

ارائه‌ی روش ترکیبی نوین از مدل‌های بیزین و رگرسیون لجستیک در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در شهرستان خلخال

حمیدرضا پورقاسمی^۱، مجید محمدی^{۲*}

^۱ بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شیراز

^۲ گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه سمنان

چکیده

زمین‌لغزش از جمله بلایای طبیعی است که به خسارت‌های انسانی و اقتصادی زیادی از جمله خسارت به مناطق مسکونی، صنعتی و منابع طبیعی منجر می‌شود. به دلیل این خطرات، روش‌های کمی و کیفی مختلفی به منظور ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش ارائه شده‌است. شهرستان خلخال نیز به سبب شرایط آب و هوایی و فیزیوگرافی خاص، همواره در معرض وقوع زمین‌لغزش قرار دارد. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش شهرستان خلخال واقع در جنوب استان اردبیل با استفاده از روش ترکیبی و نوین مدل‌های بیزین و رگرسیون لجستیک است. ابتدا نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه، سپس عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در این منطقه شناسایی شد. این عوامل شامل درجه، شکل و جهت شیب، طبقه‌های ارتفاعی، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، رودخانه، جاده و تراکم زهکشی است. در مرحله‌ی بعد وزن هر یک از کلاس‌های عوامل مؤثر، با استفاده از تئوری بیزین و میزان تأثیر هر عامل، مطابق با مدل رگرسیون لجستیک محاسبه شد. در نهایت نقشه‌ی نهایی حساسیت زمین‌لغزش منطقه‌ی مورد مطالعه، از ترکیب مدل‌های مذکور تهیه و به چهار طبقه‌ی حساسیت کم (۲۴/۶۴ درصد)، متوسط (۲۵/۹۵ درصد)، زیاد (۲۴/۴۴ درصد) و خیلی زیاد (۲۴/۹۴ درصد) تقسیم گردید. به منظور ارزیابی نقشه‌ی مذکور، از ۳۰ درصد نقاط لغزشی استفاده نشده در مدلسازی و منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل در منطقه‌ی مورد مطالعه، بیانگر دقت بسیار خوب این مدل با سطح زیرمنحنی ۸۰/۷۰ درصد است؛ بنابراین، می‌توان پیشنهاد داد که نقشه‌ی مذکور، می‌تواند در آمایش سرزمین و برنامه‌ریزی منطقه‌ی شهرستان خلخال نقش به‌سزایی داشته‌باشد.

تاریخچه مقاله:

دریافت:

۹۴/۰۷/۱۷

اصلاح:

۹۵/۰۵/۱۴

پذیرش:

۹۵/۰۷/۰۲

واژگان کلیدی:

حساسیت زمین‌لغزش

تئوری بیزین

رگرسیون لجستیک

شهرستان خلخال

۱- مقدمه

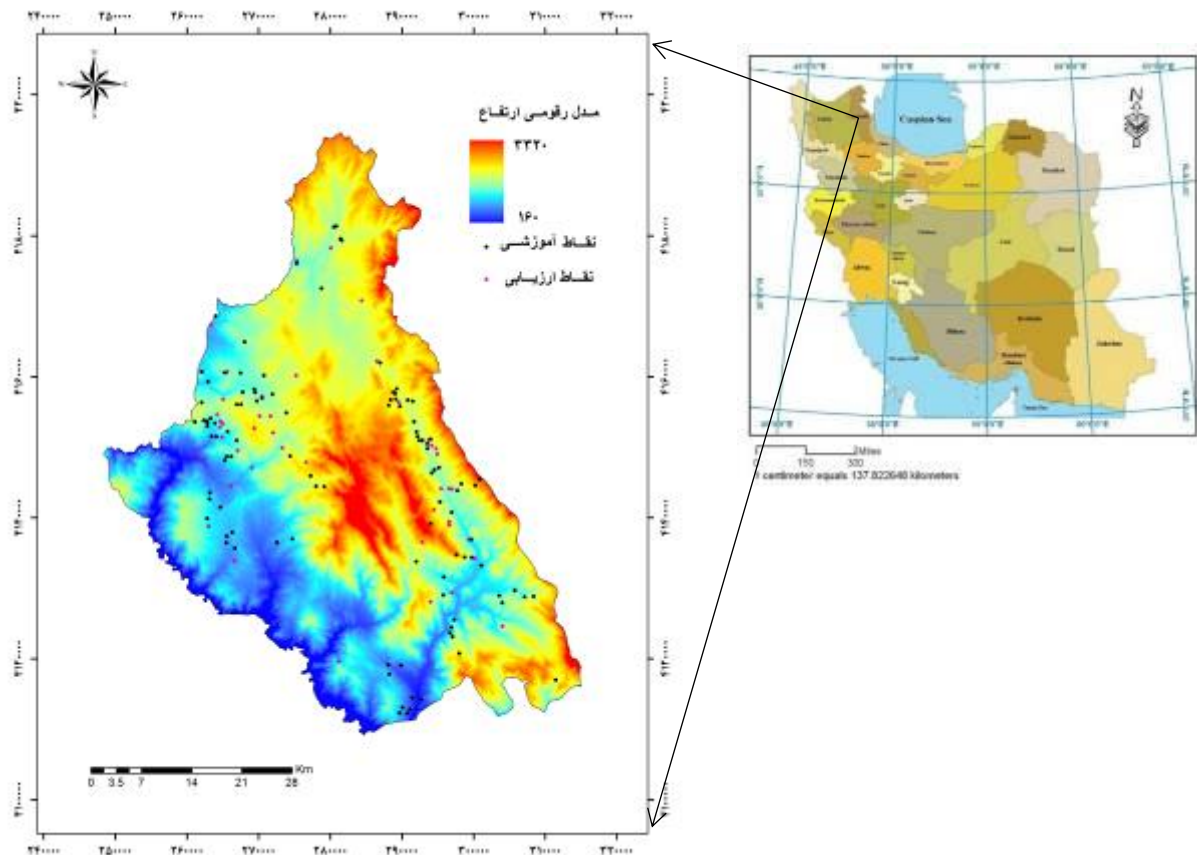
در سال‌های اخیر رشد جمعیت و توسعه‌ی شهرنشینی در مناطق ناپایدار و خطرناک، به افزایش بلایای طبیعی در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه انجامیده‌است. بلایای طبیعی به صورت مستقیم و غیرمستقیم، بر مسائل اقتصادی و اجتماعی انسان‌ها تأثیرگذار بوده و خسارت‌های ناشی از آن، در کشورهای در حال توسعه جدی‌تر است. زمین‌لغزش از جمله بلایای طبیعی است که به خسارت‌های انسانی و اقتصادی زیادی از جمله خسارت به مناطق مسکونی، صنعتی و

