



مقایسه‌ی روش‌های انتخابی تجربی و روش‌های آماری و شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه‌ی موردی در مخزن سد بهشت‌آباد)

محسن غلامی*، رسول اجل‌لوئیان

دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۷ آذر ۱۳۹۲
بازنگری: ۱۹ خرداد ۱۳۹۳
پذیرش: ۱۶ اسفند ۱۳۹۳
ارائه آنلاین: ۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش
روش نیلسن
روش مور-وارسون
روش آماری دو متغیره
روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)
منحنی ROC

چکیده: به منظور کاهش خسارت‌های ناشی از زمین لغزش، شناسایی پهنه‌های دارای پتانسیل خطر زمین لغزش و به نقشه در آوردن آن‌ها ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. برای انجام این امر، روش‌های متعددی توسط محققین در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که هر یک از آنها تحت شرایط ویژه‌ای ارائه شده‌اند. در این تحقیق، پس از تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌های قدیمی و بررسی عوامل مؤثر در زمین لغزش‌های محدوده مخزن سد بهشت‌آباد و نیز مقایسه هریک از روش‌های پهنه‌بندی و محل ابداع این روش‌ها با مورد مطالعه، روش‌های تجربی نیلسن و مور-وارسون به همراه روش آماری دو متغیره و روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش انتخاب شده‌اند. در ادامه پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، برای ارزیابی دقت این نقشه‌ها، از روش‌های احتمال تجربی، شاخص لغزش و نیز ترسیم منحنی ROC استفاده شده است. در پایان نتایج حاصل از ترسیم منحنی ROC و محاسبه سطح زیر این منحنی مبنای ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی قرار گرفت که نتیجه آن در این محدوده، انتخاب روش آماری و روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان روش‌هایی مناسب برای تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش بوده است.

۱- مقدمه

در ارتباط با میزان پیچیدگی پدیده زمین لغزش مدل‌های مبتنی بر عدم قطعیت نیز توسط افراد زیادی برای بررسی میزان پتانسیل وقوع آن از قبیل روش‌های فازی [۱۱]، شبکه عصبی مصنوعی [۱۲، ۱۳، ۲۹] و مدل‌های عصبی-فازی [۱۹] بکار رفته‌اند. روش‌های مکانیکی که بر اساس ارزیابی و تحلیل پایداری شیب توسط روش‌های تعادل حدی و روش‌های عددی پی‌ریزی شده‌اند، سال‌هاست که به طور گسترده و با نتایج قابل قبول برای ارزیابی خطر زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است [۸، ۲۵، ۲۷]. دقت هریک از روش‌های فوق مورد بحث محققین زیادی بوده است که در این بین می‌توان به مراجع [۱۸، ۲۳، ۲۴] برای بررسی دقت پهنه‌بندی بر اساس تراکم زمین لغزش‌ها در رده‌های مختلف از نقشه‌های خطر و نیز مراجع [۲، ۱۶، ۲۶، ۲۸، ۳۳، ۳۴] بر اساس ترسیم منحنی ROC^۱ و مرجع [۱۴] با روش ترسیم منحنی هزینه اشاره کرد. با توجه به معایب و مزایای هریک از روش‌های فوق در حوزه‌های

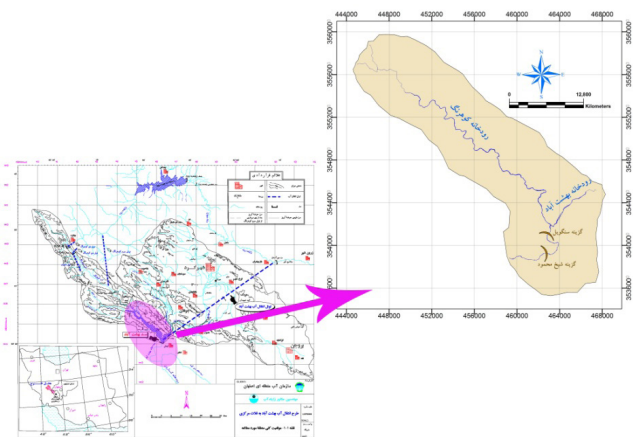
روش‌ها و ابزارهای متعددی برای تعیین میزان پتانسیل ناپایداری دامنه‌ها و یا ارزیابی میزان استعداد وقوع زمین لغزش وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به ۴ گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد: بررسی‌های کارشناسی، روش‌های آماری، مدل‌های مبتنی بر عدم قطعیت و روش‌های مکانیکی [۳۲]. بررسی‌های کارشناسی به طور عمده توسط افراد متعددی برای ارزیابی خطر زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷، ۲۱]. روش‌های آماری که خود مبتنی بر داده هستند، شامل روش‌های آماری دو متغیره و چند متغیره بوده و محققین زیادی در مطالعه‌های خود از آن‌ها استفاده کرده‌اند که به مرجع [۲۸] برای مقایسه این دو روش در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش و نیز مراجع [۸، ۲۰، ۲۲] برای ارزیابی خطر زمین لغزش می‌توان اشاره کرد.

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Ajalloeian@ui.ac.ir

^۱ Receiver Operating Characteristic

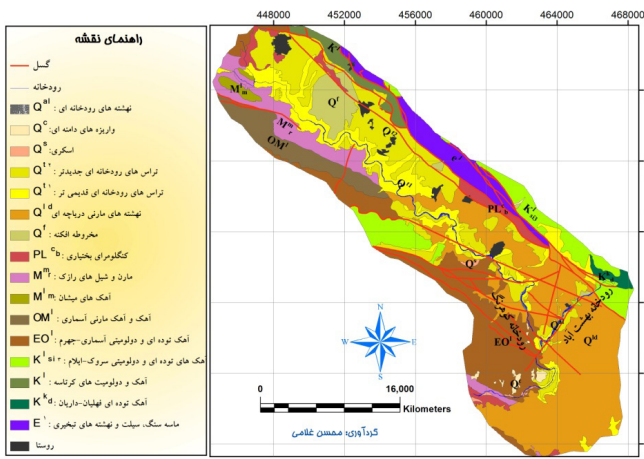
مطالعه ملاک قرار گرفته است که طبق این تعریف حرکت‌های توده‌ای از قبیل ریزش، لغزش، جریان‌های گلی و واریزه‌ای، واژگونی و غیره را شامل می‌گردد. لازم به ذکر است، سازوکار عمده‌ی زمین‌لغزش‌ها در منطقه‌ی بهشت‌آباد از نوع چرخشی هستند.

با توجه به وجود دو شاخه شرقی و غربی مخزن سد بهشت‌آباد، وسعت منطقه مورد مطالعه زیاد بوده و در حدود ۲۲۲ کیلومترمربع است. از سوی دیگر مساحت کل زمین‌لغزش‌های ثبت شده در منطقه نیز برابر با ۱/۴۲ کیلومترمربع است که در مقایسه با مساحت کل، ۰/۶۳ درصد از محدوده را دربر گرفته‌اند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی سد و مخزن بهشت‌آباد [۵]

Fig.1. Geographical location of Behesht Abad Dam reservoir [5]



شکل ۲: توزیع واحدهای سنگ‌شناسی در محدوده سد و مخزن بهشت‌آباد

Fig.2. Distribution of lithological units in Behesht Abad Dam and reservoir area

۲- آماده سازی عوامل کنترل‌کننده

برای ارزیابی و تعیین خطر زمین‌لغزش در هر منطقه، مهم‌ترین

جغرافیایی مختلف و برای تعیین پتانسیل خطر زمین‌لغزش، در این تحقیق سعی بر آن است که با توجه به حجم داده‌های موجود و نیز وسعت منطقه مورد مطالعه، کارایی برخی روش‌های انتخابی و رایج در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مورد ارزیابی قرار گیرد. در این ارتباط و برای بررسی میزان دقت نقشه‌ها، ترسیم منحنی‌های ROC^۱ مبنای نتیجه‌گیری نهایی در این مطالعه است.

