

بهبود نتایج پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری انتروپی

شانون

امین حسین پور میل‌آغاردان (Amin_hoseinpoor@yahoo.com)

دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های اطلاعات مکانی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

رحیم‌علی عباسپور*



استادیار گرایش مهندسی سیستم‌های اطلاعات مکانی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۶ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹)

چکیده

مرور خسارات ناشی از زمین‌لغزش، لزوم بررسی پارامترهای مؤثر بر آن و پیش‌بینی وقوع آن را به اثبات می‌رساند. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر بهبود نتایج پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش در منطقه توتکابن استان گیلان است. به‌همین منظور تئوری انتروپی شانون برای مدلسازی و لحاظ عدم قطعیت داده‌ها انتخاب شد. همچنین پارامترهای شیب، ارتفاع، شرایط ژئومورفولوژی، انحنای زمین، نزدیکی به رودخانه و نزدیکی به گسل‌ها، به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش به کار گرفته شدند. با استفاده از تئوری انتروپی شانون، وزن هر یک از پارامترها به‌همراه تأثیر عدم قطعیت بر نتایج محاسبه و نقشه ریسک وقوع زمین‌لغزش برای منطقه تحقیق تهیه شد. در نهایت برای ارزیابی نتایج از مقایسه موقعیت نقاط وقوع زمین‌لغزش در منطقه تحقیق و نقشه ریسک مدلسازی‌شده، استفاده شد. با ارزیابی نتایج مقدار ۰/۶۹ برای مساحت زیر منحنی (AUC) نمودار نرخ پیش‌بینی با در نظر گرفتن انتروپی و مقدار ۰/۵۴ برای بدون در نظر گرفتن انتروپی به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تئوری انتروپی شانون، عدم قطعیت، منحنی نرخ پیش‌بینی، نقشه ریسک زمین‌لغزش.

مقدمه

امروزه موضوع زمین لغزش از مهم‌ترین مباحث در زمینه مخاطرات طبیعی است، چرا که وقوع آن می‌تواند خسارات انسانی و اقتصادی فراوانی را به‌ویژه در مناطق کوهستانی در پی داشته باشد. در سال‌های اخیر با توجه به صدمات زمین لغزش در زیرساخت‌های جامعه مانند جاده‌ها، ساختمان‌ها و ...، تلاش‌های بسیاری به‌منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع این پدیده انجام گرفته است. به‌طور کلی پارامترهای بسیاری در وقوع زمین لغزش نقش دارند و همین موضوع، پیچیدگی مسئله را برای تعیین دقیق نقاط وقوع آن سخت‌تر می‌نماید. این پارامترها به‌طور کلی شامل دو گروه درونی و بیرونی است. مؤلفه‌های درونی بیانگر خصوصیات ثابت منطقه از قبیل شیب، جهت شیب، نوع خاک، ارتفاع، انحنای زمین و ... است. از طرف دیگر وقوع زلزله، بارندگی و به‌طور کلی عواملی متغیر و پیش‌بینی‌ناپذیر، از جمله پارامترهای بیرونی‌اند. مطالعات نشان داده که وقوع زمین لغزش به هر دو دسته عوامل بستگی دارد، که از این میان پارامترهای بیرونی وابسته به زمان‌اند و بررسی آنها به اطلاعات کامل از توزیع زمانی و مکانی نیاز دارد. به‌همین دلیل در ارزیابی امکان وقوع زمین لغزش و در نهایت تهیه نقشه ریسک آن تنها از پارامترهای درونی استفاده می‌شود.

امروزه با توجه به پیشرفت چشمگیر علم، سیستم‌های اطلاعات مکانی، به‌عنوان یکی از ابزارهای قوی برای تلفیق داده‌های مکانی و تولید نتایج دقیق به‌کار می‌روند، به‌طوری‌که از این علم علاوه بر پژوهش‌های جغرافیایی، در بسیاری از مطالعات مکانی علوم پزشکی، انسانی و ... نیز بهره گرفته‌اند. در زمینه وقوع زمین لغزش نیز، با توجه به تأثیر پارامترهای متنوع در وقوع این پدیده و نیاز به تولید نقشه‌های توزیع مکانی هر یک از این پارامترها و تلفیق آنها با یکدیگر، استفاده از علم سیستم‌های اطلاعات مکانی به‌عنوان ابزاری قوی برای پردازش داده‌های مکانی، اجتناب‌ناپذیر است. در دهه‌های گذشته مدل‌های مختلفی برای تلفیق لایه‌های مکانی معرفی شده‌اند که از آن جمله می‌توان به تئوری مجموعه‌های فازی، تئوری احتمال و شبکه‌های عصبی مصنوعی اشاره کرد. برای مثال ارمینی و همکاران، گومس و کاوزوگلو، کانسانی و همکاران، وو و همکاران، و پرادان و همکاران، با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی پژوهش‌هایی را انجام دادند [۲۲، ۱۶، ۱۱، ۹، ۶]. داهال و همکاران از تئوری احتمال برای وزن‌دهی پارامترهای مؤثر و تهیه نقشه ریسک استفاده کردند [۷]. به‌همین ترتیب اوزدمیر از روش Bayesian استفاده کرده است [۱۴]. شارما و همکاران مدل انتروپی را به‌منظور طبقه‌بندی خطر در منطقه‌ای از کشور هندوستان به‌کار بردند [۱۹]. همچنین پورقاسمی و

همکاران نیز به بررسی وقوع زمین‌لغزش در منطقه صفاورد پرداختند و مدل‌های احتمال شرطی و انتروپی را در این راستا به‌کار گرفتند [۱۵]. از روش‌های دیگر می‌توان به مدل لجستیک رگرسیون اشاره کرد که بویی و همکاران، چائوهان و همکاران و دوکوتا، با به‌کارگیری آن، دقت این مدل را با روش‌های دیگر مانند انتروپی شانون و تئوری احتمال شرطی مقایسه کردند [۸، ۵، ۳]. البته فلیسیمو و همکاران نیز مقایسه‌ای مشابه را صورت دادند، با این تفاوت که از روش‌های طبقه‌بندی نیز برای این مقایسه استفاده شد [۱۰]. به‌طور کلی در تمامی مدل‌ها ابتدا نقشه‌های مکانی مربوط به هر یک از لایه‌های مؤثر تهیه شده و سپس با تلفیق آنها توسط روش‌های مذکور، نقشه ریسک وقوع زمین‌لغزش تهیه می‌شود.

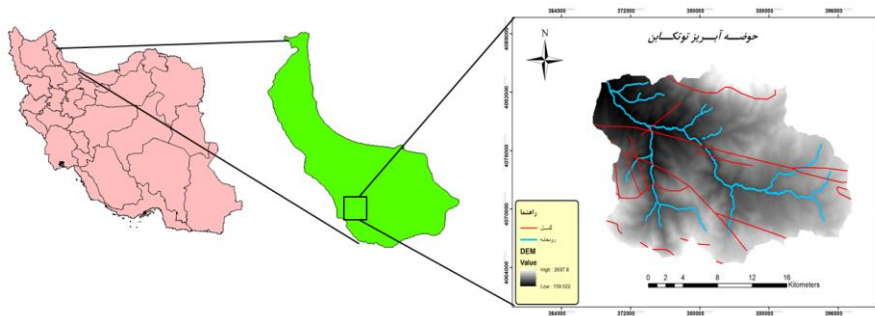
همچنین در بسیاری از پژوهش‌ها از روش‌های ارزیابی چندمعیاره استفاده شده که از آن جمله می‌توان به پژوهش ایلماز و همکاران، پرادان و همکاران، اگگون و همکاران، کوان و همکاران، کاواتسا و همکاران، لایانتانگا و همکاران و وو و همکاران اشاره کرد که در همه آنها از ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم‌های اطلاعات مکانی برای تهیه نقشه ریسک زمین‌لغزش استفاده شده است [۲۳، ۲۱، ۱۸، ۱۶، ۱۳، ۱۲، ۱۱]. در پژوهش‌هایی دیگر یائو و همکاران و همچنین بالابو و همکاران، از ماشین بردار پشتیبان برای این منظور استفاده کردند [۲۴، ۴]. از روش‌های دیگر می‌توان به پژوهش الووینی و همکاران اشاره کرد که از تئوری شهود تنها برای طبقه‌بندی نقاط مستعد خطر استفاده کردند [۲]. به‌روشی مشابه پاشا و همکاران برای محاسبه فاصله عدم قطعیت از تئوری شهود و انتروپی استفاده کردند [۱۷]. یکی از مواردی که در مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده، بررسی تأثیر عدم قطعیت یا ناهمگنی داده‌ها در لایه‌های اطلاعاتی پارامترهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش است، چرا که در نظر گرفتن ناهمگنی داده‌های مربوط به پارامترهای مؤثر، می‌تواند نتایج مورد انتظار را بهبود بخشد. یکی از تئوری‌های مطرح در زمینه عدم قطعیت، تئوری انتروپی شانون است که در سال ۱۹۴۸ مطرح شد و یکی از روش‌های بر پایه احتمالات در بسیاری از کاربردهای مکانی به‌شمار می‌رود. از این تئوری در بسیاری از مطالعات، بدون در نظر گرفتن مسئله تأثیر عدم قطعیت، تنها به‌عنوان روشی برای تلفیق داده‌ها و تهیه اندکس وقوع زمین‌لغزش استفاده شده است. در صورتی که بررسی تأثیر عدم قطعیت در نتایج، با استفاده از تئوری انتروپی شانون، از اهداف اصلی این پژوهش است.

در پژوهش‌های پیشین، داده‌های مربوط به نقاط وقوع زمین‌لغزش برای مدلسازی و تهیه نقشه ریسک زمین‌لغزش به‌کار گرفته شدند، در حالی که از دیگر اهداف این پژوهش، عدم

استفاده از داده‌ها برای مدلسازی است. این داده‌ها فقط برای ارزیابی نتایج در نظر گرفته شده‌اند. از جمله مزیت‌های برجسته این روش نسبت به سایر روش‌ها، در نظر گرفتن عدم قطعیت در نتایج است و بدین ترتیب، ذاتی بودن عدم قطعیت و محدودیت فهم انسان نسبت به دنیای اطراف را مدلسازی می‌کند.

منطقه تحقیق

حوضه آبخیز توتکابن در استان گیلان، در جنوب شهرستان رشت و شمال شرقی شهرستان رودبار قرار دارد. این حوضه در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۰ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۴۹ درجه و ۵۱ دقیقه و ۲ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه و ۴۴ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه و ۱۵ ثانیه قرار دارد. حوضه مذکور با مساحت ۴۳۰۱۱ هکتار از شمال به حوضه دیلمان، از شرق و جنوب به حوضه آبریز سیاهرود و از غرب به رودخانه سفید رود منتهی می‌شود. آبریز توتکابن متشکل از دو شهر به نام توتکابن و بره‌سر و چند روستا با جمعیت ۲۵۰ خانوار است.

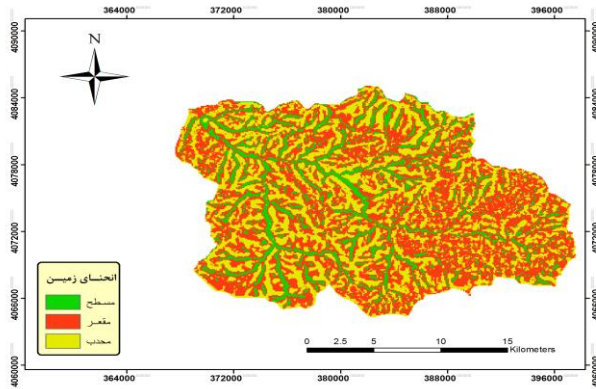


شکل ۱. منطقه تحقیق

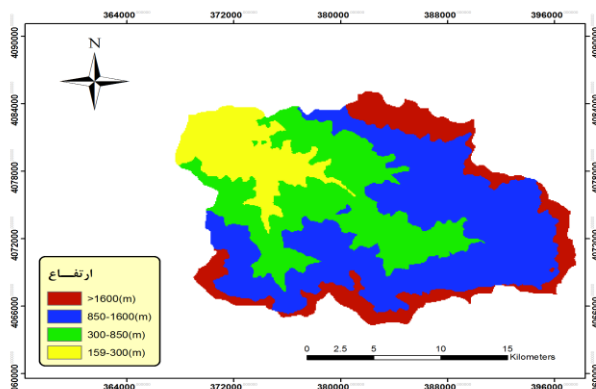
داده‌های استفاده‌شده

در این پژوهش لایه‌های اطلاعاتی مربوط به شش پارامتر مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شامل شش لایه شیب، ارتفاع، ژئومورفولوژی، انحنا، زمین، نزدیکی به رودخانه و نزدیکی به گسل‌ها تهیه شد. همچنین به منظور ارزیابی نتایج پژوهش از داده‌های مربوط به نقاط وقوع زمین‌لغزش، تحت عنوان نقشه وقوع زمین‌لغزش، استفاده شد. این نقشه شامل ۴۸ نقطه وقوع زمین‌لغزش در منطقه تحقیق است. به علاوه برای محاسبه لایه‌های شیب، ارتفاع و انحنا، زمین از نقشه مدل رقومی زمین (DEM) منطقه تحقیق استفاده شد. شکل ۲ بیانگر داده‌های استفاده‌شده

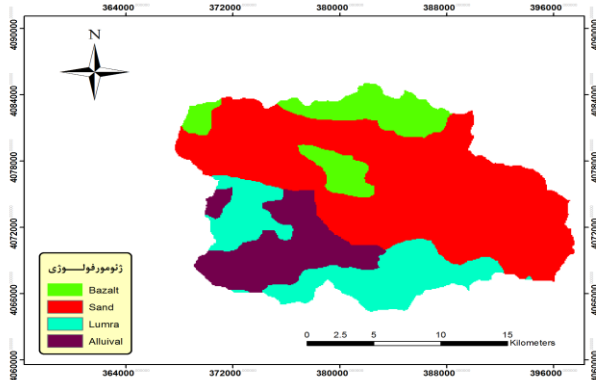
است. هر یک از این لایه‌ها بسته به حد اهمیت و شرایط منطقه در چند کلاس طبقه‌بندی شده‌اند که نتایج آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۳ بیانگر موقعیت نقاط وقوع زمین‌لغزش در منطقه تحقیق است.



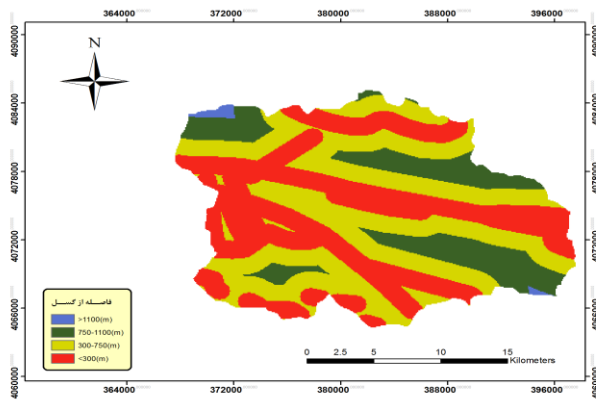
۲.الف)



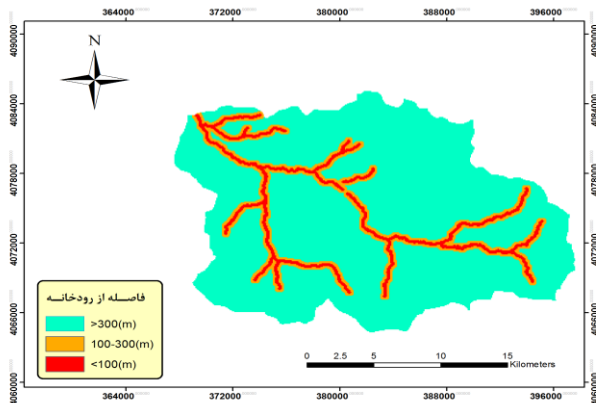
۲.ب)



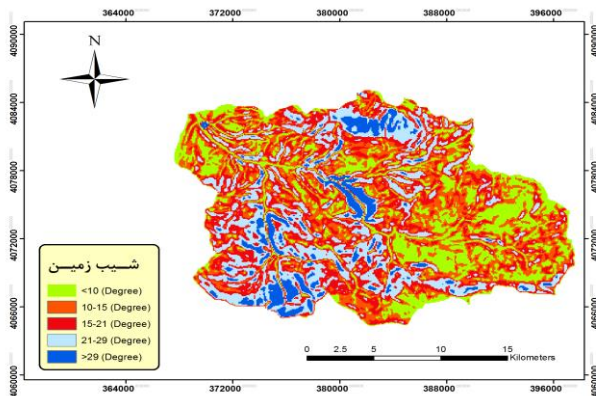
۲.ج)



(۵.۲)

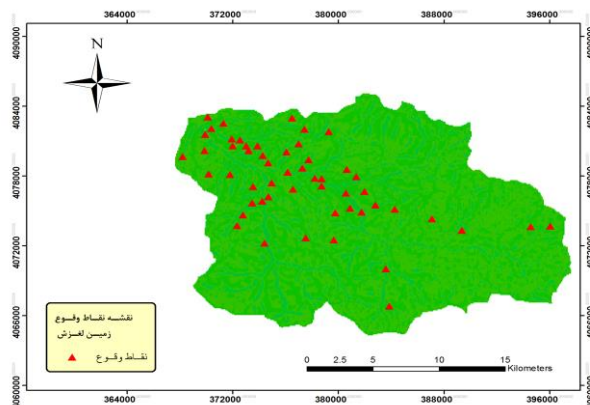


(۵.۲)



(۵.۲)

شکل ۲. لایه‌های استفاده‌شده در پژوهش: الف) انحنای زمین؛ ب) ارتفاع؛ ج) ژئومورفولوژی؛ د) فاصله از گسل؛ ه) فاصله از رودخانه؛ و) شیب زمین.



شکل ۳. موقعیت نقاط وقوع زمین‌لغزش در منطقه تحقیق

روش پژوهش

تئوری انتروپی شانون

انتروپی شانون تابعی از توزیع احتمال و معیاری برای اندازه‌گیری میزان عدم قطعیت در محتوای اطلاعات یک پارامتر است و با در نظر گرفتن فرکانس وقوع زیرگروه‌های آن پارامتر، بیانگر سطح ناهمگونی است و بدین ترتیب، تأثیر هر یک از پارامترها را بر نتایج سیستم محاسبه می‌کند.

فرض کنید $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ با تابع توزیع $p(x)$ است. انتروپی شانون به صورت رابطه

۱ تعریف می‌شود:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (1)$$

که در آن $H(X)$ بیانگر انتروپی مجموعه X است. با توجه به پیچیدگی زمین‌لغزش و تأثیر متفاوت چندین پارامتر در وقوع آن، می‌توان از تئوری انتروپی شانون برای محاسبه میزان ناهمگنی در داده‌های هر یک از پارامترهای مؤثر استفاده کرد. بدین ترتیب برای هر یک از پارامترها با توجه به سطح ناهمگنی، یک ارزش کمی به‌عنوان وزن اختصاص داده شده و در نهایت اندکس انتروپی با استفاده از وزن‌های محاسبه‌شده برای هر پارامتر، ارائه می‌شود. در این پژوهش از روابط ۲، ۳ و ۴ برای محاسبه انتروپی هر یک از پارامترها استفاده شد:

$$P_{ij} = \frac{n_j}{a} \quad (2)$$

$$E_{ij} = -(p \log_2 p) \quad (3)$$

$$E_j = \sum p \log_2 p \quad (4)$$

که در آن پارامترهای n و a به ترتیب بیانگر تعداد پلیگون‌های (پیکسل) زیر کلاس i ام از پارامتر z و تعداد کل پلیگون‌ها در منطقه تحقیق است.

نتایج و بحث

در این پژوهش ابتدا، با استفاده از روابط ارائه شده در تئوری انتروپی شانون، مقادیر انتروپی برای پارامترهای مؤثر در منطقه تحقیق محاسبه شده که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود.

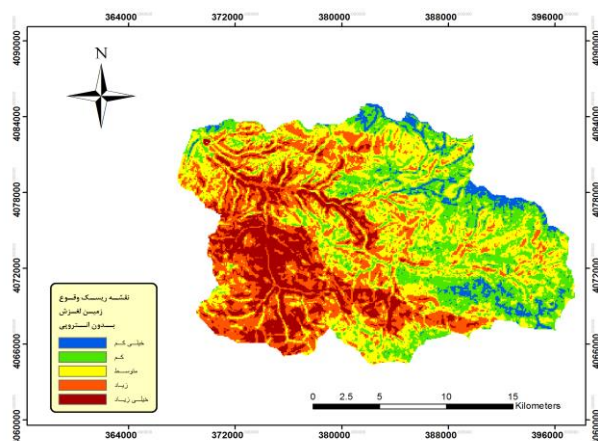
جدول ۱. مقادیر انتروپی برای پارامترهای مؤثر در منطقه تحقیق

نام پارامتر	توضیحات	شماره کلاس	n	P	E_{ij}	E_j
فاصله از رودخانه	بیشتر از ۳۰۰	۱	۵۳۸۰۱	۰/۵۹۶۱۳۳	۰/۴۴۴۸۹	۰/۸۹۰۶۸۴
	۱۰۰-۳۰۰	۲	۵۸۵۳	۰/۰۶۴۸۵۳	۰/۲۵۵۹۵۵	
	۰-۱۰۰	۳	۳۷۲۶	۰/۰۴۱۲۸۵	۰/۱۸۹۸۳۹	
شیب	۰-۱۰	۱	۱۳۷۶۲	۰/۱۵۲۴۸۸	۰/۴۱۳۷۳۵	۱/۹۱۵۳۳۲
	۱۰-۱۵	۲	۱۵۵۱۷	۰/۱۷۱۹۳۴	۰/۴۳۶۷۲۴	
	۱۵-۲۱	۳	۱۶۲۷۱	۰/۱۸۰۲۸۸	۰/۴۴۵۶۰۴	
	۲۱-۲۹	۴	۱۳۵۵۲	۰/۱۵۰۱۶۱	۰/۴۱۰۷۵۳	
	بیشتر از ۲۹	۵	۴۲۷۸	۰/۰۴۷۴۰۲	۰/۲۰۸۵۱۶	
فاصله تا گسل	بیشتر از ۱۱۰۰	۱	۴۶۲	۰/۰۰۵۱۱۹	۰/۰۳۸۹۵۶	۱/۴۴۶۷۸۶
	۷۵۰-۱۱۰۰	۲	۱۱۳۴۳	۰/۱۲۵۶۸۴	۰/۳۷۶۰۶۳	
	۳۰۰-۷۵۰	۳	۲۶۳۱۸	۰/۲۹۱۶۱۲	۰/۵۱۸۴۵۱	
	۰-۳۰۰	۴	۲۵۰۶۶	۰/۲۷۷۷۴	۰/۵۱۳۳۱۱۷	
انحنای صاف	صاف	۱	۹۵۱۶	۰/۱۰۵۴۴	۰/۳۴۲۲۰۷	۱/۳۷۵۱۵۶
	مقعر	۲	۳۰۶۶۱	۰/۳۳۹۷۳۴	۰/۵۲۹۱۴۳	
	محدب	۳	۲۳۲۰۲	۰/۲۵۷۰۸۶	۰/۵۰۳۸۰۵	
ارتفاع	بیشتر از ۱۶۰۰	۱	۹۵۷۶	۰/۱۰۶۱۰۵	۰/۳۴۳۴۰۲	۱/۶۳۶۷۰۴
	۸۵۰-۱۶۰۰	۲	۲۸۵۷۵	۰/۳۱۶۶۲	۰/۵۲۵۳۲۸	
	۳۰۰-۸۵۰	۳	۱۷۰۶۲	۰/۱۸۹۰۵۳	۰/۴۵۴۳۲	
	۱۵۹-۳۰۰	۴	۸۱۶۷	۰/۰۹۰۴۹۳	۰/۳۱۳۶۵۳	
ژئومورفولوژی	ماسه سنگ	۱	۷۲۹۷	۰/۰۸۰۸۵۳	۰/۲۹۳۳۸	۱/۵۳۱۹۱
	بازالت	۲	۳۵۰۲۵	۰/۳۸۸۰۸۹	۰/۵۲۹۹۵۱	
	لومرا دانه درشت	۳	۱۱۳۱۱	۰/۱۲۵۳۳	۰/۳۷۵۵۱۳	
	آبرفت	۴	۹۰۶۷	۰/۱۰۰۴۶۵	۰/۳۳۳۰۶۶	

مقدار a در جدول ۱ برابر با ۹۰۲۵۰ پیکسل (تعداد کل پیکسل‌های منطقه تحقیق) است. همچنین وزن‌های مرتبط با هر زیرکلاس، با توجه به حد تأثیر در وقوع زمین‌لغزش در ستون شماره کلاس قید شده است. در این جدول ستون مقادیر E_j بیانگر انتروپی هر یک از پارامترها است که مقادیر بیشتر، ناهمگونی و ناپیکنواختی داده‌ها را نشان می‌دهد. به همین ترتیب مقادیر بزرگ‌تر در ستون شماره کلاس، به میزان خطر بیشتر اشاره می‌کند. در مرحله بعد، به منظور بررسی تأثیر عدم قطعیت در نتایج که یکی از اهداف این پژوهش است، ابتدا نقشه ریسک وقوع زمین‌لغزش بدون در نظر گرفتن مقادیر انتروپی پارامترها تهیه می‌شود. در این حالت مقدار وزن‌های هر پیکسل در لایه‌های اطلاعاتی پارامترهای مؤثر (شماره کلاس مربوط به هر پیکسل)، به عنوان مقدار آن پیکسل بوده و با استفاده از ابزار تلفیق لایه‌ها در علم سیستم‌های اطلاعات مکانی، مقادیر هر پیکسل در لایه‌های مختلف با یکدیگر جمع می‌شوند و ضریب انتروپی به پیکسل‌ها اعمال نمی‌شود. بدین ترتیب نقشه مورد نظر، تنها با در نظر گرفتن مقداری عددی به عنوان وزن برای پیکسل‌های هر یک از زیرکلاس‌ها در لایه‌های مؤثر تهیه می‌شود. رابطه ۵ اندکس ریسک زمین‌لغزش را برای هر پیکسل نشان می‌دهد.

$$RW = \sum W_j \quad (5)$$

در رابطه ۵ پارامتر RW بیانگر مقدار ریسک به دست آمده برای پیکسل مورد نظر است و مقدار وزن هر پیکسل در زیرکلاس‌های پارامترهای مؤثر به صورت W_j نشان داده شده است. نقشه ریسک زمین‌لغزش بدون در نظر گرفتن انتروپی در شکل ۴ ملاحظه می‌شود.

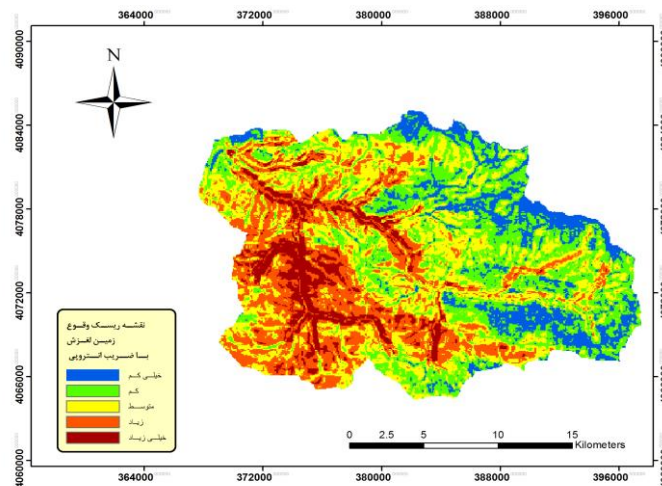


شکل ۴. نقشه ریسک وقوع زمین‌لغزش بدون در نظر گرفتن انتروپی

در ادامه به منظور اعمال عدم قطعیت، از انتروپی هر یک از پارامترها به عنوان ضریب وزن استفاده شده و اندکس انتروپی برای وقوع زمین لغزش به صورت رابطه ۶ ارائه می شود.

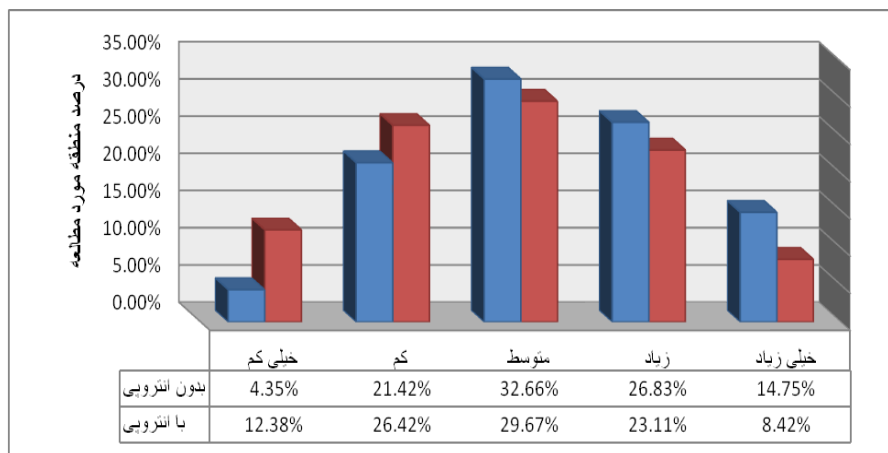
$$RV_e = \sum E_j * W_j \quad (6)$$

پارامتر RW_e در رابطه ۶ بیانگر مقدار ریسک به دست آمده برای پیکسل مورد نظر با در نظر گرفتن ضریب انتروپی برای آن پیکسل است. پارامترهای E_j نشان دهنده ضریب انتروپی محاسبه شده برای هر یک از پارامترها و ارائه شده در جدول ۱ است. همچنین پارامتر W_j بیانگر وزن تخصیص داده شده به هر یک از زیرکلاس های پارامترهای مؤثر است که در جدول ۱ ملاحظه می شود. در نهایت با اعمال این ضرایب به پارامترهای مؤثر، نقشه وقوع زمین لغزش تهیه شد که در شکل ۵ مشاهده می شود. البته شایان ذکر است که به دلیل ناممکن بودن وقوع زمین لغزش در شیب های کمتر از ۱ درصد، این نقاط شناسایی شد و احتمال وقوع برای آنها صفر در نظر گرفته شد. برای کاهش خطای مدلسازی این نقاط در کلاس خطر بسیار کم قرار گرفتند.



شکل ۵. نقشه ریسک وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن ضریب انتروپی

در هر دو نقشه، منطقه تحقیق از لحاظ ریسک زمین لغزش در ۵ کلاس خطر ارائه شده است. به منظور مقایسه نتایج این دو حالت، تعداد پیکسل های هر کلاس خطر در دو نقشه بالا در شکل ۶ ملاحظه می شود.



شکل ۶. نمودار میله‌ای، بیانگر تغییرات کلاس‌های خطر در دو حالت با انتروپی و بدون انتروپی

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، درصد منطقه خطر خیلی کم در حالت بدون انتروپی ۴/۳۵ بوده است که با اعمال انتروپی پارامترهای مؤثر به ۱۲/۳۸ افزایش یافته است. همچنین این افزایش در مورد کلاس خطر کم نیز مشابه بوده و از ۲۱/۴۲ درصد به ۲۶/۴۲ درصد افزایش یافته است. اما این روند در مورد سایر کلاس‌های خطر برعکس است، به طوری که در کلاس خطر متوسط و زیاد به ترتیب ۲/۹۹ و ۳/۷۲ درصد کاهش، و در کلاس خطر خیلی زیاد ۶/۳۳ درصد کاهش یافته است. این تغییرات در ارتباط با مقادیر انتروپی به دست آمده برای پارامترهای مؤثر است. بدین ترتیب که انتروپی پارامتر ارتفاع برابر با ۱/۶۳ است که مقدار به نسبت زیادی است و با توجه به تأثیر معکوس ارتفاع بر وقوع زمین‌لغزش، یکی از عوامل کاهش، درصد مساحت کلاس با خطر زیاد و خیلی زیاد است. همچنین انتروپی پارامتر شیب دارای بیشترین مقدار است و با توجه به رابطه مستقیم تأثیر شیب بر وقوع زمین‌لغزش، با افزایش شیب، مساحت منطقه کلاس خطر خیلی زیاد و زیاد، کاهش می‌یابد. این موضوع در مورد افزایش مساحت کلاس‌های خطر کم و خیلی کم نیز صدق می‌کند، چراکه افزایش شیب سبب افزایش مستقیم مساحت این دو کلاس کم‌خطر خواهد شد. زیرا مساحت شیب‌های متوسط در منطقه بیشتر از مساحت مناطق با شیب خیلی کم است. نتایج بررسی نقاط زمین‌لغزش در کلاس‌های خطر هر یک از روش‌ها، در جدول‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود.

جدول ۲. تراکم زمین لغزش با در نظر گرفتن انتروپی

تراکم زمین لغزش	تعداد زمین لغزش	درصد مساحت کلاس خطر	تعداد پیکسل ها	نام کلاس خطر
۱	۶	۱۲/۳۸	۷۷۳۲	خیلی کم
۰/۸۷	۱۱	۲۶/۴۲	۱۶۵۰۶	کم
۰/۶۳	۹	۲۹/۶۷	۱۸۵۳۵	متوسط
۰/۸۱	۹	۲۳/۱۱	۱۴۴۳۴	زیاد
۳/۳۱	۱۳	۸/۴۲	۵۲۶۱	خیلی زیاد

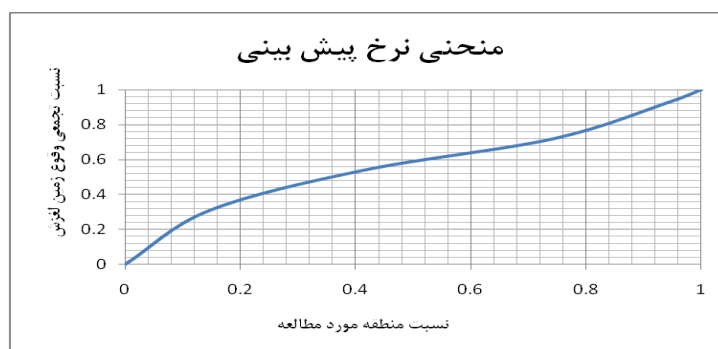
جدول ۳. تراکم زمین لغزش بدون در نظر گرفتن انتروپی

تراکم زمین لغزش	تعداد زمین لغزش	درصد مساحت کلاس خطر	تعداد پیکسل ها	نام کلاس خطر
۱/۴۳	۳	۴/۳۵	۲۷۱۹	کم
۰/۹۷۳	۱۰	۲۱/۴۲	۱۳۳۷۹	متوسط
۰/۵۷	۹	۲۳/۶۶	۲۰۳۹۹	زیاد
۰/۸۵	۱۱	۲۶/۸۳	۱۶۷۵۹	خیلی زیاد
۲/۱۱	۱۵	۱۴/۷۵	۹۲۱۲	کم

نتایج این جدول بیانگر این است که تراکم زمین لغزش در کلاس خطر بسیار زیاد به صورت چشمگیری افزایش یافته است. این افزایش در کنار کاهش مساحت این کلاس خطر از ۱۴/۷۵ درصد به ۸/۴۲ درصد است که مبین افزایش دقت در شناسایی مناطق پرخطر و تخصیص اولویت برای مناطقی است که خطر وقوع در آنها در بیشترین حد است. به طوری که مشاهده می شود با وجود کاهش ۴۰ درصدی مساحت در این کلاس خطر، تعداد نقاط وقوع زمین لغزش از ۱۵ به ۱۳ کاهش یافته است که معادل ۱۲ درصد کاهش است و در برابر کاهش ۴۰ درصدی مساحت بسیار اندک است. این موضوع از نتایج مورد انتظار پس از اعمال انتروپی در این پژوهش بوده است. همچنین در کلاس خطر زیاد، تراکم زمین لغزش از ۰/۸۵ به ۰/۸۱ کاهش یافته است که البته این کاهش تراکم برای این کلاس نتیجه ای دور از انتظار نیست، چراکه با توجه به عدم کاهش چشمگیر مساحت این کلاس و افزایش تراکم این نقاط در کلاس خطر خیلی زیاد و همچنین ثابت بودن تعداد نقاط وقوع زمین لغزش، این موضوع پیش بینی می شد. در مورد کلاس خطر متوسط، تراکم از ۰/۵۷ به ۰/۶۳ افزایش یافت. در سایر کلاس ها تغییرات زیادی مشاهده نمی شود، به طوری که بیشترین تغییر مربوط به کلاس خطر بسیار کم است که تراکم زمین لغزش در آن با

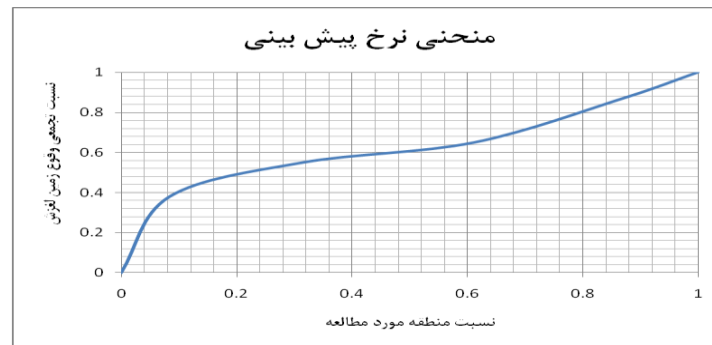
اعمال انتروپی از $1/43$ به 1 کاهش یافته است. در این پژوهش تأکید اصلی بر تغییرات کلاس‌های خطر خیلی زیاد و زیاد است که در برگرفته‌ی مناطقی با بیشترین احتمال وقوع زمین‌لغزش است که در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های مدیریت بحران از اهمیت زیادی برخوردارند. به‌طور کلی تغییرات مذکور در تراکم زمین‌لغزش ناشی از اعمال انتروپی در پارامترهای مؤثر است و با توجه به نتایج می‌توان به اهمیت انتروپی در خروجی‌های مورد انتظار پی‌برد.

یکی دیگر از ابزارهای ارزیابی نتایج پیش‌بینی، منحنی نرخ پیش‌بینی^۱ است، که در بسیاری از مطالعات پیشین استفاده شده است. در محور افقی این نمودار درصد مساحت کلاس‌های خطر به‌صورت تجمعی و در محور عمودی درصد نقاط وقوع زمین‌لغزش در کلاس‌های خطر به‌صورت تجمعی ارائه شده است. مساحت زیر این منحنی (AUC) بیانگر دقت کلاسه‌بندی و نتایج پژوهش است که در شکل‌های ۷ و ۸ به‌ترتیب برای دو حالت قبل و بعد از اعمال انتروپی مشاهده می‌شوند. مساحت زیرمنحنی این نمودارها به‌ترتیب برابر $0/54$ و $0/69$ برای قبل و بعد از اعمال انتروپی است. همان‌طور که در این نمودارها ملاحظه می‌شود، این افزایش مساحت بیشتر در قسمت شروع منحنی است که مربوط به کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد است که بی‌تردید برای شناسایی مناطق پرخطر، بیشترین اولویت را دارند. بدین ترتیب نتایج پژوهش بیانگر دقت 69 درصد برای حالت پس از اعمال انتروپی است که با توجه به محدود بودن نقاط وقوع زمین‌لغزش، دقتی پذیرفتنی است. همچنین اختلاف دقت حالت قبل و بعد از اعمال انتروپی 15 درصد است که مقدار چشمگیری بوده و نشان‌دهنده تأثیر زیاد عدم قطعیت و کارایی مناسب روش انتروپی شانون در بهبود نتایج است.



شکل ۷. منحنی نرخ پیش‌بینی بدون در نظر گرفتن انتروپی

1. Prediction Rate Curve



شکل ۸. منحنی نرخ پیش‌بینی با در نظر گرفتن انترویی

نتیجه‌گیری

با توجه به نگرانی‌های مطرح در زمینه وقوع زمین‌لغزش و آثار مخرب آن، شناسایی مناطق مستعد وقوع این حادثه اهمیت فراوانی دارد. از طرفی نمی‌توان از تأثیر عدم قطعیت در لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده و نتایج مورد انتظار چشم‌پوشید. در پژوهش حاضر به‌منظور تهیه نقشه ریسک وقوع زمین‌لغزش و همچنین بررسی تأثیر عدم قطعیت و ناهمگنی لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده بر نتایج، از تئوری انترویی شانون استفاده شد. این در حالی است که در مطالعات پیشین، این روش تنها به‌عنوان ابزار مدلسازی و تهیه اندکس وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته شده است. در این پژوهش ابتدا وزن پارامترهای مربوط به وقوع زمین‌لغزش بدون در نظر گرفتن انترویی شانون و با استفاده از کلاس خطر محاسبه شد و در ادامه مقدار انترویی برای هر یک از پارامترها محاسبه و در وزن پارامترها تأثیر داده شد. مقایسه نتایج مربوط به دو حالت مذکور، بیانگر تأثیر استفاده از تئوری انترویی شانون در بهبود نتایج پژوهش است. بدین ترتیب که میزان عدم قطعیت در نتایج نهایی در نظر گرفته می‌شود و دقت کلاس‌های خطر برای تعیین ریسک وقوع زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. از نتایج این پژوهش می‌توان در تصمیم‌گیری و مدیریت کاربری زمین و همچنین طراحی برنامه‌ریزی شهری استفاده کرد.

منابع

- [1].Akgun, Aykut. (2011). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at Izmir, Turkey. Landslides. Article on-line first available. doi:10.1007/s10346-011-0283-7.

- [2]. Althuwaynee, Omarl Pradhan Biswajeet., Lee Sung. (2012). Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, 44 (120–135).
- [3]. Bui, Dieu; Tien, Lofman; Owe, Revhaug; Inge, Dick, Oystein. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*. 59 (3), 1413–1444.
- [4]. Ballabio, Cristiano; Sterlacchini, Simone. (2012). Support vector machines for landslide susceptibility mapping: the Staffora River Basin case study, Italy. *Mathematical Geosciences*. 1–24.
- [5]. Chauhan, Shivani; Sharma, Mukta.; Arora, M. K. (2010). Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Land-slides*. 7, 411–423.
- [6]. Caniani, Donatella; Pascale, Stefania; Sdao, Francesco; Sole, Aurelia. (2008). Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards*. 45(1), 55–72.
- [7]. Dahal, Ranjan kumar; Hasegawa, Suichi; Nonomura, Atsuko; Yamanaka, Minoru; Masuda, Takuro; and Nishino Katsuhiko. (2008). GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping, *Environ Geol*. 54:311–324.
- [8]. Devkota, Krishna; Chandra Regmi, Amar, Deep; Pourghasemi, Hamid. Reza; Yoshida Kohki, Pradhan, Biswajeet, Ryu, In. Chang; Dhital, Megh. Raj; and Althuwaynee, Omar. 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.
- [9]. Ermini, Leonardo; Catani, Filippo; Casagli, Nicola. (2005). Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*. 66 (1–4), 327–343.
- [10]. Felicísimo, Angel; Cuartero, Aurora; Remondo Juan; and Quirós, Elia. (2012). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study, *Landslides*. 10:175–189.
- [11]. Gomez, Hector ; Kavzoglu, Taskin. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*. 78 (1–2). 11–27.
- [12]. Kayastha, Prabin; Dhital, Megh Raj; De Smedt, Florimond . (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal, *Computers & Geosciences*, 52:398–408.
- [13]. Lallianthanga, R.K.; Lalbiakmawia F; and Lalramchuana, F. (2013). landslide hazard zonation of mamit town, mizoram, india using remote sensing and gis techniques, *International journal of geology, earth and environmental sciences*, 3 (1), 184–194.

- [14]. Ozdemir, Adnan. (2011). Landslide susceptibility mapping using Bayesian approach in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey), *Nat Hazards*. 59:1573–1607.
- [15]. Pourghasemi Hamid. Reza; Mohammady Majid; Pradhan, Biswajeet. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran, *Catena*. 97: 71 –84.
- [16]. Pradhan, Biswajeet. (2010). Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38, 301–320.
- [17]. Pasha E; Mostafavi H; Khalaj M; Khalaj F. (2013). Calculate the Uncertainty Interval Based on Entropy and Dempster Shafer Theory of Evidence, *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 24: 215-223.
- [18]. Quan, He-Chun; Lee, Byung-Gul. (2012). GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Analytic Hierarchy Process and Artificial Neural Network in Jeju (Korea), *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(7):1258-1266.
- [19]. Sharma, L. P; Patel, Nilanchal; Ghose M. K; and Debnat P. (2012). Influence of Shannon's entropy on landslide-causing parameters for vulnerability study and zonation — a case study in Sikkim, India, *Arab J Geosci*. 5:421– 431.
- [20]. Shafer, Glenn. (1976). *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University. Press 297 pp.
- [21]. Wu, Yiping; Chen, Lixia; Cheng, Cong, Yin; Kunlong, T'or'ok, 'A. (2014). GIS-based landslide hazard predicting system and its real-time test during a typhoon, Zhejiang Province, Southeast China, *Engineering Geology*. doi: 10.1016/j.enggeo.03.005.
- [22]. Wu, Xueling; F, Ruiqing Niu; Ling Peng, Ren. (2013). Landslide susceptibility mapping using rough sets and back-propagation neural networks in the Three Gorges, China, *Environmental Earth Sciences*, doi 10.1007/s12665-013-2217-2.
- [23]. Yılmaz, lion. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey), *Computers & Geosciences*, 35 (6), 1125–1138.
- [24]. Yao, X; Tham, L.G; Dai, Fuchu. (2008). Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology* 101, 572–582.