منابع طبیعی منجر می شود (Glade, 1997). بر اساس مطالعات انجام شده، در طی سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۰۳ زمین لغزش به تنهایی ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده که بیشترین میزان خسارت آن در اروپا و سالانه ۱۷ میلیون دلار برآورد شده است (Koehorst et al, 2005). در ایران نیز در مورد خسارت‌های ناشی از حرکات توده‌ای، مطالعاتی صورت گرفته که طبق گزارش جمع‌بندی اطلاعات و خسارت‌های مربوط به ۴۹۰۰ مورد زمین لغزش از بانک اطلاعاتی تا پایان شهریورماه ۱۳۸۶، میزان خسارت ناشی از زمین لغزش ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد گردیده است (ILWP, 2007). با توجه به تلفات جانی، خسارت‌های مالی و تأثیرهای زیست‌محیطی، تهیه نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش اقدامی مهم در مدیریت این پدیده است؛ به همین دلیل، روش‌های کیفی و کمی مختلفی به منظور بررسی زمین لغزش و عوامل مؤثر بر آن طراحی شده است (Ayalew and Yamagishi, 2005). شهرستان خلخال به دلیل شرایط آب و هوایی و توپوگرافی متنوع، با مشکل زمین لغزش مواجه است و این پدیده، خسارت‌های زیادی در منطقه ایجاد می‌کند. به همین دلیل در این تحقیق برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش در شهرستان خلخال، از روش ترکیبی جدیدی استفاده شد. تهیه نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش، به شناسایی مناطق در معرض خطر منجر می‌شود. این امر در برنامه‌ریزی‌های آینده به مدیران کمک می‌کند تا در حد امکان از تغییرات و دخالت‌های انسانی در این مناطق جلوگیری و از تحریک آن خودداری شود. اگرچه در نقاط مختلف دنیا، تحقیق‌های متنوعی در زمینه‌ی کاربرد تئوری بیزین (Jebur et al, 2015؛ Mathew et al, 2007؛ Mohammady et al, 2014؛ Ozdemir and Altural, 2013؛ Akgun et al, 2011؛ Pourghasemi et al, 2012b؛ Regmi et al, 2009؛ Zhu and Wang, 2009) و رگرسیون لجستیک (Nefeslioglu et al, 2014؛ Felicísimo et al, 2013؛ Devkota et al, 2013؛ Bai et al, 2010؛ Althuwaynee et al, 2014؛ Pradhan, 2010؛ Yalcin et al, 2011؛ Youssef, 2015) در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش مشاهده شده، تاکنون هیچ تلاشی مبنی بر ترکیب مدل‌های مذکور (بیزین-لجستیک) و ارزیابی دقت آن در منابع مشاهده و گزارش نشده است که این امر می‌تواند نوآوری تحقیق حاضر باشد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

شهرستان خلخال در جنوب استان اردبیل واقع شده است و از طرف شمال به شهرستان کوثر، شرق به استان گیلان، جنوب به استان زنجان و از طرف غرب به شهرستان میانه محدود می‌گردد. این شهرستان در ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. کمینه و بیشینه‌ی ارتفاع منطقه‌ی مورد مطالعه، به ترتیب ۱۶۰ و ۳۳۲۰ متر و مساحت آن ۲۶۷۲/۲۴ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۱). شهرستان خلخال، منطقه‌ای کوهستانی است که ارتفاع آن از شرق به غرب و از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. برخلاف دامنه‌های غربی این شهرستان، در منطقه‌ی خلخال به سبب کاهش باران و خشکی هوا، پوشش گیاهی انبوه و چشم‌گیری دیده نمی‌شود. در این شهرستان، رود مهم قزل‌اوزن و شاخه‌های آن مانند شاهرود آراپاچای و سنگ‌آباد به طرف جنوب جریان دارد و به دریای خزر می‌ریزد. این منطقه از لحاظ آب و هوا، دارای تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد است. زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه، متنوع بوده و از ۸ گروه سازند تشکیل شده که بخش اعظم آن (۵۵/۴۷ درصد) سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی-بازالتی است (جدول ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

۲-۲- روش تحقیق

روش تحقیق شامل تهیه‌ی نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها، آماده‌سازی لایه‌ها و عوامل مؤثر در محیط GIS، تعیین ارتباط بین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و نقاط لغزشی با استفاده از تئوری بی‌زین، تعیین اهمیت هر لایه با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش و در نهایت ارزیابی مدل می‌باشد. بر این اساس ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاع^۱ با ابعاد پیکسل ۱۰*۱۰ متر تهیه و عوامل درجه، شکل و جهت شیب، و طبقه‌ی ارتفاعی از آن استخراج شد. برای طبقه‌بندی نقشه‌ی ارتفاعی، از منحنی تجمعی پیکسل‌های ارتفاعی و شکست‌های طبیعی این منحنی استفاده شد. نقشه‌ی کاربری اراضی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست سال ۲۰۱۲ و روش بیشینه‌ی احتمال^۲ تهیه گردید. نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه نیز در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد. نقشه‌ی مذکور در محیط نرم‌افزار ILWIS^۳ رقومی و لایه‌های سنگ‌شناسی (جدول ۱) و فاصله از گسل، از آن استخراج و لایه‌های مربوط به آبراهه‌ها (فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی) و جاده‌ها (فاصله از جاده) نیز از نقشه‌ی توپوگرافی منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه شد.

^۱ Digital Elevation Model (DEM)

^۲ Maximum Likelihood

^۳ Integrated Land and Water Information System (ILWIS)

از آنجایی که بسته به شرایط منطقه، معمولاً عوامل مختلفی در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش تأثیرگذار است، همچنین در تعیین میزان حساسیت با استفاده از مدل‌های آماری دومتغیره و احتمالاتی نظیر بیزین^۱، تمامی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش وزن یکسانی دارند؛ لذا چنانچه یکی از عوامل تأثیر بیشتری داشته باشد، میزان اثر آن نادیده گرفته می‌شود (Sharma et al, 2010؛ Ramakrishna et al, 2005). بنابراین تئوری نوین مذکور — ترکیب مدل‌های بیزین و رگرسیون لجستیک — می‌تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی، تأثیر به سزایی در شناختن عوامل مؤثر، میزان تأثیرگذاری آنها و افزایش دقت نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش داشته باشد.

جدول ۱: ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه

سن	توصیفات	گروه	سازند زمین‌شناسی
اوسن میانی	سنگ‌های آتشفشانی-آندزیتی	۱	Eav
پالئوزوئیک	سنگ‌های آتشفشانی-آندزیتی-بازالتی	۱	Pz1a,bv
پالئوسن	گنیس، گرانیت، آمفیبولیت، شیست، کوارتزیت	۱	Pz1mt
پلیوسن	مارن، شیل، کنگلومرا و ماسه‌سنگ	۲	Plms
پلیوسن-کواترنری	کنگلومرا رودخانه‌ای، کنگلومرا و ماسه‌سنگ کوهپایه‌ای	۲	PlQc
کرتاسه	سنگ‌های گچی	۳	K
کرتاسه	سنگ آهک توده‌ای خاکستری تا سیاه	۳	Knl
ژوراسیک-کرتاسه	سنگ آهک کرتاسه، سنگ آهک گلوکونیک ماسه‌ای-سیلتی	۴	Jshl.s
ژوراسیک-کرتاسه	سازند لار (سنگ آهک توده‌ای ضخیم تا خاکستری روشن)	۴	Jl
کواترنری	نهشته‌های ترانس‌های آبرفتی و مخروط افکنه	۵	Qft2
الیگوسن	سنگ‌های آتشفشانی داسیتی تا آندزیتی	۶	Odav
تریاس-ژوراسیک	سازند شمشک (شیل خاکستری سیاه و سنگ آهک)	۷	TRJs
میوسن	مارن، سنگ آهک کلسیتی، سنگ آهک ماسه‌ای و کمی کنگلومرا	۸	Mmsl

