌ها به‌عنوان یک رخداد ژئومورفیک سیستم‌های پیچیده‌ای هستند و پیش‌بینی حساسیت وقوع آنها نیاز به داده‌های مختلف ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، کاربری اراضی و سایر داده‌های مربوط به عوامل محیطی دارد (Ling Peng et al., 2014). بررسی زمین لغزش‌ها از دیدگاه سیستمی و ارزیابی عوامل مختلف در وقوع آنها نشان می‌دهد که علاوه بر

و محرک‌های اصلی آن از مهم‌ترین مراحل است، هدف اصلی این پژوهش بررسی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش با استفاده از روش احتمالاتی شاخص آنتروپی شانون در حوضه آبخیز رودخانه فهلیان است.

۲- منطقه مورد پژوهش

حوضه آبریز رودخانه فهلیان با مساحت $4030/90$ کیلومتر مربع در شمال غرب استان فارس و در طول جغرافیایی $14^{\circ} 15' 51''$ تا $18^{\circ} 18' 52''$ شرقی و عرض $28^{\circ} 28' 30''$ تا $29^{\circ} 46' 53''$ شمالی واقع شده است (شکل ۱). کمینه و بیشینه ارتفاعی حوضه به ترتیب از 681 متر در نقطه خروجی تا 3650 متر در قله برم فیروز از ارتفاعات کوه رنج در شمال حوضه است. شهرستان‌های نورآباد ممسنی، رستم (مصیری)، سپیدان (اردکان) و همچنین بخش‌ها و روستاهای زیادی در این محدوده واقع شده‌اند. این محدوده از نظر تقسیمات درجه ۱ و ۲ حوضه‌های آبریز به ترتیب در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان و حوضه آبریز جراحی-زهره قرار دارد و بر اساس تقسیمات تماب شامل زیرحوضه‌های اردکان-چشمه سفید، کودیان-سرگاه، سرانچلیک، فهلیان و نورآباد ممسنی است. رخنمون‌هایی از سنگ‌های ژوراسیک تا کواترن در این محدوده گسترش دارند که از قدیم به جدید شامل سازندهای سورمه (ژوراسیک)، گدوان و داریان (کرتاسه زیرین)، سازند گورپی و گروه بنگستان شامل سازندهای کزدمی، سورگاه، سروک و ایلام (کرتاسه) هستند. علاوه بر آن واحدهای تشریاری شامل سازندهای جهرم، پابده، آسماری و رازک و گروه فارس شامل سازندهای گچساران، آغاچاری و میشان در حوضه گسترش دارند. واحدهای جوان‌تر نیز کنگلومرای بختیاری و رسوبات کواترن هستند. دشت ممسنی که بخش کم‌ارتفاع منطقه را شامل می‌شود بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق نیمه خشک است. درجه حرارت دشت ممسنی حداقل 2 - درجه سانتی‌گراد و حداکثر 49 درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارش دشت 579 میلیمتر اندازه‌گیری شده است (انصاری و فتوحی، 1396). متوسط بارندگی شهرستان سپیدان با ارتفاع حدود 2200 متر و دهستان همایجان با ارتفاع 2050 متر از سطح دریا به ترتیب 800 و 680 میلی‌متر است.

ماکزیمم آنتروپی و رگرسیون لجستیک استفاده کرده‌اند. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان داد که مدل رگرسیون لجستیک با سطح زیر منحنی $0/82$ بالاترین دقت را دارد. (Youssef et al. (2016) به منظور تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش از مدل‌های نسبت فراوانی، وزن واقعه، شاخص آنتروپی و دمیستر- شفر استفاده کردند. نرخ پیش‌بینی به ترتیب $0/95$ ، $0/952$ ، $0/946$ و $0/934$ به دست آمد. پورقاسمی و همکاران (1393) با استفاده از شاخص آنتروپی شانون عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن را در شمال شهر تهران اولویت‌بندی کرده‌اند. نتایج نشان داد که کاربری ارضی، لیتولوژی، درجه شیب، شاخص توان آبراهه و شاخص گیاهی نرمال شده بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین‌لغزش منطقه داشته‌اند. شکاری‌بادی و همکاران (1394) تلفیقی از مدل ANP و آنتروپی شانون را جهت برآورد عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در حوضه فاروب رومان نیشاپور به کار برده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که عامل فاصله از آبراهه و به ویژه فواصل 0 تا 150 متری به عنوان مؤثرترین عامل در وقوع زمین‌لغزش و پس از آن عوامل شیب و بارش از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار هستند. شیرانی (1396) با به کارگیری مدل‌های احتمالاتی آنتروپی شانون و وزن شاهد تنوری بیزین نسبت به مدل‌سازی و ارزیابی پتانسیل حساسیت ارضی نسبت به زمین‌لغزش اقدام کرده است. نتایج حاصل از هر دو مدل متفقاً نشان داد که کاربری زمین، بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش داشته است. از دیگر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به کارهای Devkota et al. (2010)، Sherma et al. (2012)، Pourghasemi et al. (2012) و Bednarik et al. (2010) اشاره کرد. نتایج حاصل از مجموعه پژوهش‌ها حکایت از خسارات سنگین ناشی از رخداد زمین‌لغزش‌ها دارد. سهم خسارات ناشی از حرکات توده‌های در ایران سالانه 500 میلیارد ریال برآورد شده است (صدوق‌ونینی و همکاران، 1394). خسارات مستقیم اقتصادی به راه‌ها، مزارع، مناطق مسکونی و روستاها و خسارات غیرمستقیم مانند تغییر بوم‌سامانه (اکوسیستم) مناطق و از بین رفتن جنگل‌ها، مراتع و منابع طبیعی از پیامدهای زمین‌لغزش است. همچنین هدر رفت خاک، افزایش حجم رسوبات در پشت سدها و آسیب‌رسانی به کانال‌های آبیاری و آبرسانی از دیگر پیامدهای زمین‌لغزش است. به گونه‌ای که ارتباط تنگاتنگی بین فرسایش خاک، زمین‌لغزش و همچنین میزان جابه‌جایی مواد ناشی از این فرایندها وجود دارد. از آنجا که برای مقابله و مدیریت این مخاطره، شناخت عوامل

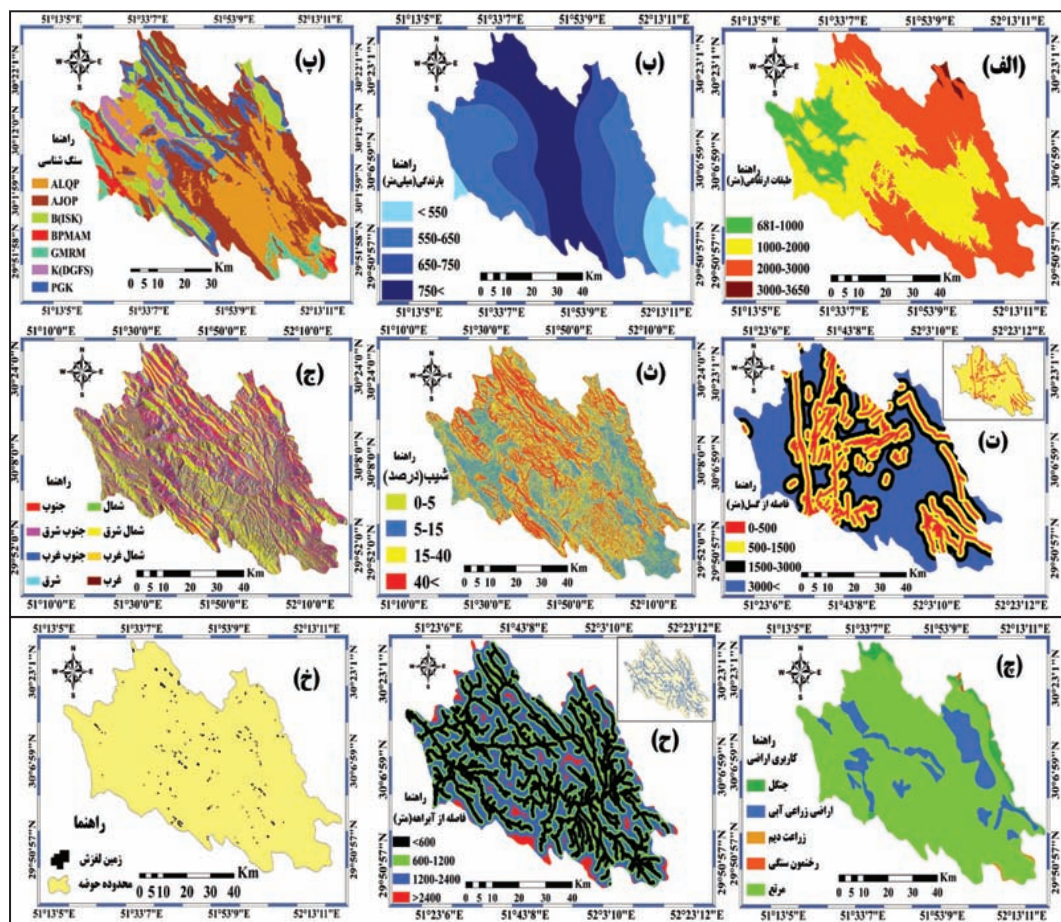


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.

