

ارزیابی آسیب پذیری زمین لغزش های کم عمق با استفاده از مدل تلفیقی SIM و AHP در حوزه آبخیز خیاوچای

- ❖ سید سعید غیائی*: دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ❖ سادات فیض نیا؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ❖ علیرضا مقدم نیا؛ دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ❖ علی نجفی نژاد؛ دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گرگان.
- ❖ سمیه ناجی راد؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل.

چکیده

برای درک ویژگی های ا ساسی دامنه هایی که مستعد زمین لغزش اند، ارزیابی آسیب پذیری زمین لغزش ابزار اصلی می باشد. در این مطالعه، ارزیابی آسیب پذیری زمین لغزش با انطباق روش های شاخص آماری و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی انجام شد. ۱۰ عامل ایجاد زمین لغزش در نظر گرفته شد که عبارتند از: ارتفاع، شیب، جهت، سنگ شناسی، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، انحنای سطح، بارندگی، رخساره های ژئومورفولوژی و حساسیت واحدهای سنگی به فرسایش. روش شاخص آماری برای تعیین ارزش وزنی (S_i) برای کلاس های هر فاکتور ایجاد لغزش استفاده شد، روش تحلیل سلسله مراتبی به منظور تعیین ارزش وزنی (W_i) برای هر فاکتور استفاده شد. مجموع حاصل W_i و S_i ارزش شاخص آسیب پذیری لغزش (LSI) را برای هر پیکسل ارائه نمود. بر مبنای LSI به دست آمده نقشه آسیب پذیری زمین لغزش تهیه شد، سپس منطقه مطالعاتی در ۵ کلاس آسیب پذیری گروه بندی شد. تراکم زمین لغزش برای ۵ کلاس آسیب پذیری حاکی از وجود تطابق کافی بین نقشه آسیب پذیری و داده های واقعی لغزش می باشد. در ادامه، نتایج نقشه آسیب پذیری زمین لغزش با استفاده از داده های مشاهداتی زمین لغزش و روش ROC به صورت کمی صحت سنجی شد. نتایج صحت سنجی نشان داد که AUC برای پیش بینی مدل ۹۵/۲٪ می باشد. نقشه آسیب پذیری نشان داد مناطق با سنگ شناسی تراس های آبرفتی قدیمی و جوان، لاهار و تراکی آندزیت-تراکیت پورفیری با درجه متفاوتی از حساسیت به فرسایش که در شیب های ۱۰ تا ۴۰ و بیش از ۶۰ درصد پراکنش دارند بسیار مستعد شکست شیب می باشند. نهایتاً مشخص شد مدل های AHP و SIM برای بازنمایی آسیب پذیری زمین لغزش مؤثر می باشد.

کلید واژگان: ارزش وزنی (S_i)، ارزش وزنی (W_i)، شاخص آسیب پذیری زمین لغزش، شکست شیب، روش ROC .

۱. مقدمه

آسیب‌پذیری زمین‌لغزش به عنوان آمادگی دامنه برای ایجاد شکست شیب تعریف شده و نقشه‌آسیب‌پذیری زمین‌لغزش رابطه بین فاکتورهای کنترل‌کننده واقعه را با لغزش‌های رخ داده درگذشته در اثر شکست شیب بیان می‌کند [۲]. درک مکانیسم زمین‌لغزش و تهیه نقشه مناطق آسیب‌پذیر به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت کاربری اراضی ضروری بوده و به عنوان یک ابزار استاندارد در فعالیت‌های تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های احتمالی در آینده به‌ویژه در مناطق کوهستانی مطرح می‌باشد [۳۴]. با این وجود، به دلیل ماهیت پیچیده زمین‌لغزش از جمله شرایط خاک، استحکام ریشه، سنگ‌بستر، وضعیت توپوگرافی، هیدرولوژی و فعالیت‌های انسانی [۳۳] پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش به‌صورت قابل اطمینان، هنوز یک چالش مهم محسوب می‌شود.

برای پرداختن به موضوع آسیب‌پذیری زمین‌لغزش طیف گسترده‌ای از روش‌ها و تکنیک‌ها ارائه شده که از دانش تخصصی ساده تا روش‌های پیشرفته ریاضی را شامل می‌شود [۶، ۱۸]. روش‌های کمی و کیفی ارزیابی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش نیازمند پیاده‌سازی مراحل زیر می‌باشند [۲۸، ۱]. تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های گذشته (۲) تهیه نقشه مجموعه‌ای از فاکتورهای زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی که به صورت مستقیم و غیرمستقیم با شکست شیب ارتباط دارند. (۳) پیش‌بینی ارتباط فاکتورهای فوق‌الذکر با ناپایداری شیب و (۴) تفکیک منطقه مطالعاتی به بخش‌های با آسیب‌پذیری متفاوت نسبت به زمین‌لغزش. در مدل‌های کیفی که بر مبنای نظرات انفرادی و یا گروهی از متخصصان شکل می‌گیرد [۱۶] بر اساس اطلاعات گذشته و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها عوامل وقوع تعیین و با استفاده از مکان‌هایی که دارای خصوصیات زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی مشابهی بوده و مستعد شکست شیب می‌باشند به ارزیابی زمین‌لغزش اقدام می‌شود. برخی از روش‌های کیفی شامل تکنیک تحلیل سلسله مراتبی [۱۰، ۳۵] و ترکیب خطی

وزن‌دار [۱] با اعمال رتبه‌بندی و وزن‌دهی قابلیت تبدیل به روش‌های نیمه کمی را دارند [۱]. از معایب اصلی این دسته از روش‌های کیفی و نیمه کمی دخالت قضاوت‌های ذهنی و ناتوانی در امر وزن‌دهی هر کدام از فاکتورها می‌باشد که عموماً بر مبنای تجزیه و تحلیل‌های ذهنی بوده و نتایج حاصله عموماً در مباحث تفسیری خطر زمین‌لغزش به کار می‌رود و اغلب برای مطالعات منطقه‌ای در مقیاس کوچک (> ۱:۲۵۰۰۰۰) سودمند می‌باشد. مدل‌های کمی در نتیجه تعریف مناطق خطر در مقیاس پیوسته و بر اساس روش‌های ریاضی عمل می‌کند [۹]. روش‌های کمی شامل مدل‌های آماری دو متغیره [۲۸، ۲۹]، تکنیک‌های آماری چند متغیره از قبیل آنالیز تشخیص [۴] رگرسیون خطی و لجستیک [۱] و روش‌های غیرخطی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۱] می‌باشند که نسبت به رویکردهای کیفی جذبه تئوری کمتری داشته [۲۹] اما نیازمند داده‌های با کمیت و کیفیت بالا می‌باشند و به منظور تهیه نقشه آسیب‌پذیری زمین‌لغزش در مناطق کوچک با مقیاس‌های متوسط (۱:۵۰۰۰۰ - ۱:۲۵۰۰۰) مناسب می‌باشد [۳۵]. بدیهی است که پیش‌بینی صحت و اطمینان وقوع لغزش‌های آتی مهم‌ترین ویژگی عملکرد هر مدل می‌باشد [۲۶]. صحت نقشه آسیب‌پذیری زمین‌لغزش عمدتاً به مقدار و کیفیت داده‌های در دسترس، مقیاس نقشه کاری، روش‌های مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آن‌ها متکی می‌باشد [۳۵]. بنابراین به دلیل محدودیت‌های حاکم بر روش‌های کیفی که متأثر از دانش ناقص و نادیده‌گیری پدیده‌ها بوده و روش‌های کمی نیز با محدودیت‌هایی از قبیل اطلاعات نادرست و کم‌دقت مواجه‌اند، هیچ اتفاق نظری مبنی بر وجود مناسب‌ترین روش وجود ندارد [۳۲].

هدف از پژوهش حاضر ارزیابی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش با ادغام دانش تخصصی و اطلاعات زمین‌لغزش‌های موجود می‌باشد که از محدودیت‌های حاکم بر روش‌های کیفی و کمی کاسته و با محاسبه شاخص آسیب‌پذیری زمین‌لغزش یک نقشه آسیب‌پذیری قابل اطمینان از منطقه ارائه شود.

درصد مساحت هر کلاس از هر عامل محاسبه و تعداد زمین‌لغزش‌های موجود در آن‌ها مورد شمارش قرار گرفت. سپس تراکم زمین‌لغزش‌ها (۱۰۰ کیلومتر مربع / تعداد زمین‌لغزش) محاسبه شد (جدول ۱).

۳.۲. نقشه پراکنش زمین‌لغزش

تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش برای حوزه آبخیز خیاوچای از طریق بررسی‌های میدانی و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای انجام شد (شکل ۱. ب). در نیمه اول سال ۱۳۹۲ بررسی‌های میدانی تکمیل شد و ۵۵ مورد زمین‌لغزش (اغلب از نوع کم‌عمق کنار آبراهه‌ای) شناسایی شد. با توجه به اینکه شناسایی تمامی لغزش‌ها در بررسی‌های میدانی دشوار بوده و همواره تعدادی از زمین‌لغزش‌ها در نقاط دورافتاده و صعب‌العبور رخ می‌دهند که از نظر دور مانده و امکان ثبت آن‌ها وجود ندارد به همین دلیل با مراجعه به نرم‌افزار *Google Earth* و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای مربوط به ماه سپتامبر سال ۲۰۱۳ تعداد ۱۹ زمین‌لغزش دیگر به مجموع زمین‌لغزش‌های تحت مطالعه افزوده شد.

