تهیهٔ نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل بیزین (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز تالار، استان مازندران)

زهرا سیلاخوری: *دانش‌آموختهٔ گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری*
قربان وهاب‌زده کبریا*: *دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری*
حمیدرضا پورقاسمی: *دانشیار بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز*

نوع مقاله: پژوهشی
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۴)

چکیده

زمین‌لغزش، جزء فراوان‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی در حوضه‌های آبخیز است و از آن به عنوان لندفرمی ژئوموفولوژیگ یاد می‌شود که سالانه خسارت‌های فراوان جانی، مالی و منابع طبیعی در پی دارد. استان مازندران نیز از این قاعده مستثنی نیست. هدف از این تحقیق، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین در حوضه آبخیز تالار واقع در استان مازندران است. در این روش، متغیرها از توزیع‌های احتمال پیروی می‌کنند و تصمیم‌گیری بهینه را می‌توان با استدلال بر توزیع‌های احتمال و داده‌های مشاهده شده انجام داد؛ به این منظور ابتدا با استفاده از نقاط لغزشی موجود، نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه تهیه شد. سپس نقشهٔ هر یک از عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش شامل درجهٔ شیب، جهت شیب، شکل شیب (تحب و تقعر شیب)، ارتفاع، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص طول شیب یا حمل رسوب (STI) و پوشش‌گیاهی منطقه رسم شد. درنهایت نیز نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین برای منطقهٔ مورد مطالعه در پنج کلاس خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه شد. نتایج نشان داد که بیشتر زمین‌لغزش‌ها مربوط به کلاس با شیب ۳۰-۱۵ درجه، با وزن ۱/۲۸ و از نظر جهت شیب در غرب و جنوب منطقه به ترتیب با وزن ۲/۲ و ۲/۴۱ رخ داده‌است. همچنین بیشتر زمین‌لغزش‌ها، در شیب محدب و از نظر ارتفاعی در کلاس ۱۰۰۰-۵۰۰ متر با وزن ۴/۰۷ شکل گرفته‌است. سنگ‌های ماسه‌ای، شیلی و سیلتی و کاربری مرتع، بیشترین تأثیر را در زمین‌لغزش داشت. بررسی فاصلهٔ زمین‌لغزش‌ها از جاده، آبراهه و گسل نیز نشان داد که بیشتر لغزش‌ها در فاصلهٔ کمتر از ۱۰۰-۰ متری این عوامل رخ داده‌است که رابطهٔ نزدیک بین آنها را نشان می‌دهد. بیشترین زمین‌لغزش‌ها از نظر پوشش‌گیاهی، مربوط به طبقهٔ ۰/۵-۰/۳ با وزن ۳/۵۶ است. تحلیل رطوبت توپوگرافیک و شاخص حمل رسوب (توان آبراهه) نشان داد که بیشترین وزن لغزشی به ترتیب مربوط به طبقات ۱۱/۲۹-۶/۳۹ و ۱۹/۶-۱۱/۸۴ با وزن‌های ۱/۰۰۹ و ۱/۱۷ است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که زمین‌لغزش‌ها به ترتیب در کلاس‌های با حساسیت کم ۲۵/۴۰ درصد، متوسط ۳۱/۵۶ درصد، زیاد ۲۸/۷۲ درصد و خیلی‌زیاد ۱۴/۳۰ قرارگرفته‌است. اعتبارسنجی مدل نیز نشان داد که سطح زیرمنحنی ROC برای مدل بیزین ۸۵/۵۶ است که در طبقهٔ خیلی خوب قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: نقشهٔ حساسیت، زمین‌لغزش، تئوری بیزین، حوضه آبخیز تالار.

* نویسندهٔ مسئول: Gh.Vahabzadeh@Sanruu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

۱ـ مقدمه

مدل‌سازی حساسیت‌پذیری نسبت به زمین‌لغزش، در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی کاربری اراضی زمین به خصوص در نواحی کوهستانی اهمیت اساسی دارد. یکی از این مدل‌ها، تلفیق شاخص آنترپی‌شانون و وزن شاهد تئوری بیزین است (Shirani, 2017). زمین‌لغزش به حرکت مواد زمین اعم از خاک و سنگ اطلاق می‌شود که تحت‌تأثیر نیروی ثقل در مناطق شیب‌دار به طرف پایین صورت می‌گیرد (Silakhori et al, 2021). در واقع، این پدیده یکی از گسترده‌ترین و مخرب‌ترین خطرهای طبیعی در نواحی کوهستانی است (Shirani et al, 2018 & Mansouri et al, 2017) و علاوه بر این، نه تنها در محیط‌های طبیعی بلکه در مناطق شهری ـــ که بر روی تپه‌های رسی و مارنی گسترش می‌یابد ـــ نیز رخ می‌دهد (Beheshti et al, 2021). زمین‌لغزش یکی از عوامل اساسی تخریب منابع طبیعی در مناطق کوهستانی است و همواره در سراسر جهان به خسارت‌های سنگین جانی و مالی فراوان منجر می‌شود (Koehorst et al, 2005). در سه دههٔ اخیر، تحقیقات متعددی در مورد پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش انجام شده‌است و همهٔ روش‌های آن، براساس نوع تجزیه و تحلیل در پنج گروه مختلف شامل تجزیه و تحلیل پراکندگی لغزش‌ها، تجزیه و تحلیل کیفی، تجزیه و تحلیل آماری و ... قرار می‌گیرد. کشور ایران با توپوگرافی به طور عمده کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی، لرزه‌خیزی زیاد و شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، دارای عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها است (Talebi and Niyazi, 2011)؛ به‌طوری که از حدود ۴۳ خطر طبیعی، ۳۸ خطر در ایران شناسایی و ثبت شد و به دلیل تعدد، تنوع، تکرار و شدت وقوع خطرات طبیعی و ناآرامی محیط، در ردیف ده کشور بلاخیز جهان قرار گرفته‌است (Mohammadi et al, 2004).

پیش‌بینی زمان وقوع زمین‌لغزش در زمینهٔ نوع، فراوانی و توزیع آنها، از توان علم بشر خارج است؛ بنابراین، با پهنه‌بندی و تهیهٔ نقشهٔ زمین‌لغزش می‌توان مناطق بحرانی و مستعد را مشخص کرد و با شناسایی عوامل مؤثر و با کمک مدل‌های مناسب، می‌توان اقدامات پیشگیرانه‌ای انجام داد و از خسارت‌های ناشی از لغزش کاست که این امر، گامی مهم در مدیریت حوضه آبخیز به شمار می‌رود (Karimi Sangchini et al, 2018 & Ranjbar and Mehmar Efhtekhari, 2012). زمین‌لغزش‌های حوضه آبریز اهرچای، با استفاده از روش شیءگرا و تئوری بیزین پهنه‌بندی شد و نتیجه از این حاکی بود که شیب‌های بین ۲۵-۲۰ درجه و فاصلهٔ ۱۷۰ تا ۱۲۵ متر از رودخانه، بیشترین تأثیر را در زمین‌لغزش منطقه داشت (Fathi et al, 2018). تهیهٔ نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش برای حوضه آبخیز سیاهرود گیلان نیز با روش بیزین انجام شد و نتیجه نشان داد که شیب‌های بین ۵-۲۰ درجه و فاصلهٔ صفر تا صد متری از رودخانه، از عوامل اصلی زمین‌لغزش است. دقت این روش برای مدل‌سازی نیز به میزان ۸۳/۳ درصد به دست آمد (Esfandiari et al, 2014). Piacentinia و همکاران (2012) با استفاده از مدل تئوری بیزین، به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در جنوب منطقهٔ تیرول در کشور ایتالیا پرداختند و نشان دادند که نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها با درصد بالایی (۷۵٪) قابل اطمینان است. Mohammady و همکاران (2012) با استفاده از سه مدل بیزین، دمپستر ـــ شیفر و "نسبت تکرار"، حساسیت زمین‌لغزش را در بخشی از استان گلستان پهنه‌بندی کردند. طبق این ارزیابی، مدل "نسبت تکرار" با دقت ۷۵ درصد، بهترین نتیجه را در بین سه مدل بیان شده به خود اختصاص داد. استان‌های شمالی کشور به لحاظ اقلیمی شرایط ویژه‌ای دارد و عواملی چون بارندگی مناسب به همراه سازندهای زمین‌شناسی حساس به فرسایش و شیب توپوگرافی،

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

قرار گرفتن بر روی کمربند کوهزایی آلپ ـ هیمالیا و وجود گسل‌های فعال، پتانسیل لازم را برای شکل‌گیری حرکات توده‌ای به خصوص زمین‌لغزش فراهم کرده‌است (Balali, 2016).