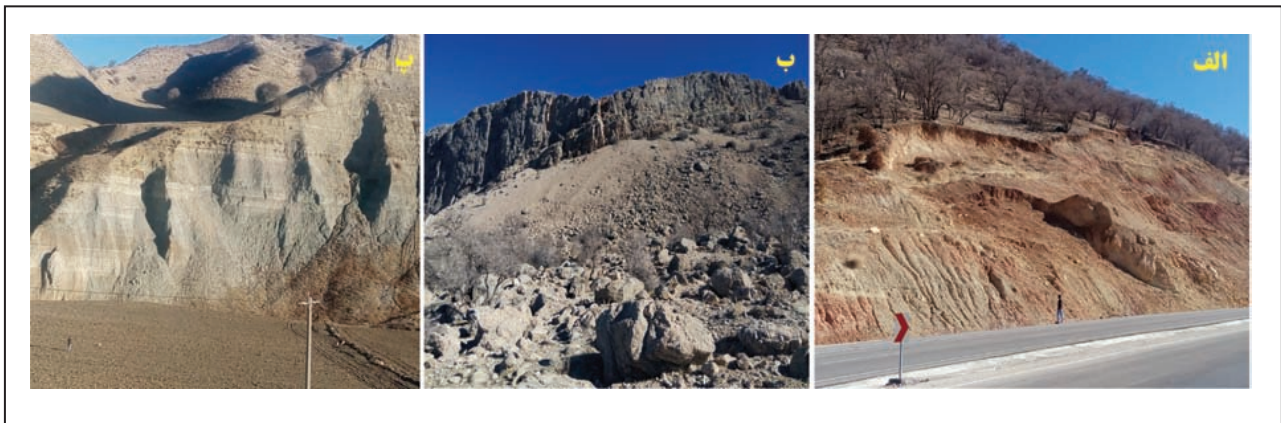
۳- روش پژوهش

در این پژوهش که حاصل یک فعالیت کاربردی- توسعه‌ای است از روش‌های متنوعی استفاده شد. ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز از جمله نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، عکس‌های هوایی و تصاویر سنجنده Landsat-8 به عنوان لایه‌های اصلی و پایه جمع‌آوری شد. واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی شناسایی شده، به ۷ گروه تقسیم و به همراه خصوصیات سنگ‌شناسی آنها مشخص شده‌اند. این واحدها به ترتیب عبارتند از: ALQP (آبرفت، رسوبات دریاچه‌ای، ذخایر تراسی و مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای کوآترنر)، AJOP (سازند آهکی- دولومیتی با میان‌لایه شیل)، GMRM (شیل، مارن، آهک، نمک یا انیدریت، ژیس،) BPMAM (کنگومرا و ماسه سنگ همراه با مارن‌های قرمز و سیلستون)، K(DGFS) (آهک همراه با مارن و شیل)، B (ISK) (آهک‌های رسی) و PGK (مارن آهکی و شیل) (شکل ۲- پ). گسل‌های منطقه نیز از روی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه برداشت و بر اساس آن لایه فاصله از گسل مشخص شد (شکل ۲- ت). همچنین بر اساس ۳۰ متر و با استفاده از محیط Arc Hydro نسبت به تهیه لایه رودخانه‌ها و آبراهه‌های اصلی اقدام شد (شکل ۲- ح). نقشه‌های شیب (شکل ۲- ث)، وجه شیب (شکل ۲- ج) و همچنین طبقات ارتفاعی (شکل ۲- الف) حوضه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار GlobalMapper@16 و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متری در محیط Arc GIS@10/3 تهیه شد. با مطالعه آمار ۳۰ ساله ایستگاه‌های واقع در حوضه و همچنین مجاور آن و روش میان‌یابی Krigging در محیط surfer@12 اقدام به تهیه منحنی‌های همبران سالیانه در حوضه مورد مطالعه شد (شکل ۲- ب). بر اساس تصاویر سنجنده ETM+2002 و نقشه کاربری زمین که توسط مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده است، نقشه کاربری زمین در محیط نرم‌افزار ENVI@4.5 تصحیح و تهیه شد (شکل ۲- ج). پردازش تصاویر ماهواره‌ای

مورد نیاز نیز با استفاده از نرم‌افزار ENVI@4.5 انجام گرفت. بازدیدهای میدانی یکی از مهم‌ترین مراحل کار است که در فرایند پژوهش و به منظور کنترل دقت مکانی لایه‌های اطلاعاتی با مشاهدات سطح زمین و زمین‌لغزش‌های حادث شده در حوضه بدان پرداخته شد (شکل ۳). زمین‌لغزش‌های منطقه بر اساس بازدیدهای میدانی (برداشت با GPS) و به کمک تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، پس از مطابقت با تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی، تدقیق و ذخیره شد. در ادامه اطلاعات مربوط به زمین‌لغزش‌های کل کشور از پایگاه داده‌های علوم زمین جمع‌آوری شد و آن دسته از زمین‌لغزش‌هایی که بر اساس بانک اطلاعاتی داده‌های لغزش وزارت جهاد کشاورزی در محدوده حوضه مورد نظر قرار می‌گیرد با برداشت‌های میدانی و به کمک دستگاه GPS ثبت، مطابقت و تدقیق شده‌اند. با توجه به مشخصات زمین‌لغزش‌های مشاهده شده در منطقه مورد مطالعه تعریف ارائه شده توسط Terzaghi (1950) در این پژوهش ملاک قرار گرفته است. با این توضیح که این تعریف انواع حرکات توده‌ای از قبیل ریزش، لغزش، واژگونی و جریان‌های گلی و واریزه‌ای را شامل می‌شود. در نهایت با استفاده از دستگاه تعداد 201 نقطه GPS یا پهنه زمین‌لغزشی در سطح حوضه ثبت و وارد محیط Arc GIS@10.3 و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها از این طریق تهیه شد (شکل ۲- خ). تمامی لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار Arc GIS@10.3 وارد و به صورت سلولی با اندازه ۳۰ در ۳۰ متر استخراج شده‌اند. از آنجایی که لایه یا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها مبنای وزن‌دهی عوامل و ساخت مدل است به منظور افزایش دقت داده‌های مکانی پراکنش زمین‌لغزش به صورت تصادفی به دو دسته آموزشی (۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) و آزمایشی (۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) تقسیم شد. پس از پردازش و تجزیه و تحلیل و انجام محاسبات آماری و کمی نسبت به اجرای مدل آنتروپی به کمک داده‌های آموزشی (۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) اقدام شد.



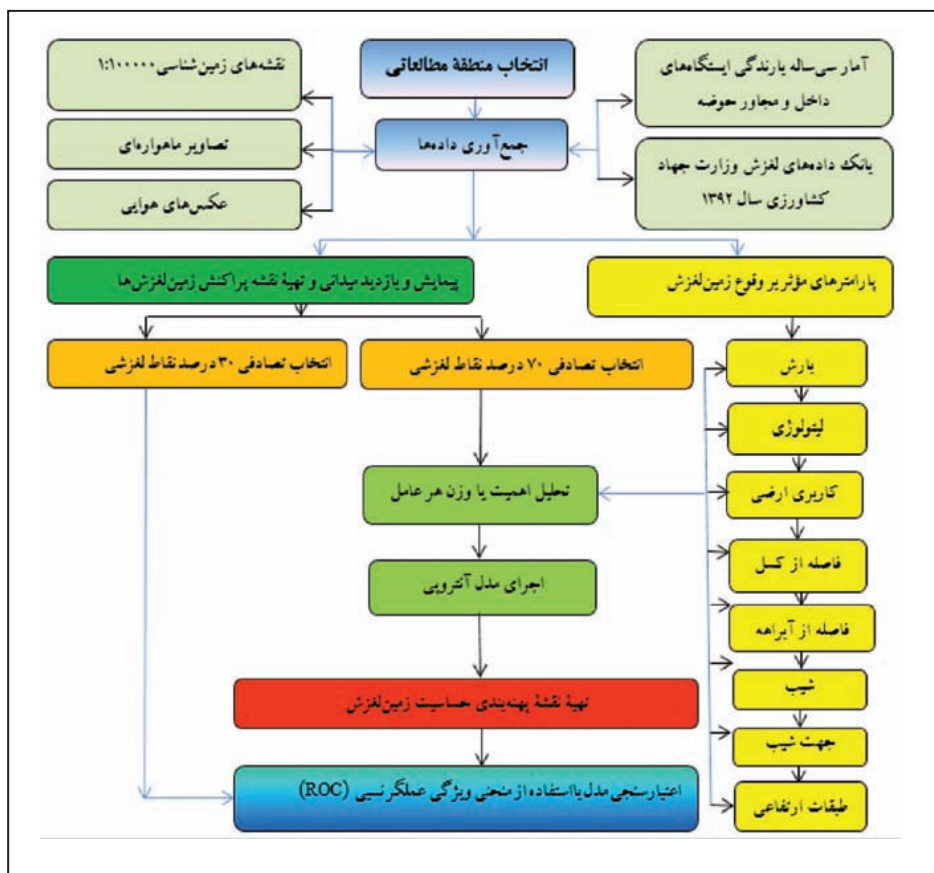
شکل ۲- نقشه‌های عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش. الف) نقشه طبقات ارتفاعی؛ ب) نقشه بارش؛ پ) نقشه سنگ‌شناسی؛ ت) نقشه فاصله از گسل؛ ث) نقشه شیب؛ ج) نقشه جهت شیب؛ چ) نقشه کاربری زمین؛ ح) نقشه فاصله از آبراهه؛ خ) نقشه پراکنش زمین‌لغزش.