۴.۲. فاکتور جهت

فاکتور جهت بر عواملی مانند هوازدگی، شرایط آب‌وهوا، پوشش اراضی و خاک تأثیر می‌گذارد. از این‌رو جهت جزء فاکتورهای مهم در آماده‌سازی نقشه آسیب‌پذیری می‌باشد [۱۴، ۳۶]. عامل جهت از مدل رقومی ارتفاع در محیط *Arc GIS 10.2* و با استفاده از الحاقی *Spatial Analyst Tools* تهیه و سپس در ۴ کلاس گروه‌بندی بندی شد (شکل ۲. الف).

۵.۲. فاکتور حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش

تهیه این فاکتور نسبت به دیگر فاکتورها زمان‌بر و نیازمند عملیات طاقت‌فرسای آزمایشگاهی می‌باشد و برای اولین بار در ارزیابی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش به‌عنوان یک عامل مؤثر دخالت داده می‌شود.

ادغام دانش تخصصی که از طریق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) صورت می‌پذیرد رویکردی کیفی بوده درحالی‌که استفاده از اطلاعات زمین‌لغزش‌های موجود روشی کمی می‌طلبد و از طریق کاربرد روش شاخص آماری (Statistical Index Method) انجام می‌پذیرد.

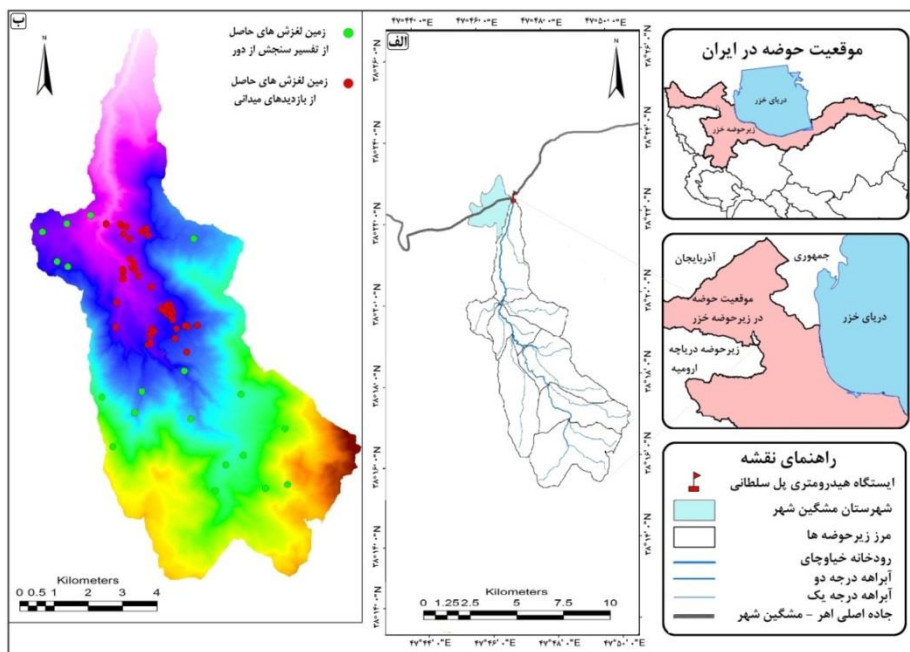
۲. روش‌شناسی

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

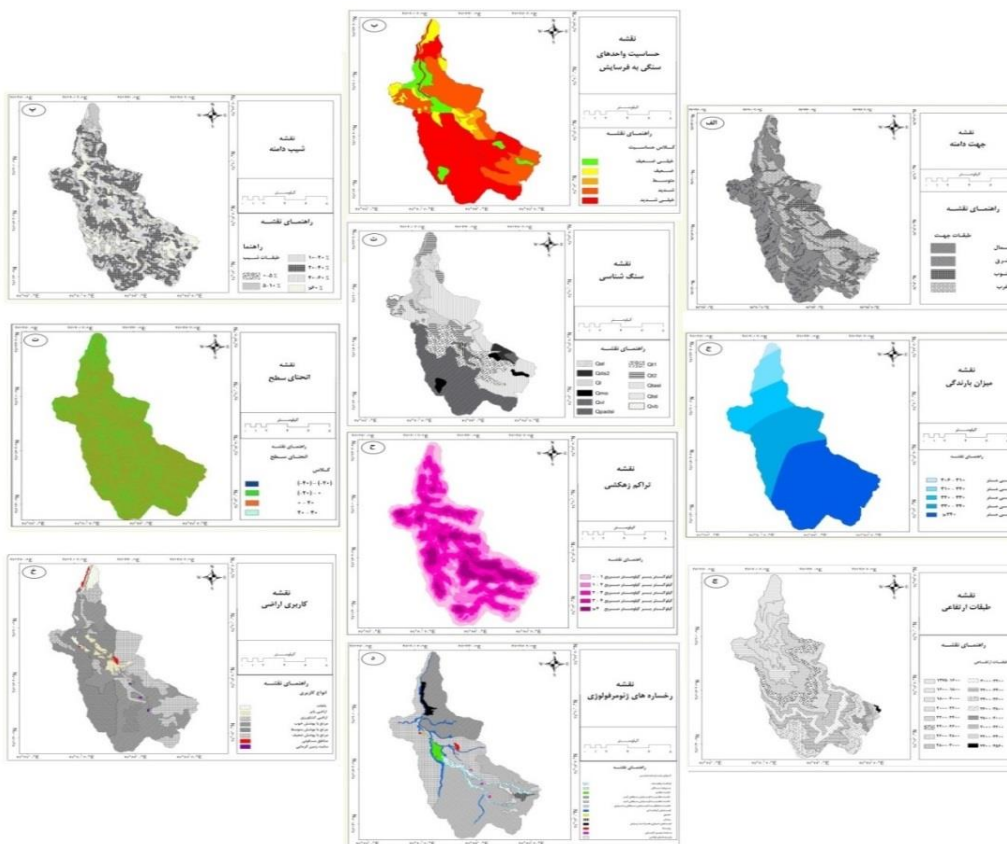
حوزه آبخیز خیاوچای به وسعت تقریبی ۱۳۰۰۰ هکتار، در حاشیه غربی کوه سبلان، در جنوب شهرستان مشکین‌شهر قرار دارد و از نظر تقسیمات سیاسی بخشی از استان اردبیل و از لحاظ تقسیمات جاماب از زیرحوزه‌های آبخیز بزرگ خزر محسوب می‌شود که با ۸ زیرحوزه در محدوده جغرافیایی ۳۷' ۴۷° تا ۴۸' ۴۷° طول شرقی و ۱۱' ۳۸° تا ۲۳' ۳۸° عرض شمالی، با حداکثر ارتفاع ۴۵۶۰ متر از سطح دریا در محل قله کسری در ارتفاعات جنوبی حوضه و حداقل ارتفاع ۱۳۷۵ متر در محل خروجی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی واقع شده است (شکل ۱. الف). به دلیل وقوع لغزش‌های متعدد کنار آبراهه‌ای در امتداد آبراهه‌ها خطر وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای تهدیدی بالفعل برای منابع طبیعی و ساکنین منطقه محسوب می‌شود.

۲.۲. گردآوری و پردازش اطلاعات

در این مطالعه مجموعه‌ای از فاکتورهای محیطی (عوامل شیب، جهت، ارتفاع، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، انحنای سطح، رخساره‌های ژئومورفولوژی و حساسیت واحدهای سنگی به فرسایش) و محرک (عامل بارندگی) به‌عنوان عوامل ایجاد زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور تولید نقشه‌های اطلاعاتی مذکور از نرم‌افزار *ESRI ArcGIS 9.3* استفاده شد (شکل ۲). به‌منظور وزن‌دهی، تمام لایه‌های برداری (.shp) به لایه‌های رستری (*GeoTIFF*) تبدیل شد. با کمک نرم‌افزار *Arc GIS 9.3*



شکل ۱. الف) نمایی از منطقه تحت مطالعه و ب) پراکنش زمین لغزش در حوزه آبخیز خیاوجای