۳- یافته‌ها

پس از تهیه‌ی نقشه‌های عوامل مؤثر و هم‌پوشانی هر عامل با نقشه‌ی پراکنش زمین لغزش‌های منطقه، نتایج حاصل از ارتباط بین زمین لغزش‌ها با عوامل مؤثر و تعیین میزان تأثیر کلاس‌های آن با استفاده از تئوری بیزین (رابطه‌های ۳ الی ۹) در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: تعیین وزن هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک و بیزین

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد لغزش	وزن‌های مثبت	وزن‌های منفی	وزن نهایی بیزین	وزن رگرسیون لجستیک
	۵-۰	۸۶۹۶۳۷	۱۴	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	-۰/۰۱۷	
درجه شیب	۱۵-۵	۲۳۵۸۵۶۰	۴۴	۰/۱۴۳	-۰/۰۸۸	۱/۱۷۹	۰/۰۲۳
	۳۰-۱۵	۲۷۵۵۸۰۸	۴۲	-۰/۰۵۹	۰/۰۳۹	-۰/۴۹۹	

^۱ Bayesian

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد لغزش	وزن‌های مثبت	وزن‌های منفی	وزن نهایی	وزن رگرسیون لجستیک
شکل شیب (متر/۱۰۰)	< ۳۰	۶۹۶۳۶۴	۸	-۰/۳۴۲	۰/۰۳۳	-۱/۰۲۰	
	مقعر	۲۶۰۹۵۶۴	۳۹	-۰/۰۷۹	۰/۰۴۷	-۰/۶۲۸	
	هموار	۱۲۴۹۷۸۶	۱۹	-۰/۰۶۱	۰/۰۱۴	-۰/۲۹۷	-۰/۲۹۷
	محدب	۲۸۲۱۰۱۹	۵۰	۰/۰۹۲	-۰/۰۷۳	۰/۸۵۵	
	هموار	۳۵۹۵۱۸	۴۶	۲/۰۶۹	-۰/۵۰۰	-۱۳/۱۹۸	۰/۰۰۰
	شمال	۵۴۲۰۷۵	۷	-۰/۲۲۵	۰/۰۱۸	-۰/۶۲۰	-۲/۰۰۵
	شمال شرقی	۷۱۲۵۷۸	۸	-۰/۳۶۵	۰/۰۳۶	-۱/۰۹۰	-۰/۹۹۸
	شرق	۷۷۱۶۸۴	۱۷	۰/۳۰۹	-۰/۰۴۹	۱/۳۵۵	-۱/۴۶۶
	جنوب شرقی	۷۰۸۳۹۶	۱۹	۰/۵۰۶	-۰/۰۸۱	۲/۳۲۵	-۱/۵۵۰
	جنوب	۷۸۷۲۱۹	۱۱	-۰/۱۴۶	۰/۰۱۸	-۰/۵۱۵	-۲/۰۳۰
جهت شیب	جنوب غربی	۱۰۴۹۴۶۶	۱۰	-۰/۵۲۹	۰/۰۷۴	-۱/۸۱۵	-۰/۸۹۲
	غرب	۹۸۲۸۶۶	۲۰	۰/۲۳۰	-۰/۰۴۶	۱/۱۱۳	-۲/۲۹۰
	شمال غربی	۷۶۶۵۶۷	۷	-۰/۵۷۱	۰/۰۵۵	-۱/۶۰۲	-۱/۳۰۹
	۱۲۲۱-۱۶۰/۵۶	۸۳۰۸۹۳	۶	-۰/۸۰۶	۰/۰۷۶	-۲/۰۹۹	
	۱۲۲۱/۱۶۰۴-۵۶/۲۲	۱۴۵۰۴۴۰	۳۶	۰/۴۲۹	-۰/۱۶۱	۲/۸۸۷	
	۱۶۰۴/۱۹۶۲-۲۲/۱۹	۱۷۹۱۹۱۴	۴۴	۰/۴۱۸	-۰/۲۱۱	۳/۲۱۱	-۰/۰۰۰۵
	۱۹۶۲/۲۳۲۰-۱۹/۱۶	۱۷۷۰۳۹۷	۱۹	-۰/۴۱۰	۰/۱۱۴	-۲/۰۷۴	
	۲۳۲۰/۳۳۲۰-۱۶	۸۳۶۷۲۵	۳	-۱/۵۰۶	۰/۱۰۶	-۲/۷۵۳	
	اراضی لخت	۲۲۱۲۴۳۱	۳۳	-۰/۰۸۱	۰/۰۳۸	-۰/۵۶۶	۰/۰۰۰
	مرتع خوب	۲۶۵۹۲۸۹	۵۱	۰/۱۷۱	-۰/۱۳۱	۱/۵۶۸	-۰/۳۷۴
کاربری اراضی	مرتع ضعیف	۹۲۷۸۴	۰	None	۰/۰۱۴	۰	۰/۰۰۰
	مخلوط باغ-کشاورزی	۱۶۵۱۱۶۵	۲۴	-۰/۱۰۶	۰/۰۳۳	-۰/۶۰۰	۰/۱۶۰
	اراضی دیم	۶۴۷۰۰	۰	None	۰/۰۱۰	۰	۰/۰۰۰
	۱	۳۷۰۵۵۱۸	۴۶	-۰/۲۶۴	۰/۲۵۴	-۲/۶۶۳	۰/۰۰۰
	۲	۵۰۰۸۶۵	۲۸	۱/۲۴۱	-۰/۲۲۲	۶/۶۶۲	۲/۰۷۷
	۳	۴۲۱۲۱۰	۱	-۱/۹۱۸	۰/۰۵۶	-۱/۹۶۵	-۱/۰۳۹
لیتولوژی	۴	۳۸۹۳۶۷	۶	-۰/۰۴۸	۰/۰۰۳	-۰/۱۲۱	۰/۸۹۵
	۵	۲۰۷۵۷۰	۴	۰/۱۷۶	-۰/۰۰۶	۰/۳۵۷	۰/۸۲۱
	۶	۲۴۲۳۴۴	۳	-۰/۲۶۷	۰/۰۰۹	-۰/۴۷۱	۰/۲۸۳
	۷	۶۳۴۳۶۱	۱۴	۰/۳۱۱	-۰/۰۳۹	۱/۲۲۳	۰/۵۳۹
	۸	۵۷۹۱۳۴	۶	-۰/۴۴۵	۰/۰۳۴	-۱/۱۳۹	-۰/۹۱۹
	۵۰۰-۰	۱۴۸۰۹۸۸	۳۵	۰/۳۸۰	-۰/۱۴۱	۲/۵۳۸	
	۱۰۰۰-۵۰۰	۱۱۰۹۶۷۲	۱۵	-۰/۱۷۹	۰/۰۳۲	-۰/۷۵۸	۰/۰۰۰۱
	۱۵۰۰-۱۰۰۰	۹۴۳۹۸۷	۲۰	۰/۲۷۰	-۰/۰۵۲	۱/۳۰۳	
۲۰۰۰-۱۵۰۰	۸۰۵۰۴۱	۱۰	-۰/۲۶۴	۰/۰۳۱	-۰/۸۸۸		
فاصله از گسل (متر)							