شکل ۳- انواع زمین‌لغزش رایج در منطقه. الف) لغزش چرخشی مرکب روی سازند پابده- گورپی؛ ب) زمین‌لغزش انتقالی- ریزشی روی رسوبات آهکی؛ پ) زمین‌لغزش چرخشی سطحی روی سازند گورپی.

به نتایج حاصل از ارزیابی به بحث و نتیجه‌گیری در مورد به کارگیری مدل مورد استفاده و نقش آن در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش پرداخته شد. فلوجارت روش تحقیق در شکل ۴ نشان داده شده است.

به منظور بررسی دقت و صحت نقشه پهنه‌بندی حاصل، مدل با استفاده از یک سوم نقاط لغزشی، نسبت فراوانی (FR)، شاخص سلول هسته (SCAI) و منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. در نهایت با توجه



شکل ۴- نمودار گردش فرایند روش تحقیق.

۴- شاخص آنتروپی شانون

آنتروپی به صورت معیار عدم قطعیت یا امید ریاضی اطلاعات تعریف شده است (Montesarchio and Naplitano, 2010). اگر x یک متغیر تصادفی با توزیعی پیوسته باشد، آنگاه آنتروپی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(x) = -K \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \log[f(x)] dx \quad (1)$$

که در آن $H(x)$ آنتروپی سیستم، $f(x)$ تابع چگالی احتمال و K ثابتی مثبت است که به صورت فاکتور مقیاس تعریف شده و به انتخاب واحد اندازه گیری وابسته است. مفهوم آنتروپی را می‌توان برای جفت متغیرهای (y, X) از طریق آنتروپی توأم تعمیم داد که به صورت زیر بیان می‌شود (Agraval et al., 2005):

$$H(x,y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) \log[f(x,y)] dx dy \quad (2)$$

که در آن $H(X,Y)$ آنتروپی توأم سیستم و $f(X,Y)$ تابع چگالی احتمال توأم برای X و Y است. مدل آنتروپی (شاخص بی‌نظمی) اولین بار توسط Boltzmann Stefan (اصل دمابویا یا ترمودینامیک) مطرح و نهایتاً توسط Shannon (1948) به صورت کمی ارائه شد (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۳). آنتروپی یک رویکرد مدیریتی است که به منظور برخورد با بی‌نظمی، بی‌ثباتی، اغتشاش و عدم یقین‌های موجود در یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yufeng and Fengxiant, 2009). آنتروپی یک معیار سنجش از بی‌نظمی در یک سیستم است (Baas, 2007). آنتروپی به معنای کمی از بی‌نظمی بین علل و نتایج یا تصمیم‌گیری‌ها در موضوعات مختلف مورد بحث است و به ویژه می‌تواند در مطالعات ژئومورفولوژی نظیر زمین‌لغزش که داده‌های موجود با عدم قطعیت روبرو هستند کارایی بالایی داشته باشد (Wan, 2009). آنتروپی در حقیقت بیانگر آن است که چگونه از بین عوامل مؤثر یک هدف، می‌توان مهم‌ترین عوامل را تخمین زد یا به عبارتی متغیرهایی که بیشترین تأثیر را در رخداد یک واقعه دارند برای ما مشخص می‌کند (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۳). معمولاً پدیده‌هایی نظیر زمین‌لغزش در طبیعت تحت تأثیر برآیند عملکرد همزمان چند عامل رخ می‌دهند. لذا مدل‌هایی نظیر آنتروپی شانون ضمن در نظر گرفتن این مسئله مهم‌ترین یا مؤثرترین عامل در بین عوامل دیگر را با توجه به رخداد لغزش‌ها در هر منطقه معرفی می‌کنند. مهم‌ترین مزیت روش آنتروپی تعیین متغیرهایی است که بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند. بنابراین تئوری مذکور می‌تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر زیادی در شناسایی عوامل مؤثر و میزان تأثیرگذاری آنها داشته باشد (Sharma et al., 2010). به‌طور کلی به منظور اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری آن با استفاده از روش مذکور از رابطه‌های ۳ تا ۷ استفاده می‌شود (Bednarik et al., 2010; Constantin et al., 2011; Pourghasemi et al., 2012):

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^S P_{ij}} \quad (3)$$

$$H_j = - \sum_{i=1}^S (P_{ij}) \log_2(P_{ij}), j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$H_{j \max} = \log_2 S_j \quad S_j = \text{number of classes} \quad (5)$$

$$I_j = \frac{H_{j \max} - H_j}{H_{j \max}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad (7)$$

که در آن P_{ij} تراکم زمین‌لغزش هر طبقه، P_{ij} احتمال تراکم زمین‌لغزش هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن، H_j و $H_{j \max}$ مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات و W_j وزن نهایی هر عامل است و با ضرب آن در کلاس‌های عامل مذکور، نقشه‌های وزنی با هم جمع می‌شوند و نقشه نهایی حساسیت به دست می‌آید. طبقه‌های

۵- بحث

دارای مقادیر عددی بیشتر، وزن بیشتری را در رخداد زمین‌لغزش به خود اختصاص می‌دهند.

با به کارگیری روابط ۳ تا ۷ ارتباط بین زمین‌لغزش، عوامل مؤثر بر وقوع آن و میزان تأثیر هر یک از آنها به منظور تهیه نقشه پتانسیل حساسیت نسبت به زمین‌لغزش با استفاده از شاخص آنتروپی در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد که عامل شیب، جهت شیب و فاصله از آبراهه به ترتیب با وزن نهایی (W_j) ۰/۶۶۲، ۰/۳۰۸ و ۰/۲۶۲ بیشترین و عامل ارتفاع، فاصله از گسل و بارندگی به ترتیب با کسب وزن نهایی ۰/۰۸۵، ۰/۰۵۲ و ۰/۲۴۷ کمترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش‌های حوضه دارند. نظر به اینکه بخش وسیعی از سطح منطقه کوهستانی همراه با دیواره‌های بلند و دره‌های ژرف است، عامل شیب مهم‌ترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه دارد. شیب‌های بیش از ۴۰ درصد با P_{ij} معادل ۳/۳۸ بیشترین تراکم زمین‌لغزش را در بین دیگر عوامل به خود اختصاص داده است. تیموری‌یانسری و همکاران (۱۳۹۶) و پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهش خود نشان دادند که بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها به ترتیب در شیب‌های $< 30^\circ$ درجه و ۳۰ تا ۵۰ درصد اتفاق افتاده است. همچنین Regmi et al. (2014) اشاره دارند که با افزایش شیب، فراوانی زمین‌لغزش‌ها افزایش می‌یابد. علت اینکه در منطقه مورد مطالعه با افزایش شیب، حساسیت به زمین‌لغزش بیشتر می‌شود را می‌توان به بالا بودن مقدار ریزش‌های سنگی و واژگونی در سطح منطقه نسبت داد. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش Wang et al. (2016)، عرب‌عامری و شیرانی (۱۳۹۵) و محمدنژاد آروق و اصغری سراسکانرود (۱۳۹۵) در ارتباط با نقش مهم شیب در رخداد زمین‌لغزش‌ها مطابقت دارد. همچنین در پژوهش قاسمیان (۱۳۹۱) و عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) شیب به عنوان یک متغیر بیشترین ارزش و ضریب تأثیر را در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش دارد. نتایج پژوهش سپهر و همکاران (۱۳۹۲) و عابدینی و فتحی (۱۳۹۳) نشان می‌دهد که شیب بیشترین ضریب اهمیت و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارد. بهاروند و سوری (۱۳۹۴) شیب را مهم‌ترین عامل می‌دانند که بیشترین همبستگی را با لغزش‌های منطقه مورد مطالعه خود داشته است. (Akgun and Turk (2010) در منطقه غرب ترکیه و Rozos et al. (2011) در منطقه شرق آچایا در یونان شیب را به عنوان مهم‌ترین عامل معرفی کرده‌اند. همانطور که اشاره شد، عامل جهت شیب با وزن نهایی (W_j) ۰/۳۰۸ دومین عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه مورد مطالعه است. مختاری‌اصل و رنجیریان شاداباد (۱۳۹۵) در پژوهشی جهت شیب را سومین عامل مؤثر در بروز زمین‌لغزش‌ها معرفی کردند. در منطقه مورد پژوهش شیب‌های شمال شرق به دلیل شرایط مرطوب‌تر و قرار گرفتن در دامنه نسا، رطوبت خود را دیرتر از دست داده و به دلیل وزن زیاد ناشی از نفوذ آب به درون لایه‌های رسوبی شرایط مساعدی جهت وقوع زمین‌لغزش پیدا کرده‌اند و با P_{ij} ۱/۴۸ از حساسیت بیشتری نسبت به دیگر جهات شیب دارند. مقدار P_{ij} برای مناطقی که در فاصله کمتر از ۶۰۰ متری آبراهه قرار دارند معادل ۱/۰۳ است که نشان‌دهنده تأثیر زیرشویی ناشی از جریان آب و فرسایش کناری و نقش آن در تشدید زمین‌لغزش‌هاست. عامل بارش با وزن نهایی (W_j) ۰/۲۴۷ در مرتبه چهارم عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه قرار دارد. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد که مقدار P_{ij} برای مناطق دارای بارندگی بیش از ۷۵۰ میلی‌متر برابر با ۱/۹۱ است. بررسی این عامل نشان می‌دهد که میزان و احتمال رخداد زمین‌لغزش در حوضه با میزان بارندگی رابطه مستقیم دارد که این مسئله نشان‌دهنده نقش بارندگی به واسطه وزن زیاد ناشی از نفوذ آب و در نتیجه تسهیل شرایط وقوع زمین‌لغزش در حوضه است. بر اساس مقدار P_{ij} سازنده‌های ماری و شیلی پایده و گورپی با وزن ۲/۹۸ و با توجه به حد روانی پایین‌کانی‌های رسی موجود در آنها بیشترین حساسیت را نسبت به دیگر سازندها دارند. همچنین مقدار P_{ij} نشان می‌دهد که سازندهای بنگستان و آسماری نیز به ترتیب با مقادیر وزنی ۱/۴۰ و ۱/۳۷ مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند.