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق منطقه‌ی سد و مخزن بهشت‌آباد است که از نظر ریخت‌شناسی، در یک ناحیه‌ی کوهستانی و بلند واقع شده و اغلب به صورت کوه‌هایی با ستیغ‌های بلند همراه با دره‌های ژرف و کم‌پهنا دیده می‌شود. ساختگاه سد بهشت‌آباد در مرکز استان چهارمحال و بختیاری در حوالی شهرستان اردل، از نظر جغرافیایی در ۲۳° و ۳۶' و ۵۰° و ۱۹' و ۵۹' طول جغرافیایی شرقی و ۳۱° عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته است. سد بهشت‌آباد با ارتفاع حدود ۱۵۰ متر، دریاچه‌ای به وسعت حدود ۳۸ کیلومتر مربع را تشکیل خواهد داد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی سد و محدوده‌ای که برای مطالعه انتخاب شده است را نشان می‌دهد [۵].

از دیدگاه زمین‌شناسی منطقه‌ای، ساختگاه سد بهشت‌آباد در پهنه‌ی زاگرس مرتفع یا روراند قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه محل احداث سد بلافاصله پس از اتصال رودخانه‌های بهشت‌آباد و کوه‌رنگ قرار گرفته است، مخزن سد دارای دو شاخه خواهد بود. لازم به ذکر است که دو گزینه برای محل احداث سد شامل گزینه سنگویل و گزینه شیخ‌محمود در حال مطالعه است. نهشته‌هایی که در شاخه شرقی مخزن و بر روی رودخانه بهشت‌آباد با آب در تماس خواهند بود، عبارتند از آهک‌های متوسط تا ضخیم لایه و کارستیک آسماری، نهشته‌های دریاچه‌ای و آبرفتی عهد حاضر و آهک‌های کارستیک کرتاسه. ناپایداری دامنه‌های ماری در جناح چپ مخزن و آبگذری واحدهای آهکی الیگو-میوسن و کرتاسه از مشکل‌های اصلی این بخش از مخزن است که بایستی مورد توجه بیشتری قرار گیرد. نهشته‌های در تماس با آب در شاخه‌ی غربی مخزن در مسیر رودخانه‌ی کوه‌رنگ شامل آهک‌های کارستیک آسماری، نهشته‌های دریاچه‌ای و آبرفتی عهد حاضر، مارن و ماسه‌سنگ‌های معادل رازک، تراس‌های آبرفتی قدیمی و جوان هستند [۵]. شکل ۲ نقشه پراکنش هر یک از واحدهای سنگ‌شناسی را در محدوده سد و مخزن بهشت‌آباد نشان می‌دهد.

با توجه به مشخصه لغزش‌های مشاهده شده در محدوده مورد مطالعه سد بهشت‌آباد، زمین‌لغزش تعریف شده در مرجع [۹]، در این

^۱ Receiver Operating Characteristic

از قضاوت مهندسی است. در این روش فرد با استفاده از تجربه خود در زمینه‌ی عوامل زمین‌لغزش در مناطق مختلف، مبادرت به تعیین این عوامل می‌نماید. چنانچه قضاوت مهندسی توسط افراد مجرب انجام‌گیرد، می‌تواند بهترین روش محسوب گردد [۳۰،۳۱]. روش دوم برای تعیین لایه‌های اطلاعاتی، استفاده از روش بینا^۱ است [۳۰،۳۱]. در این روش، با کمک نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش و مقایسه‌ی آن با نقشه‌ی عواملی که گمان می‌رود در ایجاد زمین‌لغزش سهیم بوده‌اند، نقش آن‌ها تعیین می‌گردد. این روش بیشتر در مقیاس‌های متوسط و یا بزرگ که نقشه‌ی فهرست زمین‌لغزش‌های آن‌ها موجود نیست، استفاده می‌گردد [۲۲،۳۱].

با استناد به موارد فوق، روش بینا همراه با قضاوت کارشناسی به عنوان روشی مناسب برای شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش انتخاب شده است. از سوی دیگر با بررسی عوامل مؤثر در زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه و نیز مقایسه هر یک از روش‌های پهنه‌بندی و محل ابداع این روش‌ها با محدوده مخزن سد بهشت‌آباد، در نهایت لایه‌های اطلاعاتی زیر به عنوان عوامل مؤثر و قابل کاربرد در محدوده‌ی مورد مطالعه‌ی سد بهشت‌آباد (در روش‌های آماری و شبکه عصبی) بکار گرفته شده است:

الف) عوامل مستعدکننده: زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی)، اطلاعات ناهمواری‌ها (شیب، جهت‌شیب و ارتفاع)

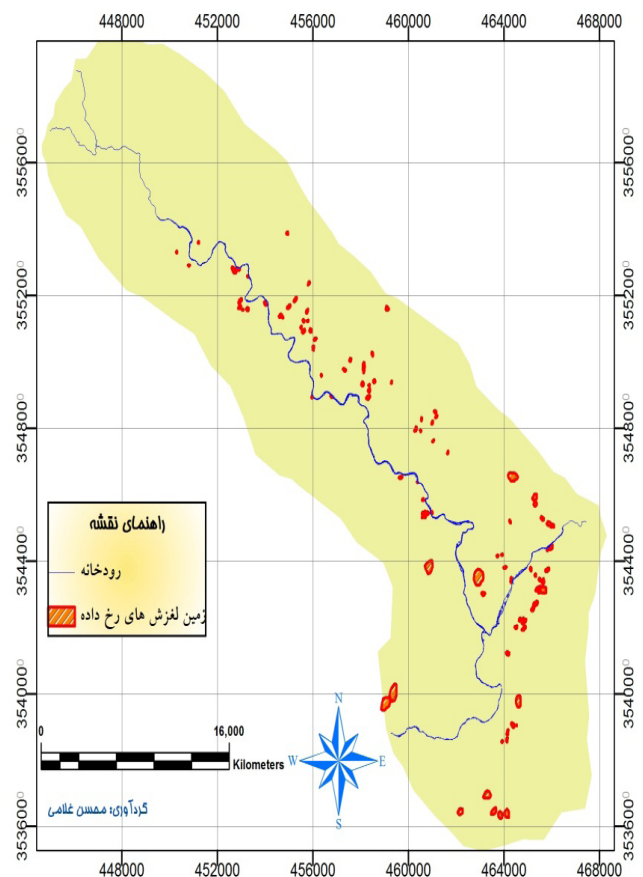
ب) عوامل تحریک‌کننده: شدت بارندگی (حداکثر بارش ۲۴ ساعته)، زلزله (بیشینه شتاب افقی زمین^۲ یا PGA)

رده‌بندی و تعداد رده‌های هر لایه اطلاعاتی برای محدوده مورد نظر در مراجع [۶،۷] ارائه شده است. نقشه‌های تهیه شده برای این ۶ لایه در شکل ۴ آمده است.

برای اطلاع از نحوه توزیع زمین‌لغزش‌ها در هر یک از رده‌های مختلف مربوط به لایه‌های اطلاعاتی، نیاز به انطباق نقشه هر لایه با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها خواهد بود. برای هر یک از ۶ عامل مؤثر شناسایی شده در این تحقیق، نمودارهای جداگانه در شکل‌های ۵ تا ۱۰ بدین منظور ارائه شده‌اند که با دقت در هر یک از آن‌ها می‌توان به توزیع زمین‌لغزش در هر رده پی برد و مستعدترین رده برای وقوع زمین‌لغزش را شناسایی کرد.

مرحله، شناسایی و بررسی زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته و مطالعه عواملی است که این زمین‌لغزش‌ها را کنترل می‌کند.

در واقع، به نقشه درآوردن زمین‌لغزش‌های قدیمی و جدید منطقه، مبنای کار و تهیه نقشه پهنه‌بندی است. با توجه به این که انتخاب حوزه‌های مناسب برای آزمون روش‌های مختلف پهنه‌بندی عامل اساسی در ارزیابی این روش‌هاست، به منظور بررسی تناسب محدوده‌ی مخزن سد بهشت‌آباد با چنین عملیاتی، پس از بررسی‌های صحرایی متوالی و بررسی دقیق عکس‌های هوایی منطقه (با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه شده در سال ۱۳۴۲)، مکان جغرافیایی و ابعاد این ناپایداری‌ها (بر اساس مختصات تعیین شده توسط GPS) بر روی نقشه‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه پیاده شد. در پایان بیش از ۱۰۰ مورد زمین‌لغزش کوچک و بزرگ، در منطقه ثبت شد که توزیع آن‌ها را می‌توان در شکل ۳ دید.



