

# پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش‌های آنتروپی و وزن شاهد (مطالعه موردی: منطقه دو آب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری)

معصومه منصوری<sup>۱</sup> و گورش شیرانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

## چکیده

در این مطالعه دو مدل دو منفرجه شامل وزن شاهد (Woe) و شاخص آنتروپی (IOE)، برای شناسایی مناطق دارای خطر زمین‌لغزش منطقه دو آب صمصامی مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور ده لایه عامل شامل شیب، سوی شیب، میزان بارش، شتاب نقل افقی زمین لرزه، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از نقاط شهری و روستایی، سنگ‌شناسی و کاربری زمین انتخاب شد. نقشه پراکنش لغزش‌ها با استفاده از لغزش‌های ثبت شده، تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و مشاهدات صحرایی تهیه شده است. نقشه خطر لغزش با استفاده از وزن به دست آمده توسط هر مدل و نرم‌افزار ArcGIS تهیه و برای ارزیابی آنها از شاخص سطح سولوست (SCAI) و سطح زیر منحنی (AUC) ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) استفاده شد. نتایج به دست آمده برآورد خوبی از خطر لغزش در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد؛ به طوری که سنگ‌شناسی، بارش و کاربری زمین نقش مهمی در ایجاد لغزش‌ها در منطقه دارند و به طور کلی هر دو مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مناسب بوده است. فرایند اعتبارسنجی با استفاده از ۳۰ درصد نقاط لغزشی نشان داد که مقدار سطح زیر منحنی ROC در روش وزن شاهد برابر با (۰/۷۹) بوده و نسبت به روش شاخص آنتروپی با سطح زیر منحنی (۰/۷۳) پیش‌بینی بهتری در رخداد زمین‌لغزش‌ها داشته است. نقشه‌های حاصل می‌تواند برای برنامه‌ریزی مکانی و کاربری زمین مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** زمین‌لغزش، پهنه‌بندی خطر، وزن شاهد، شاخص آنتروپی، دو آب صمصامی.

**نویسنده مسئول:** گورش شیرانی

E-mail: k\_sh424@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

بیزین را در یک شکل لگاریتمی خطی با استفاده از احتمال اولیه و ثانویه بیان می‌کند (شیرانی، در دست چاپ). این روش در مواردی که داده‌های کافی به منظور برآورد اهمیت نسبی شواهد با استفاده از روش‌های آماری در دسترس باشد، استفاده می‌شود. همچنین ارتباط مکانی میان موضوعات شاهد و مکان زمین‌لغزش‌های شناخته شده که به عنوان وزن شاهد بیان می‌شود، برای به دست آوردن احتمال بعدی رخداد زمین‌لغزش با توجه به احتمال اولیه رخداد آن ارزیابی می‌شود (Mathew et al., 2007). مدل‌سازی کلاسیک بیزین دارای معایبی از جمله در نظر نگرفتن حلقه‌های بازخورد در منفرجه‌های سامانه است؛ برای مثال تأثیر یک متغیر به صورت برگشتی به سوی متغیر پیش‌بینی‌کننده قابل بررسی نیست (شهابی و سعدالدین، ۱۳۸۸). مزایای استفاده از مدل وزن شاهد مانند امکان استفاده از داده‌های کمی و کیفی متغیر در سیستم‌های پیچیده همچنین توان بالای آن در نمایش تصویری منفرجه‌ها و روابط میان آنها در یک سامانه، زمینه مطالعات بسیاری را توسط پژوهشگران سراسر دنیا (Mathew et al., 2007; Mohammady et al., 2012; Pourghasemi et al., 2013; Regni et al., 2010; Xu et al., 2012; Zhu and Wang, 2009) در دهه اخیر فراهم کرده است.

آنتروپی در حقیقت بیانگر آن است که چگونه از بین عوامل مؤثر یک هدف می‌توان مهم‌ترین عوامل را برآورد کرد یا به عبارت دیگر متغیرهایی که بیشترین تأثیر را در رخداد یک پدیده دارند، برای ما مشخص می‌کند. از آنجایی که در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش بسته به شرایط منطقه، معمولاً عامل‌های مختلفی تأثیرگذار است و همچنین در تعیین میزان خطر با استفاده از مدل‌های آماری دو منفرجه و احتمالاتی مانند بیزین، همه عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش وزن یکسانی دارند؛ بنابراین چنانچه یکی از عوامل تأثیر بیشتری داشته باشد، میزان اثر آن نادیده گرفته می‌شود. بنابراین مدل شاخص آنتروپی (Index of entropy) می‌تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر بسیاری در شناسایی عوامل مؤثر و میزان تأثیرگذاری آنها داشته باشد (شیرانی، در دست چاپ؛ پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۲). در این زمینه می‌توان به مطالعات مقبسی و همکاران (۱۳۹۱)، پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۲) و (Pourghasemi et al., 2012) در ایران و (Yang and Qiao (2010) و (Altharwaynee et al (2012) و (Devkota et al. (2013) در دیگر مناطق جهان اشاره کرد.

رانش زمین یکی از گسترده‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی در نواحی کوهستانی است (شیرانی و همکاران، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴). مطالعه لغزش‌ها به دلیل افزایش آگاهی از اثرات اجتماعی و اقتصادی آنها و همچنین افزایش شهرها در مناطق کوهستانی مورد توجه قرار گرفته است. بر پایه آمار مرکز تحقیقات ایدمولوژی بلایا، لغزش‌ها مسبب دست کم ۱۷ درصد مرگ و میر ناشی از بلایای طبیعی در سراسر جهان هستند و پیش‌بینی می‌شود که این روند با توجه به افزایش روزافزون شهرنشینی و جنگل‌زدایی و نیز افزایش بارندگی به دلیل تغییرات اقلیمی در نواحی مستعد لغزش ادامه یابد (Goetz et al., 2011). در جهان امروز یکی از ارکان مهم توسعه اقتصادی، جاده‌ها با سازه‌های خطی با بازدهی مناسب هستند که به دلیل طولانی بودن و عبور از مناطق با ویژگی‌های زمین‌شناسی متفاوت، بیشتر از سازه‌های متمرکز، تحت تأثیر مخاطرات محیطی قرار می‌گیرند و موجب خسارات جانی و مالی زیادی می‌شوند. این خسارت‌ها به دلیل حذف پابی توجهی به متغیرهای زمین‌شناختی و زمین‌ریخت‌شناختی مؤثر بر این سازه‌ها هنگام انتخاب مسیر یا رعایت نکردن حریم آنهاست. در سال‌های گذشته مدیریت و نگهداری راه‌ها به حرفه‌ای تخصصی تبدیل شده است و در این راستا پهنه‌بندی مخاطرات احتمالی و شناسایی مناطق پرخطر ضرورت یافته است (روستایی و احمدزاده، ۱۳۹۱).

برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تاکنون مطالعات زیادی انجام شده است و پژوهشگران با استفاده از روش‌های مختلف رده‌بندی‌های بسیاری ارائه داده‌اند؛ اما بر پایه وضعیت منطقه مورد مطالعه، دقت و انعطاف هر یک از این روش‌ها متفاوت خواهد بود. بنابراین برای شناخت مناطق دارای پتانسیل لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر باید بهترین و دقیق‌ترین روش را با توجه به عوامل مؤثر در رخداد و وضعیت منطقه انتخاب کرد (Shirani, 2004). تاکنون پژوهش‌های بسیاری در داخل و خارج کشور در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش انجام شده است که بیشتر شامل بهره‌گیری از روش‌های احتمالاتی (شیرانی، در دست چاپ؛ Clerici et al., 2006; Akgun et al., 2008; Lee and Pradhan, 2006; Pourghasemi et al., 2012) است. همه این مدل‌ها راهکارهایی برای یکپارچه‌سازی اطلاعات و نقشه خروجی ارائه می‌دهند. مدل وزن شاهد (Weight of evidence) یک روش داده‌محور است که رویکرد

کاربری زمین، شیب، سنگ‌شناسی، سوی شیب، میزان بارش، شتاب گرانی افقی زمین‌لرزه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و فاصله از نقاط شهری و روستایی برای هر دو روش به صورت یکسان انتخاب و بررسی شد. هر یک از این عوامل به رده‌های مختلف تقسیم شد و در مجموع ۴۰ متغیر برای انجام پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به دست آمد.

نقشه عوامل مؤثر با بهره‌گیری از نقشه توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ منطقه، نقشه‌های تدقیق‌شده زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰، لایه رقوم زمین‌شناسی ایران، تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و SAS planet، مطالعات انجام شده طی طرح‌های پیشین در منطقه و در مناطق مشابه، در محیط Arc GIS تهیه شد. گفتمانی است که به منظور بهنجارسازی تفاوت دقت مقیاس نقشه‌های عامل اولیه، لایه‌های اطلاعاتی پس از رقوم شدن، با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS به لایه‌های رستری با اندازه پیکسلی ۲۰×۲۰ (برای دقت بیشتر) تبدیل شدند و با رده‌بندی این لایه‌های رستری و اندازه‌گیری میزان پراکنش لغزش‌ها در هر لایه، ورودی‌های لازم برای پهنه‌بندی به روش‌های مختلف فراهم شده است (شکل ۳). به منظور تهیه مدل رقوم ارتفاع (DEM)، نقشه شیب، سوی شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، کاربری زمین و طبقات مربوط به آنها از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ شهرکرد استفاده شده است. نقشه‌های سنگ‌شناسی و فاصله از گسل بر پایه نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ برکه بابا حیدر، رقوم و وارد محیط ArcGIS شد. به دلیل گوناگونی در جنس و سازندهای زمین‌شناسی، منطقه از دید سنگ‌شناسی به چهار دسته، از حساسیت زیاد تا کم نسبت به زمین‌لغزش تقسیم شد. نقشه شتاب گرانی افقی زمین‌لرزه با برش این منطقه از نقشه تهیه شده برای منطقه سیرم با شعاع ۱۵۰ کیلومتر و نقشه هم‌بارش با توجه به میزان و شدت بالای بارندگی در منطقه به عنوان یکی از متغیرهای مهم برای پهنه‌بندی با استفاده از آمار ۲۰ ساله بارندگی در محدوده مورد بررسی و استفاده از روش کربجنگ ساده (Simple kriging) با سه مؤلفه همبستگی مکانی ۱/۵۸، روند ۲۱۱۶۹۸/۹ و خطای تصادفی ۰/۰۱ برای نیمه پراش نگار تجربی (Experimental semivariogram) آن در محیط Arc GIS به دست آمده است.

#### ۲-۴ روش‌ها

– **کاربرد مدل‌های احتمالاتی:** در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران از روش‌های تجربی که کم و بیش بر پایه نظریه احتمال وابسته (Bayes theorem) هستند؛ برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش استفاده می‌کنند. در این چارچوب، احتمال وابسته، اندازه‌گیری درست یا اشتباه بودن یک فرضیه با توجه به شواهد موجود است.

شبکه‌های بیزین به نام شبکه‌های تصمیم، شبکه‌های تصادفی و نمودارهای تأثیر نیز شناخته می‌شوند. به طور کلی تئوری بیزین را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P(A|B) = (P(B|A) \times P(A)) / P(B) \quad (1)$$

که در آن P(A) احتمال رخداد پیشامد A، P(B) احتمال رخداد پیشامد B، P(B|A) احتمال رخداد پیشامد B به شرطی که پیشامد A رخ داده باشد و P(A|B) احتمال رخداد پیشامد A به شرطی که پیشامد B رخ داده باشد (Pourghasemi et al., 2012).

**مدل وزن شاهد:** این روش شامل کاهش هر مجموعه از عوامل مربوط به لغزش روی نقشه، به الگویی از چند موقعیت گسسته است. ساده‌ترین شکل برای یک عارضه الگویی دوتایی است که نشان‌دهنده بود یا نبود آن در یک پیکسل است.

در واقع روش وزن شاهد، روابط مکانی میان عوارض و نقشه‌های موضوعی مؤثر در رخداد ناپایداری‌ها را ترکیب می‌کند. برای هر نقشه موضوعی (مثلاً نوع خاک، وزن برای هر رده (رس، ماسه و غیره) به دست می‌آید (شکل ۴) و بر این اساس نقشه وزنی و سپس با جمع جبری همه نقشه‌های وزنی، نقشه خطر زمین‌لغزش تهیه می‌شود.  $w_i^+$  و  $w_i^-$  که احتمالات شرطی را ترکیب می‌کنند به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$w_i^+ = \log_2 [P(B_i | S) / P(B_i | \bar{S})] \quad (2)$$

$$w_i^- = \log_2 [P(\bar{B}_i | S) / P(\bar{B}_i | \bar{S})] \quad (3)$$

که در آن  $w_i^+$  و  $w_i^-$  به ترتیب وزن مثبت و وزن منفی، S احتمال ثانویه رخداد

ویژگی‌های کوهستانی، زمین‌ساخت فعال منطقه، زمین‌شناسی و اقلیم گوناگون، کمربند فعال کوهستانی زاگرس و به‌ویژه منطقه دوآب صمصامی را مستعد رخداد انواع مختلف لغزش می‌کند (شیرانی و سیف، ۱۳۹۱؛ شیرانی و همکاران، ۱۳۹۱، شیرانی و همکاران، ۱۳۹۲). افزون بر این بیش از ۸۰ درصد لغزش‌ها نیز در مسیر جاده‌های اصلی و فرعی به‌ویژه دو راه ارتباطی شهرکرد - مسجدسلیمان و شهرکرد ایذه است. به منظور تعیین پتانسیل روش‌های احتمالاتی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه دوآب صمصامی و همچنین ارائه روشی مناسب برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های این منطقه با توجه به پیشینه مطالعاتی پهنه‌بندی خطر برای مناطق مشابه، سادگی اجرای مراحل پردازش و محاسبات با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS، دو روش وزن شاهد و شاخص آنتروپی انتخاب و نتایج حاصل از این روش‌ها ارزیابی و مقایسه شده است. انتظار می‌رود که بر پایه این نتایج، بهترین روش پهنه‌بندی برای گزینش و مکان‌یابی مناسب برای ساخت ابنه صحرایی، برنامه‌ریزی‌های مکانی و کاربری زمین تعیین شود و با شناسایی این مناطق اقدامات اجرایی برای کنترل در منطقه، سمت و سویی منطقی یابد و از اتلاف انرژی و سرمایه جلوگیری شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱. موقعیت جغرافیایی

منطقه مورد مطالعه در باختر استان چهارمحال و بختیاری، در شهرستان کوهرنگ و بخشی از شهرستان اردل میان طول‌های جغرافیایی "۲۹' ۱۰' ۵۰" تا "۳۳' ۲۶' ۵۰" خاوری و عرض‌های "۴' ۲۰' ۳۲" تا "۴۳' ۱۴' ۳۲" شمالی با مرکزیت حوضه آبخیز دوآب صمصامی جای گرفته است (شکل ۱). اصلی‌ترین راه‌های دسترسی به منطقه دو جاده اصلی شهرکرد - مسجد سلیمان و شهرکرد ایذه است. شیب میانگین حوضه ۱۷ درجه و ارتفاع میانگین آن ۲۵۵۳ متر از سطح دریا و میانگین بارندگی ۸۵۰ میلی‌متر در سال است. بلندترین ارتفاع در این منطقه ۴۲۲۱ متر و ضریب برف‌گیری ارتفاعات در سال‌های مختلف میان ۳۴ تا ۵۹ درصد متفاوت بوده است.

### ۲-۲. نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها

به نقشه درآوردن زمین‌لغزش‌های کهن و جدید منطقه، پایه کار و تهیه نقشه پهنه‌بندی است. برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه، زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه در این پژوهش به صورت زیر شناسایی شده‌اند:

(۱) **پورسی و مطالعه عکس‌های هوایی:** در این مرحله با کمک عکس‌های هوایی منطقه در مقیاس‌های ۱/۲۰۰۰۰ و ۱/۴۰۰۰۰، لغزش‌های قابل تشخیص در آنها برداشت شده‌اند.

(۲) **مطالعات و برداشت‌های صحرایی:** در این مرحله از مطالعات با استفاده از GPS، زمین‌لغزش‌های دیده شده در روی زمین برداشت شده‌اند. از سوی دیگر برای تصدیق وجود و ابعاد زمین‌لغزش‌های برداشت شده توسط عکس‌های هوایی، این لغزش‌ها مورد بازدید قرار گرفته و با استفاده از تکمیل فرم‌های چهارصفحه‌ای ثبت شده‌اند.

(۳) **پورسی عکس‌های ماهواره‌ای:** از آنجایی که بسیاری از زمین‌لغزش‌ها به دلیل قرار گرفتن در مناطق دشوارگذر و دیده نشدن در عکس‌های هوایی، قابل مطالعه نمی‌باشد، منطقه مورد مطالعه با کمک تصاویر اینتیک Google Earth با وضوح و قدرت تفکیک قابل قبول، بررسی شده است.

بر پایه نقشه پراکنش زمین‌لغزش تهیه شده برای منطقه دوآب صمصامی، ۲۹۱ زمین‌لغزش بزرگ و کوچک در منطقه به مساحت ۱۰/۶۶ کیلومتر مربع، شناسایی شده است (شکل ۲).

### ۲-۳. متغیرهای مؤثر بر ناپایداری

نقشه خطر لغزش با مجموعه‌ای از عوامل با بازتابی زیاد محلی مانند خطواره‌ها، عوامل طبیعی (سنگ‌شناسی و شیب)، عوامل مصنوعی (جاده‌ها و دیگر سازه‌های صحرایی)، عوامل محرک (زمین‌لرزه، بارش و ...) مشخص می‌شود. بر پایه موقعیت و ربحث‌شناسی منطقه، بررسی‌های میدانی، مرور مطالعات انجام شده در مناطق مشابه، نقشه‌های موضوعی موجود و همچنین روش‌های پهنه‌بندی مورد استفاده ۱۰ عامل

لغزش،  $B_1$  و  $\bar{B}_1$  بود با نبود لغزش در یک پیکسل از نقشه عامل است. به طور کلی ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش: ارزیابی، یک گام بنیادین در توسعه  $[P(B_i | S) / P(B_i | \bar{S})]$  رانج کفایت (LS) و  $[P(\bar{B}_i | S) / P(\bar{B}_i | \bar{S})]$  رانج و تعیین کیفیت نقشه پهنه‌بندی خطر است. در این مرحله با تلافی نقشه پراکتش ضرورت (LN) می‌نامند.

به منظور درک هر چه بهتر رابطه‌های ۲ و ۳ و آسانی کار، به‌ویژه در محیط GIS، بهره‌گیری از شاخص سطح سلول هسته (Seed Cell Area Index) و سطح زیر مدل بر پایه جدول ۱ و به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ ارائه می‌شود و در پایان وزن پایان برمنحنی (AUC) و ویژگی عملگر گیرنده (Receiver Operating Characteristic)، پایه روابط ۶ و ۷ برای هر عامل به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مورد استفاده قراردرستی نقشه‌های تهیه شده بررسی شده است. در روش seed cell بهترین شرایط می‌گیرد (شیرانی، در دست چاپ).

$$W_i^+ = \log_e \left[ \left( \frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}} \right) / \left( \frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}} \right) \right] \quad (4)$$

$$W_i^- = \log_e \left[ \left( \frac{N_{pix2}}{N_{pix2} + N_{pix1}} \right) / \left( \frac{N_{pix4}}{N_{pix4} + N_{pix3}} \right) \right] \quad (5)$$

که در آن هر کدام از متغیرها به شرح زیر هستند:  
 Npix1: مساحت لغزشی در یک رده  
 Npix2: مساحت کل لغزشی در یک نقشه (مساحت لغزشی در یک رده)  
 Npix3: مساحت یک رده (مساحت لغزشی در یک رده)  
 Npix4: مساحت کل یک نقشه (مساحت کل لغزشی در یک رده)

منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه میان نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست. به عبارت دیگر منحنی ROC مقادیر حساسیت (Sensitivity) مدل از منحنی ROC (درصد سلول‌ها یا واحدهای ناپایدار که مساحت یک رده) + (مساحت لغزشی در یک رده)

$$C = [W^+] - [W^-] \quad (6)$$

$$W_{final} = C / S_c \quad (7)$$

که در آن C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی،  $W_{final}$  وزن پایانی استاندارد شده و نسبت به تمایز درست میان مشاهدات مثبت و منفی در نمونه اعتبارسنجی بیان Sc انحراف استاندارد و برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است می‌کند. حساسیت بالا بیانگر شمار بالای پیش‌بینی‌های درست (مثبت‌های حقیقی) است، در حالی که ویژگی بالا (اختلاف 1-specificity پایین) نشان‌دهنده عدد کم

مدل شاخص آنتروپی: آنتروپی اندازه‌گیری احتمال، ناپایداری، نبود تعادل و نبود مثبت‌های غیر حقیقی است. برای نمونه یک مدل محافظه‌کارانه که بیشتر سلول‌ها اطمینان در یک سیستم است. لغزش یک سیستم پیچیده برای تبادل مواد و انرژی به صورت ناپایدار پیش‌بینی می‌شوند، حساسیت بالا و ویژگی پایین (عدد بالای محیط است؛ بنابراین لغزش می‌تواند با استفاده از سیستم آنتروپی، اندازه‌گیری مثبت‌های منفی) خواهد داشت (شیرانی و عرب عامری، ۱۳۹۴).

توصیف شود (Yang and Qiao, 2010). آنتروپی یک لغزش به میزان تأثیر عوامل سطح زیر منحنی ROC، بیانگر مقدار پیش‌بینی سامانه از راه توصیف توانایی آن مختلف بر گسترش زمین لغزش اشاره می‌کند. چند عامل مهم، بی‌نظمی‌های بیشتری را در برآورد درست پیشامدهای رخ داده (رخداد زمین لغزش) و رخ نداده (رخ ندادن درون یک سامانه شاخص وارد می‌کند؛ بنابراین ارزش آنتروپی را می‌توان برای محاسبه زمین لغزش) آن است (شیرانی، در دست چاپ؛ شیرانی و عرب عامری، ۱۳۹۴؛ وزن عینی سامانه شاخص استفاده کرد (Yang and Qiao, 2010). ایده آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و

در این مطالعه روش وزن‌دهی بر پایه روش پیشنهادی توسط Vico et al. (1980) مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. همبستگی کیفی کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی است. مقدار وزن برای هر متغیر به‌طور جداگانه اندازه‌گیری و به عنوان شاخص برآورد به صورت (۰/۹ تا ۱؛ عالی؛ ۰/۸ تا ۰/۹؛ بسیار خوب؛ ۰/۷ تا ۰/۸؛ خوب؛ ۰/۶ تا آنتروپی بیان می‌شود. وزن متغیر به دست آمده از مرحله تعریف آنتروپی، تقریبی از ۰/۷؛ متوسط و ۰/۵ تا ۰/۶؛ ضعیف) است. هر چه سطح زیر منحنی به یک نزدیک‌تر توزیع عادی احتمال را نشان می‌دهد.

معادلات مورد استفاده برای محاسبه وزن کلی هر متغیر  $W_j$  بر پایه روابط زیر

بیان می‌شود:

### ۳- بحث و نتایج

$$P_{ij} = A_{sd} / A_t \quad (8)$$

که در آن  $A_{sd}$  درصد لغزش در هر رده و  $A_t$  درصد مساحت آن رده است. و روابط هر یک از مدل‌های شاخص آنتروپی و وزن شاهد، نقشه خطر زمین لغزش

$$P_{ij} = P_{ij} / \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (9)$$

تهیه شد. بر پایه شکست طبیعی فراوانی پیکسل‌های مقادیرشان به پنج دسته تقسیم

که در آن  $H_j$  و  $H_{jmax}$  مقادیر آنتروپی هستند که طبق رابطه ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آیند؛ شدند. این فواصل پنج رده خطر از بسیار کم تا بسیار زیاد را نشان می‌دهند. مساحت

$$H_j = -\sum_{i=1}^n (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}) \quad (10)$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j \quad (11)$$

که در آن  $Z$  بیشترین تعداد دسته در میان لایه‌های عوامل،  $1, \dots, n$ ؛ و  $S_j$  تعداد (۳۰ درصد لغزش‌ها) نمایش داده شده است.

دسته‌ها،  $I_j$  ضریب اطلاعات و  $W_j$  مقدار وزن به دست آمده برای هر متغیر به عنوان ۳-۱. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های وزن شاهد و شاخص آنتروپی

وزن کلی است. نتایج تجزیه و تحلیل مدل وزن شاهد برای هر رده در جدول ۲ خلاصه شده است.

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}} \quad (12)$$

آمده است که در آن وزن مثبت و وزن منفی، به ترتیب احتمال لغزش در بود یا

$$W_j = I_j \times P_{ij} \quad (13)$$

نتایج، میان صفر و یک متغیر است. مقادیر نزدیک‌تر به یک بیشترین ناپایداری قابل انتظار (میانگین احتمال رخداد لغزش) باشد،  $W^+$  مقداری مثبت و  $W^-$  مقداری

را دارند.  $P_{ij}$  احتمال شکست دامنه برای  $1, \dots, n$ ؛ است (Devkoto et al., 2013). منفی را نشان می‌دهند. در برابر آن، اگر اثر حضور نقشه شاهد در رخداد لغزش،

ناپایداری می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، فاصله از جاده‌های شهر کرد مسجد سلیمان و دیناران بر پایه نتایج به‌دست آمده رابطه مستقیمی با رخداد لغزش دارند که اختلال در نیرخ طبیعی خاک، ایجاد دامنه‌های بریده شده از راه فعالیت‌های ساخت‌وساز جاده‌ای، سامانه‌های زهکشی نامفص برای این جاده‌ها و بارهای احمال شده ناشی از رفت‌وآمد ماشین‌های سنگین از دلایل این امر است. با گسترش جمعیت و افزایش شهرها و روستاها بسیاری از لغزش‌های کهن به دلیل ساخت‌وساز مهندسی و صنعتی، پل‌ها، جاده‌ها، تونل‌ها، لوله‌کشی و محازن مصنوعی آب مانند سد‌ها و دریاچه‌های مصنوعی دوباره فعال می‌شوند (شیرانی و سیف، ۱۳۹۱؛ شیرانی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین ساخت شهرک‌های مسکونی و تعدیل زمین در مجاورت این ساختمان‌ها و جایگاه‌های دفن زباله از دیگر مواردی هستند که موجب فعال شدن لغزش‌های قدیمی و با ایجاد لغزش‌های جدید می‌شوند. روند کاهشی وزن‌های به‌دست آمده برای لایه فاصله از نقاط شهری و روستایی با افزایش فاصله از این نقاط در هر دو مدل این مسئله را تأیید می‌کند. در مورد بارش از آنجایی که منطقه مورد مطالعه جزو ارتفاعات زاگرس است، بر پایه بیشترین وزن پایانی به‌دست آمده برای رده ۱۰۰۰ تا ۱۱۵۰ میلی‌متر در روش وزن شاهد (۷/۶۷) و در روش شاخص آنتروپی (۰/۶۵)، افزایش روند لغزش با افزایش بارش مشهود است.

به‌طور کلی می‌توان متغیرهای سنگ‌شناسی، میزان بارش و کاربری زمین را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل ناپایداری منطقه دو آب صمصامی معرفی کرد و نتایج حاصل از مقایسه رده‌های متغیرها و عوامل مؤثر با مطالعات گذشته در رابطه با عوامل مؤثر بر ناپایداری در دیگر مناطق مانند مطالعات (Sharma et al. (2010) Pourghasemi et al. (2012) و Bednarik et al., (2010); Constantin et al. (2011) تطابق دارد.

با ترکیب نقشه‌های وزنی، نقشه‌های پهنه‌بندی به روش وزن شاهد و شاخص آنتروپی تهیه شده است (شکل‌های ۶ و ۷). بر پایه نقشه پهنه‌بندی خطر در روش وزن شاهد ۲۵/۰۱ درصد از کل منطقه (۱۴۷/۵۲ کیلومتر مربع) و در روش شاخص آنتروپی ۲۲/۶۱ درصد از کل منطقه (۱۳۳/۳۷ کیلومتر مربع) پهنه با خطر بسیار کم است. در روش وزن شاهد پهنه‌های خطر کم و متوسط به ترتیب ۲۷/۸ درصد (۱۶۳/۹۸ کیلومتر مربع) و ۲۳/۷۹ درصد (۱۴۰/۳۱ کیلومتر مربع) است و نسبت به روش شاخص آنتروپی (پهنه‌های خطر کم و متوسط به ترتیب ۲۷/۴۵ درصد و ۱۸/۵۴ درصد) مساحت بیشتری از منطقه در این رده‌ها قرار دارد. پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد در روش وزن شاهد به ترتیب ۱۸/۱۸ درصد (۱۰۷/۲۱ کیلومتر مربع) و ۵/۲۲ درصد (۳۰/۷۶ کیلومتر مربع) و در روش شاخص آنتروپی ۲۱/۷۳ درصد (۱۲۸/۱۹ کیلومتر مربع) و ۹/۶۸ درصد (۵۷/۰۹ کیلومتر مربع) از کل نقشه پهنه‌بندی خطر هستند که مساحت اختصاص یافته به رده‌های با خطر زیاد و بسیار زیاد در روش آنتروپی بیشتر از مساحت رده‌های مشابه در روش وزن شاهد است.

### ۳-۳. نتایج ارزیابی مدل‌ها

نقشه‌های خطر تهیه شده با روش‌های مختلف ارزیابی و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. در هر دو مدل وزن شاهد و شاخص آنتروپی با وجود اینکه کمتر از نیمی از مساحت منطقه مربوط به رده‌های خطر زیاد و بسیار زیاد است، درصد مساحت سلول‌های لغزشی (Seed Cell) در این دو رده بیش از دو سوم کل لغزش‌های رخ داده در منطقه است که این نتایج نشان‌دهنده صحیح بودن پهنه‌بندی با این روش‌هاست.

مقایسه مقادیر شاخص سطح سلول هسته (SCAI) به دست آمده بیانگر این است که در هر دو مدل، تکنیک پذیری میان مقادیر رده‌های خطر بسیار کم تا متوسط نسبت به رده‌های خطر زیاد و بسیار زیاد بیشتر است. مقادیر به‌دست آمده برای رده‌های بسیار کم تا متوسط مدل وزن شاهد بیشتر از SCAI مدل شاخص آنتروپی در این رده‌هاست و به‌طور کلی تکنیک مقادیر در مدل وزن شاهد بهتر از مدل شاخص آنتروپی است (شکل ۸ الف). همچنین یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل و تأیید توانایی و درستی آن، استفاده از نمودار نسبت فراوانی است. به‌طور تئوری مقادیر نسبت فراوانی باید از رده خطر کم تا زیاد افزایش پیدا کند (شیرانی و عرب‌عامری، ۱۳۹۴؛ Shirani, 2004).

کمتر از مقدار احتمال مورد انتظار باشد،  $W^+$  و  $W^-$  به ترتیب دارای مقدار منفی و مثبت خواهند بود. وزن‌های بسیار مثبت یا منفی در تعیین حساسیت لغزش‌ها بسیار مفید هستند؛ به‌طوری که نشانه‌های قوی احتمال بود یا نبود لغزش‌ها را بیان می‌کنند. همچنین وزن‌های نزدیک به صفر احتمال کمی در مورد رخداد لغزش ارائه می‌دهد. تباین (C)، میزان پیوستگی مکانی را بیان می‌کند و مقادیر بزرگ‌تر، پیوستگی فضایی بیشتری میان نقشه شاهد و رخداد لغزش نشان می‌دهد (Vahidnia et al., 2009).

در روش شاخص آنتروپی وزن پایانی  $W_j$  هر بکته از متغیرها، مطابق با روش توضیح داده شده در بخش پیش به دست آمده که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. نقشه پایانی حساسیت لغزش از مجموع حاصل ضرب وزن هر متغیر در خود متغیر طبق رابطه ۱۷ به دست آمده است.

$Y =$  شتاب ثقل افقی زمین‌لرزه  $\times ۱/۰۶ +$  میزان بارش  $\times ۰/۹۲ +$  شیب  $\times ۰/۰۸۷ +$  سوی شیب  $\times ۰/۰۰۳ +$  سنگ‌شناسی  $\times ۱/۲۰۶ +$  کاربری زمین  $\times ۰/۶ +$  فاصله از جاده  $\times ۰/۲۶۱ +$  فاصله از گسل  $\times ۰/۹۲۱ +$  فاصله از نقاط شهری و روستایی  $\times ۰/۳۵۷$  با مقایسه رده‌های زاویه شیب، برای هر دو مدل بیشترین وزن به دست آمده مربوط به رده با شیب میانگین (۵ تا ۱۵ درجه) است. در شیب‌های کم برآیند نیروها به‌صورتی است که نیروهای مقاوم بیشتر از نیروهای محرک است و در شیب‌های بالا به دلیل افزایش استحکام سازندهای زمین‌شناسی حساسیت به فرسایش کاهش می‌یابد و فرایند خاک‌سازی ضعیف و ستبرای واریزه‌ها کمتر می‌شود (Mohammady et al., 2012).

برای لایه سوی شیب، در روش وزن شاهد دامنه‌های جنوبی و جنوب باختری و در روش شاخص آنتروپی دامنه‌های شمالی، جنوبی و جنوب باختری بیشترین رخداد زمین‌لغزش را نشان می‌دهند. این شرایط به دلیل رطوبت، بارندگی و تبخیر و تعرق است. دامنه‌های دارای بارندگی شدید، سریع‌تر به حالت اشباع می‌رسند و در نتیجه فشار آب منفذی دامنه افزایش می‌یابد. با این وجود، این مسئله به ظرفیت نفوذ دامنه بستگی دارد که توسط متغیرهای مختلفی مانند شیب توپوگرافی، نوع خاک، نفوذپذیری، تخلخل، رطوبت، مواد آلی تشکیل‌دهنده، پوشش زمین و غیره کنترل می‌شود (شیرانی و سیف، ۱۳۹۱؛ شیرانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Pourghasemi et al., 2012). بر خلاف انتظار در دامنه‌های جنوبی منطقه نیز به دلیل توزیع آبراهه‌ها پتانسیل لغزش افزایش یافته است. نتایج به‌دست آمده برای لایه سنگ‌شناسی در هر دو مدل بیانگر آن است که بیشترین پتانسیل لغزشی مربوط به سنگ‌شناسی‌های با حساسیت بسیار زیاد نسبت به لغزش (رسوبات عهد حاضر، شیل و مارن‌های سازند رازک و میان‌لایه‌های پابده گوری) به دلیل جذب آب بیشتر، آنگذری کمتر و در نتیجه اشباع راحت‌تر این نوع سازندهاست. وزن‌های به‌دست آمده برای رده‌های لایه کاربری زمین در هر دو مدل، رده‌های کشاورزی و باغ و مراتع خوب را به‌عنوان مستعدترین مناطق نسبت به لغزش به دلیل اشباع شدن خاک سطحی در هنگام آبیاری و کاهش تنش مؤثر معرفی کرده است. این نتیجه با کشاورزی در دامنه‌های شیب‌دار منطقه مورد مطالعه مرتبط است. برای هر دو مدل در لایه‌های فاصله از گسل و شتاب ثقل افقی زمین‌لرزه بر خلاف انتظار، با افزایش فاصله از گسل، وزن به‌دست آمده افزایش یافته و با کاهش شتاب گرانی افقی زمین‌لرزه، وزن‌های به‌دست آمده روند افزایشی نشان داده است. به‌طور کلی گسل‌های فعال و غیرفعال و شدت لرزه‌ای آنها بر رخداد لغزش اثر گذار است؛ اما نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر آن است که گسل‌ها و شتاب ثقل افقی ناشی از آنها در رخداد لغزش‌های این منطقه مؤثر نیست. مقایسه وزن‌های به‌دست آمده برای رده‌های مختلف فاصله از عوارض خطی آبراهه و جاده برای هر دو مدل رابطه وارونی میان افزایش فاصله از عارضه و وزن به‌دست آمده نشان می‌دهد. بر اثر جریان آب رودخانه‌ها به‌ویژه رودخانه دو آب صمصامی در این منطقه، حفر و فرسایش در دره‌ها صورت می‌پذیرد که سبب شسته شدن مصالح پای دامنه‌ها در دو سوی رودخانه و افزایش زاویه شیب دامنه‌ها می‌شود و عامل نگهدارنده را از پای دامنه‌ها حذف می‌کند. از سوی دیگر این رودخانه با اشباع کردن مواد پای دامنه و بالا رفتن فشار آب منفذی در آن سبب

مدل خروجی‌های متفاوتی به دست آمده است. نقشه‌های خطر زمین‌لغزش به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که مساحت زیادی از منطقه دارای پتانسیل خطر زیاد و بسیار زیاد است. بر پایه وزن به دست آمده برای متغیرهای مؤثر در هر دو روش و مقایسه نتایج آنها متغیرهای سنگ‌شناسی، میزان بارش و کاربری زمین از عوامل بسیار مهم در ناپایداری‌های دامنه‌ای هستند. متغیرهای مقاومت برشی مواد تشکیل‌دهنده شیب‌ها شامل چسبندگی (c) و ضریب اصطکاک داخلی (φ)، ارتباط بسیار نزدیکی با نوع سنگ‌شناسی مواد دارند. مقدار عددی این متغیرها در مواد تشکیل‌دهنده یک دامنه یا شیب، در شروع و چگونگی گسیختگی نقش تعیین‌کننده دارد. همچنین متغیرهای فیزیکی خاک، همچون وزن واحد حجم، میزان تخلخل و پوکی خاک نیز به گونه‌ای از نوع سنگ‌شناسی و بافت پیروی می‌کنند و نقش مؤثری در پایداری شیب دارند. بارش موجب تغییر رفتار خاک شامل افزایش درصد رطوبت (θ)، درجه اشباع‌شدگی (St)، ضریب نفوذپذیری (k)، چگالی ظاهری (γ) و فشار آب منفذی (u) و همچنین کاهش چسبندگی مؤثر (C) و ضریب اصطکاک داخلی (φ) و کاهش و با ناپدید شدن مکش ماتریکس (sa) می‌شود. بنابراین کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چگالی و فشار آب منفذی در سطح لغزش هنگام بارش، به دلیل کاهش نیروی طبیعی مورد نیاز برای مقاومت برشی، از دیگر علل ناپایداری در اثر بارندگی است (Xiong et al., 2005). وضعیت چینه‌شناسی خاص محدوده مورد مطالعه شامل سازندهای سست و مستعد ناپایداری همچون شیل و مارن‌های سازند رازک، مارن‌های گورپی به صورت برجها در فاعده تشکیلات نتوژن، میان‌لایه‌های ماری حاصل از هوازدگی و نهشته‌های لغزشی کهن سازند گورپی به صورت میان‌لایه‌ای و شیل‌ها و مارن‌های سازند پابده به صورت نامنظم و پراکنده در ژرفاهای مختلف، همگی مستعد پهنه‌های لغزشی و ناپایدار هستند. مهم‌ترین کانی رسی فرعی موجود در همه مارن‌ها با رنگ‌های مختلف مونت‌موریلونیت (Montmorillonite) است که مهم‌ترین وجه تمایز آنها از دیگر کانی‌های رسی جذب آب تا ۸ برابر حجم اولیه و قابلیت تورم و آماس قابل ملاحظه است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که حضور یکپارچه این مارن‌ها در بخش‌های ژرف و لزه‌های ماری در ژرفاهای کم و متوسط به‌عنوان اصلی‌ترین عامل زمینه‌ساز ناپایداری است. همچنین بارش زیاد در منطقه و اشباع شدن رسوبات آبرفتی عهد حاضر و تغییر کاربری زمین و ساخت جاده‌های بدون سامانه زهکشی مناسب، سبب تشدید این پدیده در منطقه شده است.

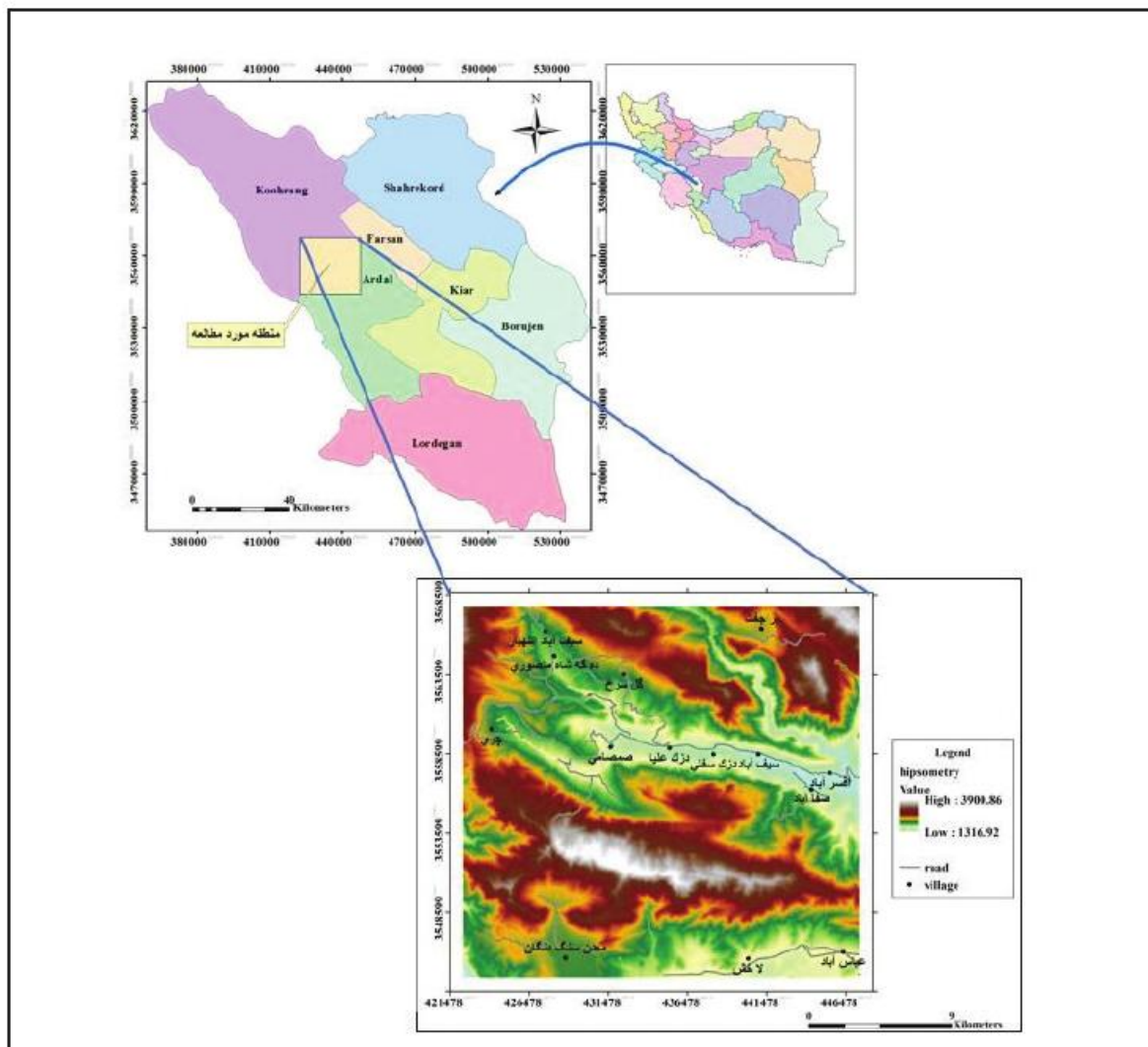
بر پایه نتایج حاصل از ارزیابی نقشه‌های خطر تهیه شده، هر دو روش وزن شاهد و شاخص آنتروپی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش این منطقه مناسب هستند. مقدار سطح زیر منحنی به دست آمده برای نقشه تهیه شده به روش وزن شاهد (۰/۷۹) و تفکیک‌پذیری بهتر شاخص SCAI در آن بیانگر آن است که این روش برای پهنه‌بندی خطر نسبت به روش شاخص آنتروپی با سطح زیر منحنی (۰/۷۳) در اولویت قرار دارد.

با توجه به نتایج (شکل ۸ ب) نیز فرضیه یاد شده ثابت شده و مقادیر به‌طور تدریجی افزایش پیدا کرده است. نسبت فراوانی به‌دست آمده برای رده‌های خطر مدل وزن شاهد از رده خطر بسیار کم تا زیاد یک روند صعودی دارد. نسبت فراوانی برای رده بسیار زیاد در روش وزن شاهد کاهش یافته است که با در نظر گرفتن واحدهای کوچک (۲۰ متر) برای شبکه‌بندی منطقه، می‌توان از این روش برای مناطقی استفاده کرد که دارای بکتراختی در لایه‌های اطلاعاتی هستند. در مدل شاخص آنتروپی روند صعودی افزایش نسبت فراوانی برای همه رده‌های خطر دیده می‌شود اما تفکیک‌پذیری میان مقادیر رده‌های خطر بسیار کم و کم قابل قبول نیست. به‌طور کلی می‌توان گفت تفکیک‌پذیری میان مقادیر نسبت فراوانی در روش وزن شاهد بیشتر از روش شاخص آنتروپی است.

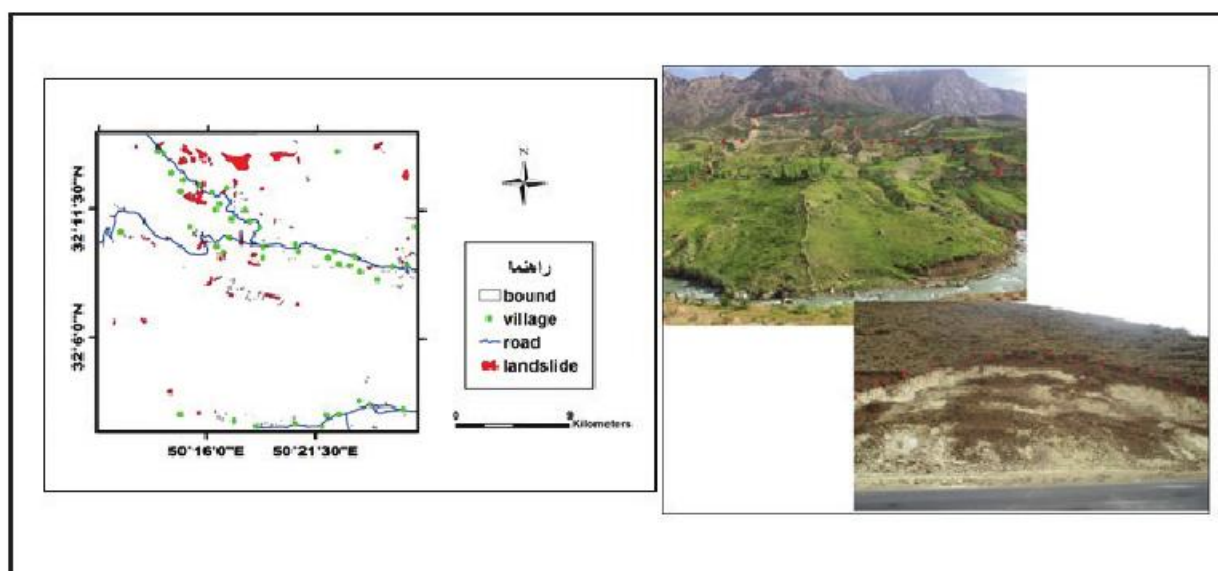
نتایج ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از منحنی ROC بیانگر آن است که هر دو مدل توانایی خوبی در پیش‌بینی نواحی لغزش یافته داشته‌اند. نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از مطالعات پیشین مانند مطالعات انجام شده توسط شیرانی (در دست چاپ)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۳)، Mathew et al. (2007) و Regmi et al. (2010) و Pourghasemi et al. (2013) مؤید دقت بالای مدل وزن شاهد و مطالعات (2010) Bednarik et al. و (2012) Pourghasemi et al. و (2010) Devkota et al. (2013) مؤید دقت بالای روش شاخص آنتروپی است. بنابراین بر پایه پژوهش‌هایی که گفته شد، مدل‌های دومنبره، رگرسیون لجستیک (شیرانی و عرب عامری، ۱۳۹۴) و دومنبره فاکتور اطمینان اهمیت کمتری دارند و روش شاخص آنتروپی و وزن شاهد برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش دارای همخوانی بهتری هستند. بیشترین مقدار سطح زیر منحنی در روش وزن شاهد (WOE)، ۰/۷۹ با خطای استاندارد ۰/۰۴۹ به‌دست آمده و پس از آن روش شاخص آنتروپی (IOE) با سطح زیر منحنی ۰/۷۳ و خطای استاندارد ۰/۰۶۹ در اولویت دوم قرار گرفته است. شکل ۹ نشان‌دهنده ارزیابی خوب مدل‌های وزن شاهد و شاخص آنتروپی در شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر آن در منطقه مورد مطالعه است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

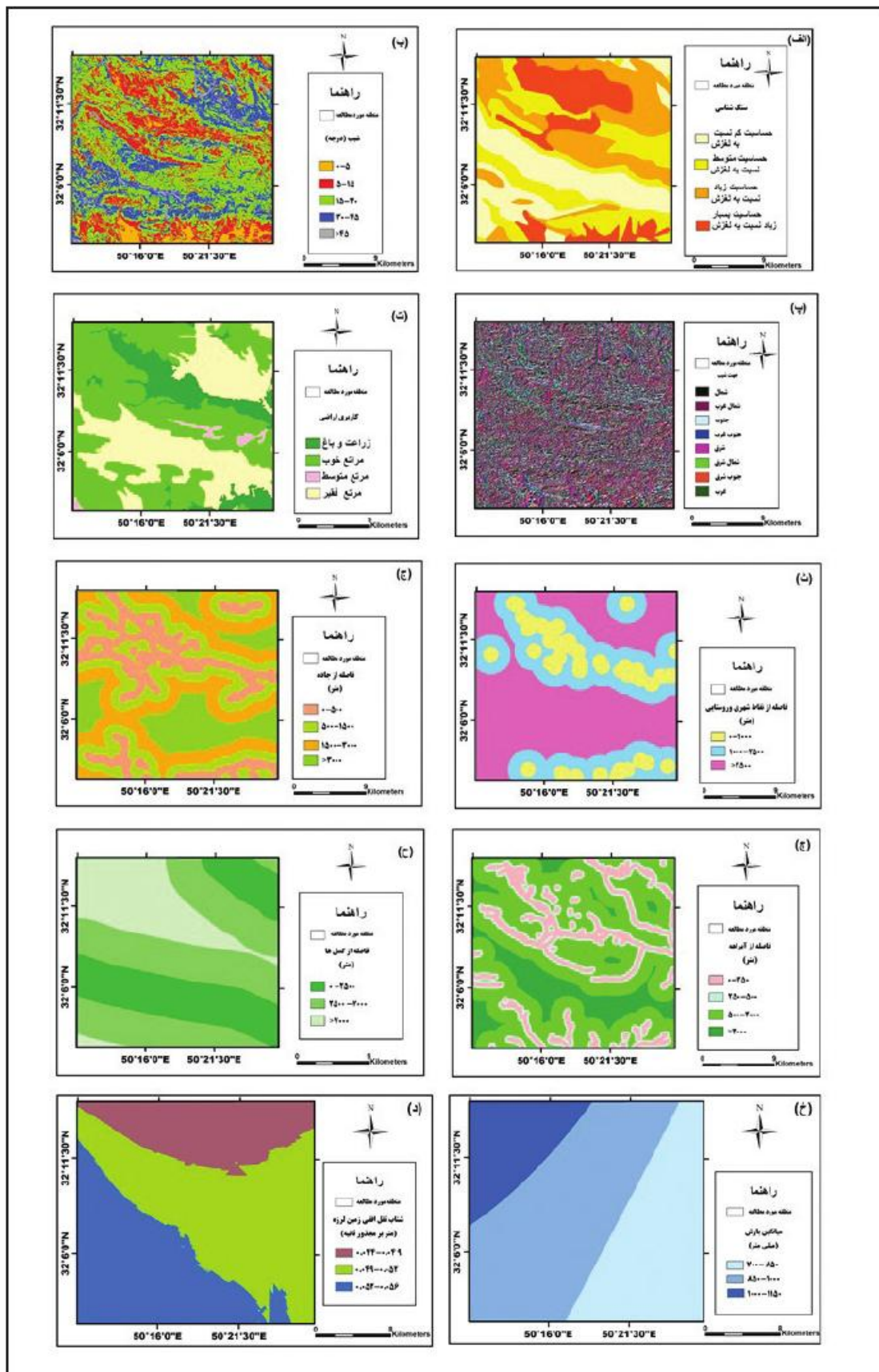
دلایل رخداد زمین‌لغزش بسیار زیاد، پیچیده و گاه ناشناخته باقی می‌ماند. اگر چه می‌توان عامل‌های پایه‌ای مؤثر در رخداد زمین‌لغزش را در طی بازده‌های میدانی، تفسیر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای دید؛ اما همچنان برخی از عامل‌ها نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین برای بررسی عوامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش در منطقه دو آب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری، در این مطالعه با انتخاب ده عامل مؤثر بر لغزش‌های منطقه و به‌نقشه درآوردن آنها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و همچنین تهیه نقشه پراکنش لغزش‌ها، پتانسیل روش‌های احتمالاتی مانند وزن شاهد و شاخص آنتروپی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش این منطقه ارزیابی شده است. داده‌های ورودی برای هر دو مدل یکسان بوده و بر پایه روابط ارائه شده برای هر



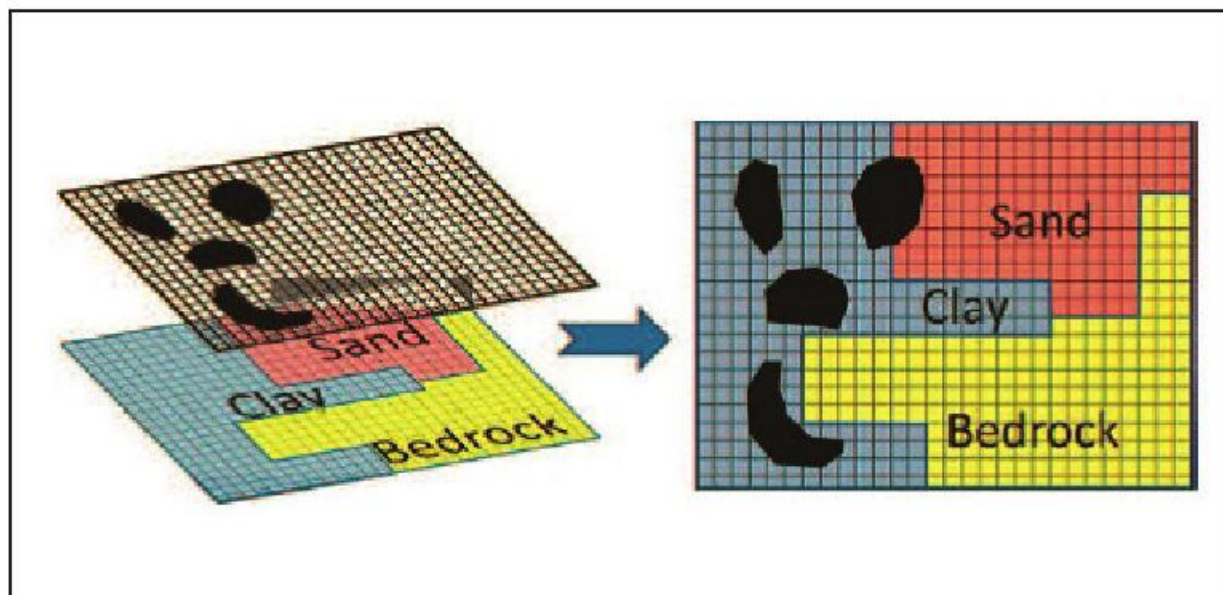
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه های دسترسی به آن.



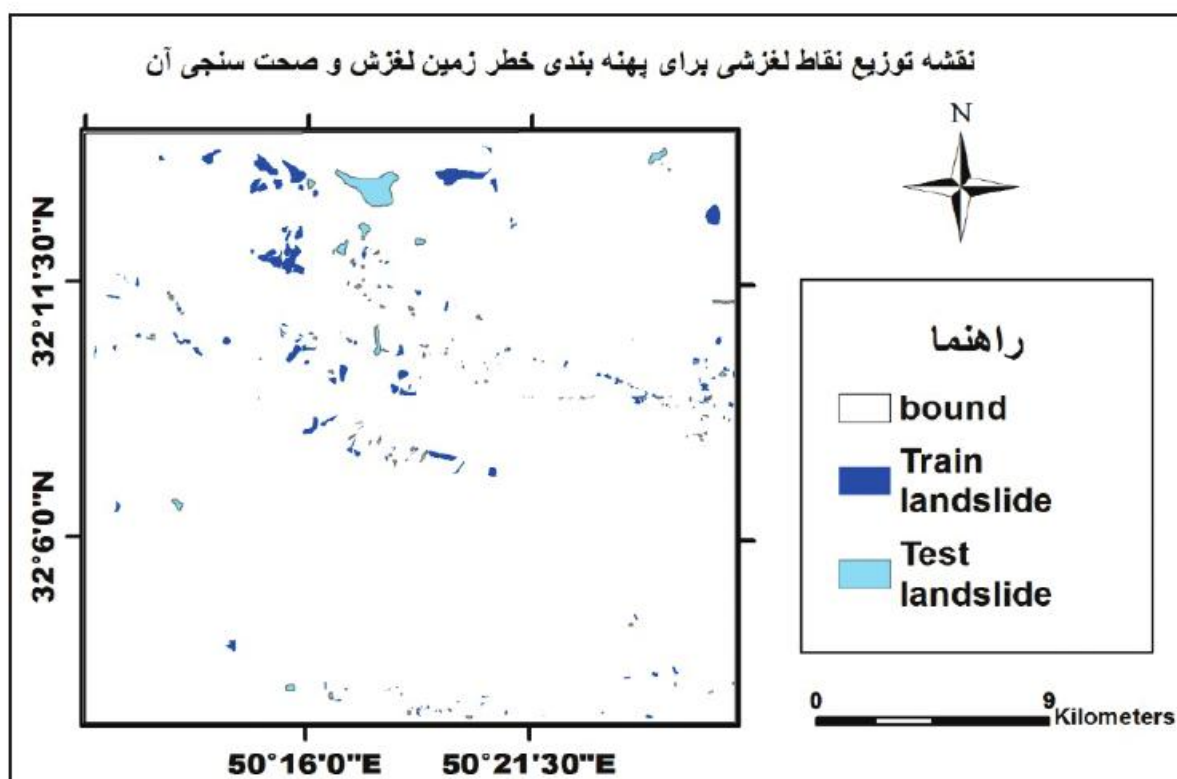
شکل ۲- نمونه ای از لغزش های بزرگ و کوچک رخ داده و نقشه پراکنش زمین لغزش ها در منطقه دو آب صمصامی.



شکل ۳- لایه های اطلاعاتی مورد استفاده برای پهنه بندی خطر زمین لغزش. الف) سنگ شناسی، ب) شیب، پ) سوی شیب، ت) کاربری زمین، ث) فاصله از نقاط شهری و روستایی، ج) فاصله از جاده، چ) فاصله از آبراهه، ح) فاصله از گسل، خ) میانگین بارش سالانه، د) شتاب ثقل افقی زمین لرزه.

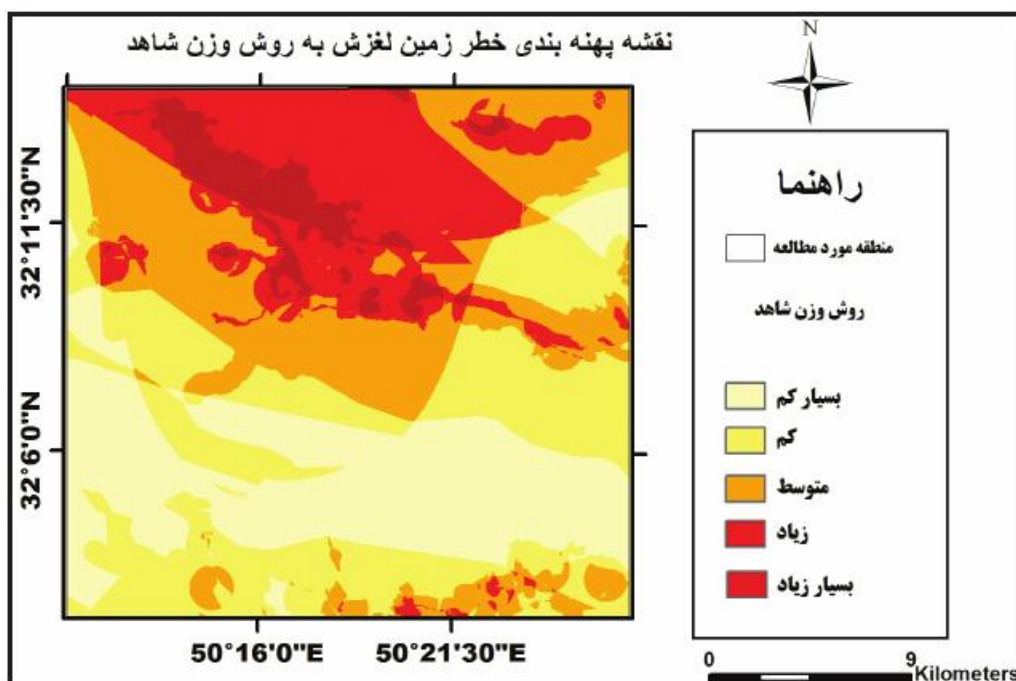


شکل ۴- نمایشی از محاسبه وزن برای رده‌های یک نقشه موضوعی (Quinn et al., 2010).

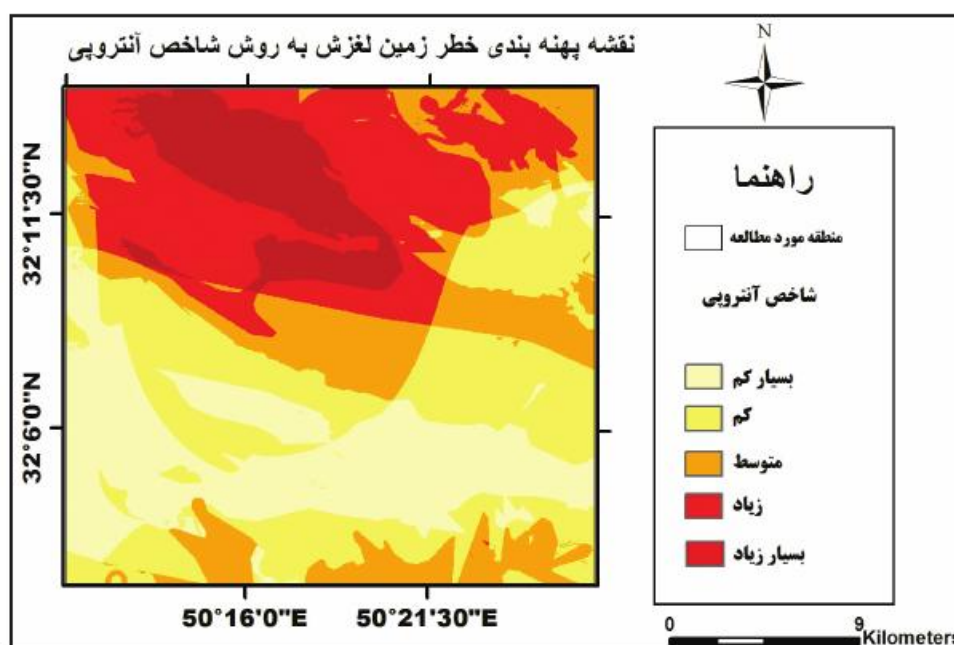


شکل ۵- نقشه توزیع لغزش‌های مورد استفاده برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و اعتبار‌سنجی نقشه‌های تهیه شده (۷۰ درصد برای پهنه‌بندی و ۳۰ درصد برای اعتبار‌سنجی).

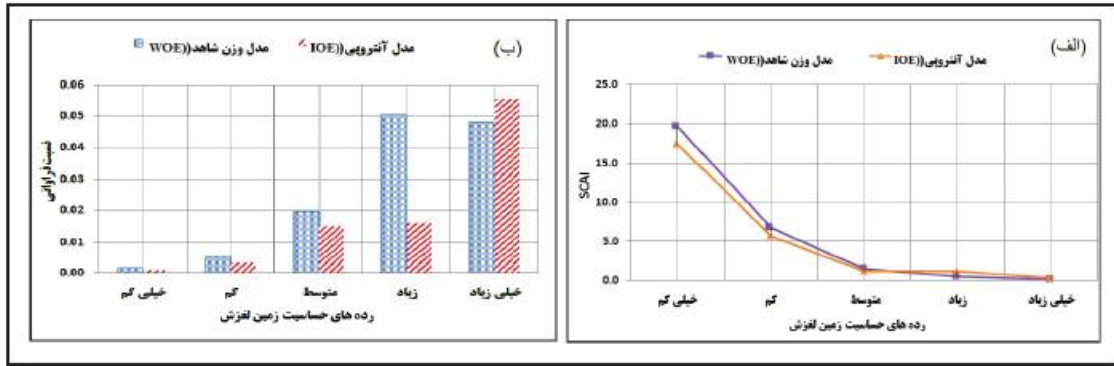




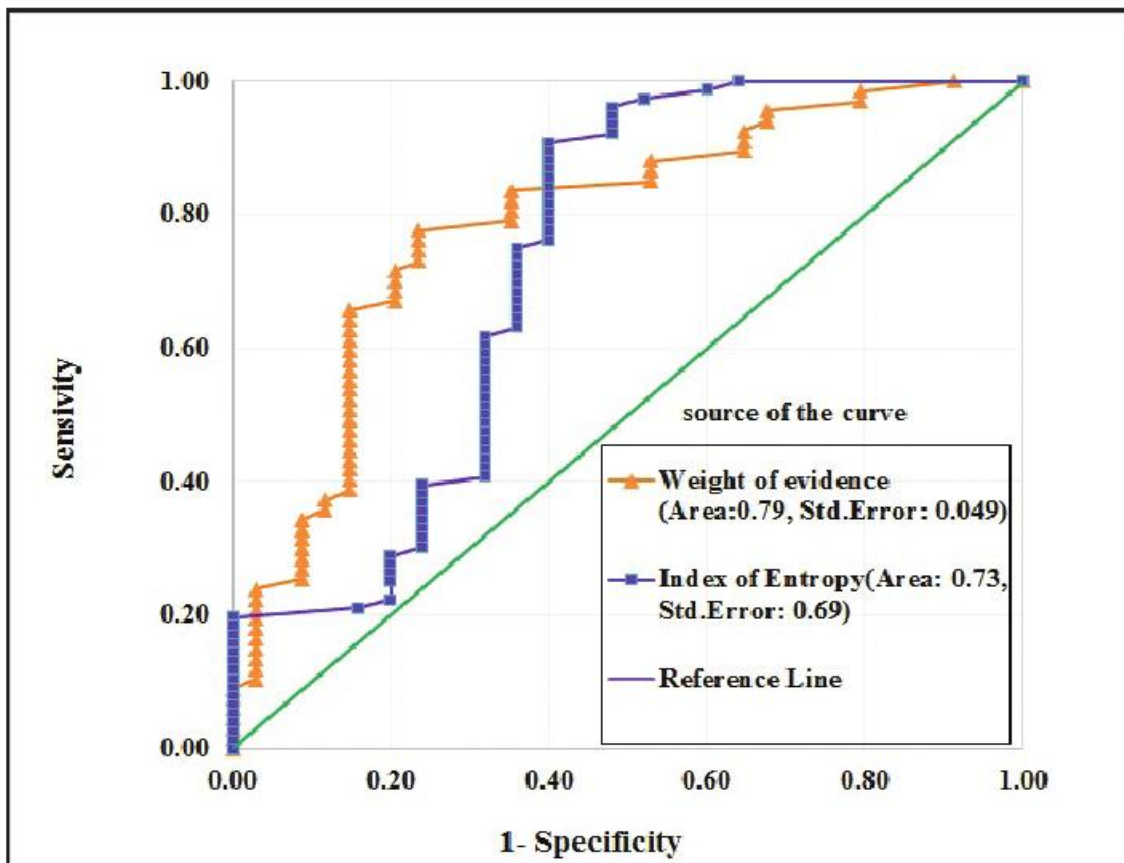
شکل ۶- نقشه پهنه بندی خطر به دست آمده به روش وزن شاهد (WOE).



شکل ۷- نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش به روش شاخص آنترویی (IOE).



شکل ۸- مقایسه رده‌های خطر نقشه‌های به‌هنه‌بندی (الف) مقایسه رده‌های خطر زمین‌لغزش بر پایه شاخص SCAI (ب) مقایسه رده‌های خطر بر پایه نسبت فراوانی.



شکل ۹- منحنی‌های ROC و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه‌های به‌هنه‌بندی خطر زمین‌لغزش.

جدول ۱- چهار حالت پتانسیل ایجاد زمین‌لغزش.

زمین لغزش	عوامل ایجاد زمین‌لغزش	
	حضور	عدم حضور
حضور	$N_{pix1}$	$N_{pix2}$
عدم حضور	$N_{pix3}$	$N_{pix4}$

جدول ۲- نتایج حاصل از ارزیابی مدل وزن شاهد.

عوامل	رده	مساحت هر رده (Km <sup>2</sup> )	مساحت لغزشی هر رده (Km <sup>2</sup> )	وزن مثبت	وزن منفی	مضرب C	وزن پایانی
شتاب گرانی افقی زمین لرزه (m/s <sup>2</sup> )	۰/۰۴۲-۰/۰۴۹	۱۲۶/۶۱	۵/۶۱	۰/۸۲	-۰/۵۱	۱/۴۴	۲۳۴۱/۴۹
	۰/۰۴۹-۰/۰۵۲	۲۶۰/۹۴	۴/۳۰	-۰/۱	۰/۰۷	-۰/۱۷	-۱/۰۵
	۰/۰۵۲-۰/۰۵۶	۲۰۲/۲۴	۰/۷۶	-۱/۵۹	۰/۳۵	-۱/۹۵	-۵/۱۸
میزان بارش (mm)	۷۰۰-۸۵۰	۲۰۲/۴۷	۱/۶۶	-۰/۷۹	۰/۲۶	-۱/۰۵	-۱۲۴۹/۱۸
	۸۵۰-۱۰۰۰	۲۸۹/۸۳	۴/۷۹	-۰/۰۹	۰/۰۸	-۰/۱۷	-۱/۱۵
	۱۰۰۰-۱۱۵۰	۹۷/۴۸	۴/۳۰	-۰/۸۹	-۰/۳۳	۱/۲۲	۷/۶۷
شیب (درجه)	۰-۵	۴۲/۳۶	۰/۷۴	-۰/۰۴	۰/۰۳	-۰/۰۴۳	-۳۱/۵۶
	۵-۱۵	۱۳۰/۲۴	۳/۳۰	-۰/۳۱	-۰/۱۱	-۰/۴۲	۲/۳۱
	۱۵-۳۰	۲۷۴/۸۸	۴/۶۳	-۰/۰۷	۰/۰۶	-۰/۱۳	-۰/۸۷
	۳۰-۴۵	۱۲۵/۱۸	۱/۹۰	-۰/۱۸	۰/۰۴	-۰/۲۲	-۰/۹۴
	۴۵<	۱۷/۱۲	۰/۲	-۰/۴۴	۰/۰۱	-۰/۴۵	-۰/۶۲
	شمال	۸۲/۷۷	۱/۴۲	-۰/۱۰	۰/۰۱	-۰/۱۱	-۳۶/۲۲
سوی شیب	شمال خاور	۷۷/۵۲	۱/۳۹	-۰/۰۸	۰/۰۱	-۰/۱۰	-۰/۳۳
	خاور	۶۷/۱۰	۱/۰۱	-۰/۱۹	۰/۰۲	-۰/۲۱	-۰/۶۴
	جنوب خاور	۶۵/۰۳	۱/۱۸	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۳
	جنوب	۸۷/۱۱	۲/۱	-۰/۲۹	-۰/۰۶	-۰/۳۵	۱/۵۷
	جنوب	۸۰/۸۹	۱/۶	-۰/۰۹	-۰/۰۱	-۰/۱۰	۰/۴۰
	باختر	۶۷/۷۵	۱/۱۱	-۰/۱۰	۰/۰۱	-۰/۱۱	-۰/۳۵
	شمال باختر	۶۱/۸۳	۰/۹۵	-۰/۱۷	۰/۰۲	-۰/۱۹	-۰/۵۶
	یک	۱۵۰/۹۱	۰/۲۶	-۲/۳۶	۰/۲۸	-۲/۶۴	-۱۳۳۲/۱۲
سنگشناسی	د	۱۶۱/۶۲	۲/۵۸	-۰/۱۳	۰/۰۴	-۰/۱۷	-۰/۸۵
	سه	۱۶۲/۴۵	۲/۲۸	-۰/۲۷	۰/۰۹	-۰/۳۵	-۱/۶۲
	چهار	۸۲/۱۰	۵/۵۵	۱/۰۲	-۰/۵۳	۱/۵۵	۱۱/۲۰
	زراعت و باغ	۲۸۶/۶۶	۲/۹۳	-۰/۷۰	-۰/۱۷	-۰/۸۷	۱۳۶۸/۹۳
کاربری زمین	مرتع خوب	۲۱۱/۶۴	۶/۳۲	-۰/۲۰	-۰/۲۴	-۰/۴۴	۳/۳۸
	مرتع فقیر	۰/۹۴	۱/۳۳	-۱/۰۷	۰/۳۲	-۱/۳۹	-۴/۹۰
	مرتع متوسط	۸۲/۱۰	۰/۰۸	-۰/۷۲	۰/۰۱	-۰/۷۳	-۰/۶۴
	فاصله از آبراهه (m)	۰-۲۵۰	۹۹/۵۳	۲/۳۴	-۰/۲۷	-۰/۰۶	-۰/۳۳
فاصله از جاده (m)	۲۵۰-۵۰۰	۸۴/۵۶	۲/۱۰	-۰/۳۳	-۰/۰۷	-۰/۳۹	۱/۷۴
	۵۰۰-۲۰۰۰	۳۱۵/۱۹	۶/۱۴	-۰/۰۸	-۰/۰۹	-۰/۱۷	۱/۲۸
	۲۰۰۰<	۹۰/۵۰	۰/۰۸	-۳/۰۳	۰/۱۶	-۳/۱۹	-۲/۷۷
	۰-۵۰۰	۱۳۹/۴۷	۳/۸۱	-۰/۴۲	-۰/۱۸	-۰/۶۰	۹۳۴/۳۶
فاصله از گسل (m)	۵۰۰-۱۵۰۰	۱۶۹/۸۳	۳/۹۲	-۰/۲۵	-۰/۱۲	-۰/۳۷	۲/۲۷
	۱۵۰۰-۳۰۰۰	۱۶۹/۱۸	۱/۷۸	-۰/۵۴	۰/۱۶	-۰/۷۰	-۲/۸۷
	۳۰۰۰<	۱۱۱/۳۱	۱/۱۴	-۰/۵۸	۰/۱۰	-۰/۶۸	-۲/۲۱
	۰-۲۵۰۰	۱۷۳/۶۸	۰/۸۸	-۱/۲۸	۰/۲۷	-۱/۵۵	-۱۳۹۴/۹۶
فاصله از گسل (m)	۲۵۰۰-۷۰۰۰	۲۷۲/۷۳	۳/۷۴	-۰/۲۸	۰/۱۹	-۰/۴۷	-۲/۸۰
	۷۰۰۰<	۱۴۳/۳۸	۶/۰۴	-۰/۸۷	-۰/۵۶	۱/۴۳	۱۰/۷۹
	۰-۱۰۰۰	۹۷/۹۱	۳/۲	-۰/۶۳	-۰/۱۹	-۰/۸۲	۱۲۴۹/۸۰
فاصله از نقاط شهری و روستایی (m)	۱۰۰۰-۲۵۰۰	۱۷۸/۴۸	۴/۴	-۰/۳۱	-۰/۱۷	-۰/۴۸	۳/۱۱
	۲۵۰۰<	۳۱۳/۴۰	۳/۰۱	-۰/۶۴	۰/۴۴	-۱/۰۸	-۵/۷۲

جدول ۳- نتایج مدل شاخص آنتروپی و وزن پایانی به‌دست آمده از این روش

متغیر	رده	مساحت هر رده (Km <sup>2</sup> )	مساحت لغزشی هر رده (Km <sup>2</sup> )	احتمال شکست دامنه	(P <sub>i</sub> )	مقدار آنتروپی	بیشترین آنتروپی	ضریب اطلاعات	وزن پایانی
شتاب نقل افقی زمین‌لرزه	۰/۰۴۲-۰/۰۴۹	۱۲۶/۶۱	۵/۶۱	۲/۴۵	۰/۶۹	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۳۰	۱/۰۶
	۰/۰۴۹-۰/۰۵۲	۲۶۰/۹۴	۴/۳۰	۰/۹۱	۰/۲۶				
	۰/۰۵۲-۰/۰۵۶	۲۰۲/۲۴	۰/۷۶	۰/۲۱	۰/۰۶				
میزان بارش (mm)	۷۰۰-۸۵۰	۲۰۲/۳۷	۱/۶۶	۰/۴۶	۰/۱۲	۰/۴۱	۰/۵۰	۰/۲۷	۰/۹۲
	۸۵۰-۱۰۰۰	۲۸۹/۸۳	۴/۷۹	۰/۹۲	۰/۲۵				
	۱۰۰۰-۱۱۵۰	۹۷/۴۸	۴/۳۰	۲/۳۹	۰/۶۵				
شیب	۰-۵	۴۲/۳۶	۰/۷۴	۰/۹۷	۰/۲۰	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۰۲	۰/۰۹
	۵-۱۵	۱۳۰/۲۴	۳/۲۰	۱/۳۶	۰/۲۹				
	۱۵-۳۰	۲۷۴/۸۸	۴/۶۳	۰/۹۳	۰/۲۰				
	۳۰-۴۵	۱۲۵/۱۸	۱/۹۰	۰/۸۴	۰/۱۸				
	۴۵<	۱۷/۱۲	۰/۲	۰/۶۵	۰/۱۴				
سوی شیب	شمال	۸۲/۷۷	۱/۴۲	۱/۹	۰/۲۲	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱
	شمال خاور	۷۷/۵۲	۱/۲۹	۰/۹۲	۰/۱۰				
	خاور	۶۷/۱۰	۱/۰۱	۰/۸۳	۰/۰۹				
	جنوب خاور	۶۵/۰۳	۱/۱۸	۱/۰۹	۰/۱۱				
	جنوب	۸۷/۱۱	۲/۱	۱/۳۳	۰/۱۵				
	جنوب باختر	۸۰/۷۹	۱/۶	۱/۰۹	۰/۱۲				
	باختر	۶۷/۷۵	۱/۱۱	۰/۹۱	۰/۱۰				
	شمال باختر	۶۱/۷۳	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۱۰				
سنگ‌شناسی	پسک	۱۵۰/۹۱	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۴۶	۰/۶۳	۰/۲۷	۱/۲۰
	د	۱۶۱/۶۲	۲/۵۸	۰/۸۸	۰/۲۰				
	سه	۱۶۲/۴۵	۲/۲۸	۰/۷۷	۰/۱۷				
	چهار	۸۲/۱۰	۵/۵۵	۲/۷۰	۰/۶۱				
کاربری زمین	کشت‌و‌ریزی - باغ	۲۸۶/۶۶	۲/۸۳	۱/۹۷	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۶۳	۰/۱۵	۰/۶۰
	مرتع خوب	۲۱۱/۶۴	۶/۳۲	۱/۲۲	۰/۳۰				
	مرتع فقیر	۰/۹۴	۱/۳۳	۰/۳۵	۰/۰۹				
	مرتع متوسط	۸۲/۱۰	۰/۰۸	۰/۴۹	۰/۱۲				
فاصله از آبراهه	۰-۲۵۰	۹۹/۵۳	۲/۳۴	۱/۳۰	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۱۷	۰/۶۵
	۲۵۰-۵۰۰	۸۴/۵۶	۲/۱۰	۱/۳۸	۰/۳۶				
	۵۰۰-۲۰۰۰	۳۱۵/۱۹	۶/۱۴	۱/۰۸	۰/۲۸				
	۲۰۰۰<	۹۰/۵۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۱				
فاصله از جاده	۰-۵۰۰	۱۳۹/۳۷	۳/۸۱	۱/۵۱	۰/۳۸	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۰۷	۰/۲۶
	۵۰۰-۱۵۰۰	۱۶۹/۸۳	۳/۹۲	۱/۳۸	۰/۳۳				
	۱۵۰۰-۳۰۰۰	۱۶۹/۱۸	۱/۷۸	۰/۵۹	۰/۱۵				
	۳۰۰۰<	۱۱۱/۳۱	۱/۱۴	۰/۵۷	۰/۱۴				
فاصله از گسل	۰-۲۵۰۰	۱۷۳/۶۸	۰/۸۸	۰/۳۸	۰/۰۸	۰/۳۶	۰/۵۰	۰/۲۷	۰/۹۲
	۲۵۰۰-۷۰۰۰	۲۷۲/۷۳	۳/۸۴	۰/۷۶	۰/۲۲				
	۷۰۰۰<	۱۴۲/۳۸	۶/۰۴	۲/۳۳	۰/۶۹				
فاصله از نقاط شهری و روستایی	۰-۱۰۰۰	۹۷/۹۱	۳/۲	۱/۸۵	۰/۴۹	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۱۰	۰/۳۶
	۱۰۰۰-۲۵۰۰	۱۷۸/۴۸	۴/۴	۱/۳۶	۰/۳۶				
	۲۵۰۰<	۳۱۲/۴۰	۳/۰۱	۰/۵۳	۰/۱۴				

جدول ۴- مقادیر به دست آمده از روش ارزیابی شاخص سطح سلول هسته.

SCAI	درصد seed	نسبت فراوانی	درصد مساحت لغزشی	سطح لغزشی (Km <sup>2</sup> )	درصد مساحت هر رده	مساحت هر رده (Km <sup>2</sup> )	رده های خطر	ردش پهنه بندی
۱۹/۶۸	۱/۲۷	-۰/۰۲	۲/۱۹	-۰/۲۲	۲۵/۰۱	۱۴۷/۵۲	بسیار کم	مدل وزن شامد (WOB)
۶/۸۸	۴/۱۰	-۰/۰۵	۷/۸۴	-۰/۸۲	۲۷/۰۸	۱۶۳/۹۸	کم	
۱/۵۲	۱۵/۶۷	-۰/۰۲۰	۲۵/۶۴	۲/۷۳	۲۳/۷۹	۱۴۰/۳۱	متوسط	
۰/۴۵	۴۰/۴۱	-۰/۰۵۰	۵۰/۵۱	۵/۳۸	۱۸/۱۸	۱۰۷/۲۱	زیاد	
۰/۱۴	۳۸/۵۵	-۰/۰۴۸	۱۳/۸۳	۱/۴۷	۵/۲۲	۳۰/۷۶	بسیار زیاد	
۱۴/۲۱	۱/۵۹	-۰/۰۰۲	۲/۵۶	-۰/۲۷	۲۲/۶۱	۱۳۳/۴۰	بسیار کم	مدل شاخص آنتروپی (IOE)
۱۱/۳۲	۲/۴۳	-۰/۰۰۳	۴/۷۳	-۰/۵۱	۲۷/۴۵	۱۶۱/۹۰	کم	
۱/۲۶	۱۴/۷۲	-۰/۰۱۹	۱۹/۴۰	۲/۰۷	۱۸/۵۲	۱۰۹/۲۴	متوسط	
۱/۰۷	۲۰/۲۴	-۰/۰۲۶	۳۱/۲۹	۳/۳۴	۲۱/۷۳	۱۲۸/۱۹	زیاد	
۰/۱۶	۶۱/۰۳	-۰/۰۷۹	۴۲/۰۲	۴/۴۸	۹/۶۸	۵۷/۰۹	بسیار زیاد	

## کتابنگاری

- ابراهیمی، م.، حبیب الهیان، م.، امیراحمدی، ا. و بهرامی، ش.، ۱۳۹۳- پهنه بندی حساسیت خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه (تئوری بیزین)، مطالعه موردی: حوضه آبخیز بار نیشابور. مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۵، شماره ۴، ۲۰ ص.
- پورقاسمی، ح. ر.، مرادی، ح. ر. و فاطمی عقدا، س. م.، ۱۳۹۲- اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی حساسیت آن با استفاده از شاخص آنتروپی شانون، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۸، شماره ۷۰، ۱۱ ص.
- روستایی، ش. و احمدزاده، ح.، ۱۳۹۱- پهنه بندی مناطق متأثر از خطر زمین لغزش در جاده ی تبریز- مرند با استفاده از سنجش از دور و GIS پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۱(۱)، ص. ۵۸ تا ۴۷
- شهابی، م. و سعدالدین، ا.، ۱۳۸۸- شبکه های تصمیم بیزین رهیافتی برای پیش بینی آثار اقدامات مدیریت خشکسالی بر روی اراضی کشت گندم در استان گلستان. پنجمین همایش ملی آبخیزداری ایران، گرگان، ص. ۳۱۴۰ تا ۳۱۴۹.
- شیرانی، کت. و سیف، ع.، ۱۳۹۱- پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش های آماری (منطقه پیشکوه، شهرستان فریدون شهر، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور، سال بیست و دوم، شماره ۸۵، ص. ۱۴۹ تا ۱۵۸.
- شیرانی، کت. و عرب عامری، ع. ر.، ۱۳۹۶- پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: حوضه دز علیا)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شماره هفتاد و دوم، ۱۳، ص. ۳۲۱ تا ۳۳۴.
- شیرانی، کت.، حاجی هاشمی جزئی، م.، نیک نژاد، س. ع. و رخشا، س.، ۱۳۹۱- پهنه بندی پتانسیل خطر زمین لغزش به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چندمتغیره (MR) (مطالعه موردی: سراب حوضه کارون شمالی). نشریه مرتع و آبخیز داری (منابع طبیعی ایران)، ۶۵(۳)، ص. ۳۹۵ تا ۴۰۹.
- شیرانی، کت.، در دست چاپ - مدل سازی و ارزیابی پتانسیل حساسیت اراضی نسبت به لغزش با استفاده از مدل های 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.
- شیرانی، کت.، سیف، ع. و نصر، ا.، ۱۳۹۲- بررسی عوامل مؤثر بر حرکات توده ای بر پایه تهیه نقشه های پهنه بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: ارتفاعات دناي زاگرس)، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور، شماره ۸۹، ص. ۳-۱۰.
- مقیمی، ا.، باقری، س. و صفراء، ط.، ۱۳۹۱- پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاق دیس نسا زاگرس شمال باختری). مجله پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۹، ص. ۷۷ تا ۹۰.

## References

- Akgun, A., Dag, S. and Bulut, F., 2008- Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54(6): 1127-1143.
- Althwaynee, O. F., Pradhan, B., Mahmud, A. R. and Yusoff, Z. M., 2012- Prediction of slope failures using bivariate statistical based index of entropy model. *Humanities, Science and Engineering (CHUSER)*, 2012 IEEE Colloquium on, 362-367.
- Bednarik, M., Magulova, B., Matys, M. and Marschalko, M., 2010- Landslide susceptibility assessment of the Kralovany-Liptovsky Mikulaš railway case study. *Phys. Chem. Earth* 35: 162-171.

- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. and Vescovi, P., 2006- A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environmental Geology*, 50(7): 941-961.
- Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M. C. and Vlaicu, M., 2011- Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environ. Earth Sci.* 63: 397- 406.
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C. 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. *Natural Hazards*, 65(1), 135-165.
- Goetz, J. N., Guthrie, R. H. and Brenning, A., 2011- Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology*, 129(3), 376-386.
- Lee, S. and Pradhan, B., 2006- Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. *Journal of Earth System Science*, 115(6), 661-672.
- Mathew, J., Jha, V. and Rawat, G., 2007- Weights of evidence modelling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. *CURRENT SCIENCE*, 92(5): 628-638.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H. R. and Pradhan, B., 2012- Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61: 221-236.
- Pourghasemi, H. R., Mohammady, M. and Pradhan, B., 2012a- Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran, *Catena* 97: 71-84.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., Gokceoglu, C. and Moezzi, K. D., 2012b- Landslide susceptibility mapping using a spatial multi criteria evaluation model at Haraz Watershed, Iran *Terrigenous Mass Movements* (pp. 23-49): Springer.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Mohammadi, M. and Moradi, H.R., 2013- Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7): 2351-2365.
- Quinn, P., Hutchinson, D., Diederichs, M. and Rowe, R., 2010- Regional-scale landslide susceptibility mapping using the weights of evidence method: an example applied to linear infrastructure. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(8), 905-927.
- Regmi, N. R., Giardino, J. R. and Vitek, J. D., 2010- Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1): 172-187.
- 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 Sikkim, India. *Arab. J. Geosci.* 5 (3): 421-431.
- Shirani, K., 2004- Evaluate the most important landslide hazard zonation methods to select an appropriate method for the South of Isfahan Province, Semirom region, Ministry of Agriculture, Soil Conservation Research Institute, 104.
- Süzen, M. L. and Doyuran, V., 2004- A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45(5), 665-679.
- Vahidnia, M., Alesheikh, A., Alimohammadi, A. and Hosseinali, F., 2009- Landslide hazard zonation using quantitative methods in GIS. *International Journal of Civil Engineering*, 7(3), 176-189.
- Vicko J., Wagner P. and Rychlikova, Z., 1980- Evaluation of regional slope stability. *Mineralia Slovaca* 12(3):275-283.
- Xiong, G., Ruan, Y. and Yang, J., 2005- Analysis on relation between rainfall and slope stability. *Underground Space*, 1(7): pp. 1017-1020.
- Xu, C., Xu, X., Dai, F., Xiao, J., Tan, X. and Yuan, R., 2012- Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science*, 23, 97-120.
- Yang, Z. and Qiao, J., 2010- Regional landslide zonation based on entropy method in Three Gorges area, China, *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2010 Seventh International Conference on IEEE, pp. 1336-1339.
- Zhu, C. and Wang, X., 2009- Landslide susceptibility mapping: a comparison of information and weights-of-evidence methods in Three Gorges Area, *Environmental Science and Information Application Technology*, 2009. ESIAT 2009. International Conference on IEEE, pp. 342-346.

# Application of probabilistic methods in landslide hazard zonation mapping (Case study: Doab Samsami region in Chaharmahal and Bakhtiari Province)

M. Mansour<sup>1</sup> and K. Shirani<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

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

Received: 2016 March 01

Accepted: 2016 July 31

## Abstract

In this research, two probabilistic methods (i.e., weight of evidence and index of entropy models) are used to perform landslide hazard zonation mapping in Doab Samsami region in Chaharmahal and Bakhtiari Province. For this purpose, ten landslide-conditioning factors (i.e., slope gradient, slope direction, precipitation, gravity acceleration, distance to roads, distance to streams, distance to faults, distance to residential areas, lithology and land use) are used. A landslide inventory map was prepared using the known landslides, Google Earth images, and field observations. The landslide hazard map was prepared taking into account the weights calculated by both models and computerized in ArcGIS Software. The SCAI and the area under the curve (AUC) of receiver operating characteristic (ROC) were used to evaluate them. The results of both models imply a good prediction of landslide hazard in the studied area. They indicate that precipitation, lithology and land use have the greatest impacts on the landslides occurred in the Doab Samsami region, respectively, and that both models are appropriate for the landslide hazard mapping. The validation results using 30% of the landslide points showed that in weight of evidence model AUC is 79% and was able to predict the landslides slightly better than the index of entropy method in which AUC was 73%. The maps produced by these models can be useful for regional spatial planning and for land use planning.

**Keywords:** land slide, hazard zonation, Weight of evidence, Index of entropy, Doab Samsami.

For Persian Version see pages 267 to 280

\*Corresponding author: K. Shirani; E-mail: k\_sh424@yahoo.com