جدول ۱- ارتباط بین زمین لغزش، عوامل مؤثر و میزان اثر هر یک از آنها با استفاده از شاخص آنتروپی.

فاکتورها	کلاس	مساحت کلاس (Km ²)	مساحت زمین لغزش (Ha)	تراکم زمین لغزش P _{ij}	احتمال تراکم زمین لغزش (P _{ij})	آنتروپی H _j	آنتروپی ماکزیموم H _{jmax}	ضریب اطلاعات I _j	وزن نهایی W _j
ارتفاع (متر)	۶۸۱-۱۰۰۰	۴۰۳/۳۰	۱۳/۹۶	۰/۲۱	۰/۰۷	۱/۷۸	۲/۰۰	۰/۱۱	۰/۰۸۵
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۱۸۶۱/۳۵	۴۱۵/۶۰	۱/۳۴	۰/۴۴				
	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۱۷۳۹/۵۱	۲۴۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۲۷				
	۳۰۰۰<	۲۶/۷۲	۲/۹۳	۰/۶۶	۰/۲۲				
جهت شیب	شمال	۴۷۹/۹۱	۹۹/۹۵	۱/۲۵	۰/۱۷	۲/۰۲	۳/۰۰	۰/۳۳	۰/۳۰۸
	شمال شرق	۶۲۲/۰۶	۱۵۳/۸۷	۱/۴۸	۰/۲۰				
	شرق	۴۳۱/۱۴	۴۰/۳۲	۰/۵۶	۰/۰۷				
	جنوب شرق	۳۴۲/۷۳	۲۵/۸۱	۰/۴۵	۰/۰۶				
	جنوب	۵۱۰/۵۵	۶۵/۹۶	۰/۷۷	۰/۱۰				
	جنوب غرب	۷۳۸/۲۵	۱۴۵/۴۲	۱/۱۸	۰/۱۶				
	غرب	۵۱۵/۱۳	۸۶/۵۳	۱/۰۱	۰/۱۳				
	شمال غرب	۳۹۱/۱۰	۵۵/۴۸	۰/۸۵	۰/۱۱				
فاصله از آبراهه (متر)	<۶۰۰	۱۷۱۵/۸۰	۳۹۳/۹۸	۱/۰۳	۰/۲۵	۱/۵۰	۲/۰۰	۰/۲۵	۰/۲۶۲
	۶۰۰-۱۲۰۰	۱۱۸۲/۳۶	۱۹۵/۰۷	۰/۹۹	۰/۲۴				
	۱۲۰۰-۲۴۰۰	۹۹۳/۱۷	۱۵۶/۴۶	۰/۹۴	۰/۲۳				
	>۲۴۰۰	۱۳۹/۵۶	۲۷/۸۶	۱/۲۰	۰/۲۹				
فاصله از گسل (متر)	۰-۵۰۰	۶۳۰/۹۸	۱۷۳/۵۸	۱/۶۵	۰/۳۷	۱/۹۱	۲/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۵۲
	۵۰۰-۱۵۰۰	۱۰۰۱/۸۵	۱۹۰/۷۶	۱/۱۴	۰/۲۶				
	۱۵۰۰-۳۰۰۰	۹۳۹/۶۶	۱۷۵/۲۳	۱/۱۲	۰/۲۵				
	۳۰۰۰<	۱۴۵۸/۴۰	۱۳۳/۷۹	۰/۵۵	۰/۱۲				

وزن نهایی W_j	ضریب اطلاعات I_j	آنتروپی ماکزیموم H_{jmax}	آنتروپی H_j	احتمال تراکم زمین لغزش (P_{ij})	تراکم زمین لغزش P_{ij}	مساحت زمین لغزش (Ha)	مساحت کلاس (Km^2)	کلاس	فاکتورها
۰/۲۴۴	۰/۲۶	۲/۸۱	۲/۰۸	۰/۰۴	۰/۲۷	۶۵/۹۳	۱۴۵۰/۸۷	ALQP (آبرفت، رسوبات دریاچه ای، ذخایر تراسی و مخروطافکنه ها کوهپایه ای کوتاه تر)	سنگ شناسی
				۰/۲۱	۱/۳۷	۲۵۹/۴۶	۱۱۳۱/۱۹	AJOP (سازند آهکی - دولومیتی با میان لایه شیل)	
				۰/۰۵	۰/۳۱	۱۳/۲۰	۲۵۱/۳۱	GMRM (شیل، مارن، آهک، نمک یا انیدریت، ژیس)	
				۰/۰۱	۰/۰۷	۱/۲۷	۱۱۶/۳۲	BPMAM (کنگلو مریا و ماسه سنگ همراه با مارن های قرمز و سیلتستون)	
				۰/۰۳	۰/۲۰	۴/۹۱	۱۴۹/۲۱	K(DGFS) (آهک همراه با مارن و شیل)	
				۰/۲۱	۱/۴۰	۱۱۹/۸۵	۵۱۲/۶۵	B(ISK) (آهک های رسی)	
				۰/۴۵	۲/۹۸	۲۰۸/۷۳	۴۱۹/۳۱	PGK (مارن آهکی و شیل)	
۰/۲۴۲	۰/۴۱	۲/۳۲	۱/۳۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۱۶/۹۰	اراضی دیم	کاربری زمین
				۰/۵۲	۱/۵۳	۳۷/۴۱	۱۴۶/۱۶	جنگل	
				۰/۳۷	۱/۰۹	۶۰۷/۹۲	۳۳۲۷/۲۲	مرتع	
				۰/۱۱	۰/۳۱	۲۸/۰۵	۵۳۵/۹۷	اراضی زراعی آبی	
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۴/۶۲	رخمون های سنگی	
۰/۲۴۷	۰/۳۰	۲/۰۰	۱/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰	۲۷۸/۶۵	۵۵ >	بارندگی
				۰/۱۹	۰/۶۲	۱۴۱/۴۳	۱۳۷۱/۳۲	۵۵۰-۶۵۰	
				۰/۲۴	۰/۷۹	۱۶۱/۱۳	۱۲۱۸/۲۰	۶۵۰-۷۵۰	
				۰/۵۸	۱/۹۱	۳۷۰/۸۲	۱۱۶۲/۷۱	۷۵۰ <	
۰/۶۶۲	۰/۶۷	۲/۰۰	۰/۶۶	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۶۴	۳۵۸/۷۳	۰-۵	شیب (درصد)
				۰/۰۲	۰/۰۶	۱۰/۳۸	۱۰۳۲/۵۶	۵-۱۵	
				۰/۱۳	۰/۵۰	۱۴۳/۲۲	۱۷۲۱/۳۷	۱۵-۴۰	
				۰/۸۶	۳/۳۸	۵۱۹/۱۴	۹۱۸/۲۲	۴۰ <	

فاصله از آبراهه، بارندگی، لیتولوژی، کاربری زمین، عامل ارتفاع و فاصله از گسل را در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه به ترتیب ذکر شده اولویت بندی می‌کند.