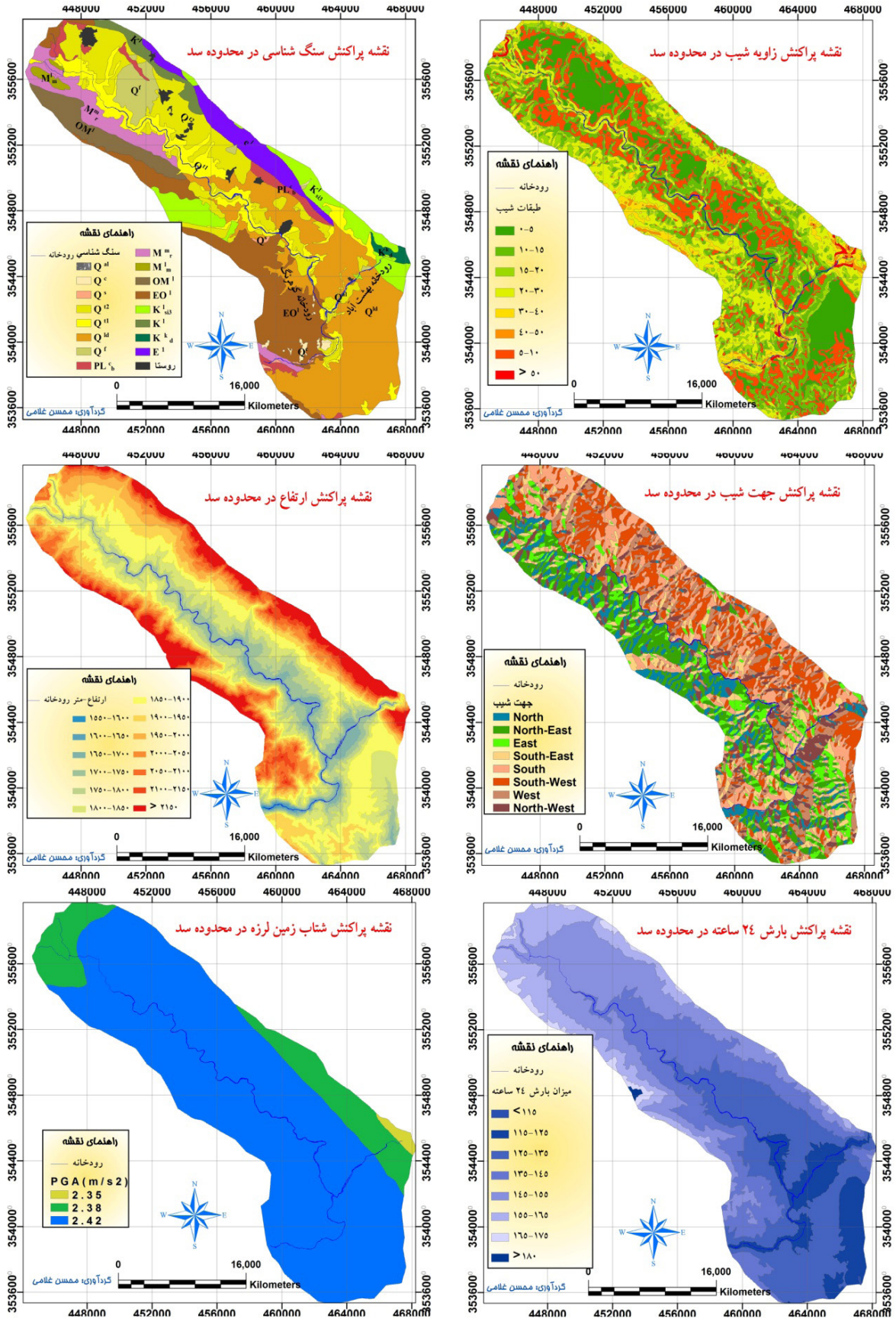
شکل ۳: نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه

Fig.3. Landslide inventory map for Behesht Abad Basin

مرحله اساسی دیگر در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، شناسایی عوامل مؤثر در وقوع است. شناسایی عوامل مؤثر در زمین‌لغزش می‌تواند توسط روش‌های مختلفی صورت‌گیرد. یکی از روش‌ها استفاده

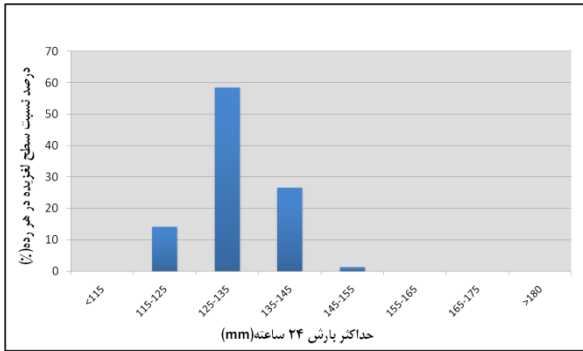
1 Weights of Evidence method

2 Peak Ground Acceleration

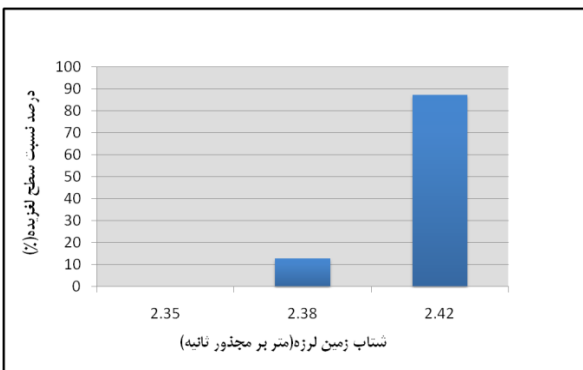


شکل ۴: نقشه‌های مربوط به عوامل زمین لغزش شامل نقشه‌های شیب، سنگ‌شناسی، ارتفاع، جهت شیب، شتاب زمین لرزه، بارندگی ۲۴ ساعته

Fig.4. Landslide-Influencing maps including slope, aspect, lithology, elevation, acceleration and -24hours raining



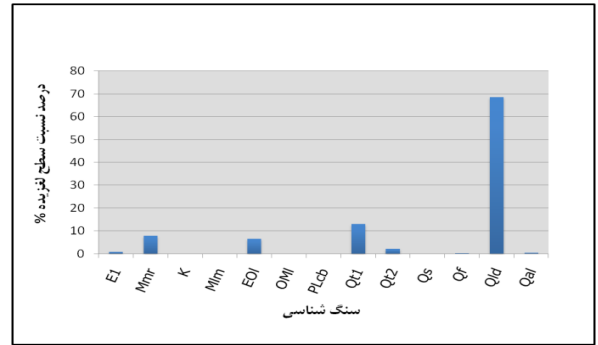
شکل ۹: توزیع زمین لغزش‌ها در طبقه‌های مختلف حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته
Fig.9. Distribution of landslides in different elevation classes



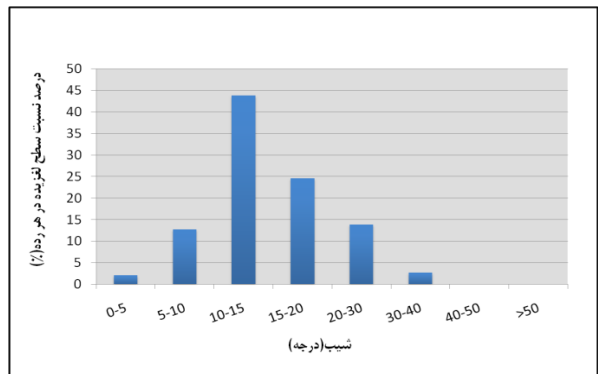
شکل ۱۰: توزیع زمین لغزش‌ها در طبقه‌های مختلف شتاب زمین لرزه
Fig.10. Distribution of landslides in different ground acceleration classes

