

## ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های آماری در حوضه آبریز باراندوز چای

وحید محمدنژاد آروق\* - استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه  
صیاد اصغری سراسکانرود - استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۱      تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۱۲/۱۷

### چکیده

در مقاله حاضر پتانسیل وقوع زمین لغزش و خطر آن در حوضه آبریز باراندوز چای (آذربایجان غربی) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از روش آماری شاخص خطر HIM استفاده شد. داده‌های مورد استفاده در این مقاله شامل داده‌های توپوگرافی، کاربری اراضی، نقشه‌های زمین‌شناسی و همچنین نقشه زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در سطح حوضه است. نقشه پایه در این زمینه، نقشه-های توپوگرافی ۲۵۰۰۰ حوضه است. شش عامل اصلی و مؤثر بر وقوع زمین لغزش در حوضه انتخاب و نقشه‌های آن به منظور وزن دهی، تهیه گردید. این عوامل عبارت‌اند از: شیب و جهت شیب، سنگ‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی و ژئومورفولوژی. در نهایت با استفاده از نقشه‌های استاندارد شده شش گانه، نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای تهیه و ترسیم شد. پتانسیل خطر زمین لغزش در حوضه مورد نظر به پنج طبقه کم، متوسط، متوسط تا زیاد، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید. نتایج نشان می‌دهد که شیب‌های بیشتر از ۳۰ درجه و جهت شیب جنوب و جنوب شرقی و مناطق کوهستانی بیشترین پتانسیل زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه را دارند. مدل مورد استفاده در این مقاله با استفاده از محاسبه مساحت زیر نمودارهای Cross-validation، مورد اعتبار سنجی قرار گرفت. میزان اعتبار آن در حدود ۸۰/۷۹ برآورد شد که بیانگر دقت خوب مدل است. همچنین فرایند تحلیل اثر از طریق حذف تک‌به‌تک عوامل مؤثر شش گانه از مدل و بررسی خروجی آن‌ها، صورت گرفت. این تحلیل نشان داد که شیب عامل اصلی در وقوع زمین لغزش در حوضه است. نتیجه دیگر اینکه که می‌توان عامل اصلی در وقوع زمین لغزش را با دقت بالایی مشخص کرد. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود محدودیت‌های عملی و مفهومی و داده‌های دقیق، تهیه نقشه خطر زمین لغزش و همچنین ارزیابی آن می‌تواند در برنامه‌ریزی آمایش سرزمین و کاهش خطرات طبیعی و همچنین هزینه‌ها مؤثر واقع شود.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، مدل آماری، شاخص خطر، پهنه‌بندی، حوضه باراندوز چای

## مقدمه

ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها را داراست. زمین‌لغزش در ایران به‌عنوان یک سانحه طبیعی، سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی به کشور وارد می‌سازد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱). تعاریف مختلفی از زمین‌لغزش صورت گرفته است. در یک تعریف کلی می‌توان زمین‌لغزش را به‌صورت حرکت مجموعه‌ای از سنگ، آوار یا خاک تحت تأثیر نیروی جاذبه تعریف کرد. برای تشخیص زمین‌لغزش‌ها از سایر جریان‌ات توده‌ای گرانشی، لازم است در تعریف ذکر شود که توده مواد متحرک باید دارای چگالی حداقل ۱۰٪ بیشتر از چگالی آب باشد (فلیسیسیمو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش، ابزار مهمی برای برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای هستند (ملچیوری<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸). هدف از تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، تفکیک سطح زمین به مناطق همگن، بر اساس احتمال ناپایداری به‌واسطه حرکات توده‌ای در موقعیت‌های خاص می‌باشد (داس<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل یا بالقوه خطر از هیچ یا بسیار کم تا بسیار زیاد تقسیم می‌کند. این فرایند که بر مبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی و مدل‌سازی کمی بر پایه داده‌های ناحیه مورد مطالعه صورت می‌گیرد، می‌تواند مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و عمران در مقیاس منطقه‌ای و ناحیه‌ای و محلی محسوب گردد (کرم و محمودی، ۱۳۸۴).

جهت پهنه‌بندی دقیق مناطق خطر زمین‌لغزش باید عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش مناطق مختلف تحلیل بگردد (سامودرا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۵؛ کامفورتی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ لان<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۴). محققین عوامل مختلف را در وقوع زمین‌لغزش مؤثر می‌دانند که شامل ارتفاع از سطح دریا و جهت شیب و میزان شیب، بارش‌های سنگین و نفوذ آب به داخل ترک‌ها و شکاف‌ها، فعالیت گسل‌های بزرگ و فعال، وجود شبکه‌های زهکشی و آبراه‌ها، کاربری اراضی و تغییرات آن، تنوع بافت و سنگ‌شناسی و نوع خاک‌های منطقه که در استحکام و نفوذپذیری مؤثر می‌باشد، زمین‌شناسی منطقه و فعالیت‌های انسانی از جمله جاده‌سازی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش می‌باشند (روستایی و احمدزاده، ۱۳۹۱؛ موسوی خطیر و همکاران، ۱۳۸۹؛ چائو و همکاران، ۲۰۰۵، آیالو و یاماگیشی<sup>۸</sup>، ۲۰۰۵؛ لی و سمبات<sup>۹</sup>، ۲۰۰۶؛ سامودرا و همکاران، ۲۰۱۵)، بعد از تشخیص عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش باید روش‌های مورد مطالعه بررسی گردد.