۵-۱. تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش بر اساس مدل آنترپوی شانون

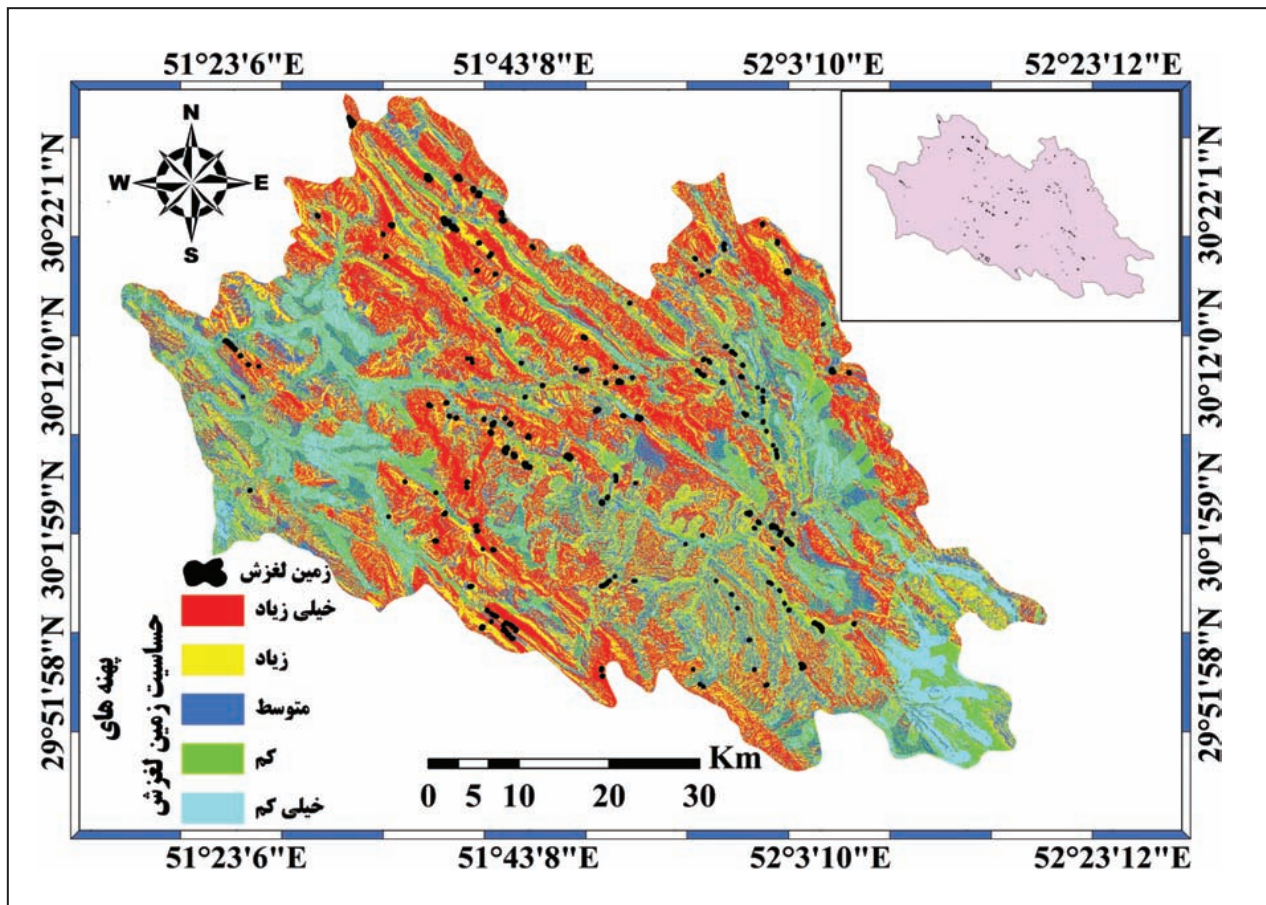
نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش Y_{ioe} با استفاده از مدل آنترپوی شانون از مجموع حاصل ضرب وزن هر پارامتر P_{ij} در خود پارامتر W_i طبق رابطه زیر بر اساس نتایج موجود در جدول ۱ محاسبه شده است:

$$Y_{ioe} = \sum_{i=1}^n W_i * P_{ij} \quad (۸)$$

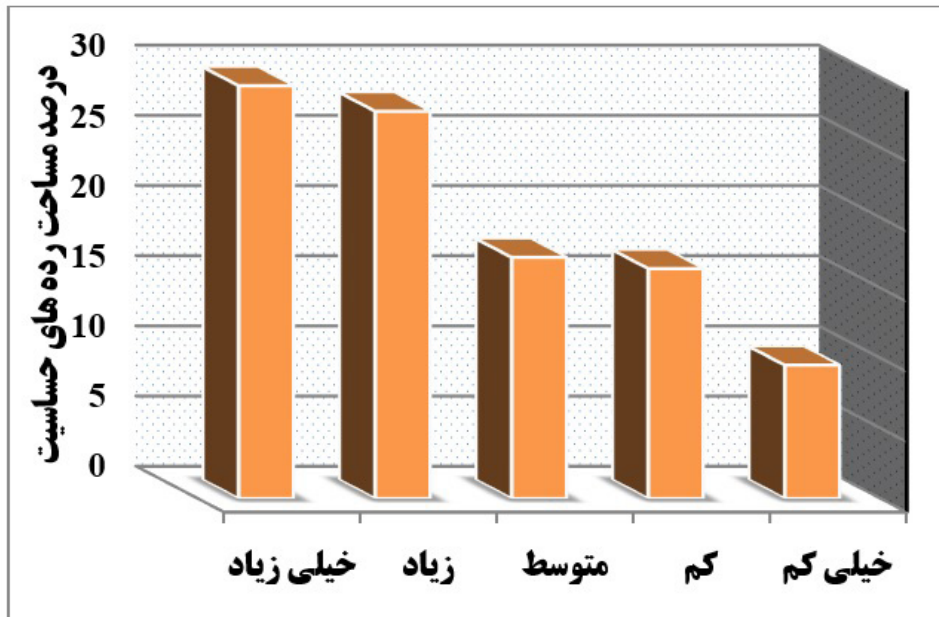
i تا n همان پارامترها یا عوامل مؤثر در زمین‌لغزش هستند. با اعمال رابطه بالا نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش طبق مدل شاخص آنترپوی (IoE) محاسبه شده است (شکل ۵). نتایج حاصل از محاسبه این مدل نشان می‌دهد که ۲۹/۴۹ درصد (۱۱۸۴۹/۲۲ هکتار) و ۲۷/۵۸ درصد (۱۱۱۱۷/۹۳ هکتار) که در مجموع بیش از نیمی (۵۶/۹۸) از کل محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شود، به ترتیب در پهنه با حساسیت خیلی زیاد و زیاد واقع شده است. پهنه‌های حساسیت متوسط و کم به ترتیب ۱۷/۱۷ درصد (۶۹۱۹/۷۰ هکتار) و ۱۶/۳۷ درصد (۶۵۹۷/۶۰ هکتار) و پهنه حساسیت خیلی کم نیز ۹/۴۹ درصد (۳۸۲۴/۵۶ هکتار) از کل منطقه را دربر می‌گیرند (جدول ۲ و شکل ۶).

در مجموع عامل لیتولوژی با وزن نهایی (W_i) ۰/۲۴۴ در رتبه پنجم عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه است.

مقیمی و همکاران (۱۳۹۱) و محمدنژاد آروق و اصغری سراسکانرود (۱۳۹۵) در پژوهش‌های خود لیتولوژی را پنجمین عامل مهم در وقوع زمین‌لغزش معرفی کرده‌اند. همچنین در نتایج حاصل از پژوهش نیری و همکاران (۱۳۹۶) لیتولوژی تأثیر متوسطی در رخداد زمین‌لغزش دارد. دخالت‌های انسان و عوامل بشرزاد به اشکال مختلف با برهم زدن تعادل دامنه‌ها می‌تواند زمینه را برای حرکات توده‌ای فراهم آورد. در حوضه مورد نظر عامل نحوه کاربری اراضی با وزن نهایی (W_i) ۰/۲۴۲ سهم خود را در وقوع زمین‌لغزش‌ها ایفا می‌کند. در این میان مناطق جنگلی که عمدتاً از درختان بلوط و پسته کوهی هستند، به دلیل تراکم کم نمی‌توانند نقش مؤثری در جلوگیری از حرکات توده‌ای داشته باشند. از طرفی جنگل‌های نیمه متراکم منطقه در چند سال اخیر در حال تبدیل شدن به زمین کشاورزی هستند، که این مسئله اهمیت تخریب جنگل و تغییر کاربری پوشش را در وقوع زمین‌لغزش نشان می‌دهد. به همین دلیل مقدار P_{ij} برای مناطق جنگلی ۱/۵۳ را نشان می‌دهد. در بین طبقات ارتفاعی، طیف ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ با میزان P_{ij} ۱/۳۴ بیشترین تراکم زمین‌لغزش‌ها را دارد. مناطقی که در فاصله ۰ تا ۵۰۰ متری گسل واقع شده‌اند نیز با P_{ij} معادل ۱/۶۵ نسبت به دیگر فواصل بیشترین تراکم زمین‌لغزش را دارند. به‌طور کلی نتایج وزن نهایی حاصل از اجرای مدل نقش عوامل شیب، جهت شیب،



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنترپوی.



شکل ۶- مساحت پهنه‌های حساسیت زمین لغزش در منطقه

جدول ۲- نسبت فراوانی (FR) و شاخص SCAI پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش.