۳- روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده مورد مطالعه

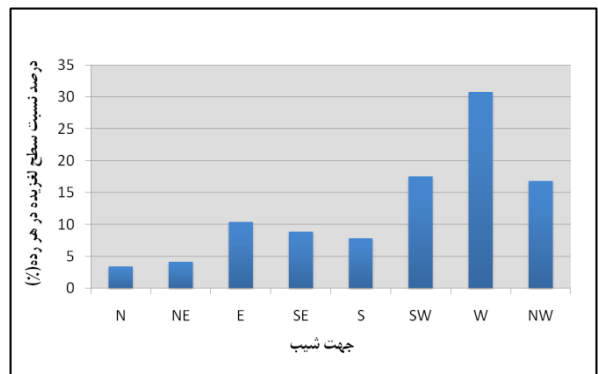
در بحث زمین لغزش، هدف از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی، بدست آوردن الگوی مناسب برای برنامه‌ریزی بهینه برای استفاده مناسب از زمین است. قطعاً تعیین کاربری مناسب اراضی ارتباط تنگاتنگی با تعیین نقاط حادثه‌خیز طبیعی به‌ویژه دامنه‌های ناپایدار خواهد داشت [۳]. محققین مختلف به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش‌ها در مناطق گوناگون، بسته به اهمیت و تأثیر عوامل مختلف، روش‌هایی را ارائه نموده‌اند که اغلب در مقیاس‌های محلی توانسته‌اند نقشه‌هایی با دقت مناسب را تولید کنند. توجه به این نکته ضروری است که استفاده از این روش‌ها و تعمیم آن‌ها برای دیگر مناطق، مستلزم تشابه نسبی بین دو منطقه از نظر شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و غیره برای انتخاب عوامل و یکسان بودن میزان نقش و اهمیت عوامل به‌کار رفته برای استفاده از وزن‌های پیشنهادی است. بنابراین در مواردی که استفاده از این گونه روش‌ها مدنظر است، باید نخست در هر دو منطقه، عوامل تقریباً مشابهی در ایجاد ناپایداری‌ها مؤثر باشند و ثانیاً امتیازهای نسبت داده شده به گروه‌های عوامل مؤثر در زمین لغزش و رده‌های آن‌ها با شرایط منطقه هماهنگ گردد. در هر کدام از این روش‌ها که در واقع به نام



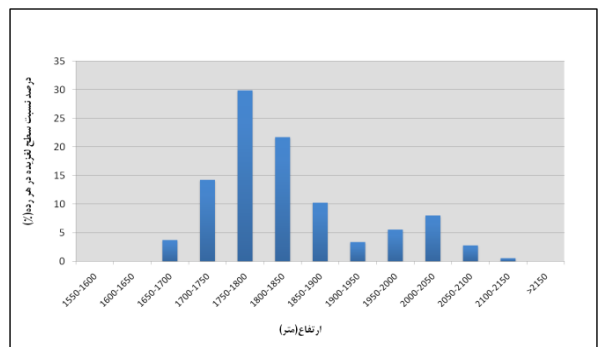
شکل ۵: توزیع زمین لغزش‌ها در واحدهای مختلف سنگ‌شناسی
Fig.5. Distribution of landslides in different lithological units



شکل ۶: توزیع زمین لغزش‌ها در طبقه‌های مختلف شیب
Fig.6. Distribution of landslides in different slope classes



شکل ۷: توزیع زمین لغزش‌ها در طبقه‌های مختلف جهت شیب
Fig.7. Distribution of landslides in different aspect classes



شکل ۸: توزیع زمین لغزش‌ها در طبقه‌های مختلف ارتفاع
Fig.8. Distribution of landslides in different elevation classes

که در آن:

$$H_L = (S_r \times S_l \times S_h) \times (T_s + T_p) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H_L &= \text{شاخص خطر زمین لغزش} \\ S_r &= \text{شاخص پستی و بلندی} \\ S_l &= \text{حساسیت سنگ شناسی} \\ S_h &= \text{شاخص تأثیر رطوبت طبیعی} \\ T_s &= \text{شدت زمین لرزه} \\ T_p &= \text{شدت بارندگی} \end{aligned}$$

برای تعیین هریک از شاخص‌های بالا جداول استاندارد توسط مورا و وارسون (۱۹۹۴) ارائه شده است که با انطباق آن‌ها با منطقه مورد مطالعه می‌توان عدد مورد نظر برای هر شاخص را تعیین کرد. با توجه به وزن‌دهی به لایه‌های مربوطه، عدد خطر در روش مورا و وارسون می‌تواند از صفر تا ۱۸۷۵ متغیر باشد. برای تبدیل اعداد به واژه‌های توصیفی، مورا و وارسون توصیف‌های معادل موجود در جدول ۱ را برای بیان خطر زمین لغزش انتخاب کرده‌اند [۱].

جدول ۱: گروه‌های پتانسیل خطر زمین لغزش [۱]

Table 1. Landslide Hazard Susceptible groups

پتانسیل خطر	گروه	مقدار عدد خطر (H_L)
خیلی کم	I	۰-۶
کم	II	۷-۳۲
نسبتاً متوسط	III	۳۳-۱۶۲
متوسط	IV	۱۶۳-۵۱۲
بالا	V	۵۱۳-۱۲۵۰
خیلی بالا	VI	۱۲۵۰ <

با اجرای مراحل مختلف پهنه‌بندی به روش مورا-وارسون، در نهایت کل حوزه با توجه به جدول طبقه‌بندی رده‌های لغزش به ۵ پهنه تقسیم شد. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش مورا-وارسون در شکل ۱۲ ارائه شده است.

۳-۲- روش نیلسن

نیلسن و همکاران در سال ۱۹۷۹ برای ارزیابی سریع پایداری شیب‌ها در منطقه خلیج سانفرانسیسکو، با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، شیب و عکس‌های هوایی، اقدام به تهیه نقشه ارزیابی خطر ناپایداری شیب‌ها با مقیاس ۱:۱۲۵۰۰۰ نمودند. معیارهای کلی مورد استفاده در این روش به صورت زیر بیان شده است [۳]:

- درصد شیب: کم‌تر از ۵ درصد، ۵-۱۵ درصد و بیش از ۱۵ درصد.
- واحدهای لیتولوژیکی: واحدهای لیتولوژیکی باید در نقشه زمین‌شناسی مشخص گردند که عبارتند از: الف) واحدهای لیتولوژیکی

دانشمند ابداع‌کننده نامگذاری شده است، براساس منطقه‌ای که اولین بار این شیوه بکار رفته، عوامل محدودی در مدل وارد شده‌اند و بنابراین هر کدام از این روش‌ها می‌توانند در شرایط خاص زمین‌شناسی و اقلیمی بکار روند. برای این اساس، استفاده از آن‌ها در هر منطقه، نیاز به آزمون و تعیین میزان توانائی و دقت آن روش در تخمین خطر وقوع لغزش در واحدهای اراضی مختلف دارد [۱].

امروزه روش‌های جدیدی مبتنی بر اصول آماری و ریاضی ارائه شده است که تا حدودی به رفع تنگنای منطقه‌ای و محلی بودن روش‌های تجربی کمک می‌کنند. روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی و روش منطق فازی هواداران زیادی را در بین علاقه‌مندان به مباحث زمین لغزش به خود جلب نموده است [۱۱، ۱۳، ۱۹]. در تحقیق جاری، با توجه به تطابق و مقایسه شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی منطقه‌ی مورد بررسی با محدوده‌ی جغرافیائی ابداع روش‌های تجربی مورا و وارسون و نیلسن و همراه با روش‌های آماری، این روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز به طور مستقل از شرایط منطقه‌ای، در دستور کار قرار گرفت که نتایج آن قابل مقایسه با روش‌های تجربی مذکور است.

۳-۱- روش مورا-وارسون

مورا و وارسون (۱۹۹۴) مجموعه مطالعه‌های موردی انجام شده در رابطه با گسیختگی‌های به وقوع پیوسته در نتیجه وقوع زلزله‌های تاریخی و بارندگی‌های سنگین در آمریکای مرکزی را ساماندهی کرده و بر اساس نتایج به‌دست آمده روشی را برای پیشگویی پهنه‌های مستعد گسیختگی شیب پیشنهاد دادند [۱]. علت انتخاب این روش برای محدوده مورد مطالعه، میزان بارندگی به نسبت بالا در منطقه و وقوع زمین لغزش‌های زیاد در اثر این بارش‌ها بوده است. عوامل موردنظر برای پهنه‌بندی در روش مورا-وارسون به شرح زیر هستند [۱]:

الف) عوامل مؤثر در استعداد گسیختگی شیب

- پستی و بلندی نسبی (S_r) در ۶ رده و حداکثر امتیاز ۵
 - شرایط سنگ‌شناسی (S_l) در ۵ رده و حداکثر امتیاز ۵
 - رطوبت خاک (S_h) در ۵ رده و حداکثر امتیاز ۵
 - ب) عوامل محرک
 - شدت زمین لرزه در مقیاس مرکالی (T_s) با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و در ۱۰ رده و حداکثر امتیاز ۱۰
 - شدت بارندگی (T_p) در ۵ رده و حداکثر امتیاز ۵
- برای محدوده‌ی سد بهشت‌آباد، ابتدا کل نقشه به شبکه‌های $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ تقسیم‌بندی شده است و آنگاه برای هر واحد شبکه براساس فرمول زیر، شاخص خطر زمین لغزش (H_L) تعیین گردید [۱]