محققین روش‌های مختلفی را برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش استفاده می‌کنند که کارایی هر کدام از این روش‌ها در مناطق مختلف متفاوت است (اشقلی فراهانی، ۱۳۸۰)، این روش‌ها در یک تقسیم‌بندی کلی به روش کیفی که شامل روش‌های تحلیل ژئومورفولوژیکی، تهیه لیست زمین‌لغزش‌های منطقه (تحلیل پراکندگی)، و روش‌های اکتشافی می‌باشد (آلوتی و چاودوری<sup>۱۰</sup>، ۱۹۹۹)، و روش‌های کمی که بر پایه تحلیل‌های آماری استوار است، طبقه‌بندی می‌شوند. در روش‌های کمی اساس بیان عددی رابطه بین فاکتورهای کنترل‌کننده و زمین‌لغزش‌ها است (آیلو و یاماگیشی، ۲۰۰۵). در بسیاری از

<sup>1</sup> Detritus

<sup>2</sup> Felicisimo

<sup>3</sup> Melchiorre

<sup>4</sup> Das

<sup>5</sup> Samodra

<sup>6</sup> Conforti

<sup>7</sup> Lan

<sup>8</sup> Ayalew

<sup>9</sup> Lee S, Sambath

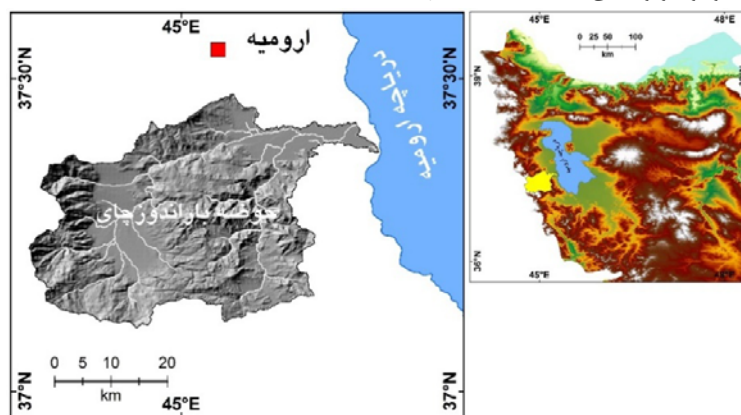
<sup>10</sup> Aleotti. and Chowdhury

تحقیقات هر دوی روش‌های کمی و کیفی باهم دیگر مورد استفاده محققین قرار گرفته است. شناسایی و انتخاب مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در یک محدوده، باعث می‌شود با اطمینان بالاتری به نتایج، برای پیشگیری یا بهبود شرایط اقدامات لازم انجام شود (شیرانی و سیف، ۱۳۹۱). بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده این تحقیق در گام اول در پی آن است که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع خطر زمین لغزش را در محدوده حوضه آبریز باراندوز چای شناسایی و در گام دوم مناطق مختلف این حوضه را نسبت به خطر زمین لغزش پهنه‌بندی بنماید.

تحقیقات متعددی در رابطه با پهنه‌بندی خطر زمین لغزش صورت گرفته است که می‌توان به تحقیقات فتاحی اردکانی (۱۳۷۹)، سفیدگری (۱۳۸۱)، فیض نیا و همکاران (۱۳۸۳)، کرم و محمودی (۱۳۸۴)، شیرانی و همکاران (۱۳۸۵)، علی‌محمدی و همکاران (۱۳۸۸)، موسوی خطیر و همکاران (۱۳۸۹)، یمانی و همکاران (۱۳۹۱)، روستایی و احمدزاده (۱۳۹۱)، وان واستن<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۷)، کاررا<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۱)، پاچوی و پانت<sup>۳</sup> (۱۹۹۲)، لان و همکاران (۲۰۰۴)، لی و سمپات (۲۰۰۶)، کومک و ماتیجا<sup>۴</sup> (۲۰۰۸)، ارکونگلو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، فلیسیکیمو و همکاران، (۲۰۱۳)، فرجی سبکیار و همکاران (۲۰۱۴)، کانفورتی و همکاران (۲۰۱۴)، فیضی زاده و همکاران (۲۰۱۴)، سامودرا و همکاران (۲۰۱۵)، اشاره کرد.

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در تحقیق حاضر، حوضه آبریز باراندوز چای واقع در استان آذربایجان غربی است. این حوضه در محدوده شهرستان‌های ارومیه و نقده قرار دارد (شکل ۱). مساحت حوضه مذکور، ۱۱۷۰ کیلومتر مربع است. آب‌های حاصل از این حوضه با جهت غربی - شرقی، در نهایت وارد دریاچه ارومیه می‌شوند. حداکثر ارتفاع حوضه ۳۴۵۳ متر است. حوضه مذکور اغلب کوهستانی بوده و تنها بخش‌های شمال شرقی و مرکزی دارای ارتفاع پایین بوده و عمدتاً از دشت‌های حاصلخیز تشکیل شده است. این امر سبب شده تا در این قسمت‌ها، پوشش گیاهی وسیعی (باغات کشاورزی)، وجود داشته باشد. این حوضه عمدتاً از سنگ‌های آهکی، دولومیت‌ها، شیل‌ها، کنگلومراها و در دشت‌ها از رسوبات کواترنری تشکیل شده است. شرایط ناهمواری، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، فعالیت‌های انسانی و پوشش گیاهی شرایط مناسبی را برای وقوع پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مختلف ایجاد کرده است.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

<sup>1</sup> Van Western

<sup>2</sup> Carrara

<sup>3</sup> Pachauri & Pant

<sup>4</sup> Komac and Matija

<sup>5</sup> Arkonglo

## مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی خطر زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه، ابتدا موقعیت زمین‌لغزش‌های موجود بر روی نقشه مشخص شد. در حدود ۳۸ زمین‌لغزش مختلف در این حوضه ثبت شده است.

عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شناسایی و نقشه‌های موضوعی این عوامل تهیه گردید. عواملی چون شیب، جهت شیب، بارش، سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی، دوری یا نزدیکی به گسل‌ها و رودخانه‌ها و نوع و عمق خاک در وقوع زمین‌لغزش تأثیر دارند. بدین منظور نقشه‌های توپوگرافی ۲۵۰۰۰ به‌عنوان نقشه پایه انتخاب شد. نقشه‌های ارتفاعی، شیب، جهت شیب و شبکه آبراهه با استفاده از این نقشه‌های پایه تهیه گردید. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه جهت تهیه نقشه-های واحدهای زمین‌شناسی، واحدهای سنگی و تراکم گسل‌ها مورداستفاده قرار گرفت. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (۲۰۱۴) و تصاویر ماهواره اسپات (۲۰۰۹) و به روش طبقه‌بندی نظارت شده تهیه و با نقشه‌های تهیه‌شده قبلی مقایسه گردید.

همان‌طور که اشاره شد داده‌های اصلی شامل سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، خاکشناسی و داده‌های توپوگرافیک می‌باشد. داده‌های دیگر مثل شیب و جهت شیب نیز به‌عنوان داده‌های ثانویه از داده‌های اصلی استخراج شد. تمامی این داده‌ها تحت عنوان عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش، وارد مدل آماری شد. هر یک از عوامل به‌طور جداگانه محاسبه و وزن آن‌ها به دست آمد. از داده‌های به‌دست‌آمده در ارزیابی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای استفاده شد. درنهایت با استفاده از روش شاخص خطر، نقشه پتانسیل زمین‌لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای تهیه و پهنه‌بندی شد.

## روش شاخص خطر (HIM)

با توجه به عدم وجود داده‌های تاریخی و ژئوتکنیکی کافی از زمین‌لغزش‌ها، مدل‌های کمی، جبری و احتمالی از این تحقیق مستثنی و به‌جای آن از برآورد آماری دومتغیره آسیب‌پذیری استفاده شد. این برآورد صرفاً بر پایه وقوع زمین-لغزش‌های موجود صورت پذیرفت. معمولاً در این روش تعداد عوامل مؤثر بر پایداری دامنه یعنی سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، خاک، شیب جهت شیب در نظر گرفته می‌شود (Chowdhury, 2003).

به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری ناشی از زمین‌لغزش، نقشه پتانسیل زمین‌لغزش (شاخص خطر)، با استفاده از روش‌های مرسوم به دست آمد. فرمول مورداستفاده در این مرحله به شرح زیر است:

$$w_i = \ln \left[ \frac{Densclas}{Densmap} \right] = \ln \left[ \frac{Area(Si)}{Area(Ni)} / \frac{\sum Area(Si)}{\sum Area(Ni)} \right]$$

در این فرمول،  $w_i$  نشان‌دهنده وزن هر یک از عوامل شش‌گانه مؤثر در زمین‌لغزش (شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی و خاکشناسی) است.  $Densclas$  نشان‌دهنده تراکم زمین‌لغزش‌های در کلاس‌های هر یک از عوامل شش‌گانه مؤثر بر زمین‌لغزش و  $Densmap$ : بیانگر تراکم زمین‌لغزش‌ها در محدوده مساحت موردبررسی یعنی حوضه آبریز باراندوز چای است.  $Area(Si)$  مساحت زمین‌لغزش‌ها در کلاس‌های هر یک از پارامترهای شش‌گانه را نشان می‌دهد.  $Area(Ni)$  مجموع مساحت طبقات پارامترهای مختلف است. بایستی اشاره کرد که تمامی محاسبات مربوط به پارامترهای مختلف و همچنین تهیه نقشه در محیط نرم‌افزار ArcGIS صورت گرفته است.

نقشه شیب حوضه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۲۵۰۰۰ تهیه و با استفاده از فرمول بالا، وزن دهی شد. سایر عوامل مؤثر نیز با استفاده از فرمول بالا وزن دهی شدند. لازم به ذکر است که اساس این روش بر همپوشانی لایه زمین‌لغزش‌ها با لایه هر یک از عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش استوار است. یعنی سعی شد در محیط نرم‌افزار ArcGIS موقعیت و وسعت زمین‌لغزش‌ها بر روی نقشه‌های ۶ عامل مذکور (به‌طور جداگانه)، اضافه شود تا بدین ترتیب مشخص شود که مثلاً زمین-لغزش‌ها در چه شیبی یا روی چه نوع سنگی اتفاق افتاده است. به‌این ترتیب ما توانستیم تراکم زمین‌لغزش‌ها را در هر یک از طبقات یا کلاس‌های عوامل مختلف محاسبه کرده و آن‌ها را نسبت به کل زمین‌لغزش‌ها بسنجیم. برای این کار