SCAI	درصد Seed	نسبت فراوانی (FR)	درصد مساحت رده	مساحت هر رده حساسیت (متر مربع)	درصد مساحت زمین لغزش	مساحت زمین لغزش (متر مربع)	رده‌های حساسیت زمین لغزش
۱/۱۳	۲۶/۰۹	۰/۱۸۷	۲۹/۴۰	۱۱۸۴۹۲۲۲۱۶/۳۵	۳۲/۸۵	۲۲۱۲۷۴۷/۶۹	خیلی زیاد
۰/۸۹	۳۰/۸۹	۰/۲۲۱	۲۷/۵۸	۱۱۱۱۷۹۳۴۰۰/۵۲	۳۶/۴۹	۲۴۵۷۷۹۸/۷۹	زیاد
۰/۶۶	۲۵/۸۵	۰/۱۸۵	۱۷/۱۷	۶۹۱۹۶۹۸۵۹/۶۰	۱۹/۰۰	۱۲۷۹۹۱۳/۷۵	متوسط
۱/۰۴	۱۵/۸۰	۰/۱۱۳	۱۶/۳۷	۶۵۹۷۵۹۵۷۶/۱۹	۱۱/۰۷	۷۴۶۰۸۴/۹۵	کم
۶/۹۵	۱/۳۶	۰/۰۱۰	۹/۴۹	۳۸۲۴۵۶۱۷۵/۳۳	۰/۵۵	۳۷۳۴۹/۷۹	خیلی کم

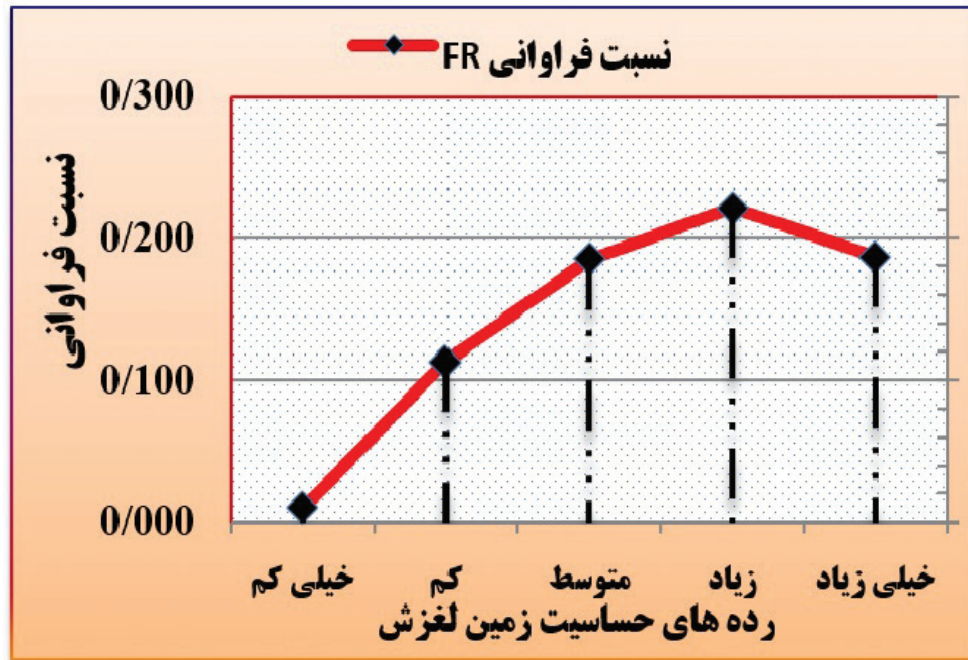
۵-۲. ارزیابی و صحت‌سنجی روش پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش

ارزیابی یک گام اساسی در توسعه و تعیین کیفیت نقشه یا مدل پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش است. برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های حساسیت نسبت به زمین لغزش، از نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) استفاده شد. با استفاده از نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) دقت طبقه‌بندی هر مدل تعیین می‌شود (Demir et al., 2012; Shirani, et al., 2018). بر اساس رابطه منطقی و نسبی موجود بین سطح زمین لغزش و پهنه‌های خطر، به ترتیب برای پهنه‌های با حساسیت پتانسیل خطر خیلی کم تا خیلی زیاد مقدار نسبت فراوانی (FR) افزایش و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) به صورت قرینه کاهش می‌یابد (شیرانی، ۱۳۹۶). همچنین در این مرحله با تلافی نقشه پراکنش زمین لغزش‌های منطقه و نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش در محیط GIS، با بهره‌گیری از منحنی ویژگی عملگر نسبی یا گیرنده ROC به ارزیابی و مقایسه روش پهنه‌بندی پرداخته و اعتبار و صحت مدل تعیین می‌شود. از آنجا که برای ارزیابی

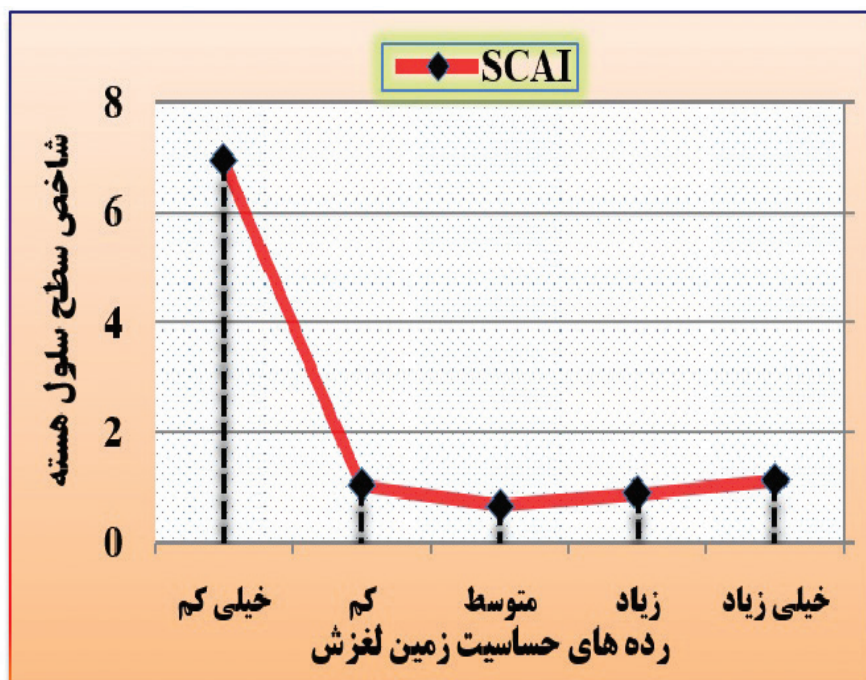
مدل نمی‌توان از همان زمین لغزش‌هایی استفاده کرد که در پهنه‌بندی استفاده شده‌اند (Komac, 2006)، لذا ۷۰ درصد زمین لغزش‌ها برای اجرای مدل آنتروپی و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل بر اساس منحنی ROC مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Constantin et al., 2011; Shirani, et al., 2018). منحنی ROC از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (Sweets, 1988). این منحنی یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست. سطح زیر منحنی ROC که AUC نامیده می‌شود، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین لغزش) آن است (Pourghasemi et al., 2012; Shirani, et al., 2018). ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. نرخ پیش‌بینی (منحنی ROC) بیانگر ارزیابی مدل و متغیرهای پیش‌بینی کننده است

مورد استفاده بیانگر این است که با افزایش حساسیت خطر از خیلی کم به خیلی زیاد مقدار نسبت فراوانی (FR) روند صعودی داشته است (شکل ۷). اما نمودار شاخص SCAI برای رده‌های حساسیت خیلی کم، کم و متوسط به ترتیب دارای روند نزولی و برای رده‌های زیاد و خیلی زیاد اندکی روند صعودی نشان می‌دهد (شکل ۸).

که زمین‌لغزش را پیش‌بینی می‌کند. همبستگی کیفی-کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت ۰/۹ تا ۱: عالی، ۰/۸ تا ۰/۹: خیلی خوب، ۰/۷ تا ۰/۸: خوب، ۰/۶ تا ۰/۷: متوسط و ۰/۵ تا ۰/۶۹: ضعیف است (Pradhan and Lee, 2010; Regmi et al., 2010). هر چه سطح زیر منحنی به یک نزدیک باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است. ارزیابی دقت طبقه‌بندی در این پژوهش بر مبنای مدل



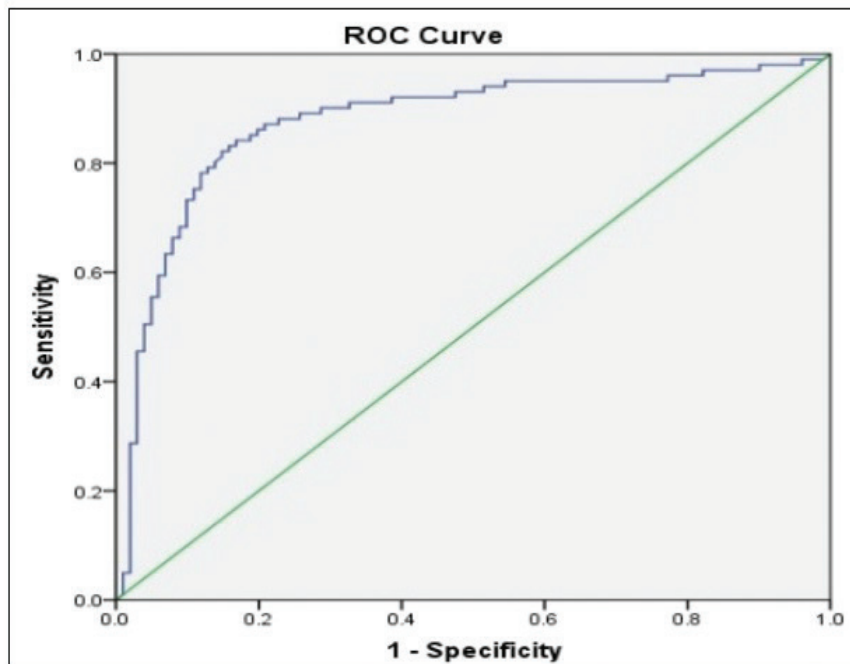
شکل ۷- نمودار نسبت فراوانی رده‌های حساسیت زمین‌لغزش.