پایداری شیب‌ها بوده ولی دارای ایرادهایی است که با توجه به مجموعه تجارب به‌دست آمده از مطالعه‌ی لغزش‌های لرزه‌ای رودبار و منجیل، اصلاح‌هایی به شرح زیر در مورد روش نیلسن صورت گرفته است که در جدول ۲ نیز ارائه شده‌اند [۳]:

با نهشته‌های زمین‌لغزشی کم و یا بدون لغزش؛ (ب) واحدهای لیتولوژیکی با نهشته‌های لغزشی قابل توجه و زیاد؛ (ج) نهشته‌های سطحی مستعد روانگرایی؛ (د) نهشته‌های زمین‌لغزشی. لازم به ذکر است که این روش، شیوه‌ای کارا و مفید در ارزیابی

جدول ۲: اصول کار در روش اصلاح شده نیلسن [۳]

Table 2. Basic in Modified-Nilson methods [3]

درصد شیب			واحدهای سنگ‌شناسی	
< ۳۰	۳۰-۱۵	۱۵-۵	> ۵	
		IV (نسبتاً پایدار)	III (پایدار)	I (پایدار)
	(مطح برای سنگ افت)			واحدهای سنگ‌شناسی با نهشته‌های زمین‌لغزشی کم و یا بدون لغزش
	IV (نسبتاً پایدار)	II (عموماً پایدار)	I (پایدار)	واحدهای سنگی مستعد لغزش
IV (ناپایدار)		VII (مطح برای روانگرایی)	V (ناپایدار)	نهشته‌های سطحی مستعد روانگرایی
		VI (بسیار ناپایدار)		نهشته‌های زمین لغزه‌ای

زمین‌شناسی حساس به گسیختگی، در نهایت با استناد به جدول ۲ نقشه پهنه‌بندی تهیه شد که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

۳-۳- روش آماری دومتغیره

روش‌های آماری با هدف غیرذهنی نمودن بیشتر روش‌های پهنه‌بندی، ابداع شده‌اند. در این روش‌ها استفاده از رایانه کار را تسهیل می‌نماید. دو نوع روش آماری در این ارتباط به کار گرفته می‌شود [۸،۲۰،۲۸،۳۱]:

۱- روش آماری دومتغیره: در این روش هر نقشه‌ی لایه‌ی اطلاعاتی (برای مثال شیب، سنگ‌شناسی و یا بارندگی) به صورت جداگانه با نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها ترکیب شده و زیرگروه‌های آن‌ها بر اساس تراکم زمین‌لغزش‌ها در آن‌ها، امتیازدهی می‌گردند. با وجود این که معمولاً استفاده از دو لایه کافی نیست، ولی این روش آسان‌ترین روش تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی است.

۲- روش آماری چندمتغیره: در این روش رخداد و یا عدم رخداد زمین‌لغزش، با توجه به مجموعه عوامل موجود (و نه به طور جداگانه) در هر واحد ارزیابی می‌گردد. اهداف عمده‌ی این روش عبارت است از: الف) تجزیه و تحلیل اطلاعات نقطه‌ای فاکتورهای محرک برای هر یک از زمین‌لغزش‌ها

ب) تجزیه و تحلیل آماری عوارض کل منطقه: برای هر نقطه، اطلاعات مربوط به لایه‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و خصوصیت‌های فیزیکی، جمع‌آوری و با استفاده از روش‌های تحلیل

الف) رده‌های شیب به ۴ رده تغییر کرده‌اند.

ب) نهشته‌های لغزشی بر اساس رده شیب، به دو رده با خطر بالا و خیلی بالا تقسیم شده‌اند.

ج) در این رده‌بندی، دامنه‌ای با شیب بیش از ۳۰ درجه صرف‌نظر از جنس سنگ، مستعد وقوع سنگ‌افت در نظر گرفته شده است.

د) تقسیم بندی نیلسن به ۵ رده، در این روش به ۷ رده افزایش یافته است.

روش کار در روش اصلاحی مشابه با روش نیلسن است با این تفاوت که کار پهنه‌بندی، بر اساس جدول ۲ انجام می‌گیرد [۳].

نکته‌ی قابل توجه در مورد نهشته‌های موجود در گستره‌ی طرح، وجود نهشته‌هایی با استعداد روانگرایی است. به طور کلی یکی از شرایط لازم برای وقوع روانگرایی در مورد این نهشته‌ها این است که در زیر سطح ایستایی قرار گرفته و اشباع یا تقریباً اشباع شده باشند و نتوانند به‌طور آزاد زهکشی شوند. در این زمینه لازم است که پدیده‌ی روانگرایی در پایین‌تر از حداکثر تراز آب مخزن سد مدنظر قرار گیرد و سپس شرایط موجود را در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش نیلسن (اصلاح شده)، تأثیر داد. با توجه به وجود نهشته‌های دریاچه‌ای مارنی (Q_{ld})، نهشته‌های واریزه‌ای در دامنه‌ها (Q_c) و رسوبات ماسه‌ای و رسی در برخی از قسمت‌های این نهشته‌ها، پتانسیل بالایی برای رخداد پدیده‌ی روانگرایی بعد از آبیگری سد و در نتیجه‌ی وقوع زمین‌لرزه مورد انتظار است. بنابراین این نهشته‌ها در یک واحد جداگانه به نام واحدهای سنگ‌شناسی مستعد زمین‌لغزش و روانگرایی طبقه‌بندی شدند.

با همپوشانی سه نقشه‌ی شیب، نهشته‌های لغزش و واحدهای

¹ Bivariate Statistical Method

² Multivariate Statistical Method

$$R_{area} = \left(\frac{ASx_i}{Ax_i} - \frac{AS}{A} \right) \times 100 \quad (3)$$

که در آن R_{area} امتیاز زیرگروه محاسبه شده در تراکم سطحی است.

در این مرحله مقادیر امتیازها و وزن‌های به‌دست آمده برای زیرگروه‌های مختلف، قابل جمع کردن برای به‌دست آوردن عدد خطر است. بعد از انجام مراحل فوق، نقشه‌های وزنی هر عامل با یکدیگر تلفیق و روی هم انداخته شده و در نهایت نقشه‌ای با مقادیر وزنی حاصل از اجتماع وزن لایه‌های اطلاعاتی (نقشه پهنه‌بندی) تهیه شده است.

نقشه‌ی وزنی به‌دست آمده با این روش، دارای ۵ رده‌ی قابل تشخیص است که با مقادیر وزنی متفاوتی از یکدیگر جدا شده‌اند. انتخاب هر پهنه بر اساس این رده‌های وزنی، بر اساس قضاوت کارشناسی صورت گرفته است. شکل ۱۲ نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محدوده‌ی مخزن سد بهشت‌آباد، با استفاده از روش آماری را نشان می‌دهد.

۳-۴- روش شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ (ANN)

روند کلی بحث در شبکه‌ی عصبی، تقلید از شیوه‌ی عملکرد مغز برای حل مسائل و هوشمندسازی سیستم‌های عصبی است. امروزه شبکه‌های عصبی مصنوعی برای کاربردهای علمی و مهندسی مختلف و به خصوص به دلیل امکان مدل کردن یک فرایند بکار می‌روند. در این میان، شبکه‌های عصبی به‌طور ویژه‌ای در زمینه‌ی مطالعه‌ی زمین‌لغزش‌ها و با عطف به تعیین غیرمستقیم عوامل محرک در وقوع زمین‌لغزش و نیز به نقشه درآوردن مناطق مستعد زمین‌لغزش، به‌کار گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که بسیاری از شبکه‌های عصبی مصنوعی بر اساس روش‌های آماری عملیات خود را انجام می‌دهند. با این حال تفاوت‌هایی میان این روش و روش‌های آماری وجود دارد. مهم‌ترین چیزی که به شبکه‌های عصبی مصنوعی این امکان را می‌دهد تا نگرشی متفاوت به مسائلی که قابل حل به روش‌های آماری نیستند بدهد، محدودیت‌های تئوریک آن‌ها است [۱۳].

