

## ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های آماری لجستیک و ناپارامتریک به منظور مدیریت مناطق حساس به حرکات توده‌ای در حوضه آبریز گویجه بل

صغری اندریانی<sup>۱</sup> - دانشجوی دکتری مدیریت محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
دکتر محمدحسین رضایی مقدم - استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
خلیل ولیزاده کامران - استادیار سنجش‌ازدور، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
ویدا برزگر - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و GIS دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۲۴

### چکیده

شناسایی مناطق مستعد حرکات توده‌ای از جمله زمین‌لغزش از طریق مدل‌سازی خطر با مدل‌های مناسب و کارا، یکی از اقدامات اساسی در کاهش خسارت احتمالی و مدیریت خطر است. زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از انواع حرکات توده‌ای، فرایند پیچیده‌ای است که تحت تأثیر پارامترهای داخلی و خارجی روی می‌دهد که شناخت این پارامترها و میزان تأثیرشان در وقوع مخاطرات و استفاده از ابزارهای مناسب برای کمی‌سازی، برنامه‌ریزی و مدیریت را در برنامه‌ریزی‌های توسعه و مدیریت بهینه منطقه به‌ویژه مناطق کوهستانی در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی یاری می‌کند. هدف از مطالعه حاضر بررسی وقوع بالقوه زمین‌لغزش در حوضه گویجه‌بل با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پرسپترون چند لایه به منظور شناخت مناطق حساس به وقوع پدیده مذکور می‌باشد. برای مدل‌سازی از ۹ پارامتر مستقل اعم از لایه بارش، لیتولوژی، پوشش و کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از گسل و فاصله از جاده استفاده گردید. بعد از استانداردسازی فازی هر یک از پارامترها، نه فاکتور به‌عنوان متغیر مستقل و زمین‌لغزش‌های رخ داده نیز به‌صورت یک لایه باینری و به‌عنوان متغیر وابسته برای مدل رگرسیون لجستیک؛ همچنین فاکتورهای استاندارد شده به‌عنوان نرون‌های ورودی و زمین‌لغزش‌های رخ داده به‌عنوان آموزش دهنده مدل شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پرسپترون چند لایه معرفی گردید. نتیجه اعتبارسنجی ROC نشان می‌دهد مساحت زیر منحنی در مدل شبکه عصبی مصنوعی بیشتر از مدل رگرسیون لجستیک بوده است و دقت برابر با ۰/۹۱ را نسبت به رگرسیون لجستیک

با دقت ۰/۸۹ نشان می‌دهد. همچنین ۹ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد و ۹/۵ درصد جزو پهنه‌های خطر متوسط می‌باشد. پهنه‌های خطر متوسط می‌توانند با سومدیریت و ساخت و سازهای عوارض انسانی از جمله جاده تحت تأثیر قرار گرفته و به پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد تبدیل گردند.

**کلیدواژه‌ها:** مدل رگرسیون لجستیک، چند لایه پرسپترون، زمین‌لغزش، استانداردسازی فازی، حوضه گویجه بل.

#### ۱. مقدمه

حرکات توده‌ای یکی از مخرب‌ترین خطرات طبیعی در مناطق کوهستانی هست که آسیب‌های زیادی به زندگی انسان‌ها و زیرساخت‌ها با خسارت‌هایی بالغ بر میلیون‌ها دلار در سراسر جهان وارد می‌کنند (راغوانشی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۵۹۵؛ پن<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۸۷؛ کانونگو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۶: ۳۶۶؛ کروزیئر<sup>۴</sup> و گلید، ۲۰۰۵: ۲). در ایران نیز آمار ثبت شده توسط وزارت جهاد کشاورزی نشان می‌دهد که تا اوایل سال ۱۳۷۸، وقوع حدود ۲۵۹۰ حرکت توده‌ای و لغزش در کشور باعث مرگ ۱۶۲ نفر، تخریب ۱۷۶ خانه و ایجاد خسارات مالی به میزان ۱۸۶۶ میلیارد ریال، تخریب ۶۷۶ هکتار جنگل و تخریب ۱۷۰ کیلومتر راه ارتباطی شده است (گروه بررسی زمین‌لغزه‌های جهاد سازندگی، به نقل از رأفت نیا و همکاران، ۱۳۹۰: ۵۴).

زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از انواع حرکات توده‌ای فرایند پیچیده‌ای است که تحت تأثیر پارامترهای داخلی و خارجی روی می‌دهد. پارامترهای داخلی مؤثر در پایداری دامنه‌ای از جمله فاکتورهای زمین‌شناسی (لیتولوژی یا نوع خاک)، شکل دامنه<sup>۵</sup> (جهت شیب و ارتفاع) و کاربری و پوشش اراضی (ونگ و نیو<sup>۶</sup>، ۲۰۰۹: ۲۰۵۹؛ آیالیو و یاماگیشی<sup>۷</sup>، ۲۰۰۴: ۱۱۵؛ آنبالاگان<sup>۸</sup>، ۱۹۹۲: ۲۷۶) می‌باشد. عمده پارامترهای خارجی مؤثر نیز زمین‌لرزه‌ها (بومر<sup>۹</sup>، ۲۰۰۲: ۲۱۹؛ کیفر<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۰: ۲۴۸)، بارش (داهالا<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۶: ۵۱۳؛ کالیسان<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۰: ۲۱۷) و فعالیت‌های انسانی می‌باشد (ونگ و نیو، ۲۰۰۹: ۲۰۶۰). مطالعه و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری در مناطق کوهستانی،

1 Raghuvanshi

2 Pan

3 Kanungo

4 Crozier & Glade

5 Slope Geometry

6 Wang & Niu

7 Ayalew & Yamagishi

8 Anbalagan

9 Bommer

10 Keefer

11 Dahal

22 Collison

اولین قدم در کاهش میزان اثرات لغزش‌ها و ایجاد اطمینان لازم برای برنامه‌ریزی‌ها و انجام کارهای عمرانی است (خطیبی بیاتی، ۱۳۸۹: ۲)؛ به عبارت دیگر ارزیابی خطر، اولین مرحله از مدیریت و کاهش خطر است. ارزیابی خطر زمین لغزش احتمال وقوع آن‌ها را در یک مکان با یک دوره برگشت برآورد می‌کند (ون وسترن<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶: ۱۶۸). برای چنین مطالعه و ارزیابی‌ها شناختن رابطه بین پارامترهای محیطی و لغزش‌های رخ داده اولین قدم می‌باشد تا بدین طریق بتوان مناطق حساس به وقوع زمین لغزش را مورد شناسایی قرار داد. سپس کیفیت و مقیاس داده‌های مورد استفاده و همچنین مدل مناسب برای ارزیابی نیز دارای اولویت اساسی به‌ویژه در مناطق کوهستانی است؛ هرچند داده‌های سنجش‌ازدور تا حدی مشکلات مربوط به تأمین داده مربوط به مناطق کوهستانی را رفع کرده است. با استفاده از مدل‌های مختلفی می‌توان نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش را به‌منظور شناخت حساسیت‌های موجود در منطقه تهیه نمود (آنبالاگان، ۱۹۹۲؛ پاچوری<sup>۲</sup> و پنت، ۱۹۹۲؛ گاریت<sup>۳</sup>، ۱۹۹۴؛ گانگ<sup>۴</sup>، ۱۹۹۶ ص‌حاه<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). اکثر روش‌های مورد استفاده بر اساس نمونه‌های تعلیمی و اختصاص وزن بر هر یک از پارامترها و زیر پارامترها، رابطه بین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش و تحلیل‌های مکانی را برقرار می‌سازند. ازجمله این روش‌ها می‌توان رگرسیون لجستیک و تحلیل آماری چند متغیره، شبکه عصبی مصنوعی، مدل فازی و مدل فازی عصبی اشاره کرد (دای<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۰؛ هانگ<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). ونگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های رگرسیون لجستیک، تحلیل آماری دو متغیره و رگرسیون زبانه‌دار تطبیقی چند متغیره<sup>۸</sup> اقدام به پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین لغزش در شهر میزونامی کشور ژاپن نمودند و مدل تطبیقی را نسبت به دیگر مدل‌های مورد استفاده کارآمد معرفی کردند. هانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های رگرسیون لجستیک، درخت تصمیم‌گیری و ماشین بردار پشتیبان منطقه بیهانگ چین را از نظر پتانسیل وقوع زمین لغزش مورد پهنه‌بندی قرار داده و در سطح اطمینان ۹۵ درصد روش درخت تصمیم‌گیری را بهترین روش با استفاده از ۱۴ فاکتور معرفی نمودند. چوآی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۲) با ترکیب روش‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مناطق حساس به زمین لغزش در منطقه‌ای از کشور کره مناطق حساس به زمین لغزش را پهنه‌بندی نمودند. در مطالعه مذکور روش شبکه عصبی به‌عنوان دقیق‌ترین روش معرفی گردید. یمانی و همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از الگوریتم‌های مختلف ماشین بردار پشتیبان و شش لایه ازجمله شیب و لیتولوژی، ... اقدام به پهنه‌بندی حوضه آبریز درکه از لحاظ پتانسیل رخداد