شکل ۸- شاخص سطح سلول هسته رده‌های حساسیت زمین‌لغزش

نسبت به زمین لغزش تهیه شده و نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها و ارزیابی خیلی خوب مدل آنتروپی در شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن است. نتایج پژوهش حاضر با مطالعه شیرانی (۱۳۹۶)، Pourghasemi et al. (2012) و Devkota et al. (2013) مبنی بر دقت بالای مدل آنتروپی به ترتیب در مقایسه با مدل‌های وزن شاهد بیزین، رگرسیون لجستیک و مدل دومتغیره فاکتور اطمینان مطابقت دارد.

بنابراین روند شاخص SCAI نشان می‌دهد که پهنه‌بندی طبقات حساسیت خطر با استفاده از مدل آنتروپی برای رده‌های حساسیت خیلی کم، کم و متوسط مناسب‌تر است. همچنین بر اساس نتایج ROC و بر مبنای سطوح طبقه‌بندی دقت (جدول ۳)، سطح زیر منحنی منطقه مورد مطالعه ۰/۸۷۷ با انحراف استاندارد ۰/۰۲۶ در سطح اطمینان ۹۹ درصد برآورد شده است. لذا شکل ۹ و نتایج مقادیر مساحت زیر منحنی (AUC) بیانگر همبستگی بالا بین نقشه حساسیت



شکل ۹- منحنی نرخ پیش‌بینی ROC نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش.

جدول ۳- مساحت زیر منحنی (ROC) به همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان آن.

سطح زیر منحنی	خطای استاندارد	سطح اطمینان	فواصل اطمینان در سطح ۹۵٪	
			حد بالا	حد پایین
۸۷۷	۰.۰۲۶	۰/۰۰۰	۰.۹۲۹	۰.۸۲۵

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از مدل آنتروپی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش از رویکردهای نسبتاً جدید در دانش علوم زمین و ژئومورفولوژی بوده و بهره‌گیری از این مدل در انجام پژوهش‌های مرتبط با پهنه‌بندی در حال افزایش است. مهم‌ترین مزیت روش آنتروپی تعیین متغیرهایی است که بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند. از آنجا که مدل آنتروپی شانون معیاری از عدم قطعیت یک متغیر تصادفی است و به‌عنوان محتوای اطلاعاتی یک سامانه محسوب می‌شود، لذا به کارگیری این مدل در پدیده‌هایی نظیر رخداد زمین‌لغزش، به دلیل طبیعت و ماهیت غیرپارامتریک آنها می‌تواند بسیار مناسب و کارآمد باشد. همچنین مدل آنتروپی شانون نیازمند فرضیات مربوط به توزیع مناسب داده‌های متغیرها و مبتنی بر مدل‌های خطی نیست. لذا می‌توان از تعداد زیادی عوامل مؤثر (متغیرها) که در رخداد زمین‌لغزش در حوضه‌های آبخیز مؤثرند، استفاده کرد. در این پژوهش با نگاه سیستمی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز فهلپان با استفاده از مدل آنتروپی شانون مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر شامل لیتولوژی، شیب، جهت شیب، بارش، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی و طبقات ارتفاعی به‌عنوان عواملی که می‌تواند در وقوع زمین‌لغزش مؤثر باشد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که میزان شیب و

جهت شیب به ترتیب با وزن نهایی (Wj) ۰/۶۶۲ و ۰/۳۰۸ بیشترین و عامل ارتفاع و فاصله از گسل به ترتیب با وزن نهایی ۰/۰۸۵ و ۰/۰۵۲ کمترین تأثیر را بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه داشته‌اند. نقشه نهایی پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش نیز نشان می‌دهد که ۲۹/۴۰ درصد از کل محدوده مورد مطالعه به مساحت ۱۱۸۴/۹۲۲ کیلومتر مربع در پهنه با حساسیت خیلی زیاد، ۲۷/۵۸ درصد از کل محدوده مورد مطالعه به مساحت ۱۱۱۱/۷۹۳ کیلومتر مربع در پهنه با حساسیت زیاد، ۱۷/۱۶ درصد از مساحت حوضه معادل ۶۹۱/۹۶ کیلومتر مربع در پهنه با حساسیت متوسط و ۲۵/۸۵ درصد از مساحت کل حوضه معادل ۱۰۴۲/۲۱ کیلومتر مربع در پهنه با حساسیت کم و خیلی کم واقع شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نقشه خطر تهیه شده در پژوهش حاضر با استفاده از منحنی ROC و میزان سطح زیر منحنی (۰/۸۷) نشان‌دهنده دقت خیلی خوب مدل برای منطقه مورد پژوهش است. بنابراین با توجه به دقت خوب نقشه حساسیت زمین‌لغزش در پیش‌بینی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش، می‌توان از این مدل در تصمیم‌گیری، مدیریت، برنامه‌ریزی و تعیین کاربری سرزمین استفاده کرد. همچنین صحت مدل مذکور در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش به این موضوع اشاره دارد که می‌توان از آن در مناطق دارای شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیک مشابه استفاده کرد.

کتابنگاری

- اشقلى فراهانى، ع.، ۱۳۸۰- ارزیابی خطر ناپایداری دامنه‌های طبیعی در منطقه رودبار با استفاده از تئوری فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۴۲ ص.
- انصاری، م. و فتوحی، ص.، ۱۳۹۶- بررسی دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی و اثرات آن بر منابع آب زیرزمینی دشت ممسنی، فصلنامه جغرافیای طبیعی، شماره ۳۶، صص. ۷۳ تا ۸۷.
- بهاروند، س. و سوری، س.، ۱۳۹۴- پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه سپیددشت، لرستان)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، شماره ۴، صص. ۱۵ تا ۳۱.
- پورقاسمی، ح. م.، مرادی، ح. م.، فاطمی عقدا، س. م.، مهدوی فر، م. ر. و محمدی، م. م.، ۱۳۹۰- ارزیابی عوامل ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز هراز)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد هجدهم، شماره چهارم، صص. ۱ تا ۲۰.
- پورقاسمی، ح. م.، مرادی، ح. م.، فاطمی عقدا، س. م.، ۱۳۹۳- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از شاخص آنتروپی شانون، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره ۷۰.
- تیموری یانرسری، ز.، حسین‌زاده، ر.، کاویان، ع. و پورقاسمی، ح. م.، ۱۳۹۶- تعیین پهنه‌های حساس بوقوع لغزش با استفاده از روش آنتروپی شانون (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهاردانگه- استان مازندران)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، صص. ۱۸۳ تا ۲۰۴.
- سپهر، ع.، بهنیافر، ا.، محمدیان، ع. و عبدالمی، ا.، ۱۳۹۲- تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم پهنه‌سازی توافقی و یکپور، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص. ۱۹ تا ۳۶.
- شکاری بادی، ع. م.، معتمدی‌راد، م. و محمدنیا، م.، ۱۳۹۴- تلفیق مدل ANP و شاخص آنتروپی شانون در برآورد عوامل مؤثر در وقوع و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه فاروب رومان نیشاپور) مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، شماره ۲۲، صص. ۸۹.
- شیرانی، ک.، ۱۳۹۶- مدل‌سازی و ارزیابی پتانسیل حساسیت اراضی نسبت به لغزش با استفاده از مدل‌های احتمالاتی آنتروپی شانون و وزن شاهد تئوری بیزین (مطالعه موردی: حوضه سرخون کارون)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال بیست و یکم، شماره ۱، صص. ۵۱-۶۸.
- شیرانی، ک.، سیف، ع. و نصر، ا.، ۱۳۹۲- بررسی عوامل مؤثر بر حرکات توده‌های برپایه تهنیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: ارتفاعات دناى زاگرس)، فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۹، صص. ۱-۳.
- صدوق و نینی، ح. م.، ثروتی، م.، نصرتی، ک. ک.، اسدی، م. و صدیق‌قربانی، م.، ۱۳۹۴- پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات، فصلنامه دانش مخاطرات، دوره ۲، شماره ۱، صص. ۱۰۵ تا ۱۱۶.
- ثروتی، م. م.، عشقی، ا. و دهقان، م.، ۱۳۸۲- ژئومورفولوژی و مخاطرات طبیعی، فصلنامه فضای جغرافیایی، شماره ۹، صص. ۱ تا ۴۴.
- عابدینی، م. و فتوحی، م.، ۱۳۹۳- پهنه‌بندی حساسیت خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز خلخال جای با استفاده از مدل‌های چندمعیاره، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، صص. ۷۱ تا ۸۵.
- عابدینی، م.، روستایی، ش. و فتوحی، م.، ۱۳۹۵- پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز-ANP (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهرچای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ش ۱، صص. ۱۴۲ تا ۱۵۹.
- عرب‌عامری، ع. ر. و شیرانی، ک. ک.، ۱۳۹۵- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر آن با استفاده از تئوری احتمالاتی دمپستر شفر، مطالعه موردی، حوضه ونک سمیرم، استان اصفهان، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۱، صص. ۹۳ تا ۱۰۶.
- قاسمیان، ب.، ۱۳۹۱- پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک، مطالعه موردی: (استان کردستان- شهرستان بیجار) پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اریلی.
- محمدنژاد آروق، و. و اصغری سراسکانرود، ص.، ۱۳۹۵- ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های آماری در حوضه آبریز باراندوزچای، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۴، صص. ۱۸۱ تا ۱۹۱.
- مختاری اصل، ا. و رنجریان شادباد، م.، ۱۳۹۵- ارزیابی و پهنه‌بندی احتمال خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز یاجیلو با مدل AHP، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۴، صص. ۱۱۹ تا ۱۳۳.
- مقیمی، ا.، باقری سید شکر س. و صفرراد، ط.، ۱۳۹۱- پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاقدیس نثار زاگرس شمال غربی)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۹، صص. ۷۷ تا ۹۰.
- نیری، ه.، کرمی، م. و سالاری، م.، ۱۳۹۶- پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از طریق ارزیابی متغیرهای محیطی با استفاده از مدل تحلیل شبکه (مطالعه موردی: شهرستان بیجار)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۴، صص. ۱۲۱ تا ۱۳۶.

References

- Agraval, D., Singh, J. K. and Kumar, A., 2005- Maximum entropy-based conditional probability runoff model. *Biosys. Eng.* 90(1): 103-113.
- Akgun, A. and Türk, N., 2010- Landslide susceptibility mapping for Ayvalik (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis. *Environ. Earth. Sci.* 61: 595-611.
- Baas, A., 2007- Complex System in Aeolian Geomorphology, *Geomorphology*, Vol. 91, Pp. 311- 331.
- Bednarik, M., Magulova, B., Matys, M. and Marschalko, M., 2010- Landslide Susceptibility Assessment of the Kral ' Ovany -Liptovsky' Mikulas Railway Case Study, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 35, Pp. 162-171.

- Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M. C. and Vlaicu, M., 2011- Landslide Susceptibility assessment using the bivariate Statistical analysis and index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *J.Environmental Earth Science*, 63: 397-406. DOL 10.1007/S12665-010-0724-y:10.
- Davis, J. and Blesius, L., 2015- A Hybrid Physical and Maximum-Entropy Landslide Susceptibility Model. *Entropy, Journal*, 17, 4271-4292.
- Demir, G., Aytakin, M., Akgun, A., Ikizler, S. B. and Tatar, O., 2012- A comparison of Landslide Susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone(Turkey) by Likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process method, *Nat Hazard*, Published online, DOI 10.1007/s11069-012-0418-8.
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghseimi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., Dhital, M. R. and Althuwaynee, O. F., 2013- Landslide susceptibility mapping using Certainty factor. Index of entropy and Logistic regression models in GIS AND Their Comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Nat. Hazards* 65: 135-165.
- Hong, H., Haghbi, S. A. and Pourghseimi, H. R., 2016- GIS –based landslid Spatial Modeling in Ganzhou City, China, *Arab J Geosci Journal*, 9:112.
- Komac, M., 2006- A Landslide Susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate Statistics in Perialpine Slovenia. *J. Geomorphology* 74(1-4): 17-28.
- Ling Peng, A. B., Ruiqing Niu, A., Bo Huang, C., Xueling Wu, A., Yannan Zhao, A. and Runqing Ye, D., 2014- Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China, *Geomorphology*, No. 204, Pp. 287–301.
- Montesarchio, V. and Naplitano, F., 2010- A single-site Rainfall disaggregation modal based on entropy. *International Workshop Advances in Statistical Hydrology*. May23-25, Taormina. Italy.
- Pourghasemi, H. R., Mohammady, M. and Pradhan, B., 2012- Landslide Susceptibility mapping using index of entropy and Conditional probability models in GIS. *Safarood Basin, Iran, Catena* 97: 71-84.
- Pradhan, B. and Lee, S., 2010- Landslide Susceptibility assessment and factor effect analysis: back Propagation artificial neural networks and their Comparison With frequency ratio and bivariate Logistic regression modeling. *Environ. Model. Softw* 25(6): 747-759.
- Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T. and Akgun, A., 2014- Application of frequency ratio, statistical index, and weight-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 725-742.
- Regmi, N. R., Giardion, J. R. and Vitek, J. D., 2010- Modeling Susceptibility to Landslides using the Weight of evidence approach: Western Colorado, USA, *Geomorphology* 115: 172-187.
- Rozos, D. G., Bathrellos, D. and Skilodimou, H. D., 2011- Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece. *Environ. Earth Sci*. 63: 49-63.
- Shannon, C. E., 1948- A mathematical theory of Communication. *Bulletin System Technol.* 27:379-423.
- Sharma, L. P., Patel, N., Ghose, M. K. and Debnath, P., 2010- Influence of Shannon,s entropy on Landslide-Causing Parameters for Vulnerability Study and Zonation-a Case Study in Shikkim, India. *Arab.J. Geosic*. 5(3): 421-431.
- Shirani, K., Pasandi, M. and Arabameri, A., 2018. Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran. *Natural Hazards*, 93(3): 1379-1418."
- Sweets, J. A., 1988- Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Sci.* 240: 1285-1293.
- Terzaghi, K., 1950- Mechanisms of Landslides, *Geotechnical Society of America, Berkeley*, pp. 83-125.
- Varnes, D. J., 1984- Landslid Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice, United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), press, Paris, 63pp.
- Wan, S., 2009- A Spatial Decision Support System for Extracting the Core Factors and Thresholds for Landslide Susceptibility Map, *Engineering Geology*, Vol. 108, PP. 237-251. doi: 10.1016/j.enggeo.06.014.
- Wang, Q., Li, W., Wu, Y., Pei, Y., Xing, M. and Yang, D., 2016- A comparative study on the landslide susceptibility mapping using evidential belief function and weight of evidence models, *J. Earth Syst. Sci*. 125, No. 3. Pp 646-662.
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., El-Hadad, B. A. and Dhahry, B. K., 2016- Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia, *Bull Eng Geol Environ*, 75: 63-87.
- Yufeng, S. and Fengxiant, J., 2009- Landslide Stability Analysis Based on Generalized Information Entropy, *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. 83-85. DOI 10.1109/ESIAT.2009.258.

Performance of Chaos theory on natural systems in landslide hazard zonation in Fahlian river basin

H. Baboli-Moakher¹, K. Shirani^{2*} and A. R. Taghian³

¹Ph.D. Student, Department of Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

²Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

³Assistant Professor, Department of Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Received: 2017 May 03

Accepted: 2018 April 15

Abstract

Catchments are natural systems in which natural phenomena like landslides are considered as natural disasters. As a chaos factor, they have a main role in forming unstable condition, tackling energy, accelerating erosion and generating sediment. So factors causing slope instability are reaction of the system to positive feedback. This study aims to employ theory of natural system chaos, in the form of Shannon entropy index, to find the factors causing landslide and its hazard zonation in Fahlian basin. First, input layers including geology, rainfall, slope, aspect, land use, distance to river, distance to fault, and elevation were digitized using GIS techniques. Then occurred landslides were detected using satellite images and field study. Landslide hazard zonation based on defined weights of each parameter was generated. In order to run model and study its accuracy, receiver or relative operating characteristic (ROC), was used with 70 and 30 per cent of data as training and test, respectively. Results show that slope and aspect have the maximum effect on landslide occurrence with ultimate weight of 0.662 and 0.308, respectively. Landslide susceptibility zonation map show that more than half of study area (56.97 percent) have very high to high susceptibility. Disaggregation of areas with SCAI method show the high accuracy of the model in detection of area with average, low and very low susceptibility. Frequency ratio of hazard classes deals with high accordingly, area under curve (AUC) of ROC was estimated 0.87 with 0.026 standard deviation which is known as very good accuracy of model.

Keywords: Landslide, Susceptibility zonation, Shannon entropy, Natural Systems, Fahlian Basin.

For Persian Version see pages 187 to 200

*Corresponding author: K. Shirani; E-mail: k_sh424@yahoo.com