اصلی‌ترین مفاهیم در مورد شبکه‌های عصبی مصنوعی به طور خلاصه عبارتند از [۱۲]:

- لایه‌ی ورودی: شامل نرون‌هایی (ساده‌ترین واحد ساختاری سیستم‌های عصبی) است که اطلاعات را دریافت کرده و بدون پردازش منتقل می‌کند.

- لایه‌ی میانی یا مخفی: ممکن است یک یا چند لایه باشد و کار پردازش اطلاعات در این لایه انجام می‌گیرد.

- لایه‌ی خروجی: این لایه نتایج را منتقل می‌کند.

- مفهوم وزن: این ضریب تعیین می‌کند که اهمیت و ارزش

رگرسیون چندگانه و تحلیل جداکننده، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در این روش‌ها، مراحل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل اطلاعات، طولانی و وقت‌گیر هستند.

محققین مختلف مقایسه بین روش‌های مختلف آماری را انجام داده‌اند که هر یک دارای ملاحظه و نتایج مختلف است [۲۸،۳۱]. با این وجود هیچ یک به طور مطلق روش آماری چندمتغیره را به روش دومتغیره ترجیح نداده‌اند و فقط با ذکر مزایا و معایب این دو روش، انتخاب روش مناسب را به میزان داده‌های مورد نیاز و مقیاس منطقه ارتباط داده‌اند. در تحقیق جاری، به دلیل داده‌های کم از زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در مقایسه با مساحت کل منطقه و نیز وسعت زیاد حوزه، روش دومتغیره انتخاب شده است. مزیتی که این روش نسبت به روش چندمتغیره دارد این است که برای تعیین عوامل مؤثر در زمین‌لغزش یا ترکیبی از آن‌ها برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش، در کنار روش بینا امکان استفاده از قضاوت کارشناسی در شرایط کمبود داده نیز توسط افراد متخصص در امر آنالیز خطر ممکن می‌گردد. بدین ترتیب انعطاف‌پذیری روش دومتغیره برای تحلیل و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که روش آماری چندمتغیره را با سیستم GIS نمی‌توان اجرا کرد.

در این قسمت به منظور انجام پهنه‌بندی، از روش آماری دومتغیره (جمع جبری وزن زیرگروه‌ها در هر واحد) استفاده شده است. علل انتخاب این روش به قرار زیر است [۱،۳۱].

- روشی ساده و قابل اجرا برای مناطق مختلف است.
- امکان تغییر وزن‌های لایه‌ها و امتیاز زیرگروه‌ها، بسیار ساده است.
- سرعت محاسبه‌های آن به وسیله‌ی سیستم GIS بسیار زیاد است.

روش ساده و مؤثر در تحلیل‌های آماری برای تعیین اهمیت عوامل مختلف وقوع زمین‌لغزش، با استفاده از قطع دوجه‌دوی نقشه‌ی زمین‌لغزش با عوامل مؤثر است. در این روش، تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر یک از زیرگروه‌ها به راحتی قابل محاسبه است. بدین منظور دو نوع تراکم مدنظر است: تراکم سطحی و تراکم تعداد [۳۱]. در این تحقیق از تراکم سطحی و بر اساس تعداد ۶ لایه اطلاعاتی انتخابی (سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، حداکثر بارش ۲۴ ساعته، شتاب بیشینه زمین‌لرزه یا PGA) استفاده شد.

تراکم سطحی (D_{area}) به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۱]:

$$D_{area} = \frac{ASx_i}{Ax_i} \times 100 \quad (2)$$

که در آن ASx_i سطح درگیر زمین‌لغزش در زیرگروه Am و Ax_i مساحت زیرگروه Am هستند.

در ادامه برای محاسبه‌ی امتیاز هر زیرگروه، باید تراکم سطحی هر یک از آن‌ها با تراکم متوسط لغزش در کل منطقه مقایسه گردد. برای این کار از رابطه‌ی زیر استفاده شد [۳۱]:

¹ Artificial Neural Network

اهداف مختلف، به گونه‌ای در شبکه‌ی عصبی آموزش می‌بیند که در نهایت، شبکه ویژگی‌های مدنظر کاربر را برای آن تعریف می‌کند.
- دسته‌بندی و کلاسه‌بندی: از مهمترین ویژگی‌های این شبکه، دسته بندی خروجی‌ها است.

- برای یافتن نگاشت‌های نامعلوم: بدین معناست که در مورد پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، مناطقی فاقد اطلاعات هستند و این شبکه‌ی عصبی است که با استفاده از قانون رگرسیون، بهترین داده‌ها را به این مناطق نسبت می‌دهد.

مراحلی که برای اجرای روش شبکه عصبی در راستای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محدوده سد بهشت‌آباد طی شده‌اند، در ادامه بیان می‌گردد.

۳-۴-۱- آماده کردن و تقسیم اطلاعات برای آموزش و آزمایش شبکه برای آماده کردن سیستم شبکه‌ی عصبی به یک سری اطلاعات برای آموزش و آزمایش نیاز است. این اطلاعات مربوط به مناطقی است که قبلاً به وسیله‌ی مطالعه دفتری و صحرایی به دست آمده‌اند و شامل دو بخش هستند:

۱- نقشه‌ی زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده: که همان نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه است.

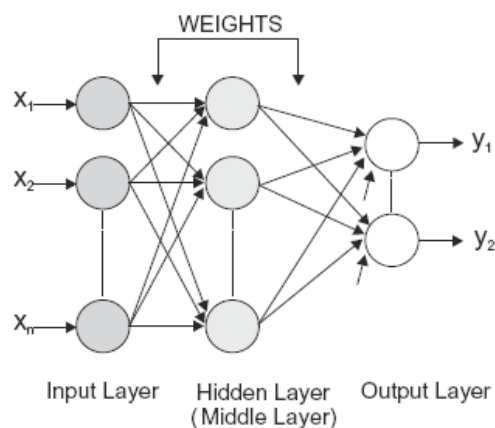
۲- نقشه‌ی مناطق غیر لغزشی که مناطقی در فاصله‌ی ۳۰ تا ۵۰ متری از حاشیه‌ی رودخانه‌های بهشت‌آباد و کوه‌رنگ و در شیب‌های کم‌تر از ۵ درجه را دربر گرفته و بیانگر محدوده‌هایی خواهد بود که احتمال بروز زمین‌لغزش وجود ندارد.

تقسیم‌بندی منطقه به واحدهای کوچکتر ممکن است به یکی از سه روش واحدهای شبکه‌ای، واحدهای دامنه‌ای و واحدهای طبیعی صورت گیرد. جزئیات هریک از این روش‌های واحدبندی در مرجع [۱۵] ارائه شده است. با توجه به اینکه داده‌های مورد نیاز برای استفاده در شبکه عصبی و نیز سیستم GIS به صورت رستری انتخاب شده‌اند، برای جلوگیری از ایجاد تعداد زیادی واحدهای کوچک، در این تحقیق از روش واحدبندی شبکه‌ای منظم چهارگوش استفاده شد. اندازه‌ی در نظر گرفته شده برای هر پیکسل ۵۰ × ۵۰ متر است. این اندازه‌ی پیکسل، با توجه به وسعت بسیار زیاد منطقه وقت زیادی را برای محاسبه لازم داشت. از طرف دیگر، اندازه‌ی بزرگ‌تر برای پیکسل‌ها، با اندازه و ابعاد برخی از زمین‌لغزش‌ها مغایرت دارد.

باید توجه داشت که اساس کار در شبکه‌ی عصبی مورد نظر، استفاده از پیکسل‌های موجود در هر نقشه از عوامل و نیز دو نقشه‌ی مذکور است [۱۲]. بنابراین تمام این نقشه‌ها به شکل رستری مورد استفاده قرار گرفتند. نتیجه‌ی واحدبندی منطقه، شامل یک سری پیکسل برای مناطق لغزش یافته و تعدادی پیکسل برای مناطق لغزش نیافته و یک سری پیکسل نیز مربوط به کل منطقه است. در این جا به این نکته اشاره نمود که تعداد پیکسل‌های موجود برای مناطق لغزشی، بسیار اندک بوده و ممکن است نتایج نهایی را تحت تأثیر قرار دهد.

اطلاعاتی که به نرون می‌رسد، چقدر است.

- مفهوم حافظه: در شبکه‌های عصبی مصنوعی، مفهوم حافظه به صورت مقادیر اتصال موجود بین نرون‌ها یا همان وزن‌ها تعریف می‌شود. در شکل ۱۱ ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی ساده به طور شماتیک ارائه شده است [۱۲].