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد لغزش	وزن‌های مثبت	وزن‌های منفی	وزن نهایی بیزین	وزن رگرسیون لجستیک
	۷۱۳۸-۲۰۰۰/۶۳	۲۳۴۰۸۸۱	۲۸	-۰/۳۰۱	۰/۱۳۱	-۱/۹۷۰	
	۱۰۰-۰	۲۹۳۹۲۶۱	۴۶	-۰/۰۳۲	۰/۰۲۵	-۰/۲۹۴	
فاصله از رودخانه (متر)	۲۰۰-۱۰۰	۱۷۸۶۸۰۴	۳۵	۰/۱۹۲	-۰/۰۸۰	۱/۳۲۵	
	۳۰۰-۲۰۰	۱۰۲۰۰۸۰	۱۳	-۰/۲۳۸	۰/۰۳۷	-۰/۹۳۱	-۰/۰۰۰۲
	۴۰۰-۳۰۰	۵۱۳۰۵۹	۱۱	۰/۲۸۲	-۰/۰۲۸	۰/۹۷۴	
	۱۱۴۷-۴۰۰/۷	۴۲۱۱۶۵	۳	-۰/۸۲۰	۰/۰۳۷	-۱/۴۶۳	
	۵۰۰-۰	۱۸۱۶۵۴۲	۵۲	۰/۵۷۱	-۰/۳۳۹	۴/۷۲۹	
فاصله از جاده (متر)	۱۰۰۰-۵۰۰	۱۴۰۸۰۱۰	۲۳	۰/۰۱۰	-۰/۰۰۳	۰/۰۵۶	-۰/۰۰۰۳
	۱۵۰۰-۱۰۰۰	۱۰۹۷۴۷۷	۱۶	-۰/۱۰۳	۰/۰۱۹	-۰/۴۵۲	
	۷۶۹۴-۱۵۰۰/۷	۲۳۵۸۳۴۰	۱۷	-۰/۸۰۸	۰/۲۶۴	-۴/۰۵۷	
تراکم زهکشی (km/km ²)	۰/۳-۵۶/۷۸	۱۸۹۷۰۸۳	۱۴	-۰/۷۸۴	۰/۱۹۵	-۳/۴۱۹	
	۳/۵-۷۸/۶۱	۲۵۷۴۵۷۲	۳۷	-۰/۱۱۸	۰/۰۶۷	-۰/۹۱۳	۰/۲۱۳
	۵/۷-۶۱/۸۹	۱۵۶۱۹۴۳	۳۲	۰/۲۳۷	-۰/۰۸۵	۱/۵۲۸	
	۷/۱۳-۸۹/۲۴	۶۴۶۷۷۱	۲۵	۰/۸۷۲	-۰/۱۶۱	۴/۵۲۹	

Intercept=۱/۱۳۳

نتایج بررسی کلاس‌های شیب (جدول ۲)، نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در کلاس شیب ۱۵-۵ درجه اتفاق افتاده است.

بررسی ارتباط بین زمین لغزش و شکل شیب، نشان‌دهنده نقش بیشتر شیب‌های محدب در رخداد لغزش‌های مشاهده شده در منطقه است. بررسی جهت شیب نشان داد که بیشتر لغزش‌های اتفاق افتاده، در جهت‌های جنوب شرق و شرق می‌باشد.

بررسی زمین لغزش‌ها در طبقه‌های ارتفاعی نشان داده که کلاس‌های ارتفاعی ۱۹۶۲/۱۹-۱۶۰۴/۲۲ و ۱۶۰۴/۲۲-۱۲۲۱/۵۶ متر، به ترتیب دارای بیشترین وزن (۳/۲۱۱ و ۲/۸۸۷) بوده و با افزایش ارتفاع بیش از ۱۹۶۳ متر، میزان حساسیت به خطر زمین لغزش کم شده است. ارتباط زمین لغزش‌ها و کاربری اراضی نشان می‌دهد که اراضی مرتعی خوب، بیشترین وزن (۱/۵۶۸) و بنابراین بیشترین احتمال وقوع لغزش را داراست. بررسی سنگ‌شناسی بیانگر حساسیت بیشتر سازندهای گروه ۲ و ۷ نسبت به وقوع زمین لغزش است که اساساً از مارن، شیل، ماسه سنگ، کنگلومرای رودخانه‌ای و شیل سیاه - خاکستری و سازند شمشک می‌باشد.

بررسی نتایج فاصله از گسل نشان می‌دهد که با افزایش این فاصله، حساسیت منطقه به وقوع زمین لغزش کمتر می‌شود (جدول ۲). بنابراین، در فاصله‌ی ۵۰۰ متری از گسل، بیشترین احتمال وقوع لغزش‌ها مشاهده شده است.

در مورد فاصله از شبکه‌ی آبراهه، بیشترین احتمال وقوع لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه‌ی مورد مطالعه، در فاصله‌ی ۱۰۰-۲۰۰ متری از این عارضه مشاهده شده است. ارتباط بین زمین لغزش و عامل فاصله از جاده، نشان داده که قسمت اعظم لغزش‌های رخ داده در منطقه‌ی مورد مطالعه، در فاصله‌ی ۱۰۰ متری از جاده‌ها مشاهده شده است. همچنین نتایج،

نشان دهنده‌ی نقش تراکم زهکشی بر وقوع زمین‌لغزش‌ها است و متعاقباً مناطق با تراکم بیشتر، وزن بیشتر و حساسیت بیشتری خواهند داشت.

پس از تغییر فرمت هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش از حالت رستری^۱ به ASCII^۲، داده‌ها از نرم‌افزار ArcGIS به نرم‌افزار SPSS منتقل و آنالیز رگرسیون لجستیک انجام شد. نتایج ضرایب رگرسیونی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش منطقه‌ی مورد مطالعه، با استفاده از تحلیل رگرسیون لجستیک نیز در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج بررسی عوامل کمی مورد مطالعه (درجه‌ی شیب، شکل شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، جاده و آبراهه و تراکم زهکشی) نشان داد که عامل‌های تراکم زهکشی، درجه‌ی شیب و فاصله از گسل به ترتیب با وزن‌های ۰/۲۳، ۰/۲۳ و ۰/۰۰۱ ارتباط مثبت، مستقیم و نقش به‌سزایی در زمینه‌ی وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه‌ی مورد مطالعه دارد؛ در حالی که عوامل دیگر دارای ضرایب منفی بود و تأثیر معکوسی داشت.

همچنین نتایج مربوط به ضرایب رگرسیونی عوامل جهت شیب، کاربری اراضی و لیتولوژی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج بررسی عامل جهت شیب نشان داد که جهت‌های مختلف شیب، در وقوع زمین‌لغزش منطقه‌ی مطالعاتی تأثیر خاصی نداشته‌اند. بررسی عامل کاربری اراضی نشان داد که کاربری مخلوط باغ و کشاورزی با وزن‌های ۰/۱۶، در رخداد زمین‌لغزش منطقه تأثیر بیشتری داشته است. درباره‌ی عامل سنگ شناسی، نتایج تحلیل رگرسیونی نشان داد که گروه‌های ۲، ۴ و ۵ سنگ شناسی که اغلب از شیل، مارن، کنگلومرا، سنگ آهک و نهشته‌های کواترنری تشکیل شده، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند (۲/۰۷۷، ۰/۸۹۵ و ۰/۸۲۱)؛ بنابراین، با لغزش منطقه بیشترین ارتباط را دارند. نتایج بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هم‌خطی بین متغیرهای مستقل، در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس جدول ۳، هیچ ارتباط هم‌خطی معنی‌داری بین متغیرهای مستقل وجود ندارد و بیشترین و کمترین مقادیر عامل تورم واریانس و ضریب تحمل، به ترتیب ۱/۳۱۲ و ۰/۷۶۲ است.

جدول ۳: بررسی هم‌خطی بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش منطقه‌ی مورد مطالعه

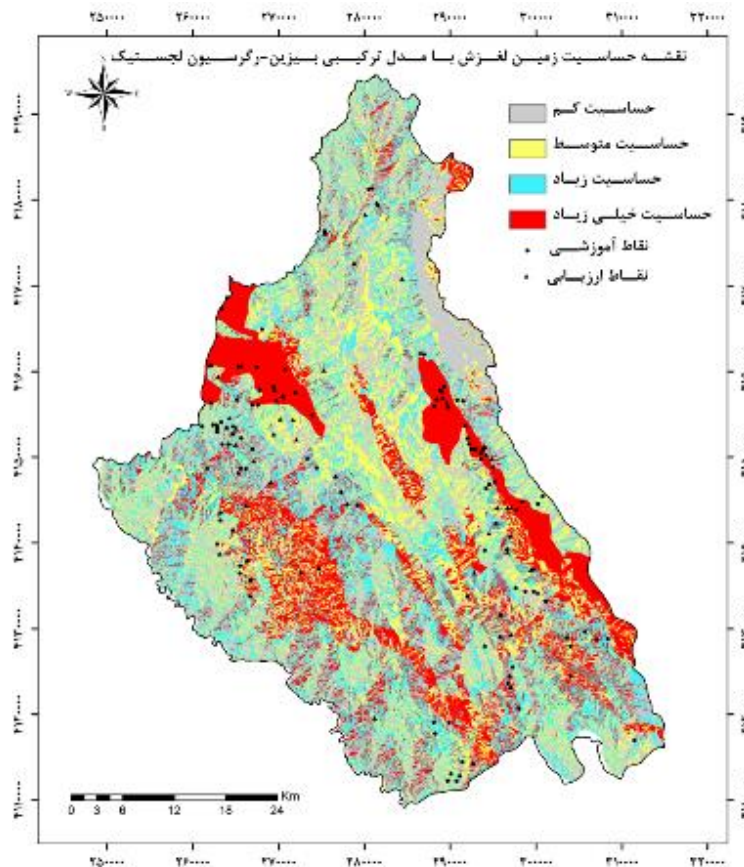
عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش	عامل تورم واریانس (VIF)	ضریب تحمل (Tolerance)
جهت شیب	۱/۰۹۵	۰/۹۱۳
طبقه‌های ارتفاع	۱/۳۱۲	۰/۷۶۲
فاصله از گسل	۱/۱۴۹	۰/۸۷۰
شکل شیب	۱/۰۶۵	۰/۹۳۹
تراکم زهکشی	۱/۲۲۳	۰/۸۱۸
فاصله از رودخانه	۱/۰۷۴	۰/۹۳۱
فاصله از جاده	۱/۱۰۱	۰/۹۰۸
درجه‌ی شیب	۱/۱۲۳	۰/۸۹۱
کاربری اراضی	۱/۱۸۵	۰/۸۴۴
لیتولوژی	۱/۱۶۱	۰/۸۶۲

^۱ Raster

^۲ Acronym for the American Standard Code for Information Interchange (ASCII)

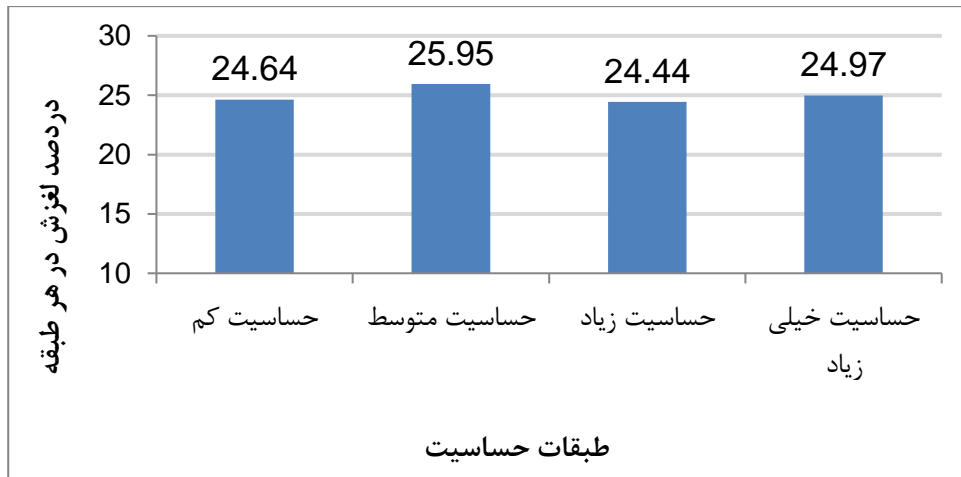
پس از تعیین وزن کلاس‌های عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با تئوری بیزین و اهمیت نسبی هر عامل با استفاده از رگرسیون لجستیک، نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش (LSM) براساس رابطه‌ی ۱۱ برای منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه (شکل ۲) و براساس شکستگی‌های طبیعی (Erner et al, 2010, Falaschi et al, 2009, Xu et al, Pourghasemi et al, 2012a; Youssef et al, 2015, al, 2012) به چهار طبقه‌ی حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد با مساحت‌های ۲۴/۶۴ درصد، ۲۵/۹۵ درصد، ۲۴/۴۴ درصد و ۲۴/۹۴ درصد تقسیم شد (شکل ۳).

$$LSM_{BT-RL} = (1.113 + (Slope * 0.023) + (Plan\ curvature * (-0.297)) + (Aspect) + (Elevation * (-0.0005)) + (Landuse) + (Lithology) + (Distance\ from\ fault * 0.0001) + (Distance\ from\ River * (-0.0002)) + (Distance\ from\ Road * (-0.0003) + (Drainage\ density * 0.213))) \quad ۱۱$$



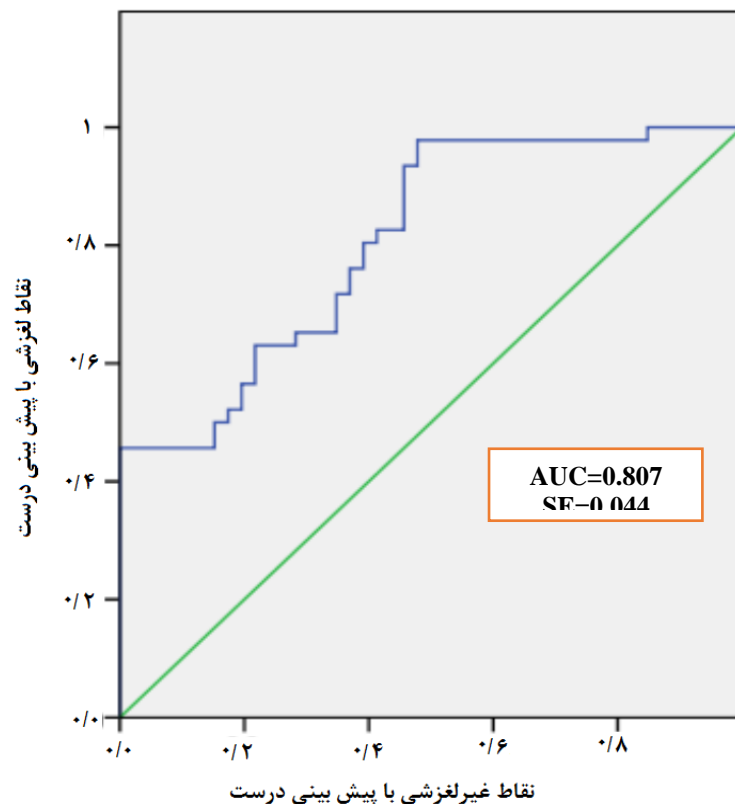
شکل ۲: نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش با مدل ترکیبی بیزین- رگرسیون لجستیک

¹ Landslide Susceptibility Mapping (LSM)



شکل ۳: درصد طبقه‌های حساسیت نقشه‌ی زمین لغزش تهیه شده با مدل ترکیبی بیزین- رگرسیون لجستیک در منطقه‌ی مورد مطالعه

همان‌طور که بیان شد، برای ارزیابی مدل از منحنی ROC استفاده شد. بر اساس نتایج منحنی ROC (شکل ۴)، مقدار سطح زیر منحنی (AUC) منطقه‌ی مورد مطالعه ۰/۸۰۷ یا ۸۰/۷۰ درصد با انحراف استاندارد ۰/۰۴۴ (SE) برآورد شده است. شکل ۴، نشان‌دهنده‌ی ارزیابی خوب مدل ترکیبی بیزین- رگرسیون لجستیک در شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن است.



شکل ۴: منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش

۴- بحث و نتیجه‌گیری

طبق مشاهدات، بیشتر زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های متوسط به وقوع می‌پیوندد که این امر با نظر برخی از محققان دیگر نیز مطابقت دارد (Ercanoglu and Gokceoglu, 2004; Lee and Abdul Talib, 2005; Mohammady *et al.*, 2014; Pourghasemi *et al.*, 2012a; Pourghasemi *et al.*, 2013a). زمین‌لغزش با افزایش شیب، بیشتر می‌شود ولی این افزایش تا شیب‌های متوسط نیز ادامه دارد. شیب‌های ملایم به سبب تنش برشی کمتر، معمولاً حساسیت کمتری به وقوع زمین‌لغزش دارند (Yalcin *et al.*, 2011; Mohammady *et al.*, 2014)؛ در حالی که در شیب‌های متوسط، دخالت‌های انسانی از قبیل تغییر کاربری اراضی به حساسیت بیشتر این شیب‌ها منجر می‌شود (Pourghasemi *et al.*, 2013a). در شیب‌های بالا نیز به دلیل صخره‌ای بودن دامنه، ضخامت کم مواد منفصل و دخالت انسانی کمتر، معمولاً وقوع زمین‌لغزش کمتر است. شیب‌های محدب، بیشترین رخداد لغزش‌ها را داشته که تحقیق‌های دیگری نیز این موضوع را تأیید کرده‌اند (Van Westen *et al.*, Pradhan and Lee, 2010; Pourghasemi *et al.*, 2013a; Jaafari *et al.*, 2014). به طور کلی، شکل شیب بر همگرایی و واگرایی جریان انتقالی از بالادست منطقه به پایین‌دست آن تأثیر به‌سزایی دارد (Ercanoglu and Gokceoglu, 2004; Oh and Pradhan, 2011). پرادان و لی^۱ (۲۰۱۰) معتقدند، تکرار اتساع و انقباض دامنه‌های محدب که سبب خزش و وقوع جریان گلی در هنگام بارش‌های سنگین می‌شود، دلیل حساسیت بیشتر این نوع دامنه‌ها است. وجود حساسیت بیشتر جهت‌های جنوب شرق و شرق نسبت به زمین‌لغزش، با نتایج تحقیق (Pourghasemi *et al.*, 2012b) مطابقت ندارد. کارارا^۲ و همکاران (۱۹۹۱) معتقدند که در تحقیقات، زمین‌های اثر جهت شیب بر زمین‌لغزش توافقی کلی وجود ندارد؛ بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که جهت شیب به عنوان عامل اصلی وقوع زمین‌لغزش در منطقه‌ی مورد مطالعه، نقشی ایفاء ننموده و عوامل دیگر، نقش این عامل در وقوع زمین‌لغزش را کم رنگ کرده‌اند.

همان‌طور که نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع، میزان حساسیت به خطر زمین‌لغزش کاهش یافته است. پاچوری و پنت^۳ (۱۹۹۲) معتقدند هر چه ارتفاع بیشتر شود، حساسیت به خطر زمین‌لغزش بیشتر می‌شود؛ اما چنانچه در ارتفاع‌های بالا وقوع زمین‌لغزش کمتر گردد؛ نشان‌دهنده‌ی آن است که در این منطقه عوامل دیگری همچون سنگ‌شناسی، در برابر لغزش بسیار مقاوم بوده است. همچنین دای و لی^۴ (۲۰۰۲) معتقدند علی‌رغم آنکه در ارتفاع‌های بالا فرایند هوازدگی سنگ در اثر پدیده‌ی ذوب - انجماد غالب است، اما هر چه ارتفاع کمتر شود، خاک‌ها عمیق و تکامل یافته‌تر می‌گردند؛ در نتیجه این مناطق برای وقوع زمین‌لغزش مساعدتر می‌شود. شاید وقوع بیشتر زمین‌لغزش‌ها در اراضی مرتعی خوب، بدین دلیل باشد که عمدتاً مراتع خوب در بخش‌هایی از منطقه قرار گرفته‌اند که خاک ضخیم و شیب نسبتاً زیادی دارد و شرایط وقوع زمین‌لغزش در آن فراهم است که این امر با نتایج پورقاسمی^۵ و همکاران (۲۰۱۳b) همخوانی دارد. همچنین قسمت‌هایی از این مناطق از نظر عوامل دیگر مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، حساس می‌باشند. دلیل اصلی وجود لغزش‌های زیاد در سازندهایی از جنس مارن، شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرای رودخانه‌ای و شیل سیاه - خاکستری و سازند

¹ Pradhan and Lee

² Carrara

³ Pachauri and Pant

⁴ Dai and Lee

⁵ Pourghasemi

شم‌شک، حساسیت بسیار زیاد این سازندها به فرسایش و زمین‌لغزش بوده که محققین دیگری نیز به این موضوع پرداخته‌اند (Uromeihy and Ohlmacher and Davis, 2003؛ Juang et al., 1992؛ Ayalew and Yamagishi, 2005؛ MahdaviFar, 2000).

گسل یکی از مهم‌ترین عوامل تکتونیکی است که می‌تواند به صورت بالقوه دامنه‌ها را حساس کند. بر همین اساس در اغلب مطالعه‌هایی که به بررسی ناپایداری دامنه‌ها می‌پردازد، عامل گسل به عنوان عاملی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش بررسی می‌شود. با افزایش فاصله از گسل، حساسیت منطقه به وقوع زمین‌لغزش کمتر می‌شود. علت اصلی تأثیر آبراهه بر وقوع زمین‌لغزش این است که آبراهه‌ها بر اثر فرسایش رودخانه‌ای و سایش دیواره‌ی کنار رودخانه، باعث به هم خوردن تعادل شیب و در نتیجه ناپایداری دامنه‌های مشرف به رودخانه می‌گردد. در مورد اثر جاده‌ها بر افزایش زمین‌لغزش، می‌توان گفت که جاده‌ها وضعیت طبیعی و به عبارت دیگر تعادل شیب منطقه را به هم می‌زنند، بریدگی‌های عمودی به وجود می‌آورند و بر بخش پایین جاده فشار اضافی وارد می‌کنند و باعث افزایش زمین‌لغزش در اطراف جاده‌ها می‌شوند. افزایش تراکم زهکشی در منطقه نیز به افزایش زمین‌لغزش منجر می‌گردد. بایستی اذعان کرد که تراکم زهکشی بالا معمولاً در مناطق بالادست حوزه آبخیز دیده می‌شود که طبعاً شرایط را برای وقوع زمین‌لغزش از طریق ایجاد رواناب و فرسایش فراهم خواهد کرد (Yesilnacar, 2005).

همان‌طور که بیان شد، نتایج مربوط به ضرایب رگرسیونی عامل جهت شیب نشان داد که جهت‌های مختلف شیب، در وقوع زمین‌لغزش منطقه‌ی مطالعاتی تأثیر خاصی نداشته‌اند. به طور کلی، انتظار آن است که براساس شرایط رطوبتی، دامنه‌هایی با جهت شمالی حساسیت بیشتری در مقایسه با دیگر جهت‌ها داشته باشند، اما زمین‌لغزش پدیده‌ای طبیعی و بسیار پیچیده است که در وقوع آن عوامل بسیاری تأثیرگذار هستند. گاه در عمل، نقش این عوامل به گونه‌ای است که می‌توان بخشی از این عامل‌ها را - که به طور طبیعی نقش اساسی در وقوع زمین‌لغزش دارند - حذف یا بسیار کم‌رنگ کرد. همچنین بخش اعظم باغ‌ها و اراضی کشاورزی در ارتفاعات ۱۲۲۱ تا ۱۹۶۲ متری قرار گرفته که عمده لغزش‌های منطقه را در این ارتفاع‌ها به خود اختصاص داده‌اند. از سوی دیگر، دخالت‌های انسانی و به هم زدن توپوگرافی طبیعی دامنه‌ها در این کاربری‌ها، خود می‌تواند به افزایش وقوع زمین‌لغزش در منطقه‌ی مورد مطالعه منجر گردد. همان‌طور که بیان شد، براساس تئوری بیزین وزن مربوط به کلاس‌های هر عامل با هم‌پوشانی عوامل مؤثر، با نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها تعیین و برای اولویت‌بندی و تعیین اهمیت هر عامل، از رگرسیون لجستیک استفاده شد. در نهایت بر اساس رابطه‌ی مدل، نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش بر مبنای مدل ترکیبی تعیین و بر اساس شکستگی‌های طبیعی، به چهار طبقه‌ی حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شد. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل مذکور براساس منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و مقدار سطح زیرمنحنی ۰/۸۰۷، در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش دقت خیلی خوبی داشته‌است. در نتیجه، می‌توان گفت که نقشه‌ی مذکور می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های آتی، مدیریت دامنه‌های خطرناک و آمایش سرزمین در منطقه‌ی مورد مطالعه، نقش به‌سزایی داشته‌باشد.

منابع

1. Akgun, A.; Kincal, C.; & B. Pradhan, 2011. Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to Izmir city (West Turkey), *Environmental Monitoring and Assessment*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-011-2352-8>.
2. Althuwaynee, O. F.; Pradhan, B.; Park, H. J. & J. H. Lee, 2014. A novel ensemble decision tree - based Chi - squared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping, *Landslides*, 11 (6), 1063-1078.
3. Ayalew, L.; & H. Yamagishi, 2005. The Application of GIS – based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda – Yahiko Mountains, central Japan, *Geomorphology*, 65, 15-31.
4. Bai, S.; Lu, G.; Wang, J.; Zhou, P.; & L. Ding, 2010. GIS - based rare events logistic regression for landslide - susceptibility mapping of Lianyungang, China, *Environmental Earth Sciences*, 62 (1), 139-149.
5. Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Pasqui, V.; & P. Reichenbach, 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard, *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427-445.
6. Dai, F. C., & C. F. Lee, (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*, 42 (3/4), 213-228.
7. Devkota, K. C.; Regmi, A. D.; Pourghasemi, H. R.; Yoshida, K.; Pradhan, B.; Ryu, I. C.; Dhital, M. R.; & O. F. Althuwaynee, 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.
8. Ercanoglu, M., & C. Gokceoglu, (2004). Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey), *Engineering Geology*, 75, 229–250.
9. Erner, A.; Sebnem, H.; & B. Duzgun, 2010. Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway), *Landslides*, 7, 55–68.
10. Falaschi, F.; Giacomelli, F.; Federici, P. R.; Puccinelli, A.; D'Amato Avanzi, G.; Pochini, A.; & A. Ribolini, 2009. Logistic regression versus artificial neural networks: landslide susceptibility evaluation in a sample area of the Serchio River valley, Italy, *Natural Hazards*, 50, 551–569.
11. Felicísimo, A.; Cuartero, A.; Remondo, J.; & E. Quirós, 2012. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*, doi: 10.1007/s10346-012-0320-1
12. Glade, T., 1997. Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand, *Environmental Geology*, 35, 160–174.
13. Iranian Landslide working party (ILWP), 2007. Iranian landslides list. *Forest, Rangeland and Watershed Management organization*, Iran, p. 60. (In Persian)
14. Jaafari, A.; Najafi, A.; Pourghasemi, H. R.; Rezaeian, J.; & A. Sattarian, 2014. GIS - based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran, *International Journal of Environmental Science and Technology*, DOI: 10.1007/s13762-013-0464-0.
15. Jebur, M. N.; Pradhan, B.; Shafri, H. Z. M.; Yusoff, Z. M.; & M. S. Tehrany, 2015. An integrated user - friendly ArcMAP tool for bivariate statistical modeling in geoscience applications, *Geoscientific Model Development*, 8, 881–891.
16. Juang, C. H.; Lee, D. H.; & C. Sheu, 1992. Mapping slope failure potential using fuzzy sets, *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 118 (3), 475-493.
17. Koehorst, B. A. N.; Kjekstad, O.; Patel, D.; Lubkowski, Z.; Knoeff J. G.; & G. J. Akkerman, 2005. Work package 6, determination of socio-economic impact of natural disasters, assessing socio-economic impact in Europe. 173 pp.
18. Lee, S., & J. Abdul Talib, (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis, *Environmental Geology*, 47, 982-990.
19. Mathew, J.; Jha, V. K.; & G.S. Rawat, 2007. Weights of evidence modeling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand, *Current Sciences*, 92(5), 628-638.