1 Van Westen

2 Pachauri &amp; Pant

3 Garrett

4 Gong

5 Saha

6 Dai

7 Hung

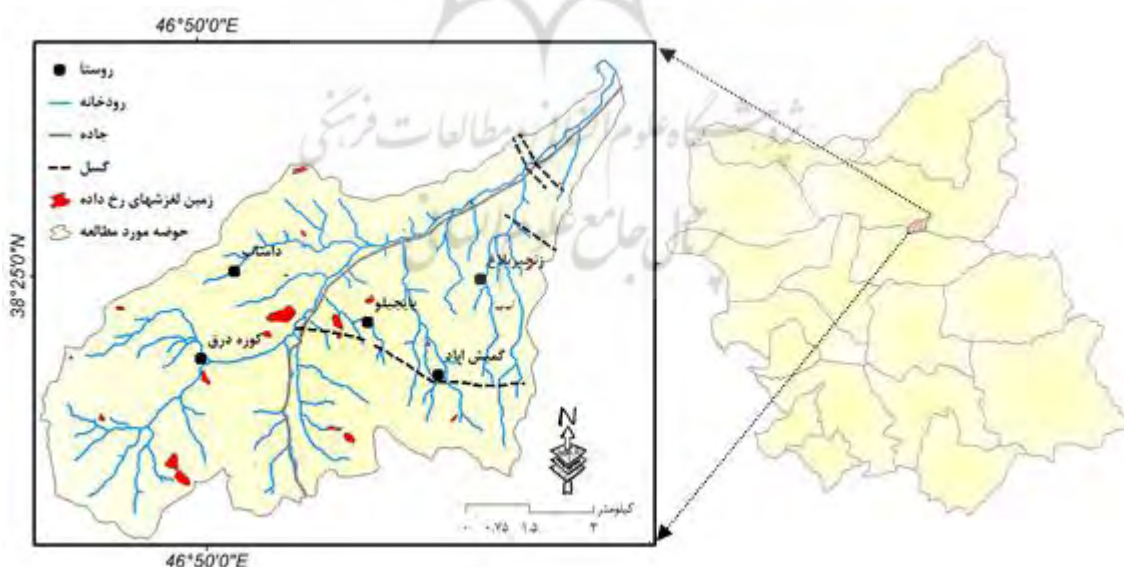
8 Multivariate adaptive regression splines

9 Choi

زمین لغزش نمودند که نتیجه حاصل انطباق بیشتر الگوریتم حلقوی با واقعیت زمینی بود. رجبی و فیض اله پور (۱۳۹۳) حوضه گیوی چای را از لحاظ پتانسیل وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و لایه‌های شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، فاصله از گسل، شبکه هیدروگرافی، کاربری اراضی پهنه‌بندی نمودند. در تحقیق حاضر روش‌های رگرسیون لجستیک به‌عنوان روشی آماری که بین پارامتر وابسته و پارامتر مستقل رابطه متقابل ایجاد می‌کند و همچنین روش شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پرسپترون چند لایه، که با استفاده از داده‌های تعلیمی تستی و آموزشی و بر اساس توابع غیر خطی به هر یک از عوامل مؤثر در زمین لغزش وزنی اختصاص می‌دهد؛ به‌منظور مدیریت بهینه در حوضه گیویچه بل مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲. منطقه مورد مطالعه

واحد مطالعاتی گیویچه بل با وسعتی معادل  $74/62$  کیلومترمربع در  $10$  کیلومتری جنوب غرب شهرستان اهر واقع شده است. این حوضه بخشی از حوضه آبریز رودخانه اهرچای است که در محدوده  $21/26''$ ،  $47$ ،  $46''$  تا  $53/64''$ ،  $56$ ،  $46''$  طول شرقی و  $21$ ،  $38'$  تا  $39/04$ ،  $27$ ،  $38'$  عرض شمالی واقع گردیده است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب  $2495$  و  $1373$  متر از سطح مبنا می‌باشد. راه اصلی دسترسی به این منطقه جاده اصلی تبریز- اهر می‌باشد که این جاده از جنوب حوضه در محدوده گردنه گیویچه بل به‌صورت جنوبی- شمالی وارد آن شده و در راستای شمال شرق در محدوده خروجی حوضه از آن خارج می‌گردد. شکل شماره ۱ موقعیت منطقه، گسل‌ها، جاده، مناطق سکونتی و زمین لغزش‌های رخ داده در حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز گیویچه بل نسبت به استان آذربایجان شرقی و لغزش‌های رخ داده

## ۳. مواد و روش‌ها

داده‌های اسنادی مشتمل بر مطالعات کتابخانه‌ای، نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی خواجه با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، ثبت نقاط زمین‌لغزش از روی تصویر ماهواره‌ای کوئیک برد، داده‌های حاصل از مشاهده میدانی و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به تاریخ ۲۰۱۴/۲۶/۰۵ به منظور استخراج نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه، داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و کلیماتولوژی به منظور تهیه لایه بارش (جدول شماره ۱)، همچنین نرم‌افزارهای Arc GIS و IDRISI نیز به عنوان ابزار مورد نیاز روش تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام روش‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر ابتدا نقشه‌های عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش که عبارت بود از: فاکتورهای استاتیک لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب و فاکتورهای دینامیک فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، کاربری و پوشش اراضی تهیه و استخراج گردید.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده برای تهیه لایه بارش

نام ایستگاه	سازمان بهره‌برداری	طول		عرض		ارتفاع به متر	نوع ایستگاه
		درجه	دقیقه	درجه	دقیقه		
اهر	وزارت نیرو	۴۷	۰۳	۳۸	۲۸	۱۳۵۰	باران سنجی
تازه کند (اهر)	وزارت نیرو	۴۷	۱۳	۳۸	۲۶	۱۲۱۵	باران سنجی
وردین	وزارت نیرو	۴۷	۰۲	۳۸	۴۵	۱۴۰۰	تبخیر سنجی
بستان‌آباد	وزارت نیرو	۴۶	۴۹	۳۷	۵۱	۱۷۰۰	باران سنجی
نهند	وزارت نیرو	۴۶	۲۹	۳۸	۰۹	۱۵۰۰	باران سنجی
ارشتاب	وزارت نیرو	۴۶	۴۰	۳۷	۵۵	۱۹۵۰	تبخیر سنجی
سینوپتیک اهر	سازمان هواشناسی	۴۷	۴	۳۸	۲۶	۱۳۹۰٫۵	سینوپتیک
سینوپتیک تبریز	سازمان هواشناسی	۴۶	۱۷	۳۸	۵	۱۳۳۱	سینوپتیک
کلیماتولوژی اهر	سازمان هواشناسی	۴۷	۳	۳۸	۲۹	۱۱۵۷	کلیماتولوژی
کسائق	سازمان هواشناسی	۴۶	۵۱	۳۸	۳۱	۱۶۲۹	باران سنجی
سارائی	سازمان هواشناسی	۴۶	۵۶	۳۸	۱۳	۱۵۵۰	باران سنجی

داده‌های حاصل از ایستگاه‌های جدول ۱ بعد از تطویل و تکمیل دوره آماری بیست ساله و آزمون همگنی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی تغییرات مکانی بارندگی و به دست آوردن گرادیان بارندگی منطقه با توجه به این موضوع که بین ارتفاع و بارش همبستگی و رابطه خطی وجود دارد، بین متوسط بارندگی سالانه ایستگاه‌های مورد استفاده و ارتفاع ایستگاه‌های مذکور از سطح دریا (با حذف ایستگاه‌های پرت) رابطه همبستگی برقرار گردید.

فازی سازی فاکتورهای مؤثر: در تحقیق حاضر به منظور استانداردسازی فاکتورهای پیوسته و گسسته از مجموعه فازی معرف کاربر<sup>۱</sup> استفاده گردید (بوروف<sup>۲</sup>، ۱۹۸۹؛ اسپموکر<sup>۳</sup>، ۱۹۸۲: ۷). در این استانداردسازی وزن ۱ به زیرمعیار دارای تناسب بیشتر با رخداد زمین لغزش و وزن صفر به کمترین تناسب در رخداد مذکور داده شد. بدین منظور با استفاده از روش هیستوگرام و تحلیل مکانی، تک تک کلاس های معیارها با لایه وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه قطع داده شدند.

رگرسیون لجستیک<sup>۴</sup> از جمله روش های آماری پیش بینی کننده می باشد که با استفاده از متغیرهای مستقل، روند گسترش متغیر وابسته را پیش بینی می کند. در تحقیق حاضر که رویکردهای سیستم اطلاعات جغرافیایی بکار گرفته شد معیارهای مستقل و وابسته به صورت رستری (تصویر که جزء کوچک آن را پیکسل تشکیل می دهد) تبدیل گردید. متغیر وابسته به عبارتی زمین لغزش های روی داده به صورت یک لایه باینری (صفر و یک) و متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر در زمین رخ داد زمین لغزش) به صورت لایه های استاندارد شده فازی (صفر تا یک) و یا طبقه بندی شده در نظر گرفته شد. البته لازم به ذکر است که متغیر وابسته با کلاس یک دنبال کننده منحنی لجستیک می باشد.

برای اعتبارسنجی مدل رگرسیون لجستیک از شاخص های Pseudo RSquare، Chi Square و ROC<sup>۵</sup> استفاده گردید. در ضمن لازم به ذکر است برای بررسی عملکرد رگرسیون لجستیک و به منظور اعتبارسنجی مدل رگرسیونی ۱۰ درصد از کل پیکسل های تصویر که به صورت تصادفی سیستماتیک انتخاب گردیده بود در برازش این مدل مورد استفاده قرار گرفت (اندریانی، ۱۳۹۳: ۱۴۸).

آزمون Pseudo R Square برای برازش مجموعه داده ها مورد استفاده قرار می گیرد و از رابطه ۱ محاسبه می گردد:

$$\text{PR2} = 1 - \frac{2 \log(\text{Likelihood})}{2 \log(L_0)} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱،  $\log(\text{Likelihood})$  مقدار تابع احتمال برای مدل کامل زمانی برازش و  $\log(L_0)$  مقدار تابع احتمال می باشد به شرطی که تمامی ضرایب به غیر از عرض از مبدأ، صفر باشد. مقدار PRSquare مساوی یک نشان دهنده برازش کامل مدل بوده و مقدار صفر نشان دهنده عدم وجود رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل می باشد. مقدار بزرگ تر از ۰/۲ نشان دهنده برازش نسبتاً خوب مدل است (کلارک و هوسکینگ<sup>۶</sup>، ۱۹۸۶؛ آیالو و یاماگیشی، ۲۰۰۴).

آزمون Chi Square از اختلاف بین  $-2 \log(\text{Likelihood})$  برای مدل بهترین برازش و  $-2 \log(L_0)$  برای فرضیه صفر به دست می آید. در صورت بزرگ تر بودن این شاخص از مقدار عددی ۱/۴، فرضیه صفر رد می گردد. فرضیه

1 User Defined

2 Burrough

3 Schmucker

4 Logistic Regression

5 Relative Operating Characteristic

6 Clark & Hosking

مورد بررسی این آزمون، صفر فرض کردن همه ضرایب به غیر از عرض از مبدأ<sup>۱</sup> می‌باشد. ROC شاخص آماره برتری برای اندازه‌گیری برازش نیکویی رگرسیون لجستیک و دیگر روش‌های آماری می‌باشد. دامنه عددی آن بین صفر تا یک متغیر بوده طوری که عدد یک نشان‌دهنده برازش کامل و عدد ۰/۵ نشان‌دهنده برازش تصادفی است. پیش‌بینی شبکه عصبی پرسپترون: در اکثر پیش‌بینی‌ها، شبکه‌های عصبی پرسپترون سه لایه با توجه به کاربرد زیاد آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروجی شبکه، با مقدار مطلوبی که از شبکه انتظار می‌رود مقایسه شده و با تغییر در نرون‌های ارتباط دهنده نرون‌ها در شبکه تعدیل می‌شود که برای این کار از الگوریتم پس انتشار<sup>۲</sup> خطا استفاده می‌کند تا با استفاده از گرادینت تابع هزینه، وزن‌های شبکه را برای کاهش میزان خطای شبکه تعدیل کند و تا خطای موجود به ازای تمامی نمونه‌های آموزشی به یک مقدار حداقل که برای شبکه از قبل تعیین شده نرسد، این کار ادامه می‌یابد. این الگوریتم از تابع سیگموئیدی<sup>۳</sup> به‌عنوان تابع غیرخطی استفاده می‌کند و از آنجایی که قاعده پس انتشار به مشتق‌گیری نیاز دارد تابع سیگموئیدی به علت داشتن خاصیت مشتق‌پذیری این شرایط را فراهم می‌آورد. این الگوریتم دارای دو گام اساسی انتشار رو به جلو<sup>۴</sup> و رو به عقب<sup>۵</sup> می‌باشد. انتشار رو به جلو با رابطه (۲) قابل بیان است.

$$O_j = 1 / (1 + e^{-\lambda \text{net}_j}) \quad \text{رابطه ۲}$$

$O_j$  خروجی برای ورودی  $j$ ، شیب تابع تبدیل و  $\text{net}_j$  از رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$\text{net}_j = \sum_i w_{ij} o_i \quad \text{رابطه ۳}$$

$w_{ij}$  وزن داده شده از واحد  $j$  تا  $i$  و خروجی واحد  $i$  (شالکوف<sup>۶</sup>، ۱۹۹۷: ۵۶۵).

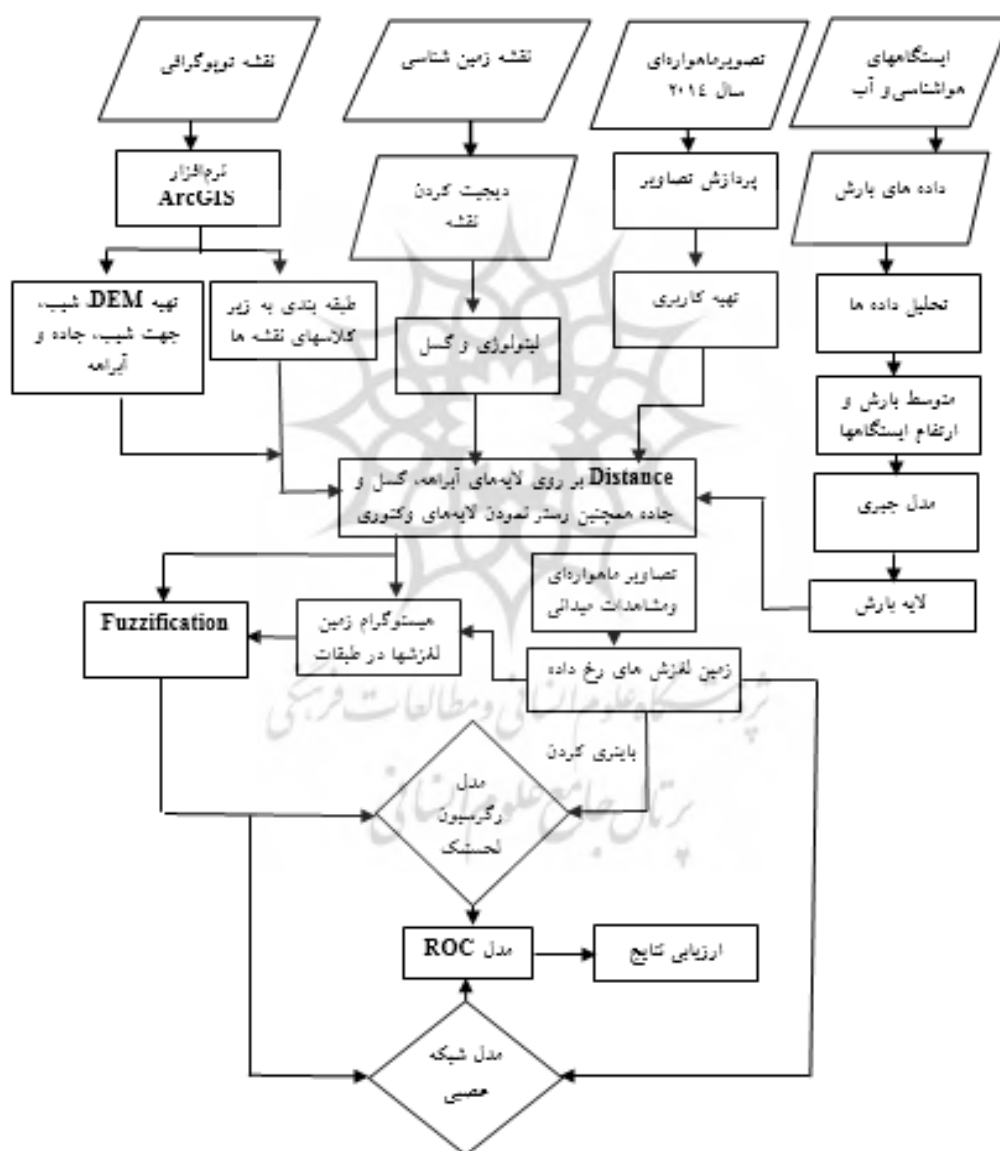
هرگونه اختلاف به عبارتی خطا در شبکه، بین خروجی شبکه با خروجی مورد انتظار که به شبکه پس انتشار می‌شود از رابطه ۴ قابل بیان است. این فرایندها مکرر تکرار می‌گردد تا خطاهای شبکه به حداقل یا به مقدار قابل قبول برسد (آتکینسون<sup>۷</sup> و همکاران، ۱۹۹۷: ۷۰۰).

$$\Delta w_{ij}(t+1) = \eta(\delta_j O_i) + \alpha \Delta w_{ij}(t) \quad \text{رابطه ۴}$$

$\eta$ : ضریب یادگیری<sup>۸</sup>،  $\delta_j$ : شاخص نرخ تغییر در خطا،  $\alpha$ : ضریب شتاب<sup>۹</sup>

- 1 Intercept
- 2 Back Propagation
- 3 Sigmoid
- 4 Forward Propagation
- 5 Backward Propagation
- 6 Shalkoff
- 7 Atkinson
- 8 Learning Rate
- 9 Momentum Rate

در پیش‌بینی نواحی مستعد زمین‌لغزش با استفاده از روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش به‌عنوان نرونهای ورودی و متغیرهای مستقل؛ همچنین لایه زمین‌لغزش‌های رخ داده به‌عنوان لایه وابسته و آموزش دهنده شبکه وارد محیط نرم‌افزار ادیسی گردید. کاربری و پوشش اراضی منطقه نیز با روش مذکور از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ استخراج گردید. بدین منظور باندهای تصویر به‌عنوان نرونهای ورودی و نقاط تعلیمی برداشتی از منطقه مورد مطالعه به‌عنوان آموزش دهنده مدل معرفی گردید شکل شماره ۲ ترتیب مراحل روش تحقیق را نشان می‌دهد.

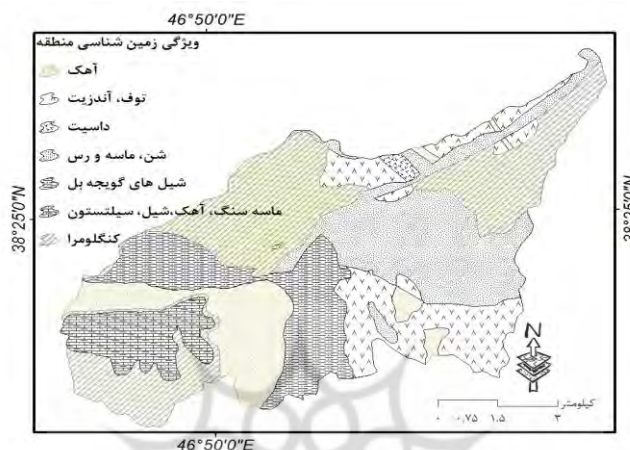


شکل ۲. فلوچارت روش تحقیق



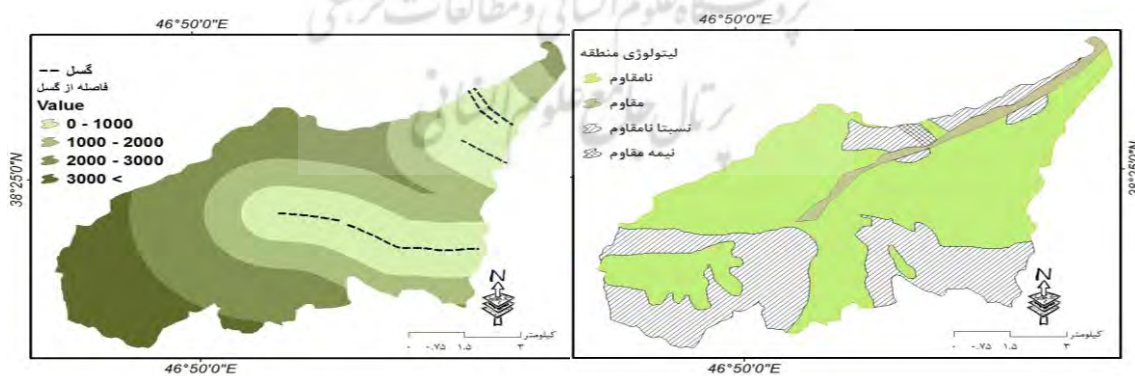
## ۴. بحث و نتایج

برای انجام روش‌های مذکور در بخش مواد و روش، نقشه پارامترهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش تهیه گردید. زمین‌شناسی منطقه به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در وقوع به‌شمار می‌رود و تنوع آن اغلب باعث اختلاف در پایداری و مقاومت سنگ‌ها و همچنین تنوع جنس خاک می‌شود (آیالو و یاماگیشی، ۲۰۰۴: ۱۱۴).



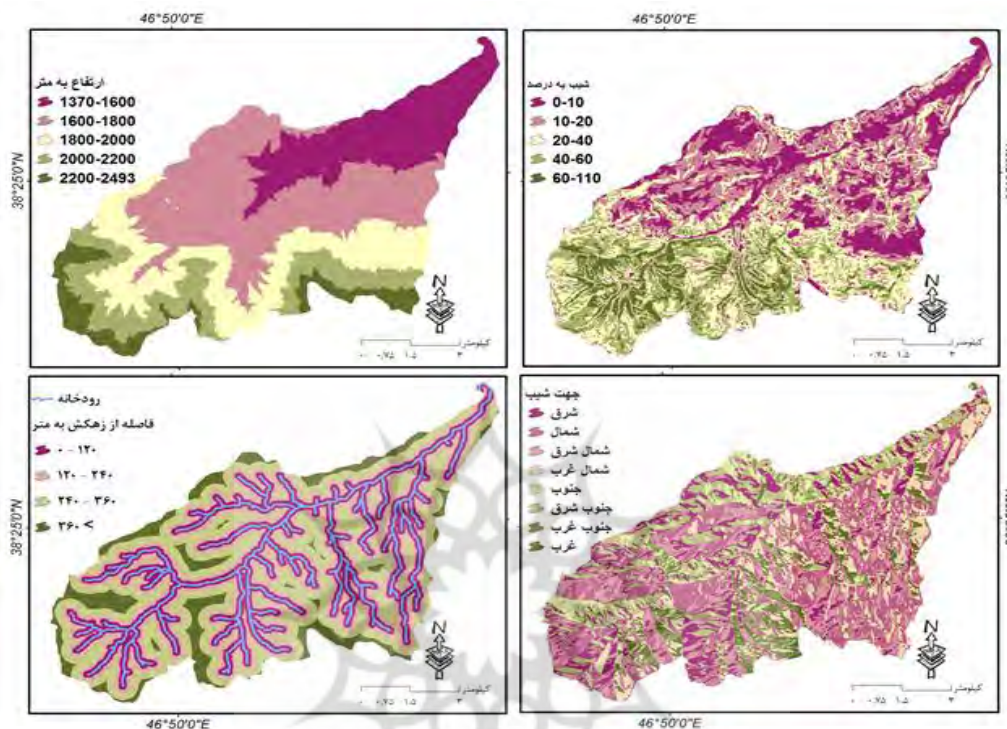
شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، لایه لیتولوژی منطقه با توجه به مقاومت سنگ‌های موجود تهیه گردید که شکل شماره ۴ به‌عنوان لایه مؤثر در زمین‌لغزش در نظر گرفته شد. در لایه لیتولوژی سنگ‌ها بر اساس مقاومتشان به چهار گروه تقسیم گردید. همچنین گسل‌های منطقه نیز از نقشه زمین‌شناسی منطقه رقومی سازی شده و فاصله از گسل‌های موجود در شکل شماره ۴ نشان داده شده است



شکل ۴. نقشه لیتولوژی و فاصله از گسل‌های منطقه مورد مطالعه

نقشه ارتفاع: با استفاده از نقشه توپوگرافی لایه رقومی ارتفاعی، لایه شیب، جهت شیب، لایه زهکشی منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. شکل های شماره ۵ به ترتیب نقشه لایه های ذکر شده را نشان می دهند.



شکل ۵. نقشه های ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب و فاصله از زهکش رودخانه منطقه مورد مطالعه

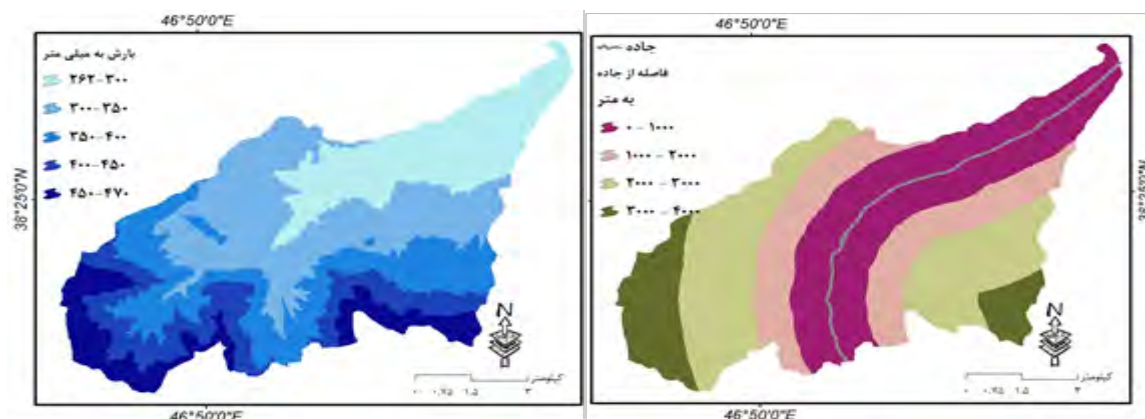
نقشه میزان بارش که با استفاده از رابطه خطی بین میانگین بارش بیست ساله ایستگاه های مورد استفاده و ارتفاع منطقه به دست آمد در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. این رابطه به صورت  $P = 0.1849H + 8.1902$  به دست آمده که دارای ضریب همبستگی  $r = 0.811$  می باشد و در سطح ۱٪ معنی دار است. در این رابطه:

$H$ : ارتفاع ایستگاه (منطقه) از سطح دریا بر حسب متر

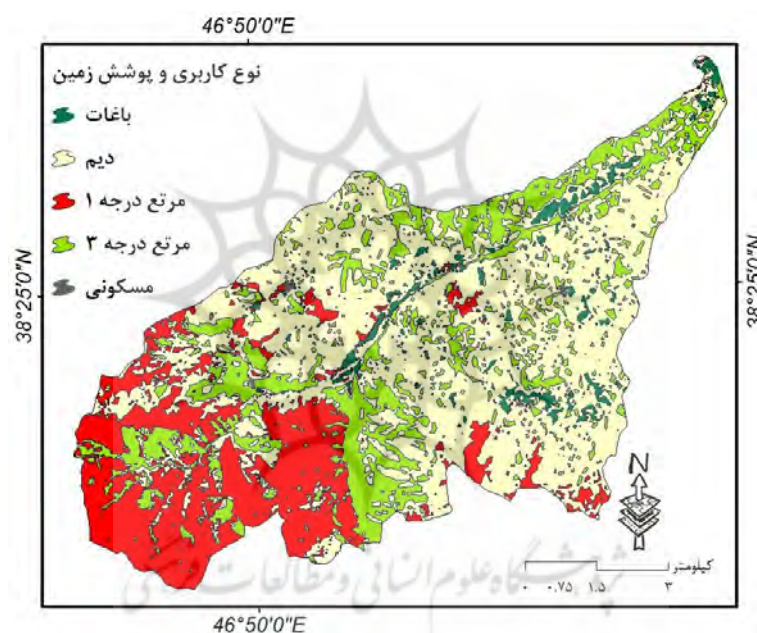
$P$ : میزان بارندگی ایستگاه (منطقه) بر حسب میلی متر می باشد.

لازم به ذکر است که در شکل شماره ۶ علاوه بر نقشه سطوح همبارش، نقشه فاصله از جاده اصلی نیز نشان داده شده است.

نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه که با استفاده از روش شبکه عصبی با الگوریتم پرسپترون چندلایه مورد طبقه بندی قرار گرفت در شکل شماره ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶. نقشه‌های سطوح هم‌باران و فاصله از جاده اصلی منطقه مورد مطالعه



شکل ۷. نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه

در مرحله بعدی کار، تک‌تک لایه‌های استخراج شده با لایه زمین‌لغزش‌های رخ داده قطع داده شد و بر اساس هیستوگرام و مساحت وقوع زمین‌لغزش‌ها در هر یک از طبقات لایه‌ها در برخی لایه‌ها مانند جهت شیب طبقه‌بندی مجدد صورت گرفت. به عبارتی بر اساس هیستوگرام وقوع زمین‌لغزش‌ها در هر یک از طبقات موجود، فازی‌سازی انجام گرفت. جدول شماره ۲ نتیجه حاصل از هیستوگرام هر یک از طبقات همچنین فازی‌سازی آن‌ها و درجه عضویت هر یک از طبقات را نشان می‌دهد.

جدول ۲. تعریف طبقات هر فاکتور، میزان مساحت زمین لغزش‌های رخ داده در هر طبقه (در واحد هکتار) و استانداردسازی فازی آن‌ها

فاکتور	طبقات	مساحت لغزش‌های رخ داده (هکتار)	شماره طبقه	وزن فازی سازی (۱ - ۰)
ارتفاع (متر)	۱۳۰۰-۱۶۰۰	۰/۳۸	۱	۰/۱
	۱۶۰۰-۱۸۰۰	۳۹/۶	۴	۱
	۱۸۰۰-۲۰۰۰	۷/۲	۲	۰/۴
	۲۰۰۰-۲۲۰۰	۲۱/۱	۳	۰/۷
	۲۲۰۰-۲۵۰۰	۰/۰۴	۱	۰/۱
جهت شیب	شمال	۵/۸	۱	۰/۲۵
	شمال شرق	۵/۱	۱	۰/۲۵
	شرق	۱۰/۵	۳	۰/۸
	جنوب شرق	۱۰/۶	۳	۰/۸
	جنوب	۹/۸	۳	۰/۸
	جنوب غرب	۷/۳	۲	۰/۵
	غرب	۱۲/۱	۴	۱
	شمال غرب	۷/۸	۲	۰/۵
شیب (درصد)	۰-۱۰	۰/۷	۱	۰/۱
	۱۰-۲۰	۱۳/۶	۲	۰/۵
	۲۰-۳۰	۲۳/۶	۴	۱
	۳۰-۶۰	۱۴/۰۱	۲	۰/۵
	۶۰-۱۱۰	۱۶/۴	۳	۰/۷
	نامقاوم	۴۰/۳	۴	۱
لیتولوژی	مقاوم	۲/۲	۲	۰/۲
	نسبتاً نامقاوم	۲۵/۸	۳	۰/۷
	نیمه مقاوم	۰	۱	۰
	۰-۱۲۰	۱۱/۵	۲	۰/۴
	۱۲۰-۲۴۰	۱۷/۸	۳	۰/۶
	۲۴۰-۳۶۰	۳۳/۴	۴	۱
	۳۶۰-۹۰۰	۵/۵	۱	۰/۱۵
فاصله از رودخانه (متر)				

## ادامه جدول ۲.

فاکتور	طبقات	مساحت لغزش‌های رخ داده (هکتار)	شماره طبقه	وزن فازی سازی (۱ - ۰)
فاصله از رودخانه (متر)	۰-۱۰۰۰	۲۹/۴	۴	۱
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۱۰/۲	۲	۰/۴
فاصله از جاده (متر)	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۲۵/۰۶	۳	۷/۰
	۳۰۰۰-۴۰۰۰	۳/۷	۱	۰/۱۵
	۰-۱۰۰۰	۳۰/۷	۴	۱
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۲/۸	۱	۰/۱
فاصله از گسل (متر)	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۱۵	۲	۰/۵
	۳۰۰۰ <	۱۹/۸	۳	۰/۷
	۲۶۲-۳۰۰	۰/۰۶	۱	۰
	۳۰۰ - ۳۵۰	۴۱/۱	۴	۱
بارش (میلی‌متر)	۳۵۰ - ۴۰۰	۲۲/۲	۳	۰/۸
	۴۰۰ - ۴۵۰	۴/۷	۲	۰/۳
	۴۵۰ - ۴۷۰	۰	۱	۰

با توجه به جدول شماره ۲ بر روی لایه‌های موجود، طبقه‌بندی مجدد سپس فازی سازی هر یک از طبقات لایه‌ها صورت گرفت. این لایه‌ها بر اساس رابطه ۵ مستخرج شده از مدل رگرسیون لجستیک مدل‌سازی گردید. شکل شماره ۸ نتیجه حاصل از پهنه‌بندی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک را نشان می‌دهد.

رابطه ۵

$$\text{Logit0} = -9.6824 + 1.337809 * \text{شیب زمین} + 1.082814 * \text{فاصله از جاده} + 1.813998 *$$

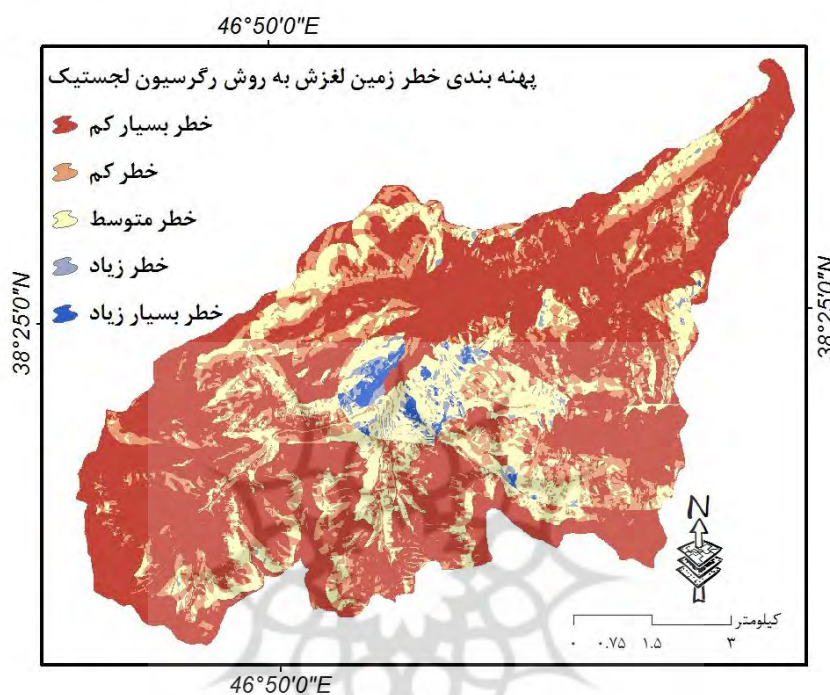
$$+ \text{فاصله از رودخانه} * 1.049866 - \text{میزان بارش} * 1.517673 - \text{لیتولوژی} * 0.444471 + \text{کاربری و پوشش زمین} +$$

$$* 1.378132 \text{ فاصله از گسل} + 3.434163 * \text{ارتفاع} + 1.353859 * \text{جهت شیب}$$

با توجه به رابطه فوق به ترتیب شیب زمین، و جهت شیب، فاصله از گسل، لیتولوژی و ارتفاع بیشترین نقش را در ایجاد زمین‌لغزش‌های رخ داده داشته‌اند. به‌ویژه ارتفاع که نقش بارزتری را داشته است. میزان اعتبارسنجی مدل رگرسیون لجستیک با استفاده از شاخص‌های  $\text{PR2}$ ،  $\text{Chi}^2$  در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. مقدار شاخص‌های مورد استفاده برای اعتبارسنجی

شاخص‌ها	Pseudo R_square	ChiSquare
مقادیر	۰/۳۱	۸۵۴

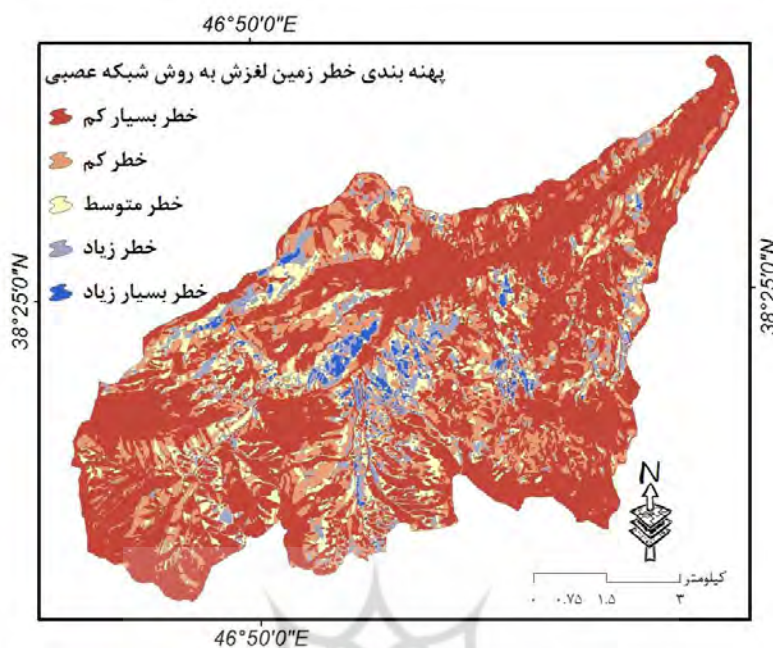


شکل ۸. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک

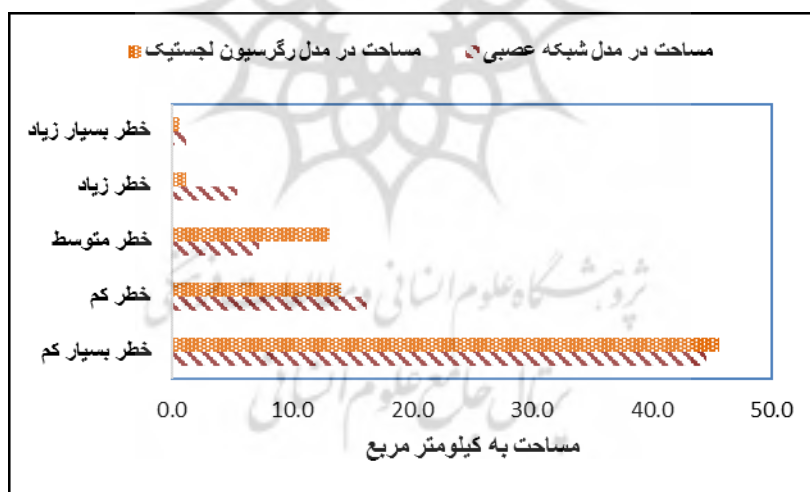
برای دستیابی به شبکه بهینه و بالاترین صحت نقشه پیش‌بینی مناطق حساس به زمین‌لغزش در روش شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پرسپترون چندلایه مقادیر متفاوتی برای شاخص‌های شبکه در نظر گرفته شد و صحت آن‌ها با استفاده از آزمون و خطا ارزیابی گردید. در نهایت مقادیر شاخص‌های بهینه طبق جدول شماره ۴ مورد استفاده قرار گرفت. شکل شماره ۹ نتیجه حاصل از پهنه‌بندی با استفاده از مدل شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های مورد استفاده در الگوریتم پرسپترون چند لایه

شاخص‌ها	متوسط پیکسل‌های آموزشی	متوسط پیکسل‌های آزمایشی	تعداد لایه‌های پنهان	گره‌های لایه پنهان	نرخ یادگیری	ضریب شتاب	میزان تکرار
مقادیر	۱۰۰۰	۵۰۰	۱	۹	۰/۰۱	۰/۵	۱۰۰۰۰

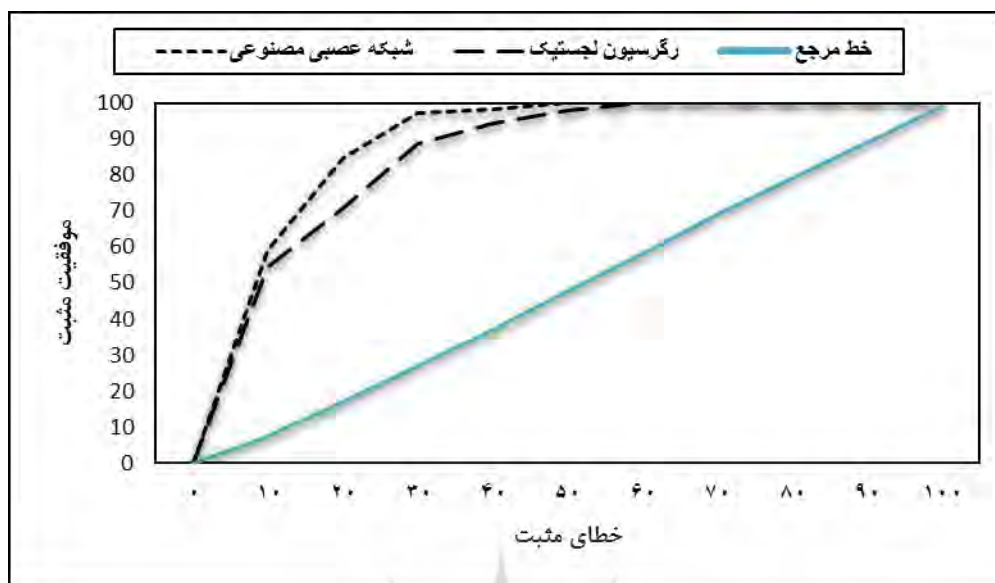


شکل ۹. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۱۰. مساحت پهنه‌های زمین‌لغزه با استفاده از مدل‌های مورد استفاده

صحت سنجی مدل‌های مورد استفاده با استفاده از روش ROC صورت گرفته است. شکل شماره ۱۱ نتیجه حاصل از این مدل که بر اساس تحلیل‌های مبتنی بر طبقه‌بندی آماری به عبارتی دیگر میزان موفقیت مدل نسبت به خطا می‌باشد را نشان می‌دهد. این شکل نشان دهنده بیشتر بودن سطح زیر منحنی در مدل شبکه عصبی می‌باشد.



شکل ۱۱. نمودار منحنی ROC برای مدل‌های مورد استفاده

در مقایسه مدل‌های مورد استفاده با استفاده از مدل آماری ROC مدل شبکه عصبی با میانگین عددی ۰/۹۱ نسبت به مدل رگرسیون لجستیک با میانگین عددی ۰/۸۹ مدلی کارآمدتر معرفی می‌گردد. این مدل با استفاده از داده‌های تعلیمی و استفاده از گره‌های پنهان و دیگر شاخص‌هایی مانند ضریب شتاب می‌تواند مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش را بهتر مدلسازی نماید.

##### ۵. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به منظور مدیریت بهینه در منطقه و جلوگیری از خسارت‌های احتمالی پیش آمده در اثر حرکات توده‌ای به ویژه زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پرسپترون چند لایه اقدام به پهنه‌بندی مناطق حساس به این حرکات گردید. برای مدلسازی از ۹ پارامتر مستقل اعم از لایه بارش، لیتولوژی، پوشش و کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از گسل و فاصله از جاده استفاده گردید. لازم به ذکر است لایه بارش با استفاده از مدل جبری و تعداد ۱۱ ایستگاه در اطراف منطقه مورد مطالعه و بر اساس رابطه بین ارتفاع و مقدار میانگین بارش از لایه رقوم ارتفاعی منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. همچنین لایه کاربری و پوشش اراضی نیز با داده‌های تعلیمی برداشت شده از منطقه مورد مطالعه و تصاویر لندست ۸ (سنجنده OLI) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی تهیه گردید. همچنین دیگر لایه‌ها نیز به نوعی از تصاویر ماهواره‌ای یا نقشه‌های منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. سپس لایه زمین‌لغزش‌های رخ داده در



منطقه با برداشت‌های زمینی و تصویر ماهواره‌ای کوئیک برد به‌عنوان لایه تعلیمی در هر دو مدل مورد استفاده قرار گرفت. زمین‌لغزش‌های رخ داده در تمام جهت شیب دیده می‌شود ولی ارتفاع ۱۶۰۰-۱۸۰۰ و شیب ۲۰-۳۰ درصد بیشتر در معرض خطر چنین پدیده‌ای هستند. فاصله از جاده و همچنین گسل نیز، با توجه به نزدیک بودن به این عوارض انسانی و طبیعی وزن بیشتری را در مطالعه حاضر به خود اختصاص دادند. همچنین چون بارش بر اساس رابطه بین ارتفاع و مقدار بارش در دیگر ایستگاه‌ها درون‌یابی شده است، لذا این مسئله بدیهی است که هر چه به‌طرف ارتفاع بیشتر پیش می‌رود بارش نیز بر اساس رابطه به دست آمده در این پژوهش، بیشتر می‌گردد. از طرفی هم ارتفاع‌های مربوط به ۱۶۰۰-۱۸۰۰ متری در این منطقه بیشتر در معرض حرکات توده‌ای هستند لذا در پارامتر بارش نیز به‌عنوان تابعی از ارتفاع، بارش‌های ۳۰۰-۳۵۰ میلی‌متری وزن بیشتری در پهنه‌بندی زمین‌لغزش به خود گرفتند. در بحث زمین‌شناسی نیز ۵۷ درصد از زمین‌لغزش‌های رخ داده به جنس کنگلومرای تعلق گرفته است. این گونه بررسی‌ها با استفاده از مدل هیستوگرام و بر اساس فراوانی داده‌های تعلیمی در هر یک از پارامترها صورت گرفته و فازی سازی نیز مبنی بر این عملکرد بوده است. بعد از استانداردسازی هر یک از پارامترها، نه فاکتور به‌عنوان متغیر مستقل و زمین‌لغزش‌های رخ داده نیز به‌صورت یک لایه صفر و یک باینری و به‌عنوان متغیر وابسته برای مدل رگرسیون لجستیک همچنین فاکتورهای استاندارد شده به‌عنوان نرونهاي ورودی و زمین‌لغزش‌های رخ داده به‌عنوان آموزش دهنده مدل شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پرسپترون چندلایه معرفی گردید. نتیجه اعتبارسنجی ROC نشان می‌دهد مساحت زیر منحنی در مدل شبکه عصبی مصنوعی بیشتر از مدل رگرسیون لجستیک بوده است و دقت برابر با ۰/۹۱ را نسبت به رگرسیون لجستیک با دقت ۰/۸۹ نشان می‌دهد. نتیجه حاصله نشان دهنده کارایی مدل شبکه عصبی می‌باشد که با یافته‌های چوآی و همکاران (۲۰۱۲) و رجبی و فیض‌اله پور (۱۳۹۳) تطابقت دارد. نتیجه مدل ترکیب خطی وزن دار با وزن دهی رگرسیون لجستیک نشان دهنده مساحتی حدود ۷/۴ درصد در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد و با وزن دهی سلسله مراتبی و به‌صورت کارشناسی حدود ۴/۷ درصد در پهنه‌های مذکور قرار می‌گیرد. ۳۶ درصد از مساحت منطقه نیز جزو پهنه‌های خطر متوسط می‌باشد که این پهنه‌های خطر می‌توانند با سومدیریت و ساخت و سازهای عوارض انسانی از جمله جاده بدون توجه به ساختار ژئومورفولوژی و لیتولوژی منطقه، تحت تأثیر قرار گرفته و به پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد تبدیل گردند. چراکه در این مدل‌سازی نیز مناطق نزدیک به عوارض انسان‌ساخت و عامل طبیعی گسل در هر دو مدل، جزو مناطق حساس به خطر زمین‌لغزش پهنه‌بندی گردیده‌اند.

## کتابنامه

- اندريانی، صغری؛ ۱۳۹۳. کاربرد تکنیک‌های سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در بررسی تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر دبی رودخانه (مطالعه موردی: صوفی چای). پایان‌نامه کارشناسی ارشد RS & GIS، دانشگاه تبریز.
- بیاتی خطیبی، مریم؛ ۱۳۸۹. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ قرنقوچای به روش دو متغیرهٔ آماری. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی. شماره ۳۲. صص ۱-۲۷.
- رأفت‌نیا، نصرت‌ا...؛ کاویانپور، محمدکاظم؛ احمدی، توفیق؛ ۱۳۹۰. بررسی علل وقوع پدیده زمین‌لغزش در جنگل گلندرود (مطالعه موردی، سری ۳ حوزه آبخیز ۴۳). فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی. سال ششم. شماره ۱. صص ۵۳-۶۳.
- رجبی، معصومه؛ فیض‌اله پور، مهدی؛ ۱۳۹۳. پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های حوضه رودخانه گیوی چای با استفاده از مدل پرسپترون چندلایه از نوع پیشخور پس انتشار (BP). جغرافیا و توسعه. شماره ۳۶. صص ۱۶۱-۱۸۰.
- یمانی، مجتبی؛ احمدآبادی، علی؛ زارع، غلامرضا؛ ۱۳۹۱. به‌کارگیری الگوریتم‌های ماشین‌های بردار پشتیبان در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه). نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۳. صص ۱۲۵-۱۴۲.
- Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32, 269-277.
- Atkinson, P. M., & Tatnall, A. R. L. (1997). Introduction of neural networks in remote sensing. *Remote Sensing*, 18(4), 699-709.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2004). Slope failures in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. *Geomorphology*, 57, 95-116.
- Bommer, J. J., & Rodriguez, C. E. (2002). Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology*, 63, 189-220.
- Burrough, P. A. (1989). Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Soil Science*, 40, 477-492.
- Clark, W. A., & Hosking, P. L. (1986). *Statistical methods for geographers* (Chap. 13). New York: John Wiley & Sons.
- Collison, A., Wade, S., Griffiths, J., & Dehn, M. (2000). Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England. *Engineering Geology*, 55, 205-218.
- Crozier, M. J. and Glade, T. (2005). Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. In T. Glade, M. Anderson and M. J. Crozier (eds.), *Landslide Hazard and Risk* (pp. 43-74). England: John Wiley & Sons.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Masuda, T., & Yamanaka, M., 2006a. Roadside slope failures in Nepal during torrential rainfall and their mitigation. In H. Marui., T. Marutani., N. Watanabe., H. Kawabe., Y. Gonda., M. Kimura., H. Ochiai., K. Ogawa., G. Fiebiger., J. Heumader., F. Rudolf-Miklau., H. Kienholz & M. Mikos (Eds.), *Disaster mitigation of debris flow, slope failures and landslides* (P. 503-514). Tokyo: Universal Academy Press.
- Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J., & Xu, Z. W. (2000). Assessment of landslide hazard on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environment Geology*, 40, 381-391.
- Garrett, J. (1994). Where and why artificial neural networks are applicable in civil engineering. *Computer Civil Engineering*, 8, 129-130.

- Gong, P. (1996). Integrated analysis of spatial data for multiple sources: using evidential reasoning and artificial neural network techniques for geological mapping. *Phonogram: Engineering Remote Sensing*, 62, 513-523.
- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C., & Tien Bui, D. T. (2015). Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines. *Catena*, 133, 266-281.
- Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & 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, 366-347.
- Keefer, D. V. (2000). Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution ° the 1989 Loma Prieta, California event. *Engineering Geology*, 58, 231° 249.
- Lee, C., & Lee, S. (2012). Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Engineering Geology*, 124, 12-23.
- Pachauri, A. K., & Pant, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, 32, 81-100.
- Pan, X., Nakamura, H., Nozaki, T., & Huang, X. (2008). A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis. *Japan Landslide Society*, 45(3), 187° 195.
- Raghuvanshi, T. K., Ibrahim, J., & Ayalew, D. (2014a). Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme: An approach for landslide hazard zonation. *African Earth Science*, 99, 595–612.
- Saha, A. K., Gupta, R. P., Starker, I., Arora, M. K., & Csaplovics, E. (2005). An approach for GIS based statistical landslide susceptibility zonation with a case study in the Himalayas. *Landslides*, 2, 61-69.
- Schmucker, K. J. (1982). *Fuzzy sets, natural language computations and risk analysis*. Philadelphia: Computer Science Press.
- Shalkoff, R. J. (1997). *Artificial neural networks*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation - Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167-184.
- Wang, L. J., Guo, M., Sawada, M. K., Lin, J., & Zhang, J. (2015). Landslide susceptibility mapping in Mizunami City, Japan: A comparison between logistic regression, bivariate statistical analysis and multivariate adaptive regression spline models. *Catena*, 135, 271-282.
- Wang, X., & Niu, R. (2009). Spatial forecast of landslides in three gorges based on spatial data mining. *Sensors*, 9, 2035° 2061.