شکل ۱۱: ساختار کلی یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی [۱۲]

Fig.11. General formation of an Artificial Neural Network [12]

روش شبکه عصبی، روشی غیرمستقیم برای به نقشه درآوردن مناطق مستعد بوده که در آن مدل‌های جعبه‌سیاه مشابه با سایر روش‌های آماری امکان ایجاد این نقشه‌ها را فراهم می‌کند. منظور از مدل جعبه سیاه این است که کاربر شبکه، در امر تعیین عواملی مانند وزن میان نرون‌ها، هیچ گونه دخالتی نداشته و این شبکه است که با آموزشی که دیده است (مانند تعداد تکرار، سرعت آموزش و غیره) بهترین رگرسیون را برای خروجی‌های شبکه تعیین می‌کند [۱۳].

نخستین مرحله در استفاده از یک روش شبکه عصبی مصنوعی، مرحله‌ی آموزش است که بر اساس تابعی از نوع شبکه‌ی عصبی، دارای اشکال متفاوتی خواهد بود. در این میان شاید بتوان شبکه‌های نوع پرسپترون چند لایه^۱ (MLP) را به عنوان عمومی‌ترین و پرکاربردترین نوع شبکه‌های عصبی معرفی کرد [۴،۱۳].

الگوی آموزش شبکه‌ی عصبی مورد استفاده در این مطالعه، از نوع پس‌انتشار^۲ (BP) است. این الگو نوعی از شبکه‌ی پرسپترون است که وزن‌های تعریف شده برای عوامل، در چندین تکرار بین لایه‌های خروجی و لایه‌های مخفی، ثبت می‌گردند [۴،۱۲].

به دلیل کاربردهای مهم شبکه‌ی عصبی نوع پرسپترون، در این تحقیق برای جبران کاستی‌های سایر روش‌های انتخابی استفاده شده است. مهمترین این کاربردها عبارتند از [۴]:

- امکان شناسایی ویژگی‌ها: به این معنا که الگوی ارائه شده برای

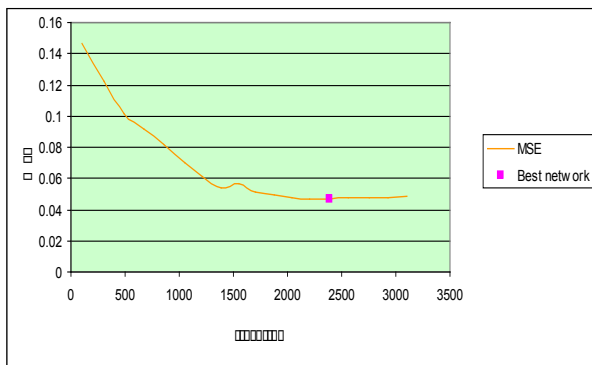
¹ Multi Layer Perceptron

² Back Propagation

۳-۴-۳- اجرای آموزش و رسیدن به خطای مطلوب

هدف از آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی، تعدیل وزن‌ها و رسیدن به یک خطای حداقل است. آموزش با یک تابع خطا که بر حسب مقادیر اولیه‌ی وزن‌ها و آستانه‌ها بوده، آغاز می‌گردد. وقتی که خطا برابر صفر یا برابر مقداری بسیار کوچک شد، وزن‌ها و شبکه به حالت ماندگار خود رسیده‌اند. حالت ماندگار وزن‌ها، برنامه و مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی را تعیین می‌کند [۴،۳۳]. در نهایت مقادیر پیشنهادی وزن‌های داده شده توسط نرم‌افزار برای هر عامل و یا لایه‌ی اطلاعاتی در جدول ۳ ارائه شده‌اند [۶،۷].

میزان خطای مورد قبول برای شبکه که بیانگر روش پایان‌دهی آموزش است، برابر با 0.001 انتخاب شده است. بر این اساس و در تعداد تکرارهای لازم برای آموزش شبکه، شکل ۱۲ برای انتخاب خطای قابل قبول شبکه ارائه می‌شود. خطای موردنظر در این جا، خطای مربع میانگین (MSE) است. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌گردد، تعداد تکراری برابر با ۲۳۸۷ و خطایی برابر با 0.0047 ، بهترین حالت را برای شبکه مشخص می‌کند.



شکل ۱۲: نمودار تعداد تکرار در برابر خطا برای تعیین تکرار و خطای قابل قبول شبکه

Fig.12. A graph to show repetition versus error for acceptable error of Network

بعد از مشخص کردن ساختار اصلی شبکه‌ی عصبی و فراهم نمودن اطلاعات مورد نیاز برای تربیت و آموزش سیستم عصبی و همچنین برای رسیدن به خطای قابل قبول، شبکه آماده است تا تحلیل مناطقی که قبلاً با آن‌ها مواجه نشده است را انجام دهد. برای این منظور، با در

هر پیکسل از هر نقشه (نقشه‌ی عامل زمین‌لغزش) یک سری اطلاعات را دریافت می‌کند و بدین ترتیب هر پیکسل حاوی ۶ مشخصه (تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این تحقیق) و لایه‌ی اطلاعاتی است. بر این اساس، ماتریسی با تعداد ستون‌هایی برابر با تعداد لایه‌های اطلاعاتی و نیز ستونی به عنوان خروجی شبکه و نیز تعداد ردیف‌های آن برابر با تعداد داده‌های مورد نظر برای مرحله آموزش و آزمایش، تعریف شد. در مرحله آزمایش، نتایج به‌دست آمده قابل مقایسه با مرحله آموزش بوده و نزدیکی نتایج در این دو مرحله است که ساختار شبکه و نتیجه‌ی نهایی را مشخص می‌کند [۴،۱۳].

تعداد پیکسل انتخابی برای شبکه‌ی عصبی به گونه‌ای است که تعداد کل پیکسل‌های مربوط به مرحله‌ی آموزش و آزمایش حدود ۲۶۱۶ انتخاب شده است که تعداد ۲۰۱۶ پیکسل برای مرحله‌ی آموزش و مابقی یعنی تعداد ۶۰۰ پیکسل برای مرحله‌ی آزمایش در نظر گرفته شدند (هر کدام شامل دو قسمت است: پیکسل‌های لغزش‌یافته و پیکسل‌های لغزش نیافته).

۳-۴-۲- تعیین تعداد نرون ورودی و خروجی و نوع تابع آستانه و نیز تعداد نرون‌های لایه پنهانی و نرخ یادگیری

برای جلوگیری از اتلاف وقت و نیز به منظور تعیین برخی عوامل مورد نظر برای ارائه به شبکه‌ی عصبی و به طور کلی برای تعیین ساختار شبکه، از نرم‌افزار Alyuda Forecaster-XL استفاده گردید. در نهایت، ساختاری که توسط این نرم‌افزار برای شبکه ارائه شد به صورت ۱-۱۹-۶ است، به این مفهوم که شبکه دارای ۶ لایه‌ی ورودی، ۱۹ لایه‌ی مخفی و یک لایه‌ی خروجی است.

برای ارتباط لایه‌های ورودی، میانی و خروجی، از توابع انتقال استفاده می‌شود [۳۳]. در این مرحله از اجرای شبکه عصبی، تابع انتقال در لایه‌ی اول برابر logsig و در لایه‌ی دوم برابر logsig انتخاب شدند. از طرف دیگر برای فرایند آموزش نیز تابع یادگیری traingdx به شبکه معرفی گردید [۱۰].

ضریب یادگیری اعمال شده در شبکه‌های عصبی در بازه‌ی بین صفر و یک متغیر است [۳۳] که در شبکه‌ی عصبی موجود، با انجام روش سعی و خطا این ضریب برابر با 0.3 انتخاب گردید.

برای آموزش شبکه وزن‌های اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند [۳۳]. بدین منظور این وزن‌ها در بازه‌ی $[0.25, -0.25]$ قرار گرفتند.