20. Mohammady, M.; 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, *Journal Asian Earth Science*, 61, 221–236.
21. Nefeslioglu, H. A.; Duman, T. Y.; & S. Durmaz, 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea Region of Turkey), *Geomorphology*, 94, 401–418.
22. Oh, H. J., & B. Pradhan, (2011). Application of a neuro - fuzzy model to landslide susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area, *Computer and Geoscience*, 37(9), 1264–1276.
23. Ohlmacher, G. C., & J. C. Davis, (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in Northeast Kansas, USA, *Engineering Geology*, 69, 331–343.
24. Ozdemir, A., & T. Altural, (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey, *Journal of Asian Earth Science*, 64, 180–197
25. Pachauri, A. K., & M. Pant, (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes, *Engineering Geology*, 32, 81–100.
26. Pourghasemi, H. R.; Mohammady, M.; & B., Pradhan, (2012a). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran, *Catena*, 97, 71–84.
27. Pourghasemi, H. R.; Moradi, H. R.; Mohammady, M.; Mostafazadeh, R.; & A. Goli Jirandeh, 2012b. Landslide Hazard Zoning Using Bayesian Theory. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, water and soil science*, 16 (62), 109–122 (In Persian).
28. Pourghasemi, H. R.; Goli Jirandeh, A.; Pradhan, B.; Xu, C.; & C. Gokceoglu 2013a. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS, *Journal of Earth System Science*, 122 (2), 349–369.
29. Pourghasemi, H. R.; Moradi, H. R.; & S. M. Fatemi Aghda, 2013b. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances, *Natural Hazard*, 69; 749–779.
30. Pradhan, B., 2010. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia, *Advances in Space Research*, 45, 1244–1256.
31. Pradhan, B., & S. Lee, (2010). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models, *Environmental Earth Sciences*, 60, 1037–1054.
32. Ramakrishna, D.; Ghose, M.K.; Vinu Chandra, R.; & A. Jeyaram, 2005. Probabilistic techniques, GIS and remote sensing in landslide hazard mitigation: a case study from Sikkim Himalayas, India, *Geocarto International*, 20 (4), 53–58.
33. Regmi, A. D.; Yoshida, K.; Pradhan, B.; Pourghasemi, H. R.; Khumamoto, T.; & A. Akgun, 2014. Application of frequency ratio, statistical index and weights - of -evidence models, and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya, *Arabian Journal of Geoscience*, 7 (2), 725–742.
34. Sharma, L. P.; Nilanchal, P.; Ghose, M. K.; & P. Debnath, 2010. Influence of Shannon's entropy on landslide-causing parameters for vulnerability study and zonation-a case study in Sikkim, India, *Arabian Journal of Geoscience*, 5 (3), 421–431.
35. Uromeihy, A., & M. R. Mahdaviifar, 2000. Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area Iran, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58 (3), 1–7.
36. Van Westen, C. J.; Rengers, N.; & R. Soeters, 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment, *Natural Hazards*, 30, 399–419.
37. Xu, C.; Dai, F.; Xu, X.; & Y. H. Lee, 2012. GIS - based support vector machine modeling of earthquake - triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China, *Geomorphology*, 145–146, 70–80.

38. Yalcin, A.; Reis, S.; Aydinoglu, A.; & T. Yomralioglu, 2011. A GIS based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey, *Catena*, 85, 274–287.
39. 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.
40. Youssef, A. M., 2015. Landslide susceptibility delineation in the Ar - Rayth Area, Jizan, Kingdom of Saudi Arabia, by using analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models, *Environmental Earth Science*, doi:10.1007/s12665-014-4008-9.
41. Youssef, A. M.; Pourghasemi, H. R.; El-Haddad, B. A.; & B. K. Dhahry 2015. Landslide susceptibility mapping using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir region, Saudi Arabia, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, DOI: 10.1007/s10064-015-0734-9
42. Zhu, C., & 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.

Presentation of new ensemble method of Bayesian and logistic regression models in landslide susceptibility assessment in the Khalkhal Township

Pourghasemi, H.R.^{1*}, Mohammady, M.²

¹. *Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University*

². *Rangeland & Watershed Management Department, Faculty Natural Resources, Semnan University*

Article History:

Received:

09, October 2015

Revised:

04, August 2016

Accepted:

23, September 2016

Keywords:

Landslide

susceptibility

Bayesian theory

Logistic regression

Khalkhal Township

Abstract

Landslide is a natural disaster that causes human and economic losses such as damages affecting organizations, industries, and the natural resources. Because of these damages, there are many quantitative and qualitative methods to investigate landslide susceptibility. Khalkhal is always exposed to landslide occurrences because of climate and special physiographic conditions. The aim of current research is to assess the landslide susceptibility in the Khalkhal Township, southern Ardabil using an ensemble and new methods namely Bayesian and logistic regression (BT-LR) models. At first, landslide inventory map was prepared and then effective factors on landslide occurrence were identified. These factors are slope degree, plan curvature, slope aspect, elevation, landuse, lithology, distance from fault, distance from river, distance from road, and drainage density. In the next step, weight of factors and their class were calculated by logistic regression and Bayesian theory, respectively. Finally, landslide susceptibility map produced by hybridation of BT-LR model were divided to four susceptibility classes such as low (24.64%), moderate (25.95%), high (24.44%), and very high (24.94%). Due to evaluate the mentioned map, 30% of landslide locations those are applied in modeling by ROC curve. Results of evaluation showed that the hybrid model presents a good accuracy with 80.70% area under the curve (AUC). So, it is proposed to apply this landslide susceptibility map for landuse and regional planning in the Khalkhal Township.