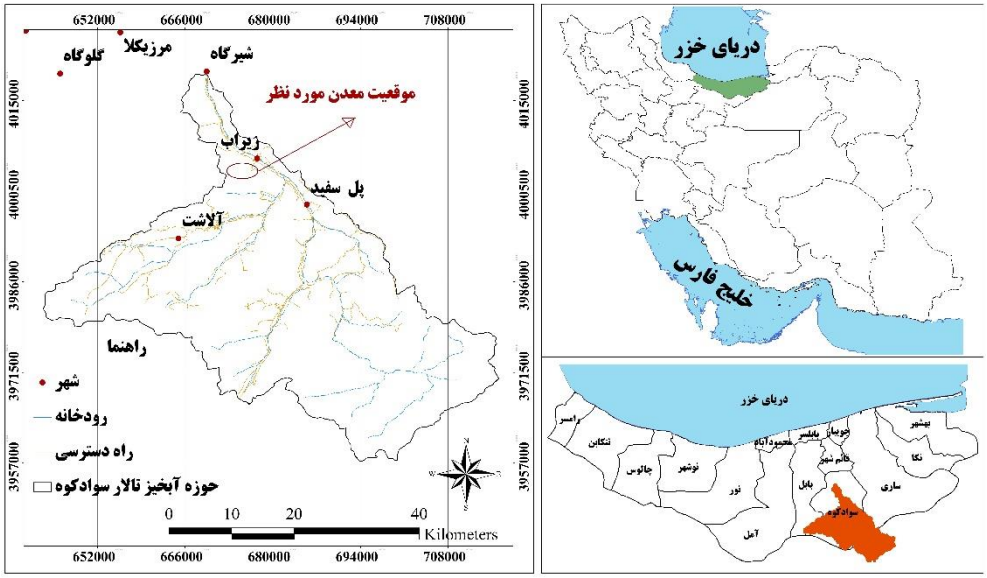
حوضه‌آبخیز تالار به این دلیل که در ساحل دریای خزر به صورت کشیده گسترده شده‌است، ارتفاعی بین ۲۸- متر تا حدود ۳۸۰۰ متر دارد و این تغییر ارتفاع با تنوع اقلیم همراه است. علاوه بر این، وجود روستاهای زیاد در پایین‌دست تا بالادست به ایجاد انواع کاربری اراضی منجر می‌شود که در زمین‌لغزش مؤثر است (Balali, 2016). بنابراین هدف از تحقیق حاضر، تهیهٔ نقشهٔ حساسیت به زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی بیزین ـــ به دلیل کارایی مناسب در بین سایر مدل‌های برآورد زمین‌لغزش ـ است. این مدل بر استدلال و استنتاج بر پایهٔ احتمال مبتنی است؛ به طوری که به این روش، شبکهٔ تصادف و تصمیم‌گیری گفته می‌شود و برای مدیریت جامع حوضه به کار می‌رود. مبنای این مدل بر این فرض استوار است که کمیت‌های مورد نظر، از توزیع‌های احتمال پیروی می‌کند و تصمیم‌گیری بهینه را می‌توان با استدلال بر این توزیع‌های احتمال و داده‌های مشاهده شده انجام داد و امکان اثبات بهینگی دارد. مرور منابع نشان می‌دهد که در این تحقیق از عوامل شاخص طول شیب و حمل رسوب (STI)، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI) و به خصوص شاخص پوشش‌گیاهی (NDVI) استفاده شد که محققان بالا بدان توجه نداشتند یا کمتر آن را به کار بردند. در همین راستا باید اضافه کرد که زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز تالار در استان مازندران، تاکنون فقط با روش دمپستر-شیفر پهنه‌بندی شده‌است (Silakhori et al, 2021). برای مقایسهٔ نتایج این روش با روش پرکاربرد و فراگیرتر دیگر از جمله روش بیزین، لازم است پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها با مدل بیزین انجام شود. بنابراین هدف از تحقیق حاضر، شناسایی و اولویت‌بندی مناطق حساس به لغزش و عوامل مؤثر در آن با استفاده از تئوری بیزین و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی حوضه آبخیز تالار است که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها و مدیریت جامع این حوضه آبخیز نقش اساسی داشته باشد.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانهٔ تالار در شهرستان‌های سوادکوه و قائمشهر استان مازندران، در بخش مرکزی رشته‌کوه‌های البرز قرار دارد. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول‌های "۲۶ ´۵۰ °۵۲ تا "۴۲ ´۱۵ °۵۳ شرقی و عرض‌های "۲۱ ´۵۴ °۳۵ تا "۵۷ ´۱۸ °۳۶ شمالی واقع است و مساحتی در حدود ۹۸۱ کیلومتر مربع دارد که از شمال به کوه ورزاک، از جنوب به کوه‌های زرشک‌دره و هلی‌چال، از شرق به روستاهای سنگده و ولیچال و از غرب به معدن کارسنگ محدود می‌شود. ارتفاع کمینه و بیشینه در منطقه نیز به ترتیب ۳۵ و ۳۵۲۰ متر است. تغییرات زیاد توپوگرافی در این منطقه، به ایجاد شرایط اقلیمی و پوشش‌های گیاهی خاص و متنوعی منجر می‌شود؛ به طوری که در فصول سرد در مناطق پست‌تر، بارش به صورت باران و در ارتفاع‌ها به صورت برف است. حوضه آبخیز تالار به دلیل موقعیت جغرافیایی، ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی و تنوع بالای سنگ‌شناسی، مستعد بروز زمین‌لغزش است. خاک و آب و هوای مناسب منطقه نیز شرایط ویژه‌ای را برای کشاورزی بر روی اراضی و جذب توریست و افراد غیر بومی‌به منطقه فراهم کرده که این امر، تغییرات شدید کاربری در اراضی جنگل و مرتع و تبدیل شدن آنها به اراضی کشاورزی و مسکونی را به همراه داشته‌است و این موضوع خود می‌تواند در وقوع حرکات توده‌ای مؤثر باشد (شکل ۱). خروجی حوضه در شمال و در جلگهٔ قائم‌شهر، از سازندهای دوران چهارم زمین‌شناسی، بخش میانی حوضه آبخیز از سازند کنگلومرایی پلیوسن و ماسه‌سنگ، لای سنگ و مارن پالئوژن و در جنوب حوضه از سازند زغال‌دار شمشک تشکیل شده‌است. میزان بارندگی

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

و دما از شمال حوضه (خروجی) به سمت جنوب در مرزهای استان تهران و سمنان کم می‌شود. میانگین بارش سالیانه از هشتصد میلی‌متر در شمال حوضه تا چهارصد میلی‌متر در ارتفاعات جنوب حوضه متغیر است و متوسط دما نیز از شانزده درجهٔ سانتی‌گراد در شمال تا ده درجه در ارتفاعات جنوب است. حوضه آبخیز تالار از نظر مورفوژنتیکی نیز در سه منطقهٔ نیمه‌خشک، ساوان و معتدل قرار می‌گیرد. در این میان، بیشترین مساحت مربوط به منطقهٔ ساوان (۵۰٪) و کمترین مساحت مربوط به منطقهٔ معتدل است. از نظر وضعیت هوازدگی، سه نوع هوازدگی شیمیایی متوسط، هوازدگی مکانیکی کم و هوازدگی خیلی کم در این حوضه شکل می‌گیرد که هوازدگی شیمیایی متوسط با ۵۶ درصد، بیشترین مساحت را در حوضه آبخیز تالار دارد (Vahabzadeh et al, 2021).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعهٔ روش تحقیق

۳ـ مواد و روش

برای تهیهٔ نقشهٔ حساسیت به زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین، ابتدا نقاط لغزشی منطقه شناسایی شد که این امر با استفاده از بانک اطلاعات زمین‌لغزش اداره کل منابع طبیعی استان مازندران و مطالعات میدانی صورت گرفت. در بازدیدهای میدانی، صحت اطلاعات جمع‌آوری شده ارزیابی شد، سپس با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS[1])، موقعیت نقاط لغزشی بررسی و ۲۶ زمین‌لغزش جدید ثبت شد. در مجموع، ۱۳۴ نقطهٔ لغزشی بررسی شد که از ۹۴ نمونهٔ آن برای آموزش (هفتاد درصد) و از ۴۰ نمونه (سی درصد) برای ارزیابی مدل استفاده شد. همچنین در این تحقیق، دوازده لایهٔ اطلاعاتی شامل نقشهٔ ارتفاع از سطح دریا، جهت شیب، درجهٔ شیب، شکل شیب، فاصله از گسل، فاصله از جاده، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص طول شیب یا شاخص حمل‌رسوب (STI)[2]، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)[3] و شاخص پوشش گیاهی (NDVI)[4] با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، خاک‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای IRS مربوط به سال ۲۰۱۲ تهیه و در محیط نرم‌افزارهای

[1] Global positioning System
[2] Sediment transport index
[3] Topographic Water Index
[4] Normalized Difference Vegetation Index

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

ENVI4.7 و ArcGIS10.3 طبقه‌بندی شد. در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، برای تصحیح اتمسفری از روش Cos(t) و برای تصحیح هندسی از روش نقشه به تصویر استفاده شد. پس از اجرای پیش‌پردازش‌های لازم، برداشت نمونه‌های تعلیمی با استفاده از دستگاه GPS در سطح حوضه آبخیز صورت گرفت. نمونه‌های تعلیمی نیز با روش نمونه‌برداری تصادفی ساده با پراکنش و تعداد مناسب در کل سطح حوضه برداشت شد. ذکر این امر لازم است که شاخص حمل رسوب، یکی از عوامل تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش است که رابطهٔ مستقیمی با طول شیب دارد و به جای هم استفاده می‌شود. نقشهٔ شاخص حمل رسوب نیز از روی نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع DEM[1] در نرم‌افزار (SAGA)[2] تهیه می‌شود. این مدل هم از رقومی کردن نقشهٔ توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه می‌شود.

برای محاسبهٔ شاخص حمل رسوب یا شاخص قدرت آبراهه (SPI)، از رابطهٔ ۱ استفاده شد. در این معادله، اندازهٔ قدرت فرسایش جریان آب متناسب با تخلیهٔ آب بود و این خود تابع وسعت حوضه است (Moore and Burch, 1986).

$$SPI=A_S.\tan B$$ رابطهٔ ۱

برای محاسبهٔ شاخص رطوبت توپوگرافیک (STI)، از رابطهٔ ۲ استفاده شد. این عامل براساس مساحت حوضه As و سینوس گرادیان شیب (SinB)، قابلیت حمل رسوب را در حوضه کنترل می‌کند.

$$STI=(As/22.13)^{0.62}(SinB/0.0896)^{1.3}$$ رابطهٔ ۲

تئوری بیزین

به علت فقدان قطعیت در رخداد برخی پدیده‌های طبیعی از جمله وقوع زمین‌لغزش، نمی‌توان پارامترهای سیستم را به درستی بیان کرد. برای تبیین این نوع موضوعات، تئوری‌های زیادی وجود دارد که به بررسی فقدان اطمینان می‌پردازد که در این مقاله، از تئوری احتمالاتی بیزین یا وزن واقعه استفاده شد (Pourghasemi et al, 2010). در همین زمینه یکی از موضوعات علم احتمال، مبحث احتمال شرطی است. در این مورد، وقتی دو یا چند رویداد به یکدیگر وابسته باشد، وقوع یا عدم وقوع یکی بر وقوع یا عدم وقوع دیگری تأثیر می‌گذارد؛ در این صورت، احتمال وقوع یکی را پس از اینکه دیگری به وقوع پیوسته باشد، محاسبه می‌کند. چنین احتمالی را احتمال شرطی می‌گویند که در این مقاله به صورت P(b | a) یعنی احتمال وقوع b پس از آنکه a اتفاق افتاده باشد، نشان داده شد (Rezaei, 2007). در این مقاله، از بخشی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش ـــ که براساس تجارب متخصصان در مجلات علمی انتشار یافته و به باور علمی تبدیل شده‌است ـــ استفاده شد. به طور کلی می‌توان گفت تئوری بیزین در دهه‌های اخیر، کاربردهای زیادی در علوم و به‌ویژه در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش داشت (رابطهٔ ۳).

$$P(b \mid a) = P(a \mid b) \times P(b) / P(a)$$ رابطهٔ ۳

[1] Digital Elevition Model
[2] System for Automated Geoscientific Analyses

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

که در آن P(a) احتمال وقوع پیشامد a، P(b) احتمال وقوع پیشامد b و P(b | a) احتمال وقوع پیشامد b به شرطی که پیشامد a اتفاق افتاده باشد. P(a | b) نیز احتمال وقوع پیشامد a به‌شرطی است که پیشامد b اتفاق افتاده باشد (Pourghasemi et al, 2011 & Shirani, 2017).به این منظور، ابتدا وزن‌های محتمل هر عامل و طبقه‌های مربوط‌به آن با استفاده از رابطه‌های (۴ و ۵) محاسبه می‌شود:

$$w_i^+ = \log_e[P(B_i|S) / P(B_i|\bar{S})]$$ رابطهٔ ۴

$$w_{i^-} = \log_e[P(\bar{B}_1|S) / P(\bar{B}_1|\bar{S})]$$ رابطهٔ ۵

به‌منظور درک هر چه بهتر روابط (۴ و ۵) و سهولت کار به‌ویژه در محیط GIS، مدل براساس جدول ۱ و به صورت رابطه‌های (۶ و ۷) ارائه شد (Yesilnacar, 2005) و در نهلیت، وزن نهایی بر اساس روابط (۸ و ۹) برای هر عامل به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شد (Shirani, 2017 & Pourghasemi et al, 2011).

$$W_i^+ = \log_e[(N_{pix1}/(N_{pix1}+N_{pix2})) / (N_{pix3}/(N_{pix3}+N_{pix4}))]$$ رابطهٔ ۶

$$W_i = \log_e[(N_{pix2}/(N_{pix1}+N_{pix2})) / (N_{pix4}/(N_{pix3}+N_{pix4}))]$$ رابطهٔ ۷

که در آن، Npix1 تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس Npix2 (تعداد کل پیکسل‌های لغزشی در یک نقشه)- (تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس) Npix3 (تعداد پیکسل‌های یک کلاس)- (تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس)، Npix4 (تعداد کل پیکسل‌های یک نقشه)- (تعداد کل پیکسل‌های لغزشی یک نقشه)- (تعداد پیکسل‌های یک کلاس) + (تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس) (Pourghasemi et al, 2011).

$$C=[(w^+)-(w^-)]$$ رابطهٔ ۸

$$W_{fin} = C/Sc$$ رابطهٔ ۹

که در آن، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} وزن نهایی استاندارد شده و SC انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی می‌باشد (Pourghasemi et al, 2011).

جدول ۱: چهار حالت پتانسیل ایجاد زمین‌لغزش

عوامل ایجاد زمین‌لغزش		
زمین‌لغزش	حضور	فقدان حضور
حضور	Npix1	Npix2
فقدان حضور	Npix3	Npix4

در مرحلهٔ بعد، نقشهٔ هر یک از عوامل مؤثر در محیط ArcMap با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها تلفیق شد و تعداد لغزش در هر طبقه به دست آمد. برای ارزیابی نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، از بین ۱۳۴ نقطهٔ لغزشی تعدادی از

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

نقاط برای مدل‌سازی و بخشی از زمین‌لغزش‌ها نیز برای ارزیابی مدل (با نسبت حدودی هفتاد به سی درصد) استفاده شد. سپس با استفاده از منحنی ROC، صحت نقشهٔ پهنه‌بندی ارزیابی شد. این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (Pourghasemi et al, 2011). سطح زیر منحنی ROC، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین لغزش) و فقدان وقوع رخداد (فقدان وقوع زمین‌لغزش) است.

۴ـ نتایج

نقشهٔ پراکنش نقاط لغزشی در منطقهٔ مطالعات حاصل از بررسی‌های میدانی واطلاعات موجود، در شکل ۲ نشان داده شد. در مرحلهٔ بعد، نقشه‌های عامل شامل دوازده نقشهٔ ارتفاع از سطح دریا، جهت شیب، درجهٔ شیب، شکل شیب، فاصله از گسل، فاصله از جاده، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص طول شیب یا شاخص حمل رسوب، شاخص رطوبت توپوگرافیک و شاخص پوشش‌گیاهی تهیه شد که در شکل ۳ آمده‌است. همین طور نتایج حاصل از ارتباط بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و لغزش‌های رخ داده، با استفاده از مدل احتمالاتی یا تئوری بیزین در جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۱: ارتباط بین هر یک از عوامل مؤثر و نقاط لغزشی با استفاده از مدل احتمالاتی بیزین

عامل	کلاس	پیکسل‌های فاقد لغزش تعداد	پیکسل‌های فاقد لغزش درصد	پیکسل‌های لغزشی تعداد	پیکسل‌های لغزشی درصد	نسبت فراوانی	W+	W-	C	S2(W+)	S2(w+)	S©	C/S©
درجه شیب	<۵	۶۸۹۱۳۶	۷/۰۲۴	۸	۸/۵۱۰	۱/۲۱	۰/۱۹۱	-۰/۰۱۶	۰/۲۱	۰/۱۲۵	۰/۰۱۱	۰/۳۶۹	۰/۵۶
	۵--۱۵	۶۸۹۱۳۶	۷/۰۲۴	۸	۸/۵۱۰	۱/۲۱	۰/۱۹۱	-۰/۰۱۶	۰/۲۱	۰/۱۲۵	۰/۰۱۱	۰/۳۶۹	۰/۵۶
	۱۵-۳۰	۶۸۹۱۳۶	۷/۰۲۴	۸	۸/۵۱۰	۱/۲۱	۰/۱۹۱	-۰/۰۱۶	۰/۲۱	۰/۱۲۵	۰/۰۱۱	۰/۳۶۹	۰/۵۶
	۳۰-۵۰	۶۸۹۱۳۶	۷/۰۲۴	۸	۸/۵۱۰	۱/۲۱	۰/۱۹۱	-۰/۰۱۶	۰/۲۱	۰/۱۲۵	۰/۰۱۱	۰/۳۶۹	۰/۵۶
	>۵۰	۶۸۹۱۳۶	۷/۰۲۴	۸	۸/۵۱۰	۱/۲۱	۰/۱۹۱	-۰/۰۱۶	۰/۲۱	۰/۱۲۵	۰/۰۱۱	۰/۳۶۹	۰/۵۶
جهت شیب	هموار	۴۱۰۵۲۳	۴/۱۸۴	۰	۰	۰	۰/۵۱۴	۰/۰۴۲	-۰/۸۳	۰/۱۱	۰/۰۱۰	۰/۲۱	۰/۲۴
	شمال	۱۴۵۰۸۸۸	۱۴/۷۸۸	۶	۶/۳۸	۰/۴۳	-۰/۸۴	۰/۰۹۴	-۰/۹۳	۰/۱۶۶	۰/۰۱۱	۰/۴۲۱	-۲/۲۱
	شمال شرقی	۱۲۳۶۶۰۹	۱۲/۶۰۴	۷	۷/۴۴	۰/۵۹	-۰/۵۲	۰/۰۵۷	-۰/۶	۰/۱۴۲	۰/۰۱۱	۰/۳۹۲	-۱/۴۸
	شرق	۱۰۴۱۰۱۵	۱۰/۶۱۰	۱۰	۱۰/۶۳	۱/۰۲	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۰	۰	۰/۱۰۰	۰/۰۱۱	۰/۳۳۴	۰/۰۰۸
	جنوب شرقی	۱۰۰۶۷۶۴	۱۰/۲۶۱	۱۰	۱۰/۶۳	۱/۰۴	۰/۰۳	-۰/۰۰۴	۰/۰۴	۰/۱۰۰	۰/۰۱۱	۰/۳۳۴	۰/۱۲
	جنوب	۱۰۴۱۰۰۵	۱۰/۶۱۰	۱۷	۱۸/۰۸	۱/۷۱	۰/۵۳	-۰/۰۸۷	۰/۶۲	۰/۰۵۸	۰/۰۱۲	۰/۲۶۷	۲/۳۱
	جنوب غربی	۱۰۸۶۷۱۲	۱۱/۰۷۶	۱۶	۱۷/۰۲	۱/۵۴	۰/۴۲	-۰/۰۶۹	۰/۴۹	۰/۰۶۲	۰/۰۱۲	۰/۲۷۴	۱/۸۱
	غرب	۱۱۴۷۴۱۵	۱۱/۶۹۵	۱۸	۱۹/۱۴	۱/۶۴	۰/۴۹	-۰/۰۸۸	۰/۵۸	۰/۰۵۵	۰/۰۱۳	۰/۲۶۲	۲/۲۱
	شمال غربی	۱۳۹۰۱۱۶	۱۴/۱۶۸	۱۰	۱۰/۶۳	۰/۷۵	-۰/۲۸	۰/۰۴۰	-۰/۳۲	۰/۱۰۰	۰/۰۱۱	۰/۳۳۴	-۰/۹۷
طبقه‌های ارتفاعی (متر)	۵۰۰>	۵۶۶۱۲۰	۵/۷۷۰	۱۳	۱۳/۸۳	۲/۳۹	۰/۸۷۴	-۰/۰۸۹	۰/۹۶	۰/۰۷۶	۰/۰۱۲	۰/۲۹۸	۳/۲۲
	۵۰۰-۱۰۰۰	۳۴۹۸۹۳۰	۳۵/۶۶۳	۵۳	۵۶/۳۸۲	۱/۵۸	۰/۴۵۸	-۰/۳۸۸	۰/۸۵	۰/۰۱۷	۰/۰۲۴	۰/۲۰۷	۴/۰۷
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۳۰۵۶۶۰۹	۳۱/۱۵۴	۲۲	۲۳/۴۰۴	۰/۷۵	-۰/۲۸۶	۰/۱۰۶	-۰/۳۹	۰/۰۴۵	۰/۰۱۳	۰/۲۴۳	-۱/۶۱
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۱۹۲۴۹۰۳	۱۹/۶۱۹	۶	۶/۳۸۲	۰/۳۳	-۱/۱۲۲	۰/۱۵۲	-۱/۲۸	۰/۱۶۶	۰/۰۱۱	۰/۴۲۱	-۳/۰۲

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

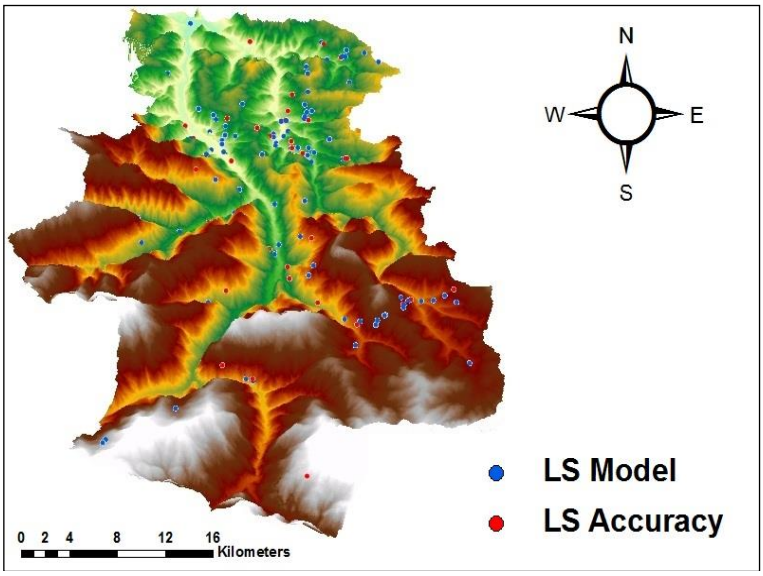
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۵۹۸۷۱۴	۶/۱۰۲	۰	۰	۰	-۰/۲۹	۰/۰۶۲	۰/۵۶	۰/۰۵	۰/۰۱۰	۰/۳۲	۰/۱۲
	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۱۲۲۷۸۲	۱/۲۵۱	۰	۰	۰	۰/۱۴	۰/۰۱۲	۰/۴۵	۰/۰۹	۰/۰۱۰	۰/۱۴	۰/۰۸
	>۳۰۰۰	۴۲۹۸۹	۰/۴۳۸	۰	۰	۰	۰/۲۴	۰/۰۰۴	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۰۱۰	۰/۴۲	۰/۱۳
کاربری اراضی	اراضی زراعی و باغ‌ها	۱۴۷۹۲۲۹	۱۵/۰۷۷	۷	۷/۴۴۶	۰/۴۹	-۰/۷۱	۰/۰۸۶	-۰/۸	۰/۱۴۲	۰/۰۱۱	۰/۳۹۲	-۲/۰۱
	جنگل	۴۸۷۳۳۹۳	۴۹/۶۷۲	۶۴	۶۸/۰۸	۱/۳۷	۰/۳۲	-۰/۴۶	۰/۷۷	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۲۲	۰/۵
	مناطق مسکونی	۴۷۳۴۹۳	۴/۸۲۶	۳	۳/۱۹۱	۰/۶۶	-۰/۴۲	۰/۰۲	-۰/۴۳	۰/۳۳۳	۰/۰۱۰	۰/۵۸۶	-۰/۷۳
	مرتع	۲۹۸۴۰۳۲	۳۰/۴۲۴	۲۰	۲۱/۲۸	۰/۶۹	-۰/۳۷	۰/۱۲۳	-۰/۴۸	۰/۰۵	۰/۰۱۳	۰/۲۵۲	-۱/۹۰
شکل شیب	منفعر	۴۱۸۶۳۰۸	۴۲/۶۶	۴۲	۴۴/۶۸	۱/۰۵	۰/۰۴۶	-۰/۰۳۵	۰/۰۸	۰/۰۲۳	۰/۰۱۹	۰/۲۰۷	۰/۳۹
	مسطح	۱۱۷۰۸۵۶	۱۱/۹۳	۴	۴/۲۵	۰/۳۶	-۱/۰۳	۰/۰۸۳	-۱/۱۱	۰/۲۵۰	۰/۰۱۱	۰/۵۱۰	-۲/۱۸
	محدب	۴۴۵۳۸۸۳	۴۵/۳۹	۴۸	۵۱/۰۶	۱/۱۳	۰/۱۱۷	-۰/۱۰۹	۰/۲۳	۰/۰۲۰	۰/۰۲۱	۰/۲۰۶	۱/۱۰

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

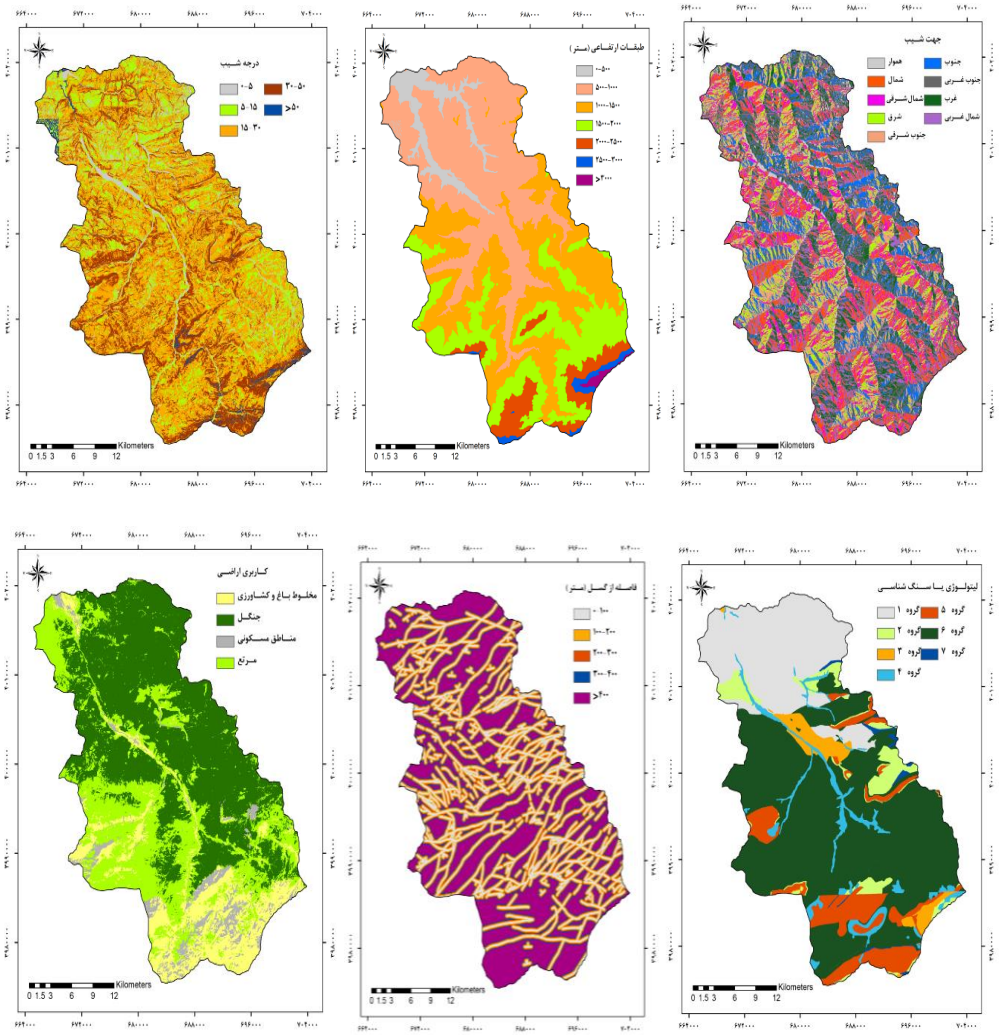
ادامهٔ جدول ۱: ارتباط بین عوامل مؤثر و رخداد زمین‌لغزش بر اساس تئوری بیزین

کلاس	پیکسل‌های فاقد لغزش		پیکسل‌های لغزشی		نسبت فراوانی	W+	W-	C	S2(W+)	S2(w+)	S©	C/S©
	تعداد	درصد	تعداد	درصد								
۰–۱۰۰	۲۱۱۸۸۶۰	۲۱/۵	۲۵	۲۶/۵	۱/۲۳	۰/۲۱	-۰/۰۷	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۲۳	۱/۱۵
۱۰۰–۲۰۰	۱۷۴۹۸۱۸	۱۷/۸	۱۱	۱۱/۷	۰/۶۵	-۰/۴۲	۰/۰۷	-۰/۵	۰/۱	۰/۰۱	۰/۳۲	-۱/۵۴
۲۰۰–۳۰۰	۱۴۳۸۷۱۵	۱۴/۶	۱۸	۱۹/۱۵	۱/۳۱	۰/۲۶	-۰/۰۵	۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۲	۱/۲۳
۳۰۰–۴۰۰	۱۱۲۰۷۱۱	۱۱/۴	۱۳	۱۳/۸	۱/۲۱	۰/۱۹	-۰/۰۳	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۲	۰/۷۳
>۴۰۰	۳۳۸۲۹۴۳	۳۴/۴	۲۷	۲۸/۷	۰/۸۳	-۰/۱۸	۰/۰۸	-۰/۳	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۲۳	-۰/۱۷
۰–۱۰۰	۱۵۹۱۹۱۳	۱۶/۲۲۵	۲۳	۲۴/۴۶	۱/۵۰	۰/۱۴	-۰/۰۳	۰/۵۱	۰/۰۴۳	۰/۰۱۴	۰/۲۴	۲/۱۴
۱۰۰–۲۰۰	۱۳۸۵۵۱۶	۱۴/۱۲۱	۱۳	۱۳/۸۳	۰/۹۸	-۰/۰۲۰	۰/۰۱	-۰/۰۲	۰/۰۷۶	۰/۰۱۲	۰/۲۹	-۰/۰۸
۲۰۰–۳۰۰	۱۲۸۸۶۳۵	۱۳/۱۳۴	۱۹	۲۰/۲۱	۱/۵۴	۰/۴۳۱	-۰/۰۹	۰/۵۲	۰/۰۵۲	۰/۰۱۳	۰/۲۶	۲/۰۱
۳۰۰–۴۰۰	۱۱۷۳۷۳۱	۱۱/۹۶۳	۹	۹/۵۸	۰/۸۰	-۰/۲۲	۰/۰۳	-۰/۳	۰/۱۱۱	۰/۰۱۱	۰/۳۵	-۰/۷۱
>۴۰۰	۴۳۷۱۲۵۲	۴۴/۵۵۴	۳۰	۳۱/۹۲	۰/۷۲	-۰/۳۳	۰/۲۱	-۰/۵	۰/۰۳۳	۰/۰۱۵	۰/۲۲	-۰/۴۴
<۶/۳۹	۶۶۰۵۱۲۴	۶۷/۳۲	۵۸	۶۱/۷۰	۰/۹۱	-۰/۰۹	۰/۱۵۸	-۰/۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۷	۰/۲۱۲	-۱/۱۵
۶/۳۹-۱۱/۲۹	۲۶۷۵۳۵۷	۲۷/۲۶	۳۰	۳۱/۹۱	۱/۱۷	۰/۱۵۷	-۰/۰۶۶	۰/۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۱۵	۰/۲۲۱	۱/۰۰۹
۱۱/۲۹-۲۶/۳۳	۵۳۰۵۶۶	۵/۴۰	۶	۶/۳۸	۱/۱۸	۰/۱۶۵	-۰/۰۱۰	۰/۱۸	۰/۱۶۶	۰/۰۱۱	۰/۴۲۱	۰/۴۱
۰–۱۰۰	۸۰۳۱۱۷	۵/۱۸۵	۲۰	۲۱/۲۸	۲/۵۹	۰/۹۶	-۰/۱۵	۱/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۲۵	۴/۴۰
۱۰۰–۲۰۰	۶۹۱۵۰۶	۷/۰۴۸	۱۵	۱۵/۹۶	۲/۲۶	۰/۸۱۷	-۰/۱۰۰	۰/۹۲	۰/۰۶۶	۰/۰۱۲	۰/۲۸۱	۳/۲۵۹
۲۰۰–۳۰۰	۶۳۸۸۹۶	۶/۵۱۲	۱۲	۱۲/۷۶	۱/۹۶	۰/۶۷۳	-۰/۰۶۹	۰/۷۴	۰/۰۸۳	۰/۰۱۲	۰/۳۰۹	۲/۴۰۱
۳۰۰–۴۰۰	۶۰۰۰۷۷	۶/۱۶	۱۵	۱۵/۹۶	۲/۶۱	۰/۹۵۸	-۰/۱۱۰	۱/۰۷	۰/۰۶۶	۰/۰۱۲	۰/۲۸۱	۳/۷۹۸
۴۰۰–۵۰۰	۵۵۶۲۶۷	۵/۶۶۹	۳	۳/۱۹۱	۰/۵۶	-۰/۵۷	۰/۰۲۵	-۰/۶	۰/۳۳	۰/۰۱۰	۰/۵۸۶	-۱/۰۲
>۵۰۰	۶۵۲۱۱۸۴	۶۶/۴۶۷	۲۹	۳۰/۸۵	۰/۴۶	-۰/۷۷	۰/۰۷۲	-۱/۵	۰/۰۳۴	۰/۰۱۵	۰/۲۲۳	-۶/۶۷
<۵/۶۶	۳۲۶۴۴۳۷	۳۳/۲۷	۳۴	۳۶/۱۷	۱/۰۸	۰/۰۸۳	-۰/۰۴۴	۰/۱۳	۰/۰۲۹	۰/۰۱۶	۰/۲۱۴	۰/۵۹
۵/۶۶-۱۱/۸۴	۳۴۷۰۵۷۸	۳۵/۳۷	۳۳	۳۵/۱	۰/۹۹	-۰/۰۱	۰/۰۰۴	-۰/۰۱	۰/۰۳۰	۰/۰۱۶	۰/۲۱۶	-۰/۰۵
۱۱/۸۴-۱۹/۶۲	۲۲۱۳۷۱۶	۲۲/۵۶	۲۶	۲۷/۶۵	۱/۲۳	۰/۲۰۳	-۰/۰۷	۰/۲۷	۰/۰۳۸	۰/۰۱۴	۰/۲۳۰	۱/۱۷
۱۹/۶۲-۴۵/۲۵	۸۶۲۳۱۶	۸/۷۸	۱	۱/۰۶۳	۰/۱۲	-۲/۱۱	۰/۰۸۱	-۲/۲	۱/۰۰	۰/۰۱۰	۱/۰۰۵	-۲/۱۸

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

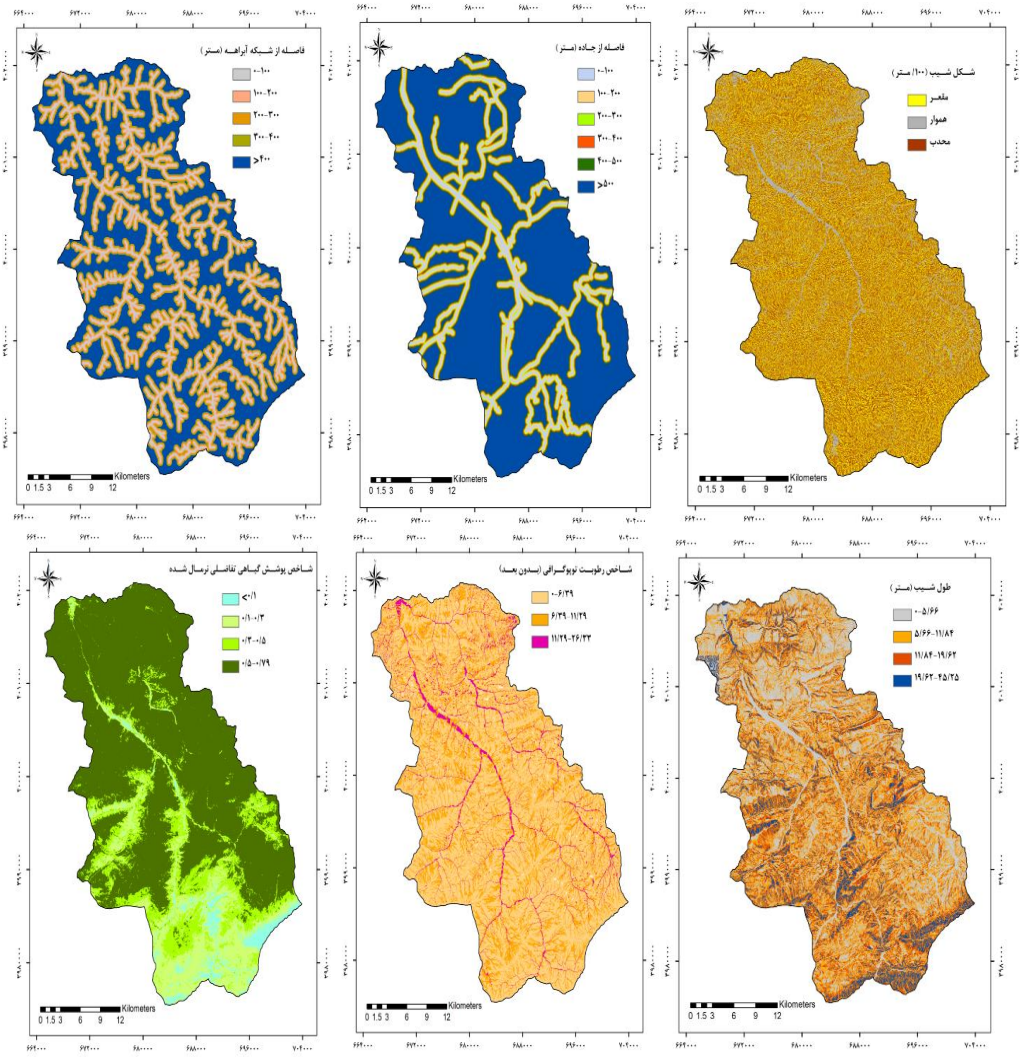


شکل ۲: نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها در منطقهٔ مورد مطالعه



شکل ۳: نقشه‌های عوامل مؤثر در زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین در منطقهٔ مورد مطالعه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

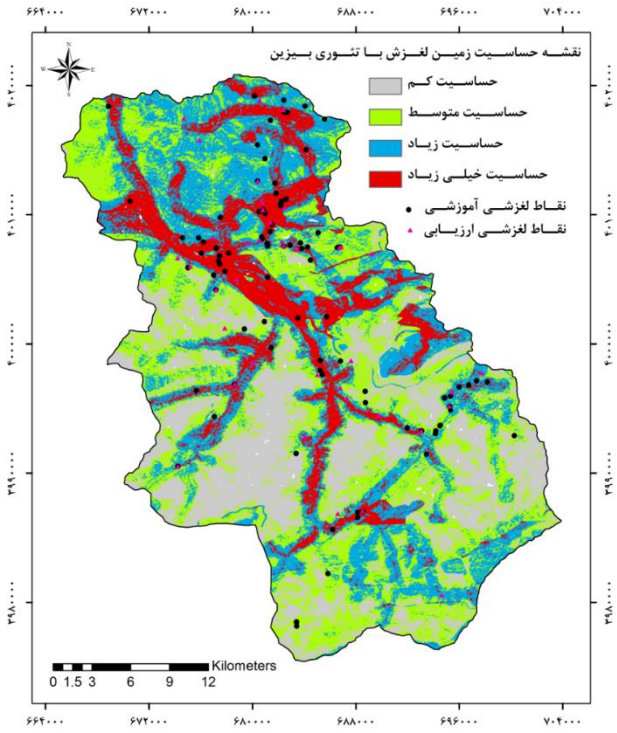


شکل ۴: نقشه‌های عوامل مؤثر در زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین در منطقهٔ مورد مطالعه

در نهایت بعد از تهیهٔ نقشه‌های وزنی بر اساس روابط مدل، نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش تهیه و بر اساس شکستگی‌های طبیعی[1]، به چهار کلاس حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. نتیجهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین در شکل (۳ و ۴) ارائه شد. این شکل، صرفاً نقشهٔ حساسیت به زمین‌لغزش منطقه را نشان می‌دهد و در واقع، نقشهٔ پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش است که از تعداد لغزش‌های اتفاق افتاده کمک گرفته و با تئوری بیزین مدل‌سازی شده‌است.

[1] Natural Breaks

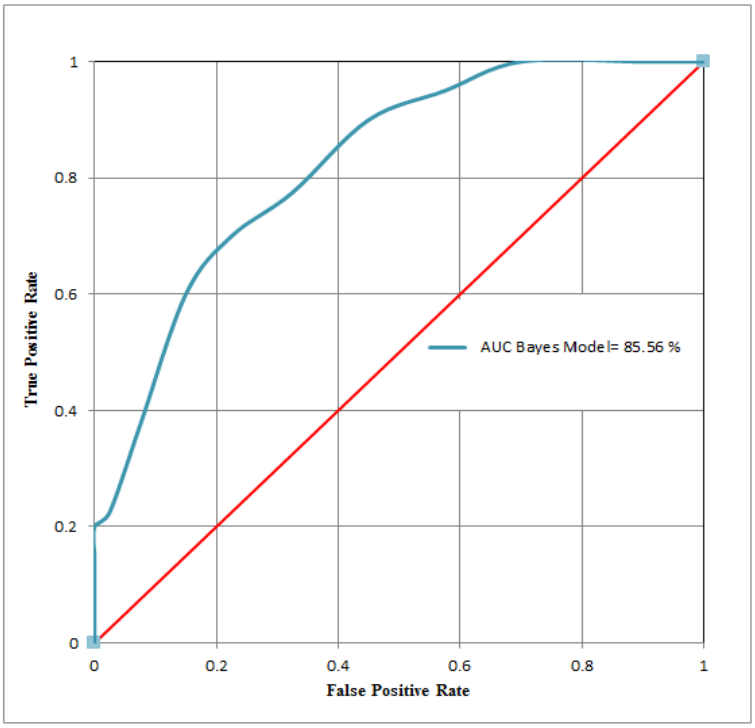
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]



شکل ۵: نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش منطقهٔ مورد مطالعه با استفاده از تئوری بیزین

براساس شکل ۵، محدودهٔ حساسیت کم به زمین‌لغزش عمدتاً مناطق جنگلی با ضخامت زیاد خاک و پوشش انبوه گیاهی را شامل می‌شود که در قسمت‌های غرب و جنوب‌شرق حوضه آبخیز پراکنده‌است. مناطق با حساسیت متوسط نیز غالباً در نقاط و ارتفاع مختلف حوضه آبخیز به طور نسبتاً یکنواخت قرار دارد. محدودهٔ با حساسیت زیاد نیز در شمال و خروجی حوضه بر روی کنگلومرای پلیوسن و در جنوب حوضه بر روی سازند شمشک با ترکیب غالب شیلی، ماسه‌سنگی، سیلت سنگ و نیز دو طرف رودخانه‌ها و جاده‌ها گسترش دارد. مناطق با حساسیت زیاد صرفاً در نزدیکی آبراهه‌ها و جاده‌ها بدون توجه به نوع سازند زمین‌شناسی توزیع شده‌است. همان طور که بیان شد، برای اعتبارسنجی نتایج یا مدل‌ها از منحنی ROC استفاده شد. هر چه سطح زیر منحنی بیشتر باشد، دقت مدل نیز بیشتر می‌شود و میزان آن بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است. سطح زیرمنحنی ROC برای مدل بیزین ۸۵/۵۶ است و در طبقهٔ خیلی خوب قرار می‌گیرد (شکل ۶).

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]



شکل ۵: منحنی ROC و سطح زیر منحنی مربوط به نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

نقشهٔ حساسیت به زمین‌لغزش این حوضه، به کمک زمین‌لغزش‌های موجود و با استفاده از نظریه یا مدل احتمالاتی بیزین تهیه شد و در واقع، نوعی پیش‌بینی صورت گرفت و نقشهٔ حساسیت به زمین‌لغزش رسم شد که در ادامه به جزئیات آنها پرداخته خواهد شد.

نتایج حاصل از بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین در منطقهٔ مورد مطالعه نشان داد که بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها مربوط به کلاس ۳۰-۱۵ درجه با وزن ۱/۲۸ است که با نتایج Arakanavolu and Goklu (2004) ــ که معتقد است بیشتر زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های متوسط اتفاق می‌افتد ــ همخوانی دارد. همچنین این نتیجه با پژوهش Fathi و همکاران (2018) مطابقت دارد؛ بدین سبب که در شیب‌های متوسط، دخالت انسانی از قبیل کاربری اراضی به حساسیت این شیب‌ها منجر می‌شود؛ زیرا در شیب‌های کمتر، نیروی مقاوم (عمودی) بیش از نیروی محرک (افقی) است و شرایط وقوع زمین‌لغزش فراهم نمی‌شود (Yesilnacar et al, 2011). بررسی جهت شیب نیز نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه، در جهت غرب و جنوب با وزن نهایی به ترتیب ۲/۲۱ و ۲/۴۱ رخ می‌دهد که با پژوهش Shams and Alizadeh (2018) و Mansouri و همکاران (2016) سازگار است. بررسی شکل شیب با وزن نهایی ۱/۱ نیز نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در شیب‌های محدب رخ می‌دهد که با نتایج Pourqasemi و همکاران (2011-2012) مشابه است که ممکن است به دلیل فرسایش بیشتر در دامنهٔ جنوبی کوه‌ها مانند سایر نقاط نیم‌کرهٔ شمالی زمین باشد. شیب‌های محدب معمولاً بیشترین زمین‌لغزش را دارد. این عامل می‌تواند در همگرایی و واگرایی جریان انتقالی از بالادست حوضه به پایین دست آن نقش به سزایی داشته باشد که با نتایج مطالعات Pourqasemi و همکاران (2011) مطابقت دارد. نقش این نوع شیب در فراوانی زمین‌لغزش ممکن است به دلیل

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

گستردگی و انقباض مکرر ناشی از بارندگی باشد که با خزش و جریان گلی همراه است. در طبقهٔ ارتفاعی ۱۰۰۰-۵۰۰ متر، حداکثر زمین‌لغزش با وزن ۴/۰۷ اتفاق افتاده‌است. با افزایش ارتفاع، میزان حساسیت به خطر زمین‌لغزش کم می‌شود که این موضوع بیانگر دخالت‌های انسانی کم یا لیتولوژی مقاوم منطقه در ارتفاعات بالاتر است که با نتایج مطالعات Pourqasemi و همکاران (2011-2012) مطابقت دارد.

بررسی سنگ‌شناسی نیز نشان می‌دهد که سنگ‌های ماسه‌ای، شیلی و سیلتی بیشترین نقش را در زمین‌لغزش به خود اختصاص می‌دهد و وزن آن ۹/۶۰۷ است. این نتیجه با پژوهش دیگران از جمله Yesilnacar (2005) همخوانی دارد. دلیل اصلی حساسیت این سازندها به فرسایش، قابلیت جذب آب آنهاست که در سنگ‌های مارنی و شیلی به دلیل وجود کانی‌ها و ذرات رسی اتفاق می‌افتد و محققان دیگر از جمله Pourqasemi (2017) به آن اشاره کرده‌اند. کاربری اراضی نشان می‌دهد که مرتع با وزن نهایی ۳/۴۸، بیشترین سهم لغزش را به خود اختصاص می‌دهد که با مطالعات Shams and Alizadeh (2018) تطبیق دارد. بررسی فاصله از جاده، آبراهه و گسل نشان می‌دهد که بیشترین لغزش‌های اتفاق افتاده، در فواصل ۱۰۰-۰ متری سه عامل مذکور رخ می‌دهد که بیانگر همبستگی وقوع زمین‌لغزش با حریم جاده، آبراهه و گسل است و با نتایج بسیاری از محققان از جمله Pourqasemi and Mohammady (2016) سازگاراست. علت این است که این عوامل تعادل طبیعی زمین را به هم می‌زند و سبب ناپایداری می‌شود. باتوجه به پوشش‌گیاهی، بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها مربوط به کلاس ۰/۵-۰/۳ با وزن ۳/۵۶ است. تحلیل رطوبت توپوگرافیک و شاخص حمل رسوب (توان آبراهه)، بیانگر آن است که بیشترین وزن لغزشی به ترتیب مربوط به طبقات ۱۱/۲۹-۶/۳۹ و ۸۴/۶-۱۱/۱۹ با وزن‌های ۱/۰۰۹ و ۱/۱۷ است. نقشهٔ پهنه‌بندی با توجه به دوازده عامل، در چهار کلاس حساسیت در شکل ۵ ارائه شد. بر اساس این شکل، زمین‌لغزش‌ها به ترتیب در کلاس‌های با حساسیت کم ۲۵/۴۰ درصد، متوسط ۳۱/۵۶ درصد، زیاد ۲۸/۷۲ درصد و خیلی‌زیاد ۱۴/۳۰ درصد قرار گرفته‌است. کلاس با حساسیت کم عمدتاً در مناطق جنگلی، مناطق با حساسیت متوسط غالباً در نقاط و ارتفاع مختلف، محدودهٔ با حساسیت زیاد در شمال و خروجی حوضه بر روی کنگلومرای پلیوسن و در جنوب بر روی سازند شمشک با ترکیب غالب شیلی، ماسه‌سنگی و سیلت سنگ و نیز دو طرف رودخانه‌ها و جاده‌ها گسترش دارد. مناطق با حساسیت زیاد نیز صرفاً در نزدیکی آبراهه‌ها و جاده‌ها بدون توجه به نوع سازند زمین‌شناسی توزیع شده‌است. نتایج این مقاله می‌تواند در آمایش و برنامه‌ریزی حوضه‌های آبخیز نقش مهمی داشته باشد. به طور خلاصه می‌توان گفت براساس نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش در شکل ۶، مناطق با حساسیت کم شامل ارتفاعات جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی به خصوص ارتفاعات بالای هزار متری و با رخنمون سنگی بود که سازندهای زمین‌شناسی الیکا، لار و تیزکوه با لیتولوژی کربناتی، مساحت زیادی از این مناطق را پوشش می‌دهد. مناطق با حساسیت متوسط نیز بیشتر دامنهٔ ارتفاعات است که در محدودهٔ با حساسیت کم و در قسمت‌های جنوبی و میانی حوضه آبخیز تالار پراکنده‌است و در فاصلهٔ دور از جادهٔ روستایی، رودخانه یا گسل قرار می‌گیرد و دارای شاخص پوشش‌گیاهی کم است. مناطق با حساسیت زیاد زمین‌لغزش نیز در قسمت‌های شمال حوضه شامل تپه ماهورهای کنگلومرایی و روستاهای جنگلی و با شاخص پوشش‌گیاهی متوسط تا زیاد واقع شده‌است. این مناطق به دلیل قطع درختان، تغییر کاربری اراضی و جاده‌های دسترسی به روستاها، معادن زغال‌سنگ و استحصال چوب جنگلی، حساسیت زیادی به زمین‌لغزش دارد. محدودهٔ با حساسیت خیلی زیاد نیز در موازات جاده‌ها، رودخانه‌ها، گسل‌ها و دامنه‌های سازند

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

شیلی شمشک واقع شده‌است. این مناطق به خصوص در موازات جاده‌های احداثی در سازندهای زمین‌شناسی شیلی و مارنی دره‌های عریض قرار دارد. برای اعتبارسنجی نتایج یا مدل‌ها از منحنی ROC استفاده شد و سطح زیر این منحنی برای مدل بیزین به میزان ۸۵/۵۶ به دست آمد و در طبقهٔ خیلی خوب قرار گرفت که بیانگر دقت بالای مدل است.

به طور کلی، مقایسهٔ نتایج این تحقیق با جدیدترین پژوهش‌های صورت گرفته در ایران نشان داد که کاربری زمین، مهم‌ترین عامل ایجاد زمین‌لغزش در حوضهٔ سرخون کارون در استان چهارمحال و بختیاری است (Shirani, 2017) و بارش، سنگ‌شناسی و کاربری زمین نیز مهم‌ترین عوامل ایجاد این پدیده در حوضهٔ دوآب صمصامی در همین استان به شمار می‌رود (Mansouri et al, 2017)؛ حال آنکه در این تحقیق مشخص شد که فاصله از آبراه و جاده به همراه عامل سنگ‌شناسی، در وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز تالار نقش اصلی را برعهده دارد. مطالعات همین محققان بیانگر آن است که مجموع پهنه‌های حساس و خیلی حساس به زمین‌لغزش، حدود ۴۵ درصد است؛ در حالی که در این تحقیق، این میزان در حدود ۴۳ درصد می‌باشد که بسیار به هم نزدیک است (Shirani, 2017). علاوه بر این، سطح زیر منحنی ROC برای حوضه آبخیز سرخون کارون با روش دمپستر ـــ شیفر (DS) و آنتروپی شانون به ترتیب ۸۲ و ۸۱ درصد حاصل شد که با مقدار ۸۵/۵۶ درصد، از نتیجهٔ این تحقیق کمتر است (Shirani et al, 2018). سطح زیر این منحنی نیز با روش دمپستر ـــ شیفر برای حوضه‌آبخیز تالار به میزان ۸۴/۷۵ درصد به دست آمد (Shirani et al, 2018). در همین زمینه و برای مقایسه، سطح زیر منحنی ROC برای حوضهٔ دوآب صمصامی با روش وزن شاهد (بیزین) و آنتروپی شانون به ترتیب به میزان ۷۹ و ۷۳ حاصل شد (Mansouri et al, 2017).

منابع

1. Arabameri, A. R.; K. Shirini, K.; & Kh. Rezaei, 2017. Comparative evaluation of probabilistic methods of event weight and frequency ratio in landslide risk zoning (Case study of Vanak watershed in Isfahan), *Watershed management research*, 8(15), 147.

2. Balali, F.; Vahabzadeh, G.; pourghasemi, H. R.; & M. Foroozanfar, 2016. Landslide potential mapping using fuzzy logic (case study: a part of the Nekarod watershed), *Winter and Spring*, 9(3), 19-30.

3. Beheshti, Z.; Gharagozlou, A.; Monavari, M.; & M. Kheirkhah Zarkesh, 2021. Landslides behavior spatial modeling by using evidential belief function model, Promethean II model, and index of entropy in Tabriz, Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1801.

4. Ebrahimi, M. M.; Habib Elahyan, H.; Mahmoud, A. Gh.; AmirAhmadi, Gh.., & Sh. Bahrami, 2014. Zoning of landslide risk sensitivity using probabilistic event weight model (Bayesian theory) Case study of Neishabour watershed, *Geography and environmental planning*, 25- 56(4), 110.

5. Esfandiari, A.; F. Beheshti, F. J.; Ebrahim, J.; & M. H. Fathi, 2014. Zoning of landslide susceptibility using Bayesian theory (Case study: Siahroud watershed), *Geography and Environmental Hazards Number Twelve*.

6. Fathi, M. H. M.; Abedini, M.; & Sh. Rural, 2018. Identification and zoning of landslide prone areas using the C-method and conditional probability theory (Bayesian theorem, case study: Sattar Khan), *Quarterly Journal of Geographical Space*, 18(64), 11.

7. Karimi Sangchini, I. M.; Ownegh., M. A.; Sadaldin., A.; & A. Mashayekhan, 2018. Landslide hazard and damage assessment in Chehelchai watershed, Golestan province, Watershed management research (research and construction), 98, 84-74.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

8. Koehorst, B. A. N. O.; Kjeksted, O. D.; Patel, D.; Lubkowski, Z. J. G.; Knoeff, J. G.; & G. J. Akkerman, 2005. Work Package ۶, Determination of Socio – Economic Impact of Natural Disasters, Assessing socio – economic Impact in Europe, 173.
9. Mansouri, M.; Shirani, K.; Ghazifard, A.; & N. Emami, 2017 .Application of probabilistic methods in landslide hazard zonation mapping (Case study:Doab Samsami region in Charmahal and Bakhtiari province), *Geoscience*, 26 (10), 267-280.
10. Mohammadi, A.; Heshmatpoor, A.; & A. Mosaedi, 2004. Study on Efficiency of an Iranian method for Landslide Hazard Zonation in Golestan Province, EGU -۱ St General Assembly. Nice. France, 34-67.
11. Mohammady, M, H. R.; Pourghasemi, H. R.; & B. Pradhan, 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, *Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models. J. Asian Earth Sc*, 61, 221-236.
12. Moore, I. D., & G. J. Burch., (1986). Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. *Water Resources Research*. 22 (28), 1350-1360.
13. Mousavi, S. Z.; Kaviyan, A. K.; Solaimani, K.; & S. R. Mousavi, 2011. Preparation of landslide susceptibility map in Sajarood watershed using logistic regression model, *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources. Soil and Water Sciences*, 40, 111-99.
14. Piacentinia, D.; Troiani, F. M.; Soldati, M. C.; Notarnicola, C. D.; Savelli, D. S.; Schneiderbauer, S.; & C. Strada, 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy), *Geomorphology*, 151,196-206.
15. Pourghasemi, H. R., 2011. Landslide sensitivity zoning using the probabilistic weight model of the event. (Case study: part of Mazandaran province, Haraz watershed), *Spatial Information Technology Quarterly*, 1(3), 10.
16. Pourqasemi, H. R., 2013. Landslide risk prediction using data mining methods in the north of Tehran. Ph.D. Thesis. Tarbiat Modares Noor University, *Faculty of Natural Resources, Department of Watershed Management*, 151-1.
17. Pourqasemi, H. R., & M. Mohammady., (2016). Presentation of new ensemble method of Bayesian and logistic regression models in landslide susceptibility assessment in the Khalkhal Township. *Quarterly journal of Environmental Erosion Research*. 6- 2 (22), 16-30.
18. Pourqasemi, H. R., 2007. Landslide risk assessment using fuzzy logic (case study of part of Haraz watershed). M.Sc. Thesis. Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University Noor, 92.
19. Ramani, E.; Kumarave, P.; & G. V. Rajamanicham, 2014. Assessing landslide Susceptibility using Bayesian probability-based Weight of evidence model, *Bull Eng Geol Environ*, 73(59), 147-167.
20. Ranjbar, M., & M. MehmarEfhtekhari., (2012). Zoning of landslide phenomenon using LNRF method in Haraz road (from Imamzadeh Hashem to Larijan). Geography (Practical-Research Quarterly of the Geographical Association of Iran), 3(33),128-107.
21. Regmi, A. D.; Devkota, D.; Yoshida, K. C.; Pradhan, k.; puorghasemi, B.; Kumamoto, H. R.; & A. Akgun, 2014. Application of frequency ratio, statistical index and weight-of evidence model and their comparison in landslide Susceptibility mapping in central Nepal Himalya, *Arab J Geosci*, 7(2), 725-742.
22. Regmi, N. R.; Giardino, J. R.; & J. D. Vitek, 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado. USA, *Geomorphology*, 115, 172-187.
23. Shahabi, M. 2009. Bayesian Decision Network An approach to predict the effects of drought management measures on dryland wheat cultivation lands in Golestan province. Proceedings of the 5th National Watershed Management Conference of Iran. 2-3. Gorgan.Iran.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

24. Shams, J., & A. Alizadeh., (2018). Landslide Sensitivity Zoning Using Conditional Probabilistic Model (Bayesian Theory), Case Study: Qara Dagh (Arasbaran from Qarasu to Diz). *Geography and Planning*. 22(63), 101.
25. Shirani, K., 2017. Modelling and Assessment of Landslide Susceptibility Zonation using Shannon's Entropy Index and Bayesian Weight of Evidence (Case Study: Sarkhoon Basin, Karoon), J. Water and Soil Sci (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.), 21(1), 11.
26. Shirani, K.; Pasandi, M.; & A. Arabameri, 2018. Landslide susceptibility assessment by Dempster–Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran," *Natural Hazards*, 93(3), 1379-1418.
27. Silakhori, Z.; Vahabzadeh kebria, G.; & H. R. Pourqasemi, 2021. Landslide Hazard Asessment Using Dempster-Shafer model (Case study; part of Talar watershed) .*E.E.R. Jour-*, 11(3), 82-93.
28. Talebi, A., & N. Niyazi., (2011). Investigation of the capability of physical-hydrological model for the study of surface landslides on natural slopes (Case study: Ilam dam watershed). *Iranian Journal of Natural Resources*. 3, 337-323.
29. Vahabzadeh, G., & S. Ahmadi., (2021). Evaluating of the effect of climate on the weathering process of rocks (Case study of Telar basin). *Journal of geography and environmental hazards.Current issue,in press*, 23.
30. Yesilnacar, E. K., 2005. The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey, University of Melbourne, 790.
31. Zhu A. X.; Wang, R.; Qiao, J.; Qin, Z.; Chen, Y.; Liu, J.; Du, J. F.; Lin, F. Y.; & Y. T. Zhu, 2014. An expert knowledge-based approach to landslide Susceptibility using GIS and fuzzy logic, *Geomorphology*, 214, 128-138.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

Landslide Susceptibility Mapping using Bayesian Model: A Case Study of some Regions of Talar Watershed, Mazandaran Province

Zahra Silakhori: *Graduated M.Sc., Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.*
Ghorban VahabzadeKebriya **1: Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.*
Hamidreza Ghasempoori: *Associate Professor, Department of Natural Resources and Environmental Egineering College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.*

Article History (Received: 2021/09/28 **Accepted:** 2022/10/6**)**



Extended abstract

1- Introduction

Mass movements are a type of morphodynamical phenomena that are usu ally related to various factors and occur on slopes in mountainous areas. Every year, damages caused by landslides lead to financial loss and death over the world (Fathi et al., 2018). According to previous studies, landslides cause 17% of the world's natural disasters. Mortality rates from 1903 to 2004 for different continents, including Asia, United States, Europe, Africa, and Australia were 29%, 39%, 30%, 1%, and 1%, respectively (Kohorest et al., 2005). Over the last three decades, several research studies have been conducted on landslide susceptibility mapping using different methods for developing their classification. All mapping methods are classified into five different groups including landslide distribution analysis, qualitative, statistical, deterministic, and frequency analyses (Vanvestern, 2003). Iran is prone to landslide phenomena due to natural conditions such as mountain topography, high tectonic and seismicity activity, geological and climatic diversity. Environmental factors affecting the occurrence of landslides are slope degree, aspect, plan curvature, elevation, land use, lithology, distance from the road, river and fault, topographic moisture index, slope length index or sediment transport and vegetation cover (Silakhori et al., 1400).

2- Methodology

Firstly, 134 points were identified using the Iranian landslide database and field survey in order to prepare a landslide susceptibility map using Bayesian theory. In the present study, 12 factors were used including elevation, slope and aspect, plan curvature, distance from the fault, road, and river, land use, geology, sediment transport index (STI), topographic wetness index (TWI), and vegetation cover. Then, topographic (1:50000), geology (1:100000), soil maps, and satellite imagery (Indian Remote Sensing) for 2012, were prepared and classified in ArcMap and ENVI environments. In order to evaluate Bayesian theory in landslide risk analysis, the relative performance curve of the relative efficiency of variables (ROC) was applied. This index is used to determine the accuracy and efficiency of the model (Egan, 1975; Williams et al., 1999). The area under the ROC curve represents the predicted value by describing its ability which accurately estimates the occurred events (landslide occurrence) and its non-occurred events (non-landslide occurrence). Therefore, the area under the curve is used as the model accuracy assessment. In the present study, 134 points of the landslide's phenomena were used for modeling (70%) and accuracy assessment (30%) (Pourghasemi et al., 2013).

-RESULTS???

3- Discussion & Conclusions

The results of the factors affecting the occurrence of landslides using Bayesian theory in the study area showed that most of the landslides occurred in the class of 15-30 degrees with a weight of 1.28, which is also reported by Eracanoglu and Gokceolu (2004). The reason is that human intervention on these slopes causes more susceptibility (Yalcin et al., 2011). The study of aspect shows that most of the landslides occurred in the west and

[1] **Corresponding Author**: gh.Vahabzadeh@Sanruu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]

south directions with a weight of 2.21 and 2.41, respectively, which is confirmed by the results of Shams and Alizadeh (2019). The results of plan curvature showed that most of the landslides happened with a weight of 1.1 in convex slopes, which is close to the results of Pourghasemi (2013). Convex slopes usually have the highest landslides which is also reported in previous studies (Vanvewsten et al., 2003; Jaaferi et al., 2014). The altitude of 500-1000m covered by sandstones, chile and siltstones showed a significant relationship with a high number of landslides (Ayalew & Yamagishi, 2005). Among different land uses, rangeland (weight of 3.48) indicated the most significant relationship in landslide occurrence, which is reported by Shams and Alizadeh (2019).

The results of distance from roads, rivers, and faults showed that most landslides occurred at distances of more than 0-100 meters which confirms the results of previous studies (Pourghasemi & Mohammadi 2016). Also, the relationship between vegetation cover and landslides showed that the highest percentage occurred in class 0.5-0.3 with a weight of 3.56. In addition, the highest slippage for topographic wetness index and sediment transport index (river capacity) occurring were related to 6.39- 11.29 and 11.84-19.6 classes (weights of 1.009 and 1.17), respectively. The area under the curve was calculated at 85.56% in the model validation for the Bayesian model, which was classified as a very good performance. Therefore, the results of our study can play an important role in the management and planning of the Talar watershed.

Keywords: Susceptibility map, Landslide, Bayesian theory, ROC curve, Talar watershed

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.7.1]