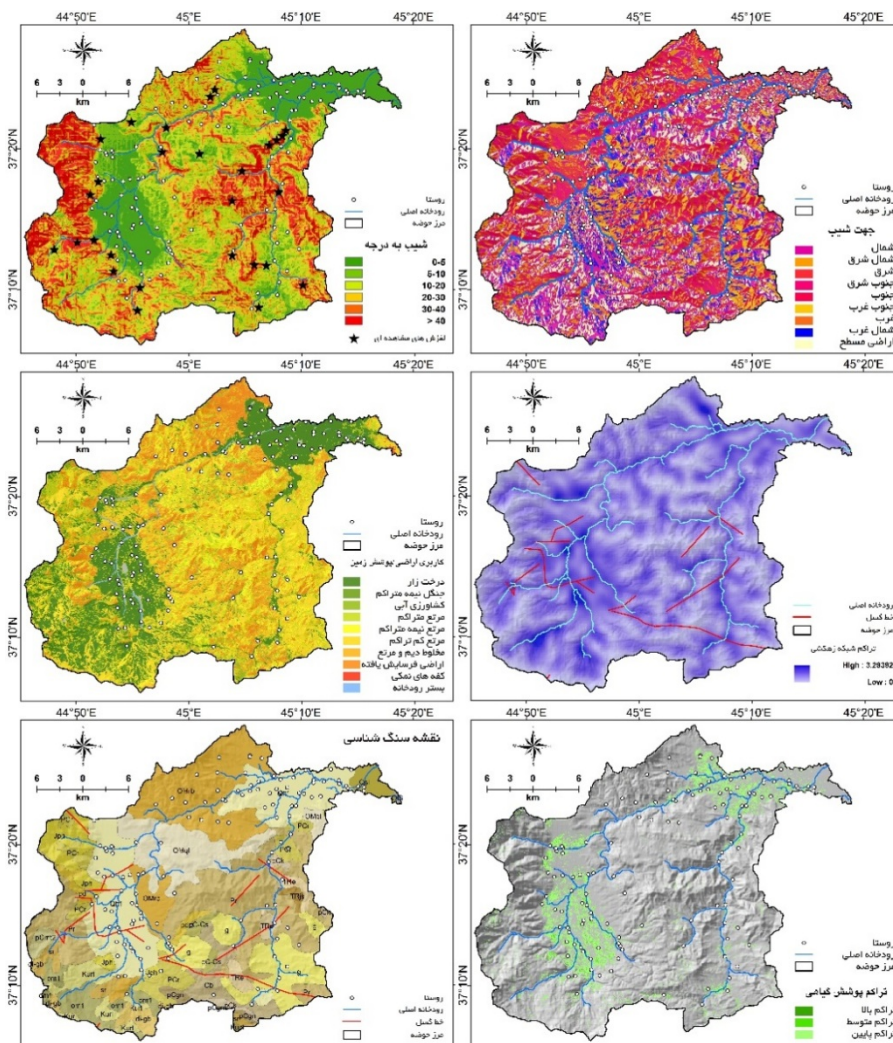
لگاریتم معمولی به کار گرفته شد. به این ترتیب که وقتی تراکم زمین لغزش‌ها کمتر از حالت نرمال بود، وزن منفی و زمانی که تراکم زمین لغزش‌ها بیشتر از حالت نرمال بود، وزن مثبت به آن‌ها اختصاص داده شد. پس از وزندهی به عوامل مختلف با استفاده از فرمول بالا، نقشه پتانسیل خطر زمین لغزش تهیه شد. این نقشه به پنج طبقه تقسیم گردید. این طبقات شامل پتانسیل خطر کم، متوسط، متوسط تا زیاد، زیاد و خیلی زیاد هستند. جهت بررسی صحت مدل نیز از روش Cross Validation استفاده شد. مجموع تعداد پیکسل‌های شش عامل مؤثر در زمین لغزش با توجه به نمودار هیستوگرام آن‌ها، از فراوانی کم تا زیاد و در کل به ۱۰۰ طبقه تقسیم شد. در مرحله بعدی، فراوانی مشترک از طریق همپوشانی نقشه زمین لغزش‌های موجود با نقشه مجموع شش عامل مؤثر، محاسبه گردید. به این ترتیب درصد تجمعی زمین لغزش‌ها و همچنین مساحت‌ها به دست آمد.

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مقادیر اعتبارسنجی شده در این تحقیق با تغییر هر یک از فاکتورهای شش‌گانه، تغییر می‌کند (Lee, 2005). در واقع در این نوع اعتبارسنجی یکی از عوامل برای نمونه عامل شیب، از مدل حذف می‌شود و سایر عوامل با همدیگر جمع می‌شوند. این کار را می‌توان یک‌به‌یک برای تمامی عوامل به کار برد و نتیجه نهایی را مشاهده کرد.

### بحث و یافته‌ها

#### تهیه نقشه فاکتورهای مؤثر در زمین لغزش

پارامترهای زمینی مانند شیب و جهت شیب شاخص‌های خوبی در تهیه نقشه استعداد زمین لغزش و خطر آسیب‌پذیری ناشی از آن با استفاده از روش معیارهای چندگانه فضایی به شمار می‌رود. اشاره شد که این نقشه از طریق نقشه‌های توپوگرافی ۲۵۰۰۰ تهیه شد (شکل ۲). سایر نقشه‌های مؤثر بر زمین لغزش (البته نه تمامی آن‌ها)، از جمله سنگ‌شناسی، تراکم آبراهه‌ها، کاربری اراضی و غیره در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: برخی از عوامل مؤثر در زمین‌لغزش

### وزن‌دهی به معیارها

به‌منظور شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر در زمین‌لغزش حوضه آبریز باراندوز چای و به کمیت درآوردن آن، وزن هر یک از عوامل مؤثر، با استفاده از فرمول اشاره‌شده در صفحات قبل محاسبه شد. هر یک از عوامل تأثیر کاملاً متفاوتی در وقوع زمین‌لغزش دارند (Castellanos, 2008). پس از محاسبه وزن شش فاکتور مؤثر، این وزن‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS به هر یک از طبقات نقشه‌های مختلف اختصاص داده شد و بدین ترتیب نقشه‌های شش‌گانه استانداردشده به دست آمد. با توجه به وجود کلاس‌های مختلف در هر یک از نقشه‌ها، کلاس‌های مؤثر هر یک از نقشه‌ها در وقوع زمین‌لغزش‌ها به دست آمد (جدول ۱). یعنی مشخص شد که در مثلاً در نقشه شیب، لغزش‌ها در چه شیبی بیشتر اتفاق افتاده است یا در چه نوع کاربری فراوانی زمین‌لغزش‌ها بیشتر است. در نقشه جهت شیب، شیب‌هایی با جهت جنوبی و جنوب شرقی، بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارد. دلیل آن را می‌توان در کمی پوشش گیاهی و همچنین دریافت بیشتر انرژی خورشیدی و در نتیجه ذوب بیشتر برف‌ها یافت. به لحاظ ژئومورفولوژیکی بیشترین زمین‌لغزش‌ها در منطقه کوهستانی و نیمه کوهستانی اتفاق افتاده است. این امر طبیعی بوده و به دلیل وجود شیب‌های تند در مناطق کوهستانی اتفاق می‌افتد. همچنین از نظر نوع کاربری و خاک، بیشترین زمین‌لغزش‌ها در مناطقی با کاربری مرتعی تنک و پراکنده و

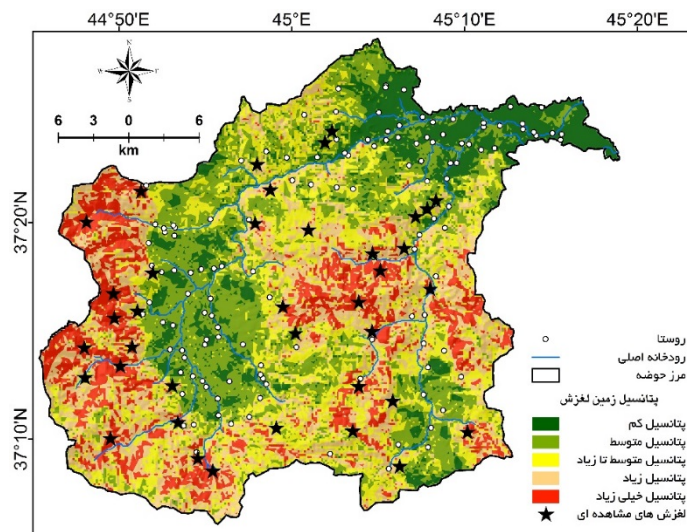
همچنین اراضی فرسایش یافته و خاک‌های ریزدانه و عمیق اتفاق افتاده است. شیب‌های بیش از ۳۰ درجه نیز در وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای تأثیر مهمی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: زیر عامل‌های مؤثر در وقوع زمین لغزش

عامل	جهت شیب	ژئومورفولوژی	کاربری اراضی	شیب	لیتولوژی	خاک
زیر	جنوب و جنوب	کوهستان و نیمه	مرتع بسیار کم تراکم و	بیشتر از-	اغلب سنگ آهک	خاک-
عامل	شرق	کوهستان	اراضی فرسایش یافته	۳۰ درجه	به شدت هوازده	عمیق و ریزدانه

### ارزیابی پتانسیل زمین لغزش

پس از وزن دهی به لایه‌های مختلف بر اساس فرمول آماری مذکور و با ترکیب آن‌ها، نقشه پتانسیل یا پهنه‌بندی زمین لغزش حوضه آبریز باراندوز چای به دست آمد. قبلاً نیز اشاره کردیم که برای عوامل مؤثر کمتر از حد نرمال وزن منفی و برای عوامل بالاتر از نرمال وزن مثبت در نظر گرفته شد. بر این اساس وزن نهایی عوامل مؤثر بین ۷ و ۱۱- طبقه‌بندی شد. با توجه به زیادی تعداد طبقات و پیچیده بودن تصمیم‌گیری در این حالت، نقشه موردنظر به ۵ طبقه تقسیم شد (شکل ۳). طبقه ۱۱- تا ۸- پتانسیل کم، ۸- تا ۴- پتانسیل متوسط، ۴- تا ۰- پتانسیل متوسط تا زیاد، ۰ تا ۳ پتانسیل زیاد و ۳ تا ۷ پتانسیل خیلی زیاد. نقشه مذکور در واقع توزیع فضایی پتانسیل وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای را نشان می‌دهد. شکل ۳ نشان می‌دهد که مناطق با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد بیشتر در غرب و بخش مرکزی شرق حوضه آبریز پراکنده شده‌اند.



شکل ۳: نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش

بر اساس شکل ۳ مساحت و درصد مساحت طبقات مختلف پتانسیل وقوع زمین لغزش به دست آمد که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد مناطق با پتانسیل خیلی زیاد در حدود ۱۵ درصد از مساحت کل حوضه را شامل می‌شود. بیشترین مساحت حوضه از نظر قابلیت زمین لغزش به طبقات متوسط و متوسط تا زیاد اختصاص دارد.

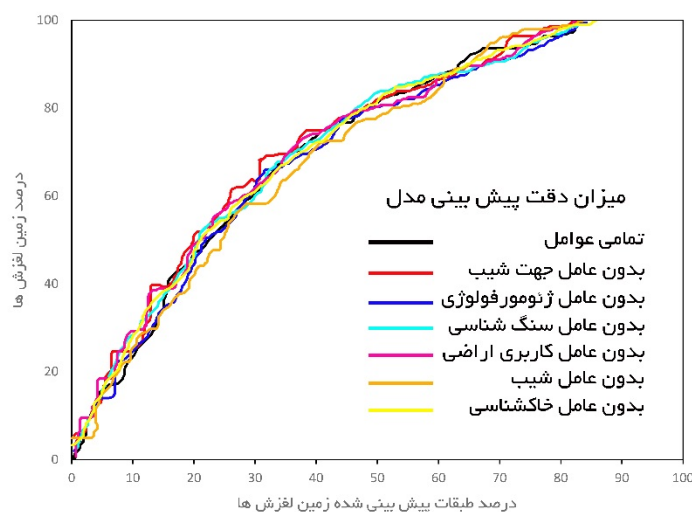
جدول ۲: مساحت و درصد مساحت پتانسیل وقوع زمین لغزش

پتانسیل زمین لغزش	مساحت (km <sup>2</sup> )	%
کم	۱۴۹/۴۴	۱۲/۷۷
متوسط	۲۹۸/۲۳	۲۵/۴۹
متوسط تا زیاد	۲۸۶/۴۳	۲۴/۴۷
زیاد	۲۶۲/۳۰	۲۲/۴۱
خیلی زیاد	۱۷۳/۶۵	۱۴/۸۴
کل	۱۶/۱۱۷۰	۱۰۰

### ارزیابی دقت و تحلیل تأثیر مدل

یکی از مهم‌ترین ابزارهای سنجش میزان دقت مدل‌ها در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، استفاده از روش Cross-validation است. نتایج این اعتبار سنجی در قالب نمودارهایی ارائه می‌شود (Chung, 1999). چنین نمودارهایی ابزار بسیار مهمی در اثبات دقت نقشه پتانسیل زمین لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای به شمار می‌رود. نمودار موردنظر برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد. این نمودار از مقایسه موقعیت زمین لغزش‌های اتفاق افتاده با نقشه پتانسیل زمین لغزش حاصل از مدل، تهیه گردید. در بسیاری از مطالعات قبلی در زمینه زمین لغزش، از این روش اعتبار سنجی استفاده شده است (Lee, 2004; 2005).

قبلاً هم اشاره شد در مقاله حاضر با در نظر گرفتن این واقعیت که زمین لغزش‌های حوضه آبریز باراندوز چای با عوامل ژئومورفولوژی، شیب، جهت، خاک، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی در ارتباط است و عامل بارندگی به‌عنوان یک عامل فعال‌کننده عمل می‌کند، اقدام به تهیه نقشه پتانسیل زمین لغزه شده است. همچنین بررسی نمودار اعتبار سنجی مدل، نشان‌دهنده دقت خوب آن است. در شکل ۴ شیب نمودارها در ابتدا پرشیب بوده و سپس از شیب آن کاسته می‌شود. این امر بیانگر دقت خوب مدل است چون تعداد پیکسل‌های پیش‌بینی شده زیادی در داخل زمین لغزش‌های موجود مشاهده می‌شود.



شکل ۴: منحنی اعتبار سنجی مدل بر اساس کل عوامل (منحنی مشکی‌رنگ) و منحنی‌های رنگی نشان‌دهنده حذف یک‌به‌یک عوامل مؤثر است.



به منظور کمی سازی میزان دقت مدل، می توان از محاسبه مساحت بخش زیرین منحنی ها استفاده کرد (Lee, 2004; Dahal, 2008). اگر کل مساحت به ۱۰۰ درصد نزدیک باشد، بیانگر پیش بینی خوب است در حالی که مساحت زیر ۵۰ درصد، پیش بینی نادرستی را نشان می دهد. میزان آن برای حوضه باراندوز چای، ۸۰/۷۹ درصد محاسبه شد. این میزان نشان دهنده صحت بالای مدل است. علاوه بر آن در این مقاله ما به تحلیل تأثیر مدل نیز پرداختیم. برای این کار تمامی عوامل را تک به تک از مدل حذف کرده و منحنی آن ها را ترسیم کردیم (شکل ۴). با توجه به نمودار مورد نظر مشخص است که حتی با حذف یک به یک عوامل از مدل، اختلاف چندانی در نمودار نهایی ایجاد نشده است. با این وجود مساحت بخش زیرین هر یک از منحنی ها محاسبه شد (جدول ۳). از شکل ۴ و جدول زیر چنین می توان استنباط کرد شیب عامل اصلی در وقوع زمین لغزه در حوضه آبریز باراندوز چای است.

جدول ۳: مساحت زیر منحنی عوامل پس از حذف یک به یک آن ها

عامل	جهت شیب	ژئومورفولوژی	کاربری اراضی	شیب	لیتولوژی	خاک
درصد	۸۲	۸۱/۵۶	۸۰/۸۷	۷۹/۱۵	۸۰/۰۸	۸۱/۱۲

### نتیجه گیری

از طریق محاسبه وزن فاکتورهای شش گانه مؤثر بر وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای، مشخص شد که نواحی با جهت شیب جنوبی و جنوب - شرقی و همچنین مناطق کوهستانی و نیمه کوهستانی، کاربری مراتع تنک و اراضی فرسایش یافته دارای بیشترین پتانسیل وقوع زمین لغزش هستند. از طرف دیگر شیب های بیش از ۳۰ درجه نیز مستعد وقوع زیاد زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه است. در این مقاله، وقوع بارندگی به عنوان یک عامل محرک در نظر گرفته شد و عملاً در داخل مدل آماری از آن استفاده نشد. به همین دلیل در این مقاله نمی توان عامل بارش را در تهیه نقشه پتانسیل و خطر زمین لغزه دخیل دانست.

برنامه ریزان و دستگاه های اجرایی مربوطه، از نقشه های مناطق مستعد زمین لغزه به طور وسیعی استفاده می کنند. کاربرد اصلی آن را می توان در مکان یابی مناطق مناسب جهت توسعه اقتصادی خلاصه کرد. در این مقاله مشخص شد که تقریباً ۳۸ درصد از مساحت منطقه دارای خطر زیاد و خیلی زیاد زمین لغزش است. نقشه نهایی حاصل از ترکیب عوامل وزن دهی شده مختلف، پیش بینی مناسبی از وقوع زمین لغزش را نشان داد. همچنین میزان دقت و اعتبار مدل بر اساس روش های مرسوم، مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان بالای اعتبار مدل ثابت شد. نقش عامل شیب، کاربری اراضی و شرایط ژئومورفولوژیکی نقش بسیار بارز و مهمی در وقوع زمین لغزش دارند. همچنین از روش محاسبه مساحت زیر منحنی های پیش بینی کننده، اعتبار مدل بررسی شد. مساحت زیر کل منحنی ها در حدود ۸۰/۷۹ درصد محاسبه گردید. از طرف دیگر با حذف تک به تک عوامل از مدل، مشخص شد که عامل شیب در وقوع زمین لغزش اهمیت بسیار بالایی دارد. بنابراین زمانی که وزن تمامی عوامل به غیر از عامل شیب به مدل اضافه شد، وزن نهایی بسیار کاهش یافت؛ چون درصد وقوع زمین لغزش های موجود، کاهش می یابد.

روش حاضر دارای اشکالاتی نیز است که بایستی آن ها را در نظر گرفت. به عنوان مثال نقشه خطر زمین لغزش تنها بر اساس زمین لغزش های موجود تهیه می شود. بنابراین استفاده از شاخص آماری خطر زمین لغزش در حوضه آبریز باراندوز چای در رتبه بندی آن ها از لحاظ اهمیت و در نتیجه کاهش خطر زمین لغزش بسیار مفید می باشد. نتیجه دیگری که از این مقاله گرفته شد این واقعیت است که می توان عامل اصلی در وقوع زمین لغزش را با دقت بالایی مشخص کرد. در نهایت نتایج نشان می دهد که علی رغم وجود محدودیت های عملی و مفهومی و داده های دقیق، تهیه نقشه خطر زمین لغزش و همچنین ارزیابی آن می تواند در برنامه ریزی آمایش سرزمین و کاهش خطرات طبیعی و همچنین هزینه ها مؤثر واقع شود.

## منابع

- اشقلی فراهانی، علی. (۱۳۸۰). ارزیابی خطر ناپایداری دامنه‌های طبیعی در منطقه رودبار با استفاده از تئوری فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت‌معلم تهران، ۱۴۲ صفحه.
- روستایی، شهرام. احمدزاده، حسن. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی مناطق متأثر از خطر زمین‌لغزش در جاده‌ی تبریز- مرند با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره‌ی ۱، صص ۴۷-۵۸.
- سفیدگری، رضا. (۱۳۸۱). ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ (مطالعه موردی حوضه دماوند) پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۱۵۹ صفحه.
- شیرانی، کوروش، سیف، عبدالله (۱۳۹۱) پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های آماری (منطقه پیشکوه، شهرستان فریدون‌شهر)؛ مجله علوم زمین، سال بیست و دوم، شماره ۸۵، صص ۱۵۸-۱۴۹.
- شیرانی کوروش، چاوشی بروجنی ستار، غیومیان جعفر (۱۳۸۵). بررسی و ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در پادانای علیای سمیرم، دو فصلنامه مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان، دوره ۲۳، شماره ۱، صص ۳۸-۲۳.
- علی‌محمدی، صفیه. پاشایی اول، عباس. شتایی جویباری، شعبان. پارسایی، لطف‌الله. (۱۳۸۸). ارزیابی کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سید کلاته رامیان، مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، دوره شانزدهم، شماره اول، صص ۷۸-۵۹.
- فیض‌نیا، سادات؛ کلاستاقی، عطاالله؛ احمدی، حسن؛ صفایی، مراد (۱۳۸۳) بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، مجله منابع طبیعی، جلد ۵۷، شماره ۱، صص ۳-۲۲.
- کرم، عبدالامیر؛ محمودی، فرج‌اله (۱۳۸۴) مدل‌سازی کمی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در زاگرس چین‌خورده (مطالعه موردی: حوضه آبریز سرخون در استان چهارمحال و بختیاری) پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۱، صص ۱۴-۱.
- موسوی‌خطیر، سیده زهره. کاویان، عطا‌الله. سلیمانی، کریم. (۱۳۸۹). تهیه نقشه حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سجارود با استفاده از رگرسیون لجستیک، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و‌خاک، سال چهاردهم، شماره ۵۳، صص ۱۱۲-۹۹.
- موسوی‌خطیر، سیده زهره. کاویان، عطا‌الله. سلیمانی، کریم. (۱۳۸۹). تهیه نقشه حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سجارود با استفاده از رگرسیون لجستیک، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و‌خاک، سال چهاردهم، شماره ۵۳، صص ۱۱۲-۹۹.
- یمانی، مجتبی؛ حسن پور، سیروس؛ مصطفایی، ابوالفضل؛ شادمان رود پستی، مجید (۱۳۹۱) نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از مدل AHP در محیط GIS؛ جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۳، پیاپی، ۴۸، شماره ۴؛ صص ۵۶-۳۴.

- Aleotti, P and Chowdhury. R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Env* 58: 21-44.
- 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
- C. F. Chung and A. G. Fabbri, "Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, No. 12, 1999, pp. 1389-1399.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti RGuzzetti, F., Pasqui, V. & Reichenbach, P., 1991- GIS techniques and statistic models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes Landforms*. 16: 427 - 455.

- Chau, K.T and J. E. Chan. 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression for Hong Kong Island. *Landslides* 280-290.
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., Sdao, F., 2014. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy) *CATENA*, Volume 113, Pp 236-250
- Das, I et al. 2010. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology* 114: 627–637.
- E. A. Castellanos Abella and C. J. Van Western, "Qualitative Landslide Susceptibility Assessment by Multicriteria Analysis: A Case Study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba," *Geomorphology*, Vol. 94, No. 3-4, 2008, pp. 453-466.
- Feizizadeh, B., Shadman Roodposhti, M., Jankowski, P., Blaschke, T., 2014. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping *Computers & Geosciences*, Volume 73, December 2014, Pages 208-221
- Felicísimo, A., Cuartero, A., Remondo, J., Quirós, E., 2013. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study, *J of Landslide*, 10:175–189
- Hassanali Faraji Sabokbar, H.A., Shadman Roodposhti, M., Tazik, E., 2014. Landslide susceptibility mapping using geographically-weighted principal component analysis *Geomorphology*, Volume 226, Pp15-24
- Komac, B., and Matija Z. 2008. Statistical landslide susceptibility modeling on a national scale: the example of Slovenia. IAG regional conference on geomorphology landslides, floods and global environmental change in mountain regions, Brasov.
- Lan, H. X and et al. 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology* 76: 109- 128.
- Lee S, Sambath T. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environ Geol* 50: 847–855.
- Lee S, Sambath T. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environ Geol* 50: 847–855.
- Melchiorre, C et al. 2008. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation, *Geomorphology* 94: 379–400.
- Pachauri .A. K & M. Pant, 1992, *Landslide Hazard Mapping Based on Geological Attributes*, *Engineering Geology*, 32: 81-100
- R. Chowdhury and P. Flentje, "Role of Slope Reliability Analysis in Landslide Risk Management," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 62, No. 1, 2003, pp. 41-46.
- R. Dahal, S. Hasegawa, A. Nonomura, M. Yamanaka, T. Masuda and K. Nishino, "GIS-Based Weights-of-Evidence Modelling of Rainfall-Induced Landslides in Small Catchments for Landslide Susceptibility Mapping," *Environmental Geology*, Vol. 54, No. 2, 2008, pp. 314-324.
- S. Lee and J. A. Talib, "Probabilistic Landslide Susceptibility and Factor Effect Analysis," *Environmental Geology*, Vol. 47, No. 7, 2005, pp. 982-990.
- S. Lee and N. T. Dan, "Probabilistic Landslide Susceptibility Mapping in the Lai Chau Province of Vietnam: Focus on the Relationship between Tectonic Fractures and Landslides," *Environmental Geology*, Vol. 48, No. 6, 2005, pp. 778-787.
- S. Lee, "Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping in GIS," *Environmental Management*, Vol. 34, No. 2, 2004, pp. 223-232.
- Samodra, G., Chen, G., Sartohadi, J., Kasama K., 2015. Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta, Java *Geomorphology*, In Press, Corrected Proof, Available online 29 July 2015.
- Van Western, C. J. 1997. Statistical landslide hazard analysis. *ILWIS 2.1 for windows applications guide*. ITC publication, Enschede, 73-84.