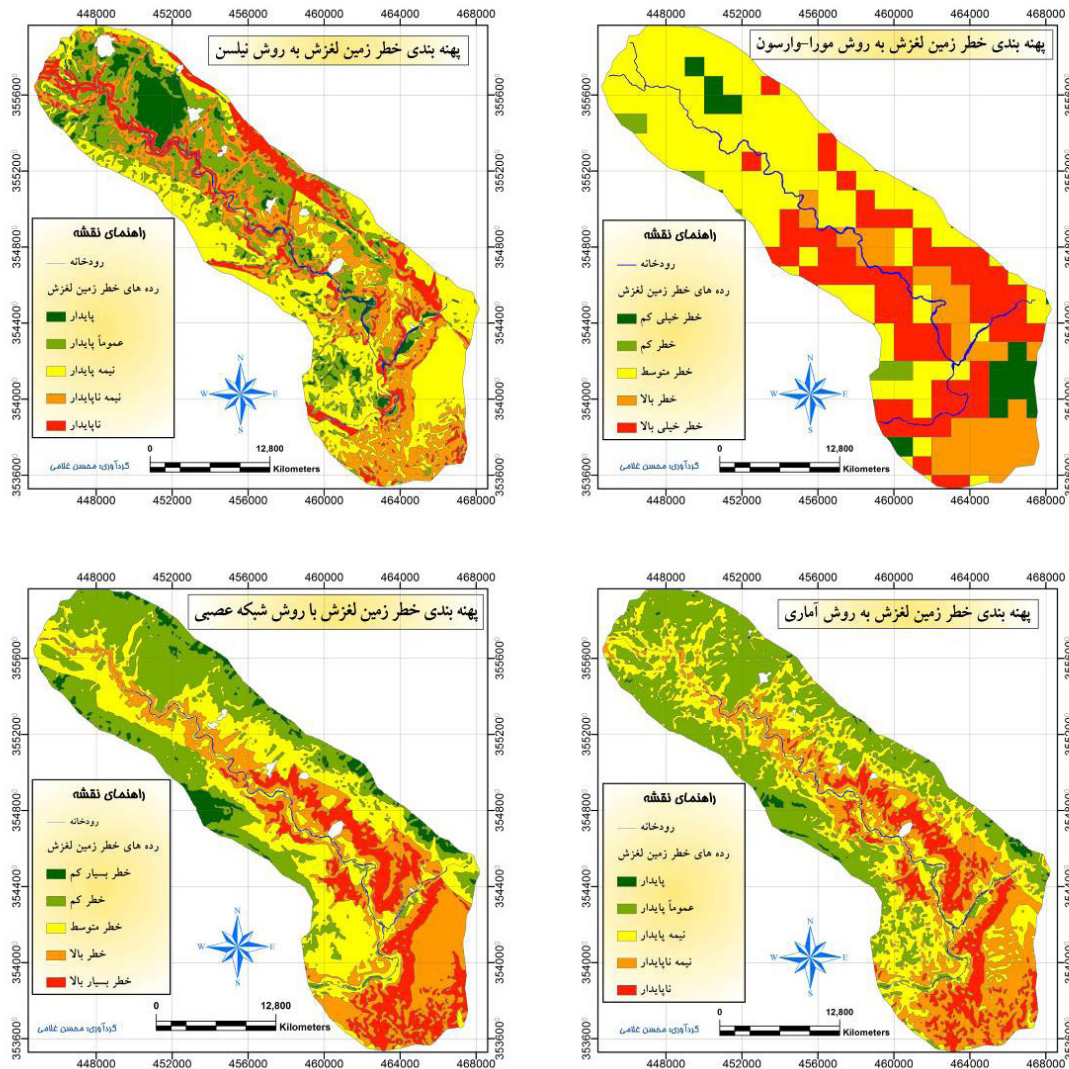
جدول ۳: تأثیر لایه‌های اطلاعاتی در منطقه برای وقوع زمین‌لغزش به روش شبکه عصبی [۶،۷]

Table 3. Effect of database layers for landslide in ANN method in area [6.7]

عامل	سنگ‌شناسی	شیب	جهت شیب	ارتفاع	بارش	زمین‌لرزه
درصد تأثیر عوامل	۴۰/۸۹۱٪	۲۴/۹۷۱٪	۱۲/۱۲۶٪	۲/۹۹۳٪	۱۷/۵۴۸٪	۱/۴۷۱٪

مورد نظر برای رده‌بندی خطر زمین‌لغزش، از این شبکه استخراج شده است. با دسته‌بندی مقادیر به‌دست آمده از شبکه، می‌توان منطقه‌ی مورد مطالعه را به نواحی متفاوت از نظر خطر زمین‌لغزش تقسیم‌بندی کرد. نقشه‌ی تهیه شده از این روش، در شکل ۱۳ ارائه شده است.

دست داشتن وزن‌های مرحله‌ی پایانی مرتبط با آموزش شبکه، کل منطقه در اختیار شبکه قرار می‌گیرد. در این حالت برای هر پیکسل مقداری بین صفر و یک توسط سیستم تعیین گردید. با پایان اجرای سیستم عصبی، شبکه به حالت پایدار رسیده و وزن‌ها و محدوده‌های



شکل ۱۳: نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش‌های نیلسن اصلاح شده، مور-وارسون، شبکه عصبی و آماری دومتغیره

Fig.13. Landslide Hazard Zonation Maps by using selective methods

$$P = \frac{k_s}{S} \left(1 - \frac{k - k_s}{n - s}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

که در آن:

P = احتمال تجربی (دقت روش)

n = مساحت کل منطقه

k_s = مساحت لغزش‌های رخ داده در خطر متوسط به بالا

S = مساحت لغزش یافته در کل منطقه

k = مساحت رده‌های خطر متوسط به بالا

۴- روش‌های ارزیابی دقت و درستی نقشه‌های پهنه‌بندی

برای آزمایش نقشه‌ی پهنه‌بندی و اجتناب از خطاهای انسانی که در به کارگیری فرمول‌ها و وارد نمودن روابط در GIS ممکن است پیش بیاید، لازم است درستی این نقشه بررسی شود. ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از انطباق نقشه‌های پهنه‌بندی به‌دست آمده با نقشه زمین‌لغزش‌های منطقه امکان‌پذیر است.

برای ارزیابی این نقشه‌ها چند روش ارائه شده است، از جمله

رابطه‌ی ۴ [۱۵، ۱۸]:

در این روش هر چقدر عامل احتمال (P) محاسبه شده برای نقشه‌ی پهنه‌بندی به عدد ۱۰۰ نزدیک شود، بیانگر دقت بالای نقشه بوده و در مقابل اعداد پائین و به ویژه کمتر از ۵۰٪ دلالت بر ناتوانی نقشه و روش مورد استفاده خواهد داشت. نتایج حاصل از این روش در مطالعه حاضر را می‌توان

در جدول ۴ ملاحظه کرد. روش دیگر استفاده از شاخص لغزش است که حاصل تقاطع نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با نقشه‌ی پراکنش زمین لغزش‌هاست و با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳]:

جدول ۴: بررسی و مقایسه دقت روش‌های پهنه‌بندی در منطقه‌ی مورد مطالعه

Table 4. Comparison of accuracy for different methods in study area

روش پهنه بندی	مورا- وارسون	نیلسن اصلاح شده	آماري	شبکه‌ی عصبی مصنوعی
احتمال تجربی یا دقت (P)	۴۱/۷٪	۵۸/۴٪	۶۹٪	۶۷٪
اولویت روش	۴	۳	۱	۲

جدول ۵: مقایسه‌ی روند تغییرهای شاخص لغزش (L_i) در روش‌های مختلف پهنه‌بندی

Table 5. Comparison of changes in Landslide Index for different methods in study area

روش پهنه‌بندی	مورا- وارسون	نیلسن اصلاح شده	آماري	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	روش پهنه‌بندی
					رده‌ی خطر
۱	۵	۱/۵	۰	۰	۱
۲	۰	۷/۹	۰/۴۸	۰/۲	۲
۳	۸/۱	۵/۹	۶/۱۷	۸/۴۶	۳
۴	۳۵/۶	۴۴/۶	۲۰/۸	۲۲	۴
۵	۵۱/۳	۴۰/۱	۷۲/۶	۶۹/۳	۵

ارائه شده است. چنانچه در این جدول مشاهده می‌گردد، روش‌های آماری دومتغیره و شبکه‌ی عصبی مصنوعی، روند بسیار منطقی‌تری را نسبت به سایر روش‌ها در افزایش شاخص لغزش همراه با افزایش رده‌های خطر، از خود نشان می‌دهند. به گونه‌ای دیگر می‌توان بیان داشت که هر چه میزان این شاخص در رده خطر ۵ در هر روش بیشتر باشد، بیانگر توانایی بالاتر آن روش در اجرای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش است.

روش دیگر برای ارزیابی میزان اعتبار و دقت نقشه‌های پهنه‌بندی ترسