پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین

حمیدرضا پورقاسمی[۱]، حمیدرضا مرادی[۱*]، مجید محمدی[۱]، رئوف مصطفی‌زاده[۱] و عباس گلی جیرنده[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین در بخشی از استان گلستان است. به این منظور ابتدا با استفاده از نقاط لغزشی بانک اطلاعات زمین‌لغزش کشور (۳۹۲ نقطه لغزشی) نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه تهیه گردید. سپس نقشه‌های هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش مانند درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، شاخص توان آبراهه، شاخص حمل رسوب، بافت خاک و پهنه‌های بارش منطقه در محیط GIS تهیه گردید. با استفاده از تئوری احتمالات بیزین ارتباط هر یک از عوامل و نقاط لغزشی موجود تعیین و وزن طبقه‌های هر عامل مشخص شد. نهایتاً نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با ۱۴ رویکرد مدل‌سازی (استفاده از تمام عوامل مؤثر و حذف تک تک عوامل) با استفاده از تئوری بیزین برای منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. ارزیابی مدل‌های مذکور با استفاده از منحنی ROC و ۳۰٪ نقاط لغزشی صورت گرفت. نتایج ارزیابی نشان داد که دقت مدل احتمالاتی تهیه شده با رویکرد دوم مدل‌سازی (حذف عامل جهت شیب از تحلیل‌ها) در منطقه مورد مطالعه ۷۱/۳۷٪ (خوب) برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: زمین لغزش، تئوری بیزین، پهنه‌بندی، منحنی ROC، استان گلستان

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

۲. گروه خاک‌شناسی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hrmoradi@modares.ac.ir

مقدمه

حرکات توده‌ای و به ویژه زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی است. وجود عواملی همچون مستعدبودن شرایط ناهمواری‌ها، بهره‌برداری‌های بی‌رویه از جنگل‌ها، رعایت نکردن اصول فنی احداث و نگهداری جاده‌های جنگلی و روستایی، عدم اعمال مدیریت صحیح و بهره‌برداری غیر اصولی از منابع موجود باعث تشدید آن شده است. زمین‌لغزش هر ساله در بسیاری از مناطق دنیا باعث کشته و مجروح شدن افراد زیادی می‌شود که این امر ضرورت توجه به این پدیده خطرناک را نمایان می‌سازد (۸). در ایران نیز مورد خسارات ناشی از حرکات توده‌ای مطالعاتی صورت گرفته که طبق گزارش، خسارات مربوط به ۴۹۰۰ زمین‌لغزش از بانک اطلاعاتی تا پایان شهریورماه ۱۳۸۶، ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد گردیده است (۷). نظر به اهمیت موضوع، شناخت عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و مناطق مورد خطر امری ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو مطالعات مختلفی با استفاده از تئوری بیزین در بحث زمین‌لغزش صورت گرفته که عبارت‌اند از:

پورقاسمی و همکاران(۱) به منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز هراز از مدل احتمالاتی بیزین استفاده کردند. در این تحقیق عوامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل به‌عنوان عوامل مؤثر شناسایی و نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. ارزیابی مدل نشان داد که نقشه مورد نظر دقت بالایی در پهنه‌بندی دارد. لی و همکاران (۱۴) از تئوری بیزین در تحلیل حساسیت زمین‌لغزش استفاده کردند. در این تحقیق از ۱۳ عامل مؤثر برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش استفاده گردید. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل مذکور دقت بالایی در منطقه مورد مطالعه دارد. لی و چوی(۱۳) جهت پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش از GIS و تئوری احتمالاتی بیزین استفاده کردند. در این تحقیق ۱۵ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه شناسایی و پهنه‌بندی با رویکردهای مختلف انجام شد. نتایج ارزیابی نشان داد که بیشترین دقت مدل زمانی است که از ۶ عامل درجه شیب، شکل شیب، نوع توپوگرافی، قطر درخت، لیتولوژی و فاصله از جاده استفاده گردید. Neuhäuser و Terhorst در جنوب شرقی آلمان به منظور ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش از مدل احتمالاتی بیزین استفاده کردند. در این تحقیق خاک، زمین‌شناسی، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از گسل، درجه شیب و شکل شیب به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش انتخاب و نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه در مقیاس ۱:۱۵۰۰۰۰ تهیه گردید. نتایج ارزیابی بیانگر صحت بالای (۹۰٪) مدل تهیه شده بود. متو و همکاران در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در کشور هند از تئوری بیزین استفاده کردند.(۱۵) عوامل مؤثر در این تحقیق درجه شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم جاده، تراکم زه‌کشی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی بود. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی نشان داد که دقت نقشه تهیه شده ۸۴/۶٪ است. بوی و همکاران برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه جائچون کشور کره از تئوری احتمالات بیزین استفاده کردند(۹).

در این تحقیق با توجه به پنج عامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی و پوشش گیاهی نقشه خطر زمین‌لغزش تهیه شد. نتایج ارزیابی نشان داد که ۸۵٪ لغزش‌ها در طبقه خطر متوسط و زیاد قرار گرفته‌اند. زو و همکاران (۲۲) به منظور تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش از دو مدل ارزش اطلاعات و مدل احتمالاتی وزن واقعه (تئوری بیزین) استفاده کردند. با استفاده از عوامل فاصله از گسل، زمین‌شناسی، ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده نقشه حساسیت زمین‌لغزش تهیه گردید. نتایج ارزیابی نشان داد که به‌ترتیب ۹۳/۲٪ و ۹۲/۲٪ از لغزش‌ها در طبقه خطر زیاد و خیلی‌زیاد برای هر یک از مدل‌های ارزش اطلاعات و وزن واقعه قرار گرفته است. رگمی و همکاران (۱۹) در غرب کلرادوی آمریکا به منظور مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش از تئوری بیزین استفاده کردند. در این تحقیق از ۱۷ عامل مؤثر در وقوع

زمین‌لغزش استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل مذکور نشان داده که دقت آن ۷۸/۴ ٪ برآورد گردیده است. به‌طور کلی نتایج حاصله از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از تئوری احتمالاتی بیزین می‌تواند در پیش‌بینی وقوع حوادث طبیعی از جمله زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یک روش خوب مورد استفاده قرار گیرد. هدف از تحقیق حاضر پهنه‌بندی خطرات زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین در بخشی از استان گلستان است. یکی از مزایای استفاده از تئوری بیزین، امکان استفاده از داده‌های کمی و کیفی متغیر و نظرات کارشناسی در سیستم‌های پیچیده است که این امر به‌صورت بالقوه در مدیریت منابع طبیعی باارزش می‌باشد، مخصوصاً در شرایطی که دسترسی به داده‌های قابل اعتماد در منابع طبیعی محدودیت دارد (۶). مهم‌ترین نوآوری تحقیق حاضر در مقایسه با دیگر تحقیقات انجام شده در داخل کشور، استفاده از فاکتورهای شکل شیب، شاخص توان آبراهه (SPI) و شاخص حمل رسوب (STI) می‌باشد که ارتباط آن با زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. این عوامل همراه با دیگر عوامل در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر به‌کارگیری شاخص ارزیابی ROC اولین‌بار است که در ایران به‌کار گرفته می‌شود و دقت مدل مذکور به‌صورت کمی بیان شد. هم‌چنین استفاده از ۱۴ رویکرد مدل‌سازی برای منطقه مذکور نیز بر توانایی‌های نقشه خطر زمین‌لغزش تهیه شده افزوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از استان گلستان است که مساحت آن تقریباً ۱۲۰۵۰/۵ کیلومترمربع می‌باشد. این منطقه بین عرض‌های "۲۷´۴۸ °۳۶ تا "۱۴´۵۶ °۳۸ شمالی و طول‌های جغرافیایی "۲۹ ´۴۰ °۵۳ تا "۴۴ ´۳۰ °۵۶ شرقی استقرار یافته است. ارتفاع بیشینه منطقه مورد مطالعه ۳۶۷۴ متر می‌باشد (شکل ۱). دمای متوسط سالانه ۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد و تعداد روزهای یخبندان سال در منطقه گرگان ۱۳ روز و در مراوه تپه ۲۰ روز گزارش شده است. میزان بارندگی متوسط سالانه استان از ۱۸۰ میلی‌متر در ایستگاه داشلی برون تا ۸۸۰ میلی‌متر در ایستگاه پس‌پشته متغیر است (۵).

روش تحقیق

به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین، ابتدا با استفاده از نقاط لغزشی بانک اطلاعات زمین‌لغزش کشور، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی تهیه گردید. سپس هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش مانند درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، بافت خاک، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص توان آبراهه، شاخص حمل رسوب و بارش در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه، کلاسه‌بندی و با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تلفیق شدند. به منظور تعیین نقشه‌های شاخص توان آبراهه (SPI یا Stream Power Index) و شاخص حمل رسوب (STI یا Sediment Transport Index) از روابط ۱ و ۲ استفاده گردید (۱۶ و ۱۷). نقشه پهنه‌های بارش نیز با استفاده از آمار بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه، تهیه شد.

$$SPI = A_S . \tan\beta \qquad [۱]$$

$$STI = \left(\frac{A_S}{۲۲/۱۳}\right)^{۰/۶} . \left(\frac{\sin\beta}{۰/۰۸۹۶}\right)^{۱/۳} \qquad [۲]$$

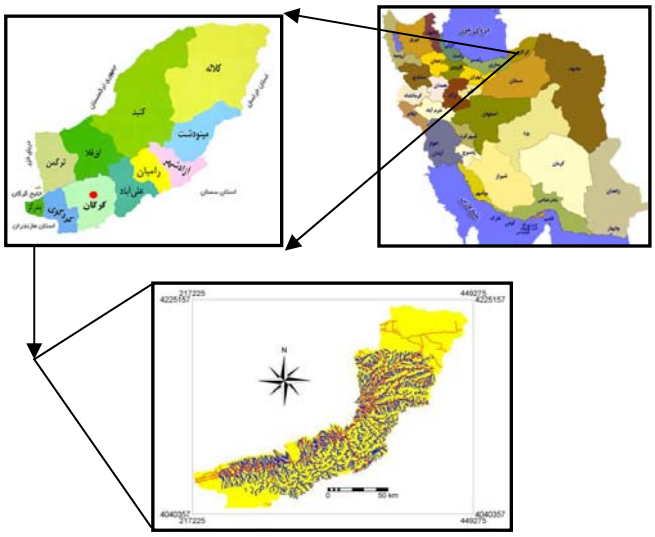
که در آن: A_S: مساحت حوزه آبخیز، β: گرادیان شیب برحسب درجه و STI بیانگر توان حمل آبراهه و یا به عبارتی عامل LS (Length and Slope) مدل AUSLE (Adapted Universal Soil Loss Equation) است که مدل مذکور اصلاح شده معادله جهانی تلفات خاک (Universal Soil Loss Equation) می‌باشد.

تئوری بیزین

شبکه‌های بیزین به‌نام شبکه‌های تصمیم (Belief networks)، شبکه‌های تصادفی (Casual networks) و نمودارهای تأثیر

جدول ۱. چهار حالت پتانسیل ایجاد زمین‌لغزش (۲۰)

	عوامل ایجاد زمین لغزش	
زمین‌لغزش	حضور	عدم حضور
حضور	$N_{pix۱}$	$N_{pix۲}$
عدم حضور	$N_{pix۳}$	$N_{pix۴}$



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

(Influence diagrams) نیز شناخته می‌شوند (۶). این روش بر مبنای محاسبات احتمالات وابسته (قضیه بیز یا Bayes theorem) است که در ابتدای دهه ۱۹۹۰ به عنوان سیستم‌های پشتیبانی تصمیم برای مطالعات پزشکی مورد استفاده قرار گرفته (رابطه ۳) و در دهه اخیر کاربردهای زیادی در سایر علوم و به‌ویژه در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش داشته است. به این منظور ابتدا با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ وزن‌های محتمل هر عامل و طبقه‌های مربوط به آن محاسبه می‌شود.

$$P(b|a) = P(a|b) \times P(b) / P(a) \qquad [۳]$$

که در آن $P(a)$: احتمال وقوع پیش‌آمد a، $P(b)$: احتمال وقوع پیش‌آمد b، $P(b|a)$: احتمال وقوع پیش‌آمد b به شرطی که پیش‌آمد a اتفاق افتاده باشد و $P(a|b)$: احتمال وقوع پیش‌آمد a به شرطی که پیش‌آمد b اتفاق افتاده باشد (۲۰).

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

$$w_i^- = \log_e[P(\bar{B}_i|S) / P(\bar{B}_i|\bar{S})] \qquad [۵]$$

به منظور درک هر چه بهتر روابط ۴ و ۵ (۲۰) و سهولت کار، به‌ویژه در محیط GIS، مدل براساس جدول ۱ و به‌صورت رابطه‌های ۶ و ۷ ارائه می‌گردد (۲۱) و نهایتاً وزن نهایی براساس روابط ۸ و ۹ برای هر عامل به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت (۱۳ و ۱۴).

$$W_i^+ = \log_e[(N_{pix۱} / (N_{pix۱} + N_{pix۲})) / (N_{pix۳} / (N_{pix۳} + N_{pix۴}))] \qquad [۶]$$

$$W_i^- = \log_e[(N_{pix۲} / (N_{pix۱} + N_{pix۲})) / (N_{pix۴} / (N_{pix۳} + N_{pix۴}))] \qquad [۷]$$

که در آن:

$N_{pix۱}$: تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس،

$N_{pix۲}$: (تعداد کل پیکسل‌های لغزشی در یک نقشه) – (تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس)،

جدول ۲. ارتباط بین هر یک از عوامل موثر و نقاط لغزشی با استفاده از مدل احتمالی بیزین

عامل	کلاس	a	b	c	d	W^+	W^-	C	$S^2(W^+)$	$S^2(W^-)$	S(C)	C/S(C)
درجه شیب	۰–۵	۵۷۶۴۸۷۴	۴۴/۶۲	۸۵	۳۰/۹۱	−۰/۳۶۷	۰/۲۲۱	−۰/۵۸۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	۰/۱۳۰	−۴/۵۱۰
	۶–۱۲	۲۵۶۸۰۵۲	۱۹/۸۸	۷۵	۲۷/۲۷	۰/۳۱۶	−۰/۰۹۷	۰/۴۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵	۰/۱۳۵	۳/۰۵۱
	۱۳–۲۰	۲۲۲۸۲۴۸	۱۷/۲۵	۶۹	۲۵/۰۹	۰/۳۷۵	−۰/۱۰۰	۰/۴۷۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۱۳۹	۳/۴۱۰
	۲۱–۳۰	۱۶۰۴۵۱۳	۱۲/۴۲	۳۴	۱۲/۳۶	−۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	−۰/۰۰۵	۰/۰۲۹	۰/۰۰۴	۰/۱۸۳	−۰/۰۲۸
	۳۰<	۷۵۳۱۱۵	۵/۸۳	۱۲	۴/۳۶	−۰/۲۹۰	۰/۰۱۵	−۰/۳۰۵	۰/۰۸۳	۰/۰۰۴	۰/۲۹۵	−۱/۰۳۳
جهت شیب	شمال	۲۳۱۹۱۱۴	۱۷/۹۵	۴۳	۱۵/۶۴	−۰/۱۳۸	۰/۰۲۸	−۰/۱۶۶	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴	۰/۱۶۶	−۰/۹۹۹
	شمال شرقی	۱۲۹۴۹۳۰	۱۰/۰۲	۲۶	۹/۴۵	−۰/۰۵۸	۰/۰۰۶	−۰/۰۶۵	۰/۰۳۸	۰/۰۰۴	۰/۲۰۶	−۰/۳۱۴
	شرق	۱۰۲۳۳۵۲	۷/۹۲	۲۲	۸	۰/۰۱۰	−۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	۰/۰۴۵	۰/۰۰۴	۰/۲۲۲	۰/۰۴۸
	جنوب شرقی	۱۵۱۵۸۷۵	۱۱/۷۳	۲۹	۱۰/۵۵	−۰/۱۰۷	−۰/۰۱۳	−۰/۱۲۰	۰/۰۳۴	۰/۰۰۴	۰/۱۹۶	−۰/۶۱۲
	جنوب	۱۵۱۴۹۲۳	۱۱/۷۳	۳۳	۱۲	۰/۰۲۳	−۰/۰۰۳	۰/۰۲۶	۰/۰۳۰	۰/۰۰۴	۰/۱۸۶	۰/۱۴۱
	جنوب غربی	۱۲۱۸۳۳۶	۹/۴۳	۳۲	۱۱/۶۴	۰/۲۱۰	−۰/۰۲۵	۰/۲۳۵	۰/۰۳۱	۰/۰۰۴	۰/۱۸۸	۱/۲۴۹
	غرب	۱۵۴۶۱۹۴	۱۱/۹۷	۳۹	۱۴/۱۸	۰/۱۷۰	−۰/۰۲۵	۰/۱۹۵	۰/۰۲۶	۰/۰۰۴	۰/۱۷۳	۱/۱۲۹
	شمال غربی	۲۴۸۶۰۷۸	۱۹/۲۴	۵۱	۱۸/۵۵	−۰/۰۳۷	۰/۰۰۹	−۰/۰۴۶	۰/۰۲۰	۰/۰۰۴	۰/۱۵۵	−۰/۲۹۴
شکل شیب	مقعر	۶۷۸۳۸۷۰	۵۲/۵۱	۱۳۶	۴۹/۴۵	−۰/۰۶۰	۰/۰۶۲	−۰/۱۲۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۱۲۱	−۱/۰۱۵
	محدب	۶۱۳۴۹۳۲	۴۷/۴۹	۱۳۹	۵۰/۵۵	۰/۰۶۲	−۰/۰۶۰	۰/۱۲۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۱۲۱	۱/۰۱۵

ادامه جدول ۲

ارتفاع (متر)	۰-۵۰۰	۶۱۶۰۹۱۸	۴۷/۶۹	۱۱۹	۴۳/۲۷	-۰/۰۹۷	۰/۰۸۱	-۰/۱۷۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۱۲۲	-۱/۴۶۵
	۵۰۱-۱۰۰۰	۲۶۰۵۴۹۷	۲۰/۱۷	۹۷	۳۵/۲۷	۰/۵۵۹	-۰/۲۱۰	۰/۷۶۹	۰/۰۱۰	۰/۰۰۶	۰/۱۲۶	۶/۰۹۱
	۱۰۰۱-۱۵۰۰	۱۸۷۳۰۱۴	۱۴/۵۰	۳۹	۱۴/۱۸	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۴	-۰/۰۲۶	۰/۰۲۶	۰/۰۰۴	۰/۱۷۳	-۰/۱۴۹
	۱۵۰۱-۲۰۰۰	۱۲۱۴۲۷۷	۹/۴۰	۱۷	۶/۱۸	-۰/۴۱۹	۰/۰۳۵	-۰/۴۵۴	۰/۰۵۹	۰/۰۰۴	۰/۲۵۰	-۱/۹۱۳
	۲۰۰۱-۲۵۰۰	۷۴۱۴۳۳	۵/۷۴	۳	۱/۰۹	-۱/۶۶۰	۰/۰۴۸	-۱/۷۰۸	۰/۳۳۳	۰/۰۰۴	۰/۵۸۱	-۲/۹۴۳
	۲۵۰۱-۳۰۰۰	۳۰۱۰۹۴	۲/۳۳	۰	۰	∞	۰/۰۲۴	∞	∞	۰/۰۰۴	∞	∞
	۳۰۰۰<	۲۲۵۶۹	۰/۱۷	۰	۰	∞	۰/۰۰۱۷	∞	∞	۰/۰۰۴	∞	∞
زمین‌شناسی	کربونیفر	۵۴۳۶۱۰	۴/۲۱	۱۷	۶/۱۸	۰/۳۸۵	-۰/۰۲۱	۰/۴۰۵	۰/۰۵۹	۰/۰۰۴	۰/۲۵۰	۱/۶۱۹
	کرتاسه	۲۱۵۵۶۱۱	۱۶/۶۹	۲	۰/۷۳	-۳/۱۳۳	۰/۱۷۵	-۳/۳۰۸	۰/۵۰۰	۰/۰۰۴	۰/۷۱۰	-۴/۶۶۲
	دونین	۹۰۹۶۳۰	۷/۰۴	۲۱	۷/۶۴	۰/۰۸۱	-۰/۰۰۶	۰/۰۸۸	۰/۰۴۸	۰/۰۰۴	۰/۲۲۷	۰/۳۸۶
	ژوراسیک	۱۹۵۶۰۲۱	۱۵/۱۴	۶۵	۲۳/۶۴	۰/۴۴۵	-۰/۱۰۵	۰/۵۵۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۰/۱۴۲	۳/۸۸۱
	نئوژن	۱۶۹۵۶	۰/۱۳	۰	۰	∞	۰/۰۰۱	∞	∞	۰/۰۰۴	∞	∞
	اردوویسین	۵۴۲۸	۰/۰۴	۰	۰	∞	۰/۰۰۰۴	∞	∞	۰/۰۰۴	∞	∞
	پالئوژن	۷۱۱۵۱۷	۵/۵۱	۳۹	۱۴/۱۸	۰/۹۴۶	-۰/۰۹۶	۱/۰۴۲	۰/۰۲۶	۰/۰۰۴	۰/۱۷۳	۶/۰۲۹
	پرمین	۵۲۹۲۰۳	۴/۱۰	۸	۲/۹۱	-۰/۳۴۲	۰/۰۱۲	-۰/۳۵۵	۰/۱۲۵	۰/۰۰۴	۰/۳۵۹	-۰/۹۸۸
	کواترنری	۵۹۶۶۶۲۰	۴۶/۱۹	۱۱۶	۴۲/۱۸	-۰/۰۹۱	۰/۰۷۲	-۰/۱۶۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۱۲۲	-۱/۳۳۰
	سیلورین	۹۳۸۹۲	۰/۷۳	۱	۰/۳۶	-۰/۶۹۲	۰/۰۰۴	-۰/۶۹۶	۱/۰۰۰	۰/۰۰۴	۱/۰۰۲	-۰/۶۹۵
	تریاس	۳۰۳۱۴	۰/۲۳	۶	۲/۱۸	۲/۲۳۰	-۰/۰۲۰	۲/۲۵۰	۰/۱۶۷	۰/۰۰۴	۰/۴۱۳	۵/۴۵۰
بافت خاک	SCL&CL	۷۰۲۴۴۱۶	۵۴/۳۷	۱۷۵	۶۳/۶۴	۰/۱۵۷	-۰/۲۲۷	۰/۳۸۴	۰/۰۰۶	۰/۰۱۰	۰/۱۲۵	۳/۰۶۵
	SCL&SaCL	۱۸۷۹۸۴۴	۱۴/۵۵	۱۳	۴/۷۳	-۱/۱۲۴	۰/۱۰۹	-۱/۲۳۳	۰/۰۷۷	۰/۰۰۴	۰/۲۸۴	-۴/۳۴۰
	SL	۱۱۲۲۲۵	۰/۸۷	۰	۰	∞	۰/۰۰۹	∞	∞	۰/۰۰۴	∞	∞
	SL&SCL	۳۹۰۲۳۱۷	۳۰/۲۱	۸۷	۳۱/۶۴	۱/۰۴۷	۰/۹۸۰	۰/۰۶۸	۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۰/۱۳۰	۰/۵۲۳

ادامه جدول ۲

کاربری اراضی	دریاچه	۳۹۱۱	۰/۰۳	۰	۰	∞	۰/۰۰۰۳	∞	∞	۰/۰۰۴	∞
	نی‌زار	۱۷۴۷	۰/۰۱	۰	۰	∞	۰/۰۰۰۱	∞	∞	۰/۰۰۴	∞
	اراضی بایر	۱۳۷۴۹	۰/۱۱	۰	۰	∞	۰/۰۰۱	∞	∞	۰/۰۰۴	∞
	اراضی شور	۱۰۹۰	۰/۰۱	۰	۰	∞	۰/۰۰۰۱	∞	∞	۰/۰۰۴	∞
	مرتع - زراعت	۴۰۳۷۳۹	۳/۱۳	۱۷	۶/۱۸	۰/۶۸۲	−۰/۰۳۲	۰/۷۱۴	۰/۰۵۹	۰/۰۰۴	۰/۲۵۰	۲/۸۵۲
	زراعت آبی	۲۶۶۸۷۹۰	۲۰/۶۶	۲۰	۷/۲۷	−۱/۰۴۴	۰/۱۵۶	−۱/۲۰۰	۰/۰۵۰	۰/۰۰۴	۰/۲۳۲	−۵/۱۶۷
	زراعت دیم	۹۶۲۸۸۷	۷/۴۵	۴۷	۱۷/۰۹	۰/۸۳۰	−۰/۱۱۰	۰/۹۴۰	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴	۰/۱۶۰	۵/۸۶۷
	مرتع	۴۰۴۹۰۲۹	۳۱/۳۴	۲۵	۹/۰۹	−۱/۲۳۸	۰/۲۸۱	−۱/۵۱۸	۰/۰۴۰	۰/۰۰۴	۰/۲۱۰	−۷/۲۳۹
	جنگل	۴۸۱۳۸۶۰	۳۷/۲۶	۱۶۶	۶۰/۳۶	۰/۴۸۲	−۰/۴۵۹	۰/۹۴۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۱۲۳	۷/۶۳۸
فاصله از جاده (متر)	۰–۱۰۰	۳۸۸۲۸۳	۳/۰۱	۲۴	۸/۷۳	۱/۰۶۶	−۰/۰۶۱	۱/۱۲۷	۰/۰۴۲	۰/۰۰۴	۰/۲۱۴	۵/۲۷۴
	۱۰۱–۲۰۰	۳۴۳۷۴۵	۲/۶۶	۱۸	۶/۵۵	۰/۹۰۰	−۰/۰۴۱	۰/۹۴۱	۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۰/۲۴۴	۳/۸۵۹
	۲۰۱–۳۰۰	۳۵۸۲۷۸	۲/۷۷	۱۵	۵/۴۵	۰/۶۷۶	−۰/۰۲۸	۰/۷۰۴	۰/۰۶۷	۰/۰۰۴	۰/۲۶۶	۲/۶۵۳
	۳۰۱–۴۰۰	۳۳۳۰۶۹	۲/۵۸	۸	۲/۹۱	۰/۱۲۱	−۰/۰۰۳	۰/۱۲۴	۰/۱۲۵	۰/۰۰۴	۰/۳۵۹	۰/۳۴۶
	۴۰۱–۵۰۰	۳۴۱۱۳۴	۲/۶۴	۹	۳/۲۷	۰/۲۱۵	−۰/۰۰۷	۰/۲۲۱	۰/۱۱۱	۰/۰۰۴	۰/۳۳۹	۰/۶۵۲
	۵۰۰<	۱۱۱۵۴۲۹۳	۸۶/۳۴	۲۰۱	۷۳/۰۹	−۰/۱۶۷	۰/۶۷۸	−۰/۸۴۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	۰/۱۳۶	−۶/۲۱۲
فاصله از رودخانه (متر)	۰–۱۰۰	۶۲۵۷۵۵	۴/۸۴	۱۵	۵/۴۵	۰/۱۱۹	−۰/۰۰۶	۰/۱۲۵	۰/۰۶۷	۰/۰۰۴	۰/۲۶۶	۰/۴۷۱
	۱۰۱–۲۰۰	۵۶۱۴۴۲	۴/۳۵	۱۸	۶/۵۵	۰/۴۱۰	−۰/۰۲۳	۰/۴۳۳	۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۰/۲۴۴	۱/۷۷۵
	۲۰۱–۳۰۰	۵۸۸۷۷۲	۴/۵۶	۱۸	۶/۵۵	۰/۳۶۲	−۰/۰۲۱	۰/۳۸۳	۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۰/۲۴۴	۱/۵۷۱
	۳۰۱–۴۰۰	۵۶۴۴۴۰	۴/۳۷	۱۸	۶/۵۵	۰/۴۰۴	−۰/۰۲۳	۰/۴۲۷	۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۰/۲۴۴	۱/۷۵۲
	۴۰۰<	۱۰۵۷۸۳۹۳	۸۱/۸۸	۲۰۶	۷۴/۹۱	−۰/۰۸۹	۰/۳۲۶	−۰/۴۱۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	۰/۱۳۹	−۲/۹۸۲

ادامه جدول ۲

فاصله از گسل (متر)	۰-۱۰۰	۲۷۴۸۱۰	۲/۱۲	۹	۳/۲۷	۰/۴۳۱	-۰/۰۱۱	۰/۴۴۳	۰/۱۱۱	۰/۰۰۴	۰/۳۳۹	۱/۳۰۶
	۱۰۱-۲۰۰	۲۴۹۷۳۰	۱/۹۳	۵	۱/۸۲	-۰/۰۶۱	۰/۰۰۱	-۰/۰۶۲	۰/۲۰۰	۰/۰۰۴	۰/۴۵۱	-۰/۱۳۸
	۲۰۱-۳۰۰	۲۶۳۰۲۳	۲/۰۴	۶	۲/۱۸	۰/۰۶۹	-۰/۰۰۱	۰/۰۷۱	۰/۱۶۷	۰/۰۰۴	۰/۴۱۳	۰/۱۷۱
	۳۰۱-۴۰۰	۲۵۳۶۴۸	۱/۹۶	۷	۲/۵۵	۰/۲۶۰	-۰/۰۰۶	۰/۲۶۶	۰/۱۴۳	۰/۰۰۴	۰/۳۸۳	۰/۶۹۴
	۴۰۰<	۱۱۸۷۷۵۹۱	۹۱/۹۴	۲۴۸	۹۰/۱۸	-۰/۰۱۹	۰/۱۹۷	-۰/۲۱۷	۰/۰۰۴	۰/۰۳۷	۰/۲۰۳	-۱/۰۶۹
بارش (میلی‌متر)	۴۰۰>	۳۰۱۲۷۰۲	۲۳/۳۲	۸	۲/۹۱	-۲/۰۸۱	۰/۲۳۶	-۲/۳۱۷	۰/۱۲۵	۰/۰۰۴	۰/۳۵۹	-۶/۴۵۹
	۴۰۰-۵۰۰	۱۸۲۷۱۳۱	۱۴/۱۴	۵۳	۱۹/۲۷	۰/۳۰۹	-۰/۰۶۲	۰/۳۷۱	۰/۰۱۹	۰/۰۰۵	۰/۱۵۳	۲/۴۲۷
	۵۰۱-۶۰۰	۳۰۱۶۳۲۳	۲۳/۳۵	۴۷	۱۷/۰۹	-۰/۳۱۲	۰/۰۷۸	-۰/۳۹۰	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴	۰/۱۶۰	-۲/۴۳۷
	۶۰۰<	۵۰۶۲۶۴۶	۳۹/۱۹	۱۶۷	۶۰/۷۳	۰/۴۳۸	-۰/۴۳۷	۰/۸۷۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۱۲۳	۷/۰۸۸
شاخص توان آبراهه	۰-۱۰	۵۰۵۹۸۵۲	۳۹/۱۷	۷۸	۲۸/۳۶	-۰/۳۲۳	۰/۱۶۳	-۰/۴۸۶	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵	۰/۱۳۴	-۳/۶۳۴
	۱۱-۲۰	۱۶۸۱۳۰۲	۱۳/۰۱	۴۰	۱۴/۵۵	۰/۱۱۱	-۰/۰۱۸	۰/۱۲۹	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴	۰/۱۷۱	۰/۷۵۴
	۲۱-۳۰	۱۰۶۹۰۵۶	۸/۲۸	۲۱	۷/۶۴	-۰/۰۸۰	۰/۰۰۷	-۰/۰۸۷	۰/۰۴۸	۰/۰۰۴	۰/۲۲۷	-۰/۳۸۴
	۳۱-۴۰	۷۹۶۳۴۰	۶/۱۶	۲۱	۷/۶۴	۰/۲۱۴	-۰/۰۱۶	۰/۲۳۰	۰/۰۴۸	۰/۰۰۴	۰/۲۲۷	۱/۰۱۳
	۴۱-۵۰	۶۲۱۱۴۶	۴/۸۱	۸	۲/۹۱	-۰/۵۰۲	۰/۰۲۰	-۰/۵۲۲	۰/۱۲۵	۰/۰۰۴	۰/۳۵۹	-۱/۴۵۵
	۵۰ <	۳۶۹۱۱۰۶	۲۸/۵۷	۱۰۷	۳۸/۹۱	۰/۳۰۹	-۰/۱۵۶	۰/۴۶۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۱۲۴	۳/۷۶۱
شاخص حمل رسوب	۰-۲۰	۱۰۲۹۰۵۰۶	۷۹/۶۶	۲۰۷	۷۵/۲۷	-۰/۰۵۷	۰/۱۹۵	-۰/۲۵۲	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰/۱۴۰	-۱/۸۰۱
	۲۱-۴۰	۱۸۱۷۸۰۱	۱۴/۰۷	۵۱	۱۸/۵۵	۰/۲۷۶	-۰/۰۵۳	۰/۳۳۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۴	۰/۱۵۵	۲/۱۲۴
	۴۱-۶۰	۵۵۰۱۴۷	۴/۲۶	۱۱	۴	-۰/۰۶۳	۰/۰۰۳	-۰/۰۶۵	۰/۰۹۱	۰/۰۰۴	۰/۳۰۸	-۰/۲۱۲
	۶۱-۸۰	۱۶۶۷۱۲	۱/۲۹	۳	۱/۰۹	-۰/۱۶۸	۰/۰۰۲	-۰/۱۷۰	۰/۳۳۳	۰/۰۰۴	۰/۵۸۱	-۰/۲۹۳
	۸۰<	۹۳۶۳۶	۰/۷۲	۳	۱/۰۹	۰/۴۰۹	-۰/۰۰۴	۰/۴۱۳	۰/۳۳۳	۰/۰۰۴	۰/۵۸۱	۰/۷۱۱

a: تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش، b: درصد پیکسل‌های فاقد لغزش، c: تعداد پیکسل‌های لغزشی و d: درصد لغزشی

توصیفات بافت خاک (SCL&CL: سیلتی- رسی- لومی و رسی-لومی، SCL&SaCL: سیلتی-رسی-لومی و ماسه-رسی-لومی، SL: سیلتی-لومی، SL&SCL: سیلتی-لومی و سیلتی-رسی-لومی).

$N_{pix۳}$: (تعداد پیکسل‌های یک کلاس) - (تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس)،

$N_{pix۴}$: (تعداد کل پیکسل‌های یک نقشه)- (تعداد کل پیکسل‌های لغزشی یک نقشه)- (تعداد پیکسل‌های یک کلاس) + (تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس).

$$C = \left[\left(W^{+}\right) - \left(W^{-}\right)\right] \quad [۸]$$

$$W_{final} = C / S_C \quad [۹]$$

که در آن:

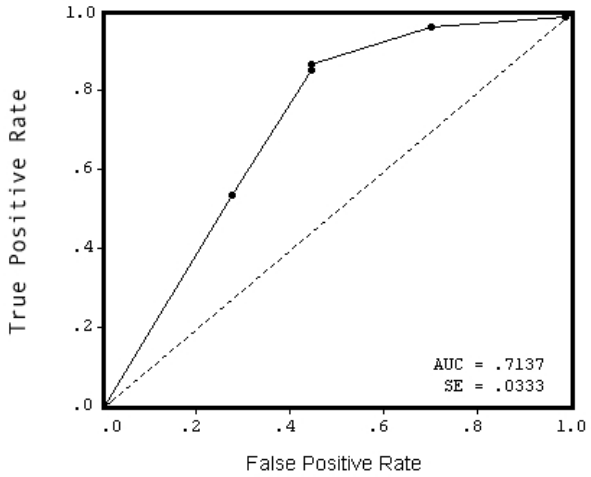
C: تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{final}: وزن نهایی استاندارد شده و S_C: انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی می‌باشد.

ارزیابی روش پهنه‌بندی

بعد از تهیه نقشه‌های وزنی براساس روابط مدل، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با ۱۴ رویکرد (استفاده از تمام عوامل مؤثر و حذف تک تک عوامل) تهیه و براساس شکستگی‌های طبیعی (Natural Breaks) به چهار کلاس (خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) طبقه‌بندی گردیدند. لذا نمی‌توان جهت ارزیابی نقشه‌های مورد نظر و تعیین دقت آنها، از نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه استفاده کرد (۱۲). جهت حل این مشکل تعدادی از نقاط لغزشی برای مدل‌سازی و بخشی از آن نیز برای ارزیابی مدل مذکور (به‌ترتیب ۷۰ درصد و ۳۰ درصد) مورد استفاده قرار گرفت (۲، ۳، ۱۰ و ۱۱). آنگاه با استفاده از منحنی ROC یا Relative Operating Characteristics Curve (۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۲) صحت نقشه‌های تهیه شده مورد تأیید قرار گرفت. نهایتاً نقشه‌ای که دارای بیشترین دقت بود به‌عنوان نقشه نهایی خطر زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد شد. منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند (۲۰). در حقیقت منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موارنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست (Trade off). سطح زیر منحنی ROC (AUC یا Area Under Curve)، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداده (وقوع زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین‌لغزش) آن است. ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیرAUC از۰/۵-۱ متغیر است. چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین زند مقدار AUC آن ۰/۵ است و زمانی که منحنی ROC، سطح زیرمنحنی برابر با یک داشته باشد بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است. همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به‌صورت زیر است (۱-۰/۹، عالی؛ ۰/۹-۰/۸، خیلی خوب؛ ۰/۸-۰/۷، خوب؛ ۰/۷-۰/۶، متوسط و ۰/۶-۰/۵، ضعیف) (۲۲).

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از ارتباط هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و مدل احتمالاتی بیزین در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج بررسی عامل شیب نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در کلاس شیب ۲۰-۱۳ درجه رخ داده است. در شیب‌های کم برآیند نیروها به‌صورتی است که نیروی مقاوم(عمودی) بیشتر از نیروی محرکه (افقی) بوده و شرایط وقوع زمین‌لغزش فراهم نمی‌شود. در شیب‌های زیاد نیز فرآیندهای فرسایشی دیگر غالب بوده و خاک کافی برای وقوع زمین‌لغزش تحت این شرایط وجود ندارد. بررسی جهت شیب نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در جهت‌های جنوب غربی و غرب رخ داده که دلیل آن جهت وزش بادهای باران‌آور منطقه است. بررسی شکل شیب نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در شیب‌های محدب رخ داده و این عامل می‌تواند نقش به‌سزایی در همگرایی و واگرایی جریان انتقالی از بالادست حوزه به پایین‌دست آن داشته باشد. بررسی طبقات ارتفاعی نشان داده که کلاس ارتفاعی ۱۰۰۰-۵۰۱ متر بیشترین



شکل ۲. منحنی ROC و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (حذف عامل جهت شیب)

وزن (۶/۰۹۱) را به خود اختصاص داده است و همراه با افزایش ارتفاع، میزان حساسیت به خطر زمین‌لغزش کم گردیده است که این موضوع نشان‌دهنده دخالت‌های انسانی و یا لیتولوژی مقاوم منطقه در ارتفاعات بالاتر است. بررسی زمین‌شناسی نشان داده که بیشتر وزن را سازندهای دوره پالئوژن و تریاس به خود اختصاص داده‌اند. بررسی بافت خاک نشان داده که بیشتر لغزش‌های اتفاق افتاده در خاک‌های سیلت-رس-لومی و رسی-لومی اتفاق افتاده است.

دلیل این امر شاید جذب آب بیشتر و آبگذری کمتر خاک‌های با بافت متوسط و ریز، در نتیجه اشباع راحت‌تر این خاک‌ها باشد. نتایج تحلیل کاربری اراضی نشان داده که بیشترین وزن لغزش را کاربری جنگلی (۷/۶۳۸) به خود اختصاص داده که می‌توان این موضوع را به نفوذ بیشتر آب در مناطق جنگلی و عدم توجه به اصول جاده‌سازی در کاربری‌های جنگلی نسبت داد که با نظرات پورقاسمی و همکاران (۲) مطابقت دارد. بررسی فاصله از جاده، رودخانه و گسل نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های اتفاق افتاده به‌ترتیب در فواصل ۱۰۰-۰، ۲۰۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۰ متری سه عامل مذکور اتفاق افتاده که بیانگر همبستگی وقوع زمین‌لغزش با حریم جاده، آبراهه و گسل است. بررسی عامل بارش در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه زمانی اتفاق می‌افتد که بارندگی در منطقه بیشتر می‌شود که بیانگر حساسیت بالای چشم‌انداز (Landscape) به عامل بارش در منطقه است. بررسی شاخص توان آبراهه و شاخص حمل رسوب نیز نشان داده که بیشترین وزن لغزشی به ترتیب مربوط به طبقه‌های بیشتر از ۵۰ (۳/۷۶۱) و ۴۰-۲۱ (۲/۱۲۳) است.

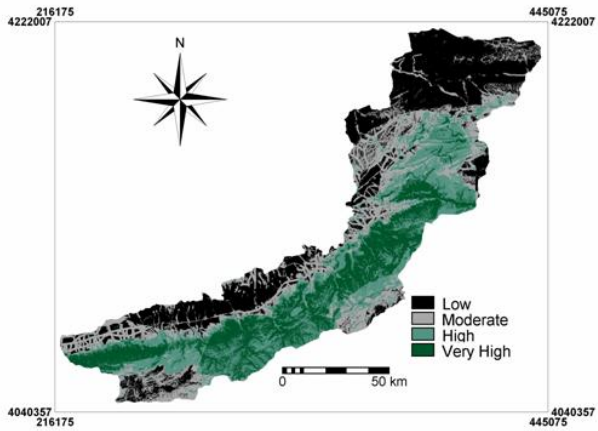
به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه از ۱۴ رویکرد (جدول ۳) استفاده گردید. ۱۴ نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از منحنی ROC و با در نظر گرفتن سطح زیر منحنی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

براساس نتایج منحنی ROC (جدول ۳)، مقدار سطح زیر منحنی منطقه مورد مطالعه هنگامی‌که از تمام عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش استفاده گردید دارای دقتی برابر با ۶۹/۶۷٪ بوده است (رویکرد اول مدل‌سازی). بیشترین دقت مدل زمانی بوده است که عامل جهت شیب از تحلیل‌ها حذف گردیده است (رویکرد دوم مدل‌سازی) که در این‌حالت دقت مدل به ۷۱/۳۷٪ افزایش یافته است (شکل ۲) که نشان‌دهنده ارزیابی خوب مدل احتمالی بیزین برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش است. هم‌چنین دقت در جدول ۳ نشان می‌دهد که زمانی‌که عوامل لیتولوژی (رویکرد ۷) و فاصله از جاده (رویکرد ۹) از تحلیل‌ها حذف گردید دقت مدل به‌ترتیب به ۶۷/۷٪ و ۶۸/۲۰٪ کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که عوامل لیتولوژی و فاصله

جدول۳. توصیف آماری هر یک از رویکردهای مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش و میزان دقت مدل‌های مذکور

رویکردها	مینیمم مقادیر	ماکزیمم مقادیر	میانگین	انحراف معیار	سطح زیر منحنی
۱	−۴۴/۸۶۶	۴۵/۳۰۲	−۰/۶۴۹	۱۹/۹۲۱	۰/۶۹۶۷ (٪۶۹/۶۷)
۲	−۴۰/۳۵۶	۴۱/۸۹۲	−۰/۱۵۸	۱۷/۸۴۳	۰/۷۱۳۷ (٪۷۱/۳۷)
۳	−۴۳/۸۶۷	۴۴/۰۵۳	۰/۹۹۲	۱۷/۴۶۵	۰/۶۹۱ (٪۶۹/۱۰)
۴	−۴۳/۸۵۱	۴۴/۲۸۷	−۰/۰۱۰	۱۹/۱۷۲	۰/۶۸۴۵ (٪۶۸/۴۵)
۵	−۴۳/۴۰۱	۳۹/۲۱۱	−۲/۱۸۸	۱۸/۰۱۶	۰/۷۰۳۶ (٪۷۰/۳۶)
۶	−۳۷/۶۲۷	۳۷/۶۶۴	−۰/۵۲۲	۱۵/۸۸۴	۰/۶۹۵ (٪۶۹/۵۰)
۷	−۴۱/۷۲۵	۴۲/۰۷۶	−۰/۲۳۳	۱۷/۸۳۲	۰/۶۷۷ (٪۶۷/۷۰)
۸	−۴۲/۳۹۵	۴۲/۲۳۷	−۱/۶۲۳	۱۸/۸۰۲	۰/۶۸۷۹ (٪۶۸/۷۹)
۹	−۳۸/۶۵۴	۴۳/۹۱۶	۳/۸۲۸	۱۸/۸۱۳	۰/۶۸۲۰ (٪۶۸/۲۰)
۱۰	−۴۱/۸۸۴	۴۳/۵۲۷	۰/۹۰۲	۱۸/۴۸۹	۰/۶۸۵۸ (٪۶۸/۵۸)
۱۱	−۴۳/۷۹۷	۴۶/۳۷۱	۰/۳۵۳	۱۹/۱۷۵	۰/۶۸۹۷ (٪۶۸/۹۷)
۱۲	−۴۱/۲۳۲	۴۱/۵۴۱	−۰/۰۱۱	۱۷/۵۲۱	۰/۶۹۰۷ (٪۶۹/۰۷)
۱۳	−۴۳/۰۶۵	۴۳/۳۱۰	−۰/۱۰۹	۱۹/۲۱۷	۰/۷۰۱۷ (٪۷۰/۱۷)
۱۴	−۳۸/۴۰۷	۳۹/۹۷۷	−۰/۶۷۵	۱۷/۱۹۲	۰/۷۰۰۴ (٪۷۰/۰۴)

۱. استفاده از تمام عوامل موثر، ۲. حذف عامل جهت شیب، ۳. حذف عامل شیب، ۴. حذف عامل شکل شیب، ۵. حذف عامل ارتفاع، ۶. حذف عامل کاربری اراضی، ۷. حذف عامل لیتولوژی، ۸. حذف عامل بافت خاک، ۹. حذف عامل فاصله از جاده، ۱۰. حذف عامل فاصله از آبراهه، ۱۱. حذف عامل فاصله از گسل، ۱۲. حذف عامل شاخص توان آبراهه، ۱۳. حذف عامل شاخص حمل رسوب و ۱۴. حذف عامل بارش.



شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه با استفاده از تئوری بیزین

از جاده به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شوند. نتایج پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نیز برای مدل برتر (رویکرد ۲) در شکل ۳ نشان داده که به‌ترتیب ۳۱/۶۵، ۲۴/۸۱، ۲۳/۱۲ و ۲۰/۴۲ درصد از منطقه مورد مطالعه در طبقه خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است.

منابع مورد استفاده

۱. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی و م. محمدی. ۱۳۸۹. کاربرد سامانه اطلاعات مکانی و مدل احتمالاتی Weight of Evidence در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، مجموعه مقالات هفتمین همایش ملی سامانه‌های اطلاعات مکانی GIS89، سازمان نقشه‌برداری ایران، ۶ دیماه، ۹ص.

۲. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی، م. محمدی و م. ر. مهدویفر. ۱۳۸۷. تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین‌لغزش و ارزیابی آن با استفاده از اپراتورهای فازی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان ۱۲ (۴۶ الف): ۳۷۵-۳۹۰.

۳. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی، س. م. فاطمی‌عقدا، م. ر. مهدویفر و م. محمدی. ۱۳۸۸. ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره فازی، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران ۳(۸): ۵۱-۶۳.

۴. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی و م. محمدی. ۱۳۸۶. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با روش آماری Frequency ratio در حوزه آبخیز صفارود، مجموعه مقالات سومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۵. شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان. ۱۳۸۶. گزارش آمار و اطلاعات هواشناسی استان گلستان.

۶. شهابی، م. ا. و سعدالدین. ۱۳۸۸. شبکه تصمیم بیزین رهیافتی برای پیش‌بینی اثرات اقدامات مدیریت خشکسالی روی اراضی کشت گندم دیم در استان گلستان، مجموعه مقالات پنجمین همایش ملی آبخیزداری ایران، ۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۸۸ گرگان، ایران.

۷. گروه مطالعه امور زمین‌لغزش‌ها. ۱۳۸۶. فهرست زمین‌لغزش‌های کشور شهریورماه ۱۳۸۶، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، معاونت آبخیزداری، دفتر مهندسی و ارزیابی طرح‌ها.

۸. محمدی، م. ۱۳۸۶. تحلیل خطر حرکات توده‌ای و ارائه مدل منطقه‌ای مناسب با استفاده از GIS (مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز هراز)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور.

9. Bui, H.B., Q. Nguyen and V.T. Nguyen. 2008. GIS-based weight of evidence modeling for landslide susceptibility mapping at Jaechon area, Korea. International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences, 4 pp.
10. Clerici, A., S. Perego, C. Tellini and P. Vescovi. 2006. A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the conditional analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). Environ. Geol. 50(7): 941–961.
11. Constantin, M., M. Bednarik, M.C. Jurchescu and M. Vlaicu. 2010. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania), Environmental Earth Science, DOI 10.1007/s12665-010-0724-y, 10 pp.
12. Komac, M.A. 2006. Landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Sloveni. Geomorfology 74: 17-28.
13. Lee, S. and J. Choi. 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. Intl. J. Geograph. Inform. Sci. 18(8): 789- 814.
14. Lee, S., J. Choi and K. Min. 2002. Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. Environ. Geol. 43: 120–131.
15. Mathew, J., V.K. Jha and G.S. Rawat. 2007. Weights of evidence modeling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. Current Sci. 92(5), 628-638.
16. Moore, I.D., P.E. Gessler, G.A. Neslesn and G.A. Peterson. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. Soil Sci. Soc. Amer. J. 57(2): 443-452.
17. Nefeslioglu, H.A., T.Y. Duman and S. Durmaz. 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey), Geomorphology 94: 401-418.
18. Neuhäuser, B. and B. Terhorst. 2007. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW- Germany). Geomorphology 86: 12–24.
19. Regmi, N. R., J. R. Giardino and J. D. Vitek. 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA, Geomorphology, 115, 172–187. Measuring the accuracy of diagnostic systems, Science, 240:1285-1293.
20. Van Western, C.J. 2002. Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping, 21 pp.

21. Yesilnacar, E.K. 2005. The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey, Ph.D Thesis. Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 pp.
22. Zhu, C. and X. Wang. 2009. Landslide susceptibility mapping: A comparison of information and weights-of evidence methods in Three Gorges Area. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, DOI 10.1109/ESIAT.2009. 187: 342-346.