شکل ۲. خروجی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش

جدول ۱. روابط مکانی بین زمین‌لغزش و فاکتورهای مؤثر در وقوع آن

فاکتور	طبقه‌های عوامل	سطح (کیلومتر مربع)	کل زمین‌لغزش‌ها		زمین‌لغزش‌های مدل‌سازی		Si
			تراکم زمین‌لغزش (تعداد)	تراکم زمین‌لغزش (۱۰۰ کیلومتر مربع تعداد)	زمین‌لغزش (تعداد)	تراکم زمین‌لغزش (۱۰۰ کیلومتر مربع تعداد)	
سنگ‌شناسی	تراکی آندزیت- تراکیت پورفیری	۳۸/۸۹	۱۸	۴۶/۲۸	۱۴	۳۶/۰۰	-۰/۰۳۹
	پادگانه آبرفتی قدیمی	۱۸/۷۵	۱۰	۵۳/۳۳	۹	۴۸/۰۰	۱/۱۴۶
	پادگانه آبرفتی جوان	۱۰/۱۷	۲۸	۲۷۵/۳۳	۲۰	۱۹۶/۶۶	۰/۸۵۶
	آندزیت- داسیت پورفیری	۳۷/۶۷	۵	۱۳/۲۷	۱	۲/۶۵	-۲/۵۰۳
رخسارهای آب و فولادی	نهشته لاهار	۸/۰۶۹	۱۲	۱۴۸/۷۲	۱۰	۱۲۳/۹۳	۱/۱۱۸
	فرسایش آبراه‌های	۴/۱۵	۳۵	۸۴۳/۳۷	۳۲	۷۷۱/۰۸	۲/۶۰۷
	دامنه نامنظم با فرسایش سطحی و شیاری	۳۸/۰۱	۲۱	۵۵/۲۵	۱۳	۳۴/۲۰	۰/۵۹۰
	دامنه منظم با فرسایش سطحی کم	۲۳/۵۴	۸	۳۳/۹۸	۷	۲۹/۷۴	-۰/۴۸۷
	آبراهه برف‌سب	۴/۲۳	۵	۱۱۸/۲۰	۲	۴۷/۲۸	۰/۴۵۳
	دامنه منظم با فرسایش سطحی متوسط	۵۳/۲۶	۴	۷/۵۱	۰	۰/۰۰	-۱
	مرتع ضعیف	۲۹/۱۴	۵	۱۷/۱۶	۰	۰/۰۰	-۱
	مرتع متوسط	۳۹/۶۶	۱۳	۳۲/۷۸	۲۴	۶۰/۵۱	۰/۳۶۷
	مرتع خوب	۴۴/۴۳	۳۰	۶۷/۵۲	۷	۱۵/۷۶	-۰/۷۵۴
	کشاورزی	۸/۷۲	۵	۵۷/۳۴	۳۰	۳۴۴/۰۴	۰/۲۹۶
باردگی	بایر	۳/۳۷	۲۰	۵۹۳/۴۷	۲۰	۵۹۳/۴۷	۲/۸۷۴
	۳۲۰ - ۳۳۰	۱۶/۸۴	۱۱	۶۵/۳۲	۶	۳۵/۶۳	-۰/۳۲۶
	۳۳۰ - ۳۴۰	۳۵/۲۷	۴۹	۱۳۸/۹۳	۴۵	۱۲۷/۵۹	۱/۲۵۷
	۳۴۰ <	۶۸/۹۶	۱۳	۱۸/۸۵	۲	۲/۹۰	-۱/۹۶۶
	۵ - ۱۰	۵/۹۲	۵	۸۴/۴۶	۲	۳۳/۷۸	۰/۳۰۶
	۱۰ - ۲۰	۱۹/۱۰	۶	۳۱/۴۱	۶	۳۱/۴۱	۰/۰۸۰
	۲۰ - ۴۰	۴۵/۵۴	۱۶	۳۵/۱۳	۸	۱۷/۵۷	-۰/۷۷۰
	۴۰ - ۶۰	۳۲/۵۲	۷	۲۱/۵۳	۵	۱۵/۳۸	-۰/۹۶۹
	۶۰ <	۲۶/۳۹	۳۹	۱۴۷/۷۸	۳۳	۱۲۵/۰۵	۱/۱۴۱
	۱ - ۲	۳۵/۴۱	۲	۵/۶۵	۱	۲/۸۲	-۲/۳۰۶
تراکم رهگشی	۲ - ۳	۳۴/۱۸	۲۹	۸۴/۸۴	۲۲	۶۴/۳۷	۰/۵۲۶
	۳ - ۴	۲۵/۹۶	۲۱	۸۰/۸۹	۱۵	۵۷/۷۸	۰/۴۲۶
	۴ <	۱۵/۵۴	۲۰	۱۲۸/۷۰	۱۶	۱۰۲/۹۶	۱/۲۵
	۰ - ۲۰	۷۸/۵۳	۴۵	۵۷/۳۰	۲۸	۳۵/۶۶	۰/۰۵۴
	۵۰ >	۲۸/۹۲	۲۲	۷۶/۰۷	۱۹	۶۵/۷۰	۰/۸۵۶
	۲۰۰ - ۳۰۰	۳۸/۸۹	۱۸	۴۶/۲۸	۱۴	۳۶/۰۰	-۰/۰۳۹
	۳۰۰ <	۴۱/۳۳	۳۳	۷۹/۸۵	۲۱	۵۰/۸۱	۱/۱۴۶
	غرب	۴۹/۸۶	۲۱	۴۲/۱۲	۱۷	۳۴/۱۰	-۰/۳۲۵
	جنوب	۱۲/۷۷	۸	۶۲/۶۵	۶	۴۶/۹۹	-۵/۷۰۵
	شمال	۴۳/۶۴	۳۲	۷۳/۳۳	۲۳	۵۲/۷۰	۰/۵۲۶
جهت	شرق	۲۳/۷۱	۱۲	۵۰/۶۱	۸	۳۳/۷۴	-۰/۵۲۱
	۱۶۰۰ - ۱۸۰۰	۶/۰۴۹	۳	۴۹/۵۹	۲	۳۳/۰۶	-۵/۷۰۵
	۱۸۰۰ - ۲۰۰۰	۹/۰۴	۱۷	۱۸۸/۰۵	۱۶	۱۷۶/۸۶	۱/۵۵۴
	۲۰۰۰ - ۲۲۰۰	۱۴/۰۷	۳۱	۲۲۰/۳۳	۲۸	۱۹۸/۹۸	۱/۷۳۳
	۲۲۰۰ - ۲۴۰۰	۱۴/۸۷	۱۱	۷۳/۹۷	۰	۰/۰۰	-۱
	۲۴۰۰ - ۲۶۰۰	۱۳/۰۴	۲	۱۵/۳۴	۰	۰/۰۰	-۱
	۲۶۰۰ - ۲۸۰۰	۱۱/۸۳	۲	۱۶/۹۱	۰	۰/۰۰	-۱
	۲۸۰۰ - ۳۰۰۰	۱۰/۲۲	۳	۲۹/۳۵	۰	۰/۰۰	-۱
	۳۰۰۰ - ۳۲۰۰	۹/۱۶	۲	۲۱/۸۳	۰	۰/۰۰	-۱
	۳۲۰۰ - ۳۴۰۰	۱۱/۸۸	۱	۸/۴۲	۰	۰/۰۰	-۱
طبقات ارتفاعی	۳۴۰۰ - ۳۶۰۰	۱۳/۲۶	۱	۷/۵۴	۰	۰/۰۰	-۱

انحنای سطح دارای دامنه‌ای از اعداد منفی، صفر و مثبت می‌باشد که منفی حاکی از حالت تقعر دامنه، مثبت نشانگر تحدب دامنه و صفر نشانه مسطح بودن دامنه می‌باشد. عامل انحنای دامنه با استفاده از روش زونبرگر-تورن از مدل رقومی ارتفاع و در محیط ArcGIS 10.2 در قالب ۴ کلاس تهیه شد (شکل ۲. ت).

۸.۲. فاکتور سنگ‌شناسی

سنگ‌شناسی منطقه نقش بسیار مهمی را در ارزیابی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش ایفا می‌کند [۳۶] زیرا واحدهای سنگ‌شناسی مختلف تفاوت‌های قابل توجهی را در ناپایداری زمین‌لغزش از خود نشان می‌دهند. نقشه سنگ‌شناسی مورد استفاده در این مطالعه بر اساس پارامترهای مهندسی شامل نوع سنگ و سن زمین‌شناسی در قالب ۱۱ نوع واحد سنگی طبقه‌بندی شد (شکل ۲. ت):

- ۱) واحد Q^{al} ، آبرفت‌های جوان با استحکام کم که ثبات نداشته و همواره دستخوش فرسایش می‌باشند. (۲) واحد Q_2^f ، پادگانه‌های آبرفتی جوان (۳) واحد Q^{mo} ، رسوبات یخچالی (۴) واحد Q_1^f ، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی (۵) واحد Q^l ، نهشته‌های لاهار (۶) واحد Q_{s2}^d ، گدازه و گنبد‌های داسیتی-ریوداسیتی (۷) واحد Q_{sl}^{pad} ، آندزیت-داسیت پورفیری (۸) واحد Q_{sl}^{td} ، تراکی آندزیت-تراکیت پورفیری (۹) واحد Q_{sl}^f ، گدازه‌های آندزیتی (۱۰) واحد Q^{vb} ، جریان‌های گدازه و گدازه‌های برشی تراکی آندزیتی-تراکی بازالتی و فونولیتیکی (۱۱) واحد Q_{vL} ، لاتیت. بالاترین تراکم زمین‌لغزش به ترتیب با ۲۵۷/۳۳ و ۱۴۸/۷۲ زمین‌لغزش در هر ۱۰۰ کیلومترمربع در واحدهای پادگانه آبرفتی جوان و نهشته لاهار و کمترین تراکم در واحد آندزیت-داسیت پورفیری با ۱۳/۲۷ لغزش می‌باشد.

۹.۲. فاکتور بارندگی

بارندگی یکی از عوامل بسیار مهم در راه‌اندازی و تسریع زمین‌لغزش محسوب می‌شود و توزیع زمانی و مکانی آن اغلب به‌عنوان موضوع اصلی در شروع

به‌منظور تعیین حساسیت واحدهای سنگی با تقسیم‌بندی حوضه به زیرحوضه‌های کوچک‌تر و نمونه‌برداری از نقطه خروجی هر زیرحوضه و الک‌بندی نمونه‌های برداشتی با سری الک‌های استاندارد، الک‌های با قطر ۶۰۰ میکرون و ۴ میلی‌متر به دلیل دارا بودن بیشترین فراوانی رسوب به‌عنوان الک شاخص انتخاب شد. سپس با انتخاب ۱۰۰ دانه رسوبی از هر نمونه، بررسی‌های کانی‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ بینوکلر صورت پذیرفت که در نهایت با توجه به واحدهای سنگی مؤثر سنگ‌شناسی آن‌ها، این ذرات به واحدهای سنگی مؤثر نسبت داده شد. در نهایت با تلفیق نتایج مربوط به دو غربال با استفاده از رابطه تجربی فیض‌نیا، [۷] اقدام به تعیین پتانسیل رسوبزایی برای واحدهای سنگی هر زیرحوضه شد. پتانسیل رسوبزایی یک عدد بدون بعد و بیانگر حساسیت نسبی واحدها در برابر فرسایش می‌باشد که هر چه این نسبت برای هر یک از واحدهای همگن بالاتر باشد رسوب‌زایی نیز بالاتر است. واحدهای سنگی بر اساس حساسیت به فرسایش در قالب ۵ گروه کلاس‌بندی شد (شکل ۲. ب).

۶.۲. فاکتور شیب

بالا رفتن شیب دامنه باعث افزایش حجم و وزن نسبی توده لغزشی بر واحد سطح صفحه لغزش می‌شود و نیروی محرک زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد. عامل شیب یکی از مهم‌ترین فاکتورها در توده مخرب می‌باشد که مکرراً در تهیه نقشه آسیب‌پذیری زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸، ۳۲، ۳۶]. تهیه این فاکتور مطابق با فاکتور جهت انجام شد و در قالب ۶ کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۲. پ).

۷.۲. فاکتور انحنای سطح

به‌طور خاص انحنای دامنه اشتقاق خط عمود از حداکثر شیب در راستای جهت دامنه می‌باشد که امکان برجسته نمودن همگرایی (انحنای مقعر) و واگرایی (انحنای محدب) جریان آب را فراهم می‌آورد [۳۰].

۱۲،۲. فاکتور کاربری اراضی

کاربری اراضی به‌عنوان یک فاکتور مهم در آسیب‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷، ۳۰، ۳۶]. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصویر ماهواره لندست ۸، اخذ شده از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا و در محیط نرم‌افزار ENVI تهیه شد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از روش حداکثر احتمال در سیستم طبقه‌بندی نظارت شده به دلیل دارا بودن بالاترین ضریب کاپا و صحت کلی (به ترتیب ۰/۸۳ و ۹۱/۲ درصد) استفاده شد. پس از تهیه نقشه کاربری با بازدیدهای میدانی تصحیحات لازم صورت پذیرفت و نقشه مورد نظر تدقیق گشت (شکل ۲.خ).

۱۳،۲. فاکتور رخساره‌های ژئومورفولوژی

در این مطالعه از این فاکتور به‌عنوان یکی از فاکتورهای اصلی در ارزیابی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش استفاده شد. برای تهیه این لایه اطلاعاتی با تلفیق نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع در محیط ArcGIS 9.3 نقشه مرفولوژی منطقه تهیه شد و با کمک نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی ۱:۵۰۰۰۰ تصحیحات لازم صورت پذیرفت و در نهایت با تلفیق نقشه سنگ‌شناسی با نقشه مرفولوژی، نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی تهیه و با بازدیدهای مکرر میدانی اقدام به تدقیق نقشه مذکور گردید (شکل ۲.د). به دلیل تنوع و پراکنش انواع فرسایش در منطقه مطالعاتی، پراکنش پوشش سنگی در ارتفاعات بالا و خاک‌زایی مناسب در ارتفاعات پایین منطقه شناسایی و تفکیک رخساره‌ها بسیار مشکل می‌باشد. با این حال با توجه به صلاح دید کار شناسان و متخصصان صاحب‌نظر و با استناد به شناخت قبلی نگارندگان از منطقه مطالعاتی و نیز بازدیدهای مکرر میدانی با استفاده از نقشه‌های فوق‌الذکر، ۱۱ نوع رخساره در منطقه شناسایی شد که عبارت‌اند از: آبراهه برف‌ساب، برون‌زد سنگی، دامنه منظم، دامنه منظم با فرسایش سطحی کم، دامنه منظم با فرسایش سطحی متوسط،

زمین‌لغزش می‌باشد، زیرا مقدار آب خاک را بارندگی کنترل می‌کند [۶]. منحنی‌های هم‌باران سالانه بر اساس آمار ۲۰ ساله ۹ ایستگاه باران‌سنجی، با استفاده از مدل دایره‌ای روش کریجینگ به دلیل داشتن حداقل ریشه دوم میانگین مربعات خطا ($RMSE = 61/24$) و با استفاده از الحاقی Geo statistical Analyst در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.2 تهیه و سپس در قالب ۵ کلاس تهیه شد (شکل ۲.ج).

۱۰،۲. فاکتور ارتفاع

در گزارش‌های انتشار یافته مکرراً به ارتباط نزدیک زمین‌لغزش با ارتفاع اشاره شده است [۲۸، ۳۶]. مدل رقومی ارتفاعی (DEM) که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد که با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر قابلیت تشخیص و تفکیک بالایی در عوارض دارد. فاکتور ارتفاع پس از تولید از مدل رقومی ارتفاع و با توجه به اختلاف ارتفاع زیاد منطقه مطالعاتی (۴۵۶۰-۱۳۷۵) به ۱۶ کلاس با اختلاف ۲۰۰ متر طبقه‌بندی شد (شکل ۲.چ).

۱۱،۲. فاکتور تراکم زهکشی

پارامتر مهمی که پایداری دامنه را تحت کنترل دارد درجه اشباع مواد روی دامنه می‌باشد. تراکم زهکشی، نسبت طول کل آبراهه‌ها به مساحت حوضه آبریز است. هر چه تراکم زهکش‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد [۳۵]. شبکه آبراهه با فرسایش دامنه یا با اشباع بخش پایین‌تر مواد دامنه که در نتیجه افزایش سطح آب رخ می‌دهد اثر معکوسی بر پایداری دامنه دارند [۳۵]. از طریق بازدیدهای میدانی تعیین اثر آبراهه‌ها بر دامنه انجام شد، سپس اقدام به تهیه شبکه آبراهه‌ها در محیط ArcGIS 9.3 شد و با استفاده از الحاقی Spatial Analyst Tools عامل تراکم زهکشی تهیه شد سپس در قالب ۵ کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۲.ح).

زمین لغزش) به منظور آزمون نقشه آسیب پذیری زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفت.

۱۵،۲. روش شاخص آماری

روش شاخص آماری یکی از روش های آماری دومتغیره می باشد که عموماً به منظور توسعه ارتباط بین توزیع زمین لغزش ها و فاکتورهای کنترلی استفاده می شود [۸] و به دلیل ساده سازی، توانمندی و عدم حساسیت به متغیرهای وابسته [۱۷]، برای مطالعه مناطق پهناور که از داده های محدودی برخوردارند بسیار مناسب می باشد [۱۴]. روش شاخص آماری اولین بار با عنوان ارزش اطلاعاتی معرفی شد، سپس توسط VanWesten [۳۱] شاخص آماری نام گذاری شد و بعدها در تعدادی از مطالعات با همین عنوان مورد استفاده قرار گرفت [۷، ۳۵، ۳۶] این روش بر مبنای توزیع لغزش در طبقات هر متغیر عمل می کند. نرخ طبقات مربوط به هر متغیر به صورت لگاریتم طبیعی تراکم زمین لغزش در هر طبقه تقسیم بر تراکم کل زمین لغزش تعریف می شود. رابطه ۱، اساس این روش را نشان می دهد:

$$Si = \ln \left(\frac{Densclass}{Densmap} \right) = \ln \left(\frac{Npix(Si)}{SNpix(Si)} \right) \quad (1)$$

Si : نرخ مربوط به طبقات هر معیار،
 $Densclass$: تراکم زمین لغزش مربوط در هر طبقه،
 $Densmap$: تراکم زمین لغزش در تمام نقشه،
 $Npix(Si)$: تعداد پیکسل های زمین لغزش در هر طبقه،
 $Npix(Ni)$: تعداد کل پیکسل های طبقات،
 $SNpix(Si)$: تعداد کل پیکسل های زمین لغزش و $SNpix(Ni)$: تعداد کل پیکسل های نقشه است.

روش شاخص آماری به منظور ترکیب هر فاکتور با نقشه توزیع زمین لغزش استفاده شد، سپس ارزش وزنی (Si) برای هر کلاس از پارامترها محاسبه شد. همان طوری که در جدول ۱ مشاهده می شود Si ها تنوع مشابهی را در

دامنه نامنظم با فرسایش سطحی و شیاری، فرسایش آبراهه ای، فرسایش خندقی، ریزش سنگی، ریزش همراه با فرسایش سطحی و واریزه بلوکی. آبراهه برف ساب به صورت رخساره واضحی در محدوده ارتفاعی ۳۰۰۰ تا ۲۲۰۰ متری گسترش داشت که با توجه به حضور یخچال های طبیعی در کوه های سبلان، بستر U شکل آبراهه و نیز محدوده پیشروی یخچال در گذشته (تا ارتفاع ۲۲۰۰ متری) در شناسایی محدوده این رخساره بسیار مؤثر بود. مابقی رخساره ها به غیر از رخساره های ترکیبی به سهولت شناسایی شد. به عنوان مثال تفکیک رخساره دامنه منظم به دلیل پوشش گیاهی یکنواخت و عدم وجود خاک لخت از رخساره دامنه نامنظم تفکیک شد. همین روند در مورد بقیه رخساره های ترکیبی صورت پذیرفت. بالاترین تراکم زمین لغزش در رخساره فرسایش آبراهه ای پراکنش دارد (۸۴۳/۳۷).

۱۴،۲. ارزیابی آسیب پذیری زمین لغزش

به منظور محاسبه شاخص آسیب پذیری زمین لغزش (LSI) از دو روش شاخص آماری و تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. روش شاخص آماری بر اساس قوانین تصمیم گیری به تنهایی قادر به ارزیابی واقعی می باشد. با این وجود از روش شاخص آماری به منظور تعریف نرخ مربوط به طبقه های هر کدام از متغیرها استفاده شد. روش AHP نیز به منظور تعیین وزن هر کدام از متغیرهای مؤثر در وقوع زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفت. نهایتاً LSI بر اساس دو روش محاسبه شد. به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از ارزیابی آسیب پذیری زمین لغزش، لغزش های موجود به صورت تصادفی به دو مجموعه تقسیم بندی شد: دسته اول به منظور مدل سازی آسیب پذیری و دسته دیگر برای آزمون داده ها استفاده شد. بیش از ۷۰ درصد از کل داده ها (۵۵ مورد زمین لغزش) به عنوان داده های ورودی برای تجزیه و تحلیل فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش در مدل سازی نقشه آسیب پذیری استفاده شد. و کمتر از ۳۰ درصد داده ها (۱۹ مورد

به‌منظور تعیین وزن معیارها (W_i) در روش *AHP*، در محیط نرم‌افزار *Expert Choice* یک ماتریس مقایسه‌ی زوجی تشکیل می‌شود که با استفاده از مقادیر نسبی بین ۱ تا ۹ برای عناصر تشکیل‌دهنده‌ی ماتریس و به‌وسیله‌ی ارزیابی زوجی، تأثیر هر معیار در رخداد زمین‌لغزش نسبت به دیگر معیارها مشخص می‌شود. بنابراین، در ابتدا یک ماتریس 10×10 تهیه و سپس عناصر آن با استفاده از اطلاعات مربوط به زمین‌لغزش‌ها و نظر کارشناسی به‌صورت زوجی مقایسه و تکمیل می‌شود. براساس ارزیابی صورت‌پذیرفته در نرم‌افزار *Expert Choice* وزن هر کدام از عوامل (W_i) محاسبه می‌شود.

نیمه‌ی راست ماتریس، وارون بخش چپ آن است. برای مثال اگر اهمیت سنگ شناسی به شیب برابر دو باشد، اهمیت شیب نسبت به سنگ شناسی برابر با $1/2$ خواهد بود (جدول ۲).

قالب تراکم زمین‌لغزش از طبقات هر عامل نشان می‌دهد. از آنجایی که در بعضی طبقات زمین‌لغزشی رخ نداده از این رو S_i برای طبقات مشابه (۱-) در نظر گرفته شد که حاکی از احتمال بسیار کم برای وقوع زمین‌لغزش در این مناطق می‌باشد.

۱۶.۲. روش تحلیل سلسله مراتبی

این روش، همانند تئوری تصمیم‌گیری و تحلیل ناسازگاری (*Conflict Resolution*) اندازه‌گیری را بر روی معیارهای با قابلیت کمی شدن و غیر عینی انجام می‌دهد [۱۹]. روش تحلیل سلسله مراتبی یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره است که کاربر را برای رسیدن به یک مقیاس ترجیحی از مجموعه‌ای از متغیرها قادر می‌سازد. این روش کاربرد زیادی در انتخاب سایت، آسان‌سازی تحلیل‌ها و تحلیل حساسیت به زمین‌لغزش دارد [۱]. روش *AHP* به‌طور گسترده‌ای در تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته است [۸، ۱۲، ۳۶].

جدول ۲. ماتریس مقایسه‌ی زوجی، وزن‌ها و نرخ سازگاری معیارها

W_i	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	معیارها
۰/۰۷۷	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	(۱) بارندگی
۰/۱۷۳	۲	۳	۲	۳	۱	۴	۳	۱	۱		(۲) سنگ‌شناسی
۰/۱۶۸	۲	۳	۲	۳	۱	۳	۳	۱			(۳) حساسیت سنگی
۰/۰۶۹	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۱				(۴) انحنای سطح
۰/۰۵۰	۲	۱	۲	۱	۳	۱					(۵) جهت شیب
۰/۱۵۴	۲	۳	۲	۳	۱						(۶) میزان شیب
۰/۰۴۶	۳	۱	۲	۱							(۷) طبقات ارتفاعی
۰/۰۹۶	۲	۲	۱								(۸) کاربری اراضی
۰/۰۵۱	۲	۱									(۹) رخساره ژئومورفولوژی
۰/۱۱۶	۱										(۱۰) تراکم زهکشی
											نرخ ناسازگاری

۰/۰۲

بازه ۰ و ۱ قرار می‌گیرد [۲۰]. هرچه قدر ضریب *CR* به صفر نزدیک باشد حاکی از دقت بالای مقایسه می‌باشد. همچنین اگر ضریب مذکور بزرگ‌تر از $0/1$ باشد به‌طور

در نهایت کیفیت مقایسه‌ی صورت‌پذیرفته به‌وسیله‌ی نرخ ناسازگاری (*CR*) صورت می‌پذیرد که این نرخ بین شاخص ناسازگاری ماتریس و شاخص تصادفی قرار داشته و در

لازم به ذکر است که LSI و نقشه آسیب پذیری زمین لغزش بر اساس ۷۰٪ داده‌های حاصل از نقشه پراکنش زمین لغزش برای مدل سازی، به دست آمد و از ۳۰٪ باقی مانده از داده‌های موجود در نقشه پراکنش زمین لغزش به منظور سنجش نقشه آسیب پذیری زمین لغزش استفاده شد.

۱۷،۲. روش منحنی ROC^۱

منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمال و پیش بینی سیستم‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند [۳۱] که به طور گسترده به منظور آزمون مدل آسیب پذیری زمین لغزش [۱۴] یا همان پیش بینی صحت مدل آسیب پذیری زمین لغزش استفاده شده است [۲۷، ۳۶]. در واقع منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از مواز نه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها است (*Trade off*). سطح زیر منحنی *ROC* (*Area Under of Curve*) بیانگر مقدار پیش بینی سیستم از طریق تو صیف توانایی آن در تخمین در ست وقایع رخ داده (وقوع زمین لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین لغزش) آن است [۳]. ایده آل ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد [۱۵] و مقادیر *AUC* از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین زند مقدار *AUC* آن ۰/۵ می‌باشد و زمانی که منحنی *ROC*، سطح زیر منحنی برابر با یک داشته باشد بیانگر بهترین دقت از نقشه آسیب پذیری تهیه شده است [۱۳]. همبستگی کیفی - کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت زیر است (۱ - ۰/۹، عالی؛ ۰/۸ - ۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۷ - ۰/۸، خوب؛ ۰/۶ - ۰/۷، متوسط؛ ۰/۵ - ۰/۶، ضعیف) [۳۷].

خودکار در نرم افزار رد شده و بایستی در قضاوت‌های کارشناسی صورت پذیرفته تجدید نظر شود و به عبارتی مقایسات زوجی دوباره انجام شود. ضریب CR در این مطالعه برابر با ۰/۰۲ به دست آمد. فاکتور سنگ شناسی به عنوان قوی ترین فاکتور وزن دار ($W_i = 0/173$) شناخته شد (جدول ۲).

شاخص آسیب پذیری زمین لغزش (LSI)، به منظور ارزیابی حساسیت دامنه نسبت به شکست شیب به صورت کمی ارائه شده است. به منظور تهیه نقشه نهایی آسیب پذیری زمین لغزش مقادیر S_i و W_i حاصل تلفیق و معادله ۲ به منظور محاسبه شاخص آسیب پذیری زمین لغزش ارائه شد:

(۲)

$$LSI = \sum_{i=1}^n S_i \times W_i$$

که n : تعداد فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش (در اینجا برابر با ۱۰)، S_i : ارزش وزنی حاصل از روش شاخص آماری و W_i : ارزش وزنی حاصل از تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. LSI در محیط *ArcGIS 9.3* و با استفاده از دستور *Raster Calculator* در الحاقی *Spatial Analyst Tools* محاسبه و نقشه آسیب پذیری زمین لغزش تولید شد. نقشه آسیب پذیری تولید شده بر اساس شکست‌های طبیعی (*Natural Breaks*) در ۵ کلاس طبقه بندی شد. بدین صورت که با تهیه درصد تجمعی پیکسل‌های موجود در نقشه آسیب پذیری و ثبت ارزش پیکسلی مربوط به محدوده کلاس‌ها، ۵ شکست طبیعی تعیین شد، به طوری که حد بالای کلاس‌های مربوطه به طور تقریبی در صد تجمعی ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ را نشان می‌دهد. برای مثال دامنه ارزش پیکسلی مربوط به محدوده ۲۰ - ۰ در صد، ۳/۲۴۷ - تا ۱/۸۴۷ می‌باشد که به صورت کیفی کلاس با آسیب پذیری خیلی کم را نشان می‌دهد. افزایش ارزش پیکسلی با افزایش درصد تجمعی پیکسل‌ها رابطه‌ای مستقیم دارد.

^۱ Receiver Operating Characteristic curve

۳. نتایج

در بردارند (تقریباً ۱۸٪). این دو کلاس کمترین سطح را نسبت به کلاس های آسیب پذیری دیگر دارد. کلاس آسیب پذیری متوسط با سطحی برابر با ۲٪ پس از کلاس آسیب پذیری خیلی زیاد در رتبه دوم قرار دارد. کلاس های آسیب پذیری زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با ۲۰/۴ و ۲۲ درصد بیش از ۴۰ درصد منطقه را در برداشته که در صد قابل توجهی می باشد. نقشه آسیب پذیری زمین لغزش بر اساس کلاس بندی فوق در شکل ۳ نشان داده شده است.

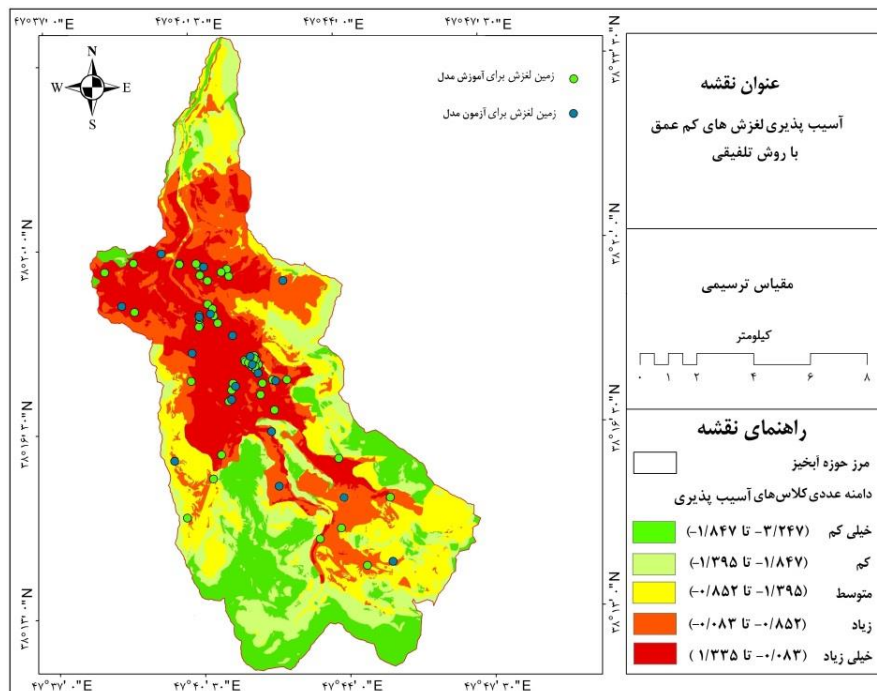
مقادیر ارزش های LSI با تلفیق Si و Wi فاکتورهای فوق الذکر در محدوده بین ۳/۲۴۷- تا ۱/۳۳۵ به دست آمد (جدول ۳). بر اساس مقادیر LSI به دست آمده سطح منطقه در قالب ۵ کلاس طبقه بندی شد: آسیب پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد. کلاس های آسیب پذیری کم و خیلی کم در صد مشابهی از منطقه را

جدول ۳. مساحت و درصد مساحت ۵ کلاس آسیب پذیری

کلاس آسیب پذیری زمین لغزش		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
LSI مقادیر		۳/۲۴۷ تا -۱/۸۴۷	-۱/۸۴۷ تا -۱/۳۹۵	-۱/۳۹۵ تا -۰/۸۵۲	-۰/۸۵۲ تا -۰/۰۸۳	-۰/۰۸۳ تا ۱/۳۳۵
سطح هر	(کیلومتر مربع)	۲۴/۰۶	۲۳/۳۶	۲۷/۵۳	۲۶/۴۹	۲۸/۵۶
کلاس	(٪)	۱۸/۵	۱۸	۲۱/۲	۲۰/۴	۲۲

است که عوامل سنگ شناسی، حساسیت واحدهای سنگی به فرسایش و میزان شیب بالاترین میزان Wi را کسب کرده اند (جدول ۴).

از آنجایی که مقادیر LSI از اوزان Si و Wi فاکتورهای مذکور به دست آمده، انتظار می رود مناطق با Si و Wi بیشتر، سطوح آسیب پذیری بالایی داشته باشند. روشن



شکل ۳. نقشه آسیب پذیری زمین لغزش

جدول ۴. پراکنش ۵ کلاس آسیب پذیری در طبقات ۳ متغیر سنگ شناسی، حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش و میزان شیب

فاکتور	کلاس	مساحت کلاس‌های آسیب‌پذیری (درصد)					سطح (کیلومتر مربع)
		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
سنگ‌شناسی	آبرفت‌های جوان	۸/۲۹	۵/۳۲	۷/۱۳	۱/۳۸	۰/۰۲۸	۱/۹۹
	پادگانه آبرفتی جوان	۴/۴۵	۰/۰۲	۵/۷۹	۷/۲۷	۱۹/۵	۱۰/۱۷
	رسوبات یخچالی	۳/۳۸	۱/۹۹	۵/۳۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰	۲/۷۵
	پادگانه آبرفتی قدیمی	۰/۵	۰/۰۱	۳/۷۳	۳۰/۳۲	۳۳/۵۳	۱۸/۷۶
	لاهار	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۶۷	۷/۵۱	۲۰/۶۲	۸/۰۷
	گدازه داسیتی-ریوداسیتی	۱	۷/۴۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۴۱
	آندزیت- داسیت پورفیری	۴۷/۲۳	۷۱/۵۶	۲۵/۶۵	۹/۵۵	۰/۰۱	۳۷/۶۷
	تراکی آندزیت- تراکیت پورفیری	۲۶/۵۲	۶/۱۷	۴۴/۷۸	۴۲/۶۳	۲۶	۳۸/۸۸
	گدازه‌های آندزیتی	۳/۲۱	۳/۴۹	۶/۰۳	۱/۲۷	۰/۲۷	۳/۶۶
	گدازه‌های برشی تراکی آندزیتی- تراکی بازالتی	۰/۱۶۴	۲/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۵۸
لاتیت	۵/۲۱	۱/۶۲	۰/۸۲	۰/۰۳	۰/۰۰۷	۱/۸۶	
درصد کل							
حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش (بدون واحد)	> ۵۰	۷	۲/۰۳	۱۱/۸۱	۱۴/۷۹	۴۰/۱۴	۲۱
	۵۰ - ۱۰۰	۱	۲/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۵۸۹
	۱۰۰ - ۲۰۰	۳	۳/۴۹	۶/۰۳	۱/۲۷	۰/۲۷۴	۳/۶۶
	۲۰۰ - ۳۰۰	۲۷	۶/۱۷	۴۴/۷۸	۴۲/۶۳	۲۶	۳۸/۸۸
	۳۰۰ <	۶۲	۸۵/۹۶	۳۷/۳۵	۴۱/۲۹	۳۳/۵۷	۶۵/۸۶
	درصد کل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
شیب (درصد)	۰ - ۵	۰/۴۲	۰/۶	۰/۱۷	۰/۷۷	۰/۰۲	۰/۵۰۵
	۵ - ۱۰	۱/۶۲	۲/۲۶	۴/۰۶	۳/۲۸	۶/۲۱	۵/۹۲۴
	۱۰ - ۲۰	۱۰/۸۹	۱۰/۴۴	۸/۰۹	۱۵/۹۵	۲۶/۵۸	۱۹/۱۱۲
	۲۰ - ۴۰	۳۱/۶۳	۳۸/۷۱	۲۵/۴۴	۴۴/۷	۳۵/۱۴	۴۵/۵۴۱
	۴۰ - ۶۰	۶/۶	۳۵/۵۲	۳۲/۱۲	۲۰/۴	۱۱/۸۷	۳۲/۵۳۸
	> ۶۰	۲۲/۸۳	۱۲/۴۴	۳۰/۰۹	۱۴/۸۷	۲۰/۱۵	۲۶/۳۸۳
درصد کل							

پورفیری با (۳۸/۸۷ کیلومتر مربع) به تنهایی ۲۰/۶۲٪ از مناطق آسیب‌پذیری خیلی زیاد را پوشش می‌دهد. علاوه بر این درصد بالایی از کلاس آسیب‌پذیری خیلی کم و کم را واحد آندزیت- داسیت پورفیری شامل می‌شود (به ترتیب ۴۷/۲۳٪ و ۷۱/۵۶٪) که درصد قابل توجهی از منطقه را پوشش می‌دهد (۳۷/۱۶۷). فاکتور حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش با $W_i = ۰/۱۶۸$ به‌عنوان دومین متغیر مهم در آسیب‌پذیری زمین‌لغزش می‌باشد. که از بین طبقات آن، طبقه > ۵۰ با (۴۰/۱۴٪)

فاکتور سنگ‌شناسی با بالاترین مقدار W_i (۰/۱۷۳) به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور مؤثر در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد که از بین طبقات این متغیر، پادگانه آبرفتی قدیمی، تراکی آندزیت- تراکیت پورفیری، نهشته لاهار و پادگانه آبرفتی جوان به ترتیب ۳۳/۵، ۲۶، ۲۰/۶۲ و ۱۹/۵ درصد از سطح آسیب‌پذیری خیلی زیاد را شامل می‌شوند. از میان واحدهای سنگی، واحد سنگی لاهار با مساحتی برابر با ۸/۰۷ کیلومتر مربع در مقایسه با پادگانه آبرفتی قدیمی (۱۸/۷۶ کیلومتر مربع) و تراکی آندزیت - تراکیت

ترتیب با (۲۶/۵۸٪) و (۲۰/۱۵٪) شامل می‌شوند (جدول ۴). همان‌طوری که پیش‌تر نیز ذکر شد از مجموعه داده‌های مورداستفاده در آزمون (*Test*) به‌منظور سنجش نقشه آسیب‌پذیری زمین‌لغزش استفاده شد. یک روش سنجش ساده، بررسی توزیع لغزش از لحاظ تعداد وقوع، درصد یا تراکم زمین‌لغزش در کلاس‌های آسیب‌پذیری می‌باشد. جدول ۵ لیست تعداد زمین‌لغزش، درصد و تراکم لغزش در ۵ کلاس آسیب‌پذیری را در قالب کل داده‌ها، داده‌های آموزش (*Training*) و داده‌های آزمون (*Test*) نشان می‌دهد. واضح است که اکثر زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه در سطوح آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد قرار دارند.

و < 300 با (۳۳/۵۷٪) در مجموع نزدیک به ۷۵٪ از مناطق با آسیب‌پذیری خیلی زیاد را شامل می‌شوند (جدول ۴). کلاس > 50 با وجود سطح بسیار کمتر (۲۱ کیلومترمربع) نسبت به کلاس < 300 (۶۵/۸۶ کیلومترمربع) از آسیب‌پذیری خیلی بالایی برخوردار است. که در طبقه ۳۰۰ - ۲۰۰ با وسعتی برابر با (۳۸/۸۸ کیلومترمربع) ۲۶٪ از مناطق آسیب‌پذیری خیلی زیاد را پوشش می‌دهد.

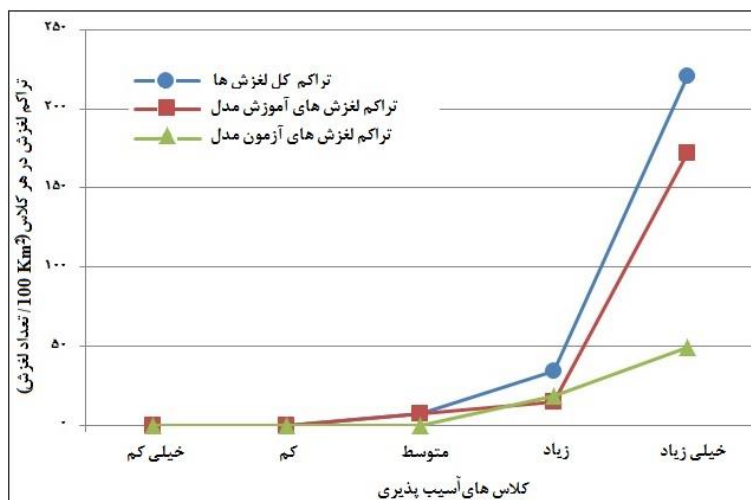
فاکتور شیب با $Wi = 0.154$ به‌عنوان سومین عامل مهم در آسیب‌پذیری زمین‌لغزش می‌باشد. بالاترین درصد از کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد را طبقه ۴۰٪ - ۲۰٪ با (۳۵/۱۴) و پس‌از آن طبقات ۲۰٪ - ۱۰٪ و < 60 ٪ به

جدول ۶. تعداد و تراکم زمین‌لغزش در هر کلاس آسیب‌پذیری از سه مجموعه داده

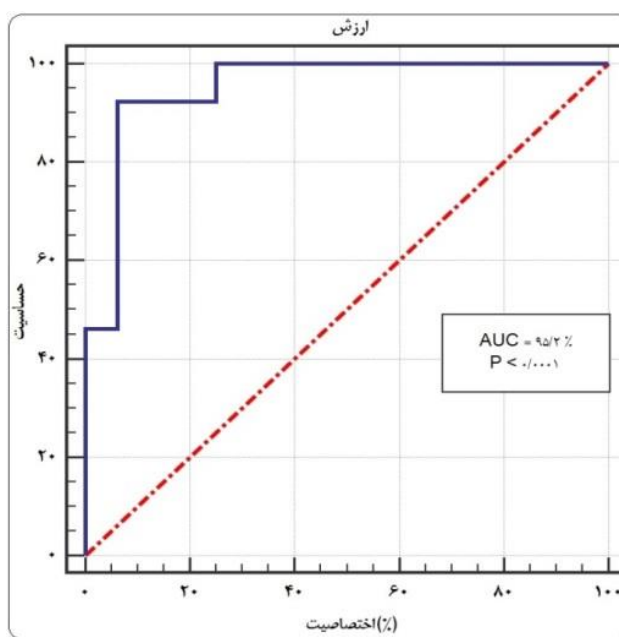
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	کلاس آسیب‌پذیری زمین‌لغزش
۶۳	۹	۲	۰	۰	تعداد کل زمین‌لغزش
۸۵/۱۴	۱۲/۱۶	۲/۷	۰/۰۰	۰/۰۰	درصد کل زمین‌لغزش
۲۲۰/۶	۳۳/۹	۷/۲	۰/۰	۰/۰	تراکم کل زمین‌لغزش (۱۰۰ کیلومترمربع/تعداد)
۴۹	۴	۲	۰	۰	تعداد زمین‌لغزش برای آموزش مدل
۸۹/۰۹	۷/۲۷	۳/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	درصد زمین‌لغزش برای آموزش مدل
۱۷۱/۶	۱۵	۷/۲	۰/۰	۰/۰	تراکم زمین‌لغزش برای آموزش مدل (۱۰۰ کیلومترمربع/تعداد)
۱۴	۵	۰	۰	۰	تعداد زمین‌لغزش برای آزمون مدل
۷۳/۶۸	۲۶/۳۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	درصد زمین‌لغزش برای آزمون مدل
۴۹/۰۲	۱۸/۸۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	تراکم زمین‌لغزش برای آزمون مدل (۱۰۰ کیلومترمربع/تعداد)

زمین‌لغزش در سه مجموعه داده نشان می‌دهد ۵ کلاس آسیب‌پذیری لغزش برای منطقه مطالعاتی مناسب بوده و مطابقت آن قابل قبول می‌باشد (شکل ۴). منحنی *ROC* در شکل ۵ نشان داده شده که مقدار سطح زیر منحنی (*AUC*) برای داده‌های مورداستفاده در آزمون برابر با ۰/۹۵/۲٪ می‌باشد. که در مقایسه با ۵۰٪ $AUC > 50\%$ که قابل قبول بودن مدل را نشان می‌دهد بسیار بالا بوده و حاکی از دقت عالی مدل می‌باشد.

مقایسه مقادیر تراکم با *LSI* های به‌دست‌آمده نشان می‌دهد زمانی که سطوح آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد متعاقباً تراکم زمین‌لغزش نیز رشد می‌یابد. این مقادیر برای داده‌های آموزش مدل از سطوح آسیب‌پذیری "خیلی کم" تا "خیلی زیاد" به ترتیب برابر با ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۷/۲، ۱۵ و ۱۷۱/۶ می‌باشد. روند مذکور برای داده‌های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۱۸/۸۷ و ۴۹/۰۲ می‌باشد. برای کل داده‌ها نیز مقادیر تراکم برابر با ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۷/۲، ۳۳/۹ و ۲۲۰/۶ می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل تراکم



شکل ۴. تراکم زمین لغزش (۱۰۰ کیلومتر مربع / تعداد) در هر ۵ کلاس آسیب پذیری از سه مجموعه داده



شکل ۵. منحنی ROC برای صحت سنجی مدل آسیب پذیری زمین لغزش

است. روش شاخص آماری به منظور توسعه روابط بین فاکتورهای کنترلی و پراکنش زمین لغزش استفاده شد، تکنیک تحلیل سلسله مراتبی نیز به منظور توجه فاکتورهای ذهنی و عینی در فرآیند تصمیم گیری استفاده شد. ترکیب دو روش به تولید شاخص آسیب پذیری

۴. بحث و نتیجه گیری

ارزیابی آسیب پذیری صورت گرفته در این مطالعه از دانش تخصصی یکپارچه ای برخوردار می باشد که با پراکنش واقعی زمین لغزش جهت بهینه سازی زنجیره پردازش به منظور تهیه نقشه آسیب پذیری صورت پذیرفته

زمین‌لغزش (LSI) منجر شد.

یافته‌های این تحقیق از این نظر که در برخی موارد بین مقدار Si و درصد سطح آسیب‌پذیری خیلی زیاد و زیاد تطابق لازم وجود ندارد با یافته‌های [۳۶] کاملاً مطابقت دارد. به‌عنوان مثال در مورد فاکتور شیب، مقدار Si برای طبقه شیب ۴۰ - ۲۰٪ کمتر از طبقات شیب ۲۰ - ۱۰٪ و $0.60 <$ می‌باشد (۰/۷۷) - در برابر ۱/۱۴۱ و ۰/۰۸) که حاکی از تأثیر شدید فاکتورهای دیگر در توزیع کلاس‌های آسیب‌پذیری برای عامل شیب می‌باشد. در خصوص وجود چنین عدم تطابقی بین میزان Si پایین برای طبقه شیب ۴۰ - ۲۰٪ (که بالاترین درصد سطح از آسیب‌پذیری خیلی زیاد را در بردارد)، قرارگیری واحدهای سنگی با حساسیت خیلی ضعیف و خیلی شدید به فرسایش در طبقات با شیب بین ۴۰ - ۲۰ درصد و نیز بالا بودن مقدار Wi عامل حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش، نسبت به عامل شیب می‌باشد (۰/۱۶۸) در برابر ۰/۱۵۴). که دلیلی منطقی بر بالا بودن گسترش کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد در شیب ۴۰ - ۲۰٪ نسبت به دوطبقه دیگر می‌باشد. با این وجود مناطق موجود در شیب‌های زیر ۴۰ درصد آسیب‌پذیری بالایی نسبت به زمین‌لغزش دارند.

نتایج حاصل از این تحقیق که عامل اصلی آسیب‌پذیری را سنگ‌شناسی معرفی می‌کند با نتایج [۲۵] کاملاً مطابقت دارد. دلیل این امر اختصاص وزن بالا به فاکتور سنگ‌شناسی بر اساس نظرات کارشناسی در طی مقایسات زوجی معیارها نسبت به هم می‌باشد. که از بین طبقات مختلف آن، واحد سنگی لاهار با وجود سطح کم درصد قابل توجهی از مناطق با آسیب‌پذیری خیلی زیاد را پوشش می‌دهد که دلیل این امر قرارگیری آن در دو طرف زهکش اصلی حوضه می‌باشد و از لحاظ وقوع زمین‌لغزش بسیار آسیب‌پذیر می‌باشد. پس از عامل سنگ‌شناسی، حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش و میزان شیب در جایگاه بعدی می‌باشند. مدیریت نادرست و اتخاذ کاربری نامناسب موجب

ناپایداری دامنه‌ها در شیب‌های ۴۰-۱۰ درصد شده است که عامل شکست شیب در این منطقه به‌طور جدی متأثر از فعالیت‌های انسانی می‌باشد. با توجه به تحلیل‌های حاصل از فاکتورهای سنگ‌شناسی، حساسیت نسبی واحدهای سنگی به فرسایش و میزان شیب نسبت به پراکنش کلاس‌های آسیب‌پذیری زمین‌لغزش می‌توان اذعان داشت که مناطق پوشیده از پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جوان، نهشته‌های لاهار و تراکی آندزیت - تراکیت پورفیری با هر میزان حساسیتی نسبت به فرسایش (از خیلی کم تا خیلی زیاد) که در شیب‌های ۱۰ تا ۴۰ درصد و بیش از ۶۰ درصد پراکنش دارند بسیار مستعد شکست شیب و تولید یک‌باره حجم بالای رسوب می‌باشند که پراکنش زمین‌لغزش فراوان در این طبقات صحت این موضوع را تأیید می‌نماید. هرچند شایع است که دامنه‌های با شیب تندتر از شیب طبیعی (۴۰ - ۲۵ درجه) زمانی که از سجم کافی برای مهار شکست شیب وجود نداشته باشد ناپایدار خواهند بود [۳۶]. اما نکته‌ای که در این مطالعه ناپایداری شیب‌های کم را نسبت به شیب‌های تند تشدید می‌کند نزدیک بودن تجمعات بشری در قالب سکونت‌گاه‌ها و روستاها به مناطق با شیب کمتر می‌باشد که همواره تحت تأثیر فعالیت‌های بشری قرار داشته و جایی که خاک‌زایی مناسب در اراضی کشاورزی بستر مناسبی را برای فعالیت بشر فراهم نموده به دلیل عدم آگاهی از محدودیت‌های موجود و نیز عدم رعایت الگوی کشت، اراضی بایر جایگزین این اراضی شده و به مرور زمان موجب فرسایش خاک و تولید رسوب می‌شود، در حالی که دامنه‌های پرشیب دور از دسترس بشر بوده و عملاً تجمع انسان‌ها در این گونه نقاط به ندرت صورت پذیرفته و یا اصلاً شکل نگرفته است. به همین دلیل می‌توان به روشنی بیان نمود که فعالیت‌های انسانی نقش بسیار مهمی در تحریک آسیب‌پذیری زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی بر عهده داشته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده پیشنهاد می‌شود از تغییر کاربری و جاده‌سازی‌های غیراستاندارد در مناطق مستعد وقوع

تلفیقی *SIM* و *AHP* در سنجش آسیب‌پذیری منطقه می‌باشد. یافته‌های این تحقیق از این نظر که روش‌های تلفیقی قادرند عملکرد بالایی را در مناطق کوچک داشته باشند با نتایج [۲۷ و ۱۴] کاملاً مطابقت دارد. از این رو با تغییر مقادیر اوزان به دست آمده از دانش تخصصی حاصل از فرایند تحلیل سلسله مراتبی، می‌توان با اصلاح روش و عوامل ناپایداری شیب، روش حاضر را نسبت به استفاده در مناطق دیگر توصیه نمود.

زمین لغزش جلوگیری شود. تراکم زمین لغزش برای ۵ کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد تا خیلی کم حاکی از افزایش روند خطی می‌باشد که متناسب با افزایش آسیب‌پذیری، افزایش یافته و نشان از تطابق کافی بین نقشه آسیب‌پذیری و داده‌های واقعی زمین لغزش می‌باشد که با یافته‌های [۲۵، ۲۳، ۲۴ و ۸] مطابقت دارد. علاوه بر این مقدار بالای سطح زیر منحنی ROC ($AUC = 0.952$) حاکی از توانایی بالای مدل

References

- [1] Ayalew, L. and Yamagishi, H. (2005). *The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda–Yahiko Mountains, Central Japan*. *Geomorphology*, 65, 15-31.
- [2] Brabb, E.E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. Proc., Fourth international Symposium on Landslides. Canadian Geotechnical Society, Toronto, Canada, pp. 307–324.
- [3] Bui, D. T., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O. (2011). *Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression*. *Natural hazards*, 59(3), 1413-1444.
- [4] Carrara, A., Crosta, G. and Frattini, P. (2003). *Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(10), 1125-1142.
- [5] Duc, D. M. (2013). *Rainfall-triggered large landslides on 15 December 2005 in Van Canh district, Binh Dinh province, Vietnam*. *Landslides*, 10, 219-230.
- [6] Erenner, A. and Düzgün, H. S. B. (2010). *Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway)*. *Landslides*, 7(1), 55-68.
- [7] Feiznia, S. (2008). *Applied sedimentology with focus on soil erosion and sediment production*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan University Publication, 358p (in Persian).
- [8] Gharahi, H., Bahloli, B., Sayyar, A. and Shariat Jafari, M. (2011). *Providing Landslide susceptibility map using the hierarchical analysis and bivariate statistical model in Alborz dam reservoir*. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 21(81), 93-100 (In Persian).
- [9] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P. (1999). *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. *Geomorphology*, 31, 181-216.
- [10] Kamp, U., Growley, B.J., Khattak, G.A. and Owen, L.A. (2008). *GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region*. *Geomorphology*, 101, 631-642.
- [11] Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S. and Gupta, R. P. (2006). *A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas*. *Engineering Geology*, 85(3), 347-366.
- [12] KarimiSangchini, E., Ownegh, M. and Saddodin, A. (2012). *Comparing applicability of 4 quantitative and semi-quantitative models in landslide hazard zonation in Chehel-Chay watershed, Golestan province*. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(1), 183-196 (In Persian).
- [13] Lee, S. and Talib, J. A. (2005). *Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis*. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.

- [14] Meinhardt, M., Fink, M. and Tunschel, H. (2015). *Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics*. *Geomorphology*, 234, 80-97.
- [15] Nandi, A. and Shakoor, A. (2010). *A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses*. *Engineering Geology*, 110(1), 11-20.
- [16] Neaupane, K. M. and Piantanakulchai, M. (2006). *Analytic network process model for landslide hazard zonation*. *Engineering Geology*, 85(3), 281-294.
- [17] Poli, S. and Sterlacchini, S. (2007). *Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique*. *Natural Resources Research*, 16(2), 121-134.
- [18] Pradhan, B., Sezer, E. A., Gokceoglu, C. and Buchroithner, M. F. (2013). *Landslide susceptibility mapping by neuro-fuzzy approach in a landslide-prone area (Cameron Highlands, Malaysia)*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12), 4164-4177.
- [19] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.
- [20] Saaty, T. L. and Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*. Springer Science & Business Media. (Vol. 175).
- [21] Shariat Jafari, M. (1996). *Landslide (principles of natural slope stability)*. *Writing. Publications Structures*, 218p (In Persian).
- [22] Shariat Jafari, M. and Ghaioimian, J. (2008). *Evaluation of Performance of model bivariate statistical analysis in landslide hazard zonation*. *Journal of Science, University of Tehran*, 34, 137-143 (In Persian).
- [23] Shirani, K., Ghaioimian, J. and Mokhtari, A. (2005). *Investigation and Evaluation of Landslide Hazard Zonation by using Bivariate and multivariate statistical analysis*. *Journal of Water and Watershed*, 3(2), 36-47 (In Persian).
- [24] Shirani, K., Chavoshi, S. and Ghaioimian, J. (2013). *Investigation and assessment of the landslide hazard zonation methods in the upper Padena Semirom*. *Journal of Basic Science, University of Isfahan*, 23-35 (In Persian).
- [25] Shirani, K. and Seif, A. (2012). *Landslide Hazard Zonation by using Statistical Methods (Pishkuh Region in Fereydonshahr Province)*. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 22(85), 149-158 (In Persian).
- [26] Soeters, R. and van Westen, C.J. (1996). *Slope instability recognition, analysis, and zonation*. In: Turner, K.A., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transport Research Board Special Report, 247, 129-177.
- [27] Song, Y.Q., Gong, J.H., Gao, S., Wang, D.C., Cui, T.J., Li, Y. and Wei, B.Q. (2012). *Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: a case study in Beichuan, China*. *Comput. Geosci*, 42, 189-199.
- [28] Süzen, M.L. and Doyuran, V. (2004). *Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey*. *Eng. Geol*, 71, 303-321.
- [29] Thiery, Y., Malet, J.P., Sterlacchini, S., Puissant, A. and Maquaire, O. (2007). *Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment*. *Geomorphology*, 92, 38-59.
- [30] Trigila, A., Iadanza, C., Esposito, C. and Scarascia-Mugnozza, G. (2015). *Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy)*. *Geomorphology*, 249, 119-136.
- [31] VanWesten, C.J. (1997). *Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows Application Guide*. ITC Publication, Enschede, 73-84.
- [32] Vahidnia, M. H., Alesheikh, A. A., Alimohammadi, A. and Hosseinali, F. (2010). *A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping*. *Computers & Geosciences*, 36(9), 1101-1114.
- [33] Wu, W. and Sidle, R. C. (1995). *A distributed slope stability model for steep forested basins*. *Water resources research*, 31(8), 2097-2110.

- [34] Yalcin, A. (2005). *An investigation on Ardesen (Rize) region on the basis of landslide susceptibility* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.(in Turkish).
- [35] Yalcin, A. (2008). *GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations*. *Catena*, 72, 1-12.
- [36] Zhang, G., Cai, Y., Zheng, Z., Zhen, J., Liu, Y. and Huang, K. (2016). *Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China*. *CATENA*, 142, 233-244.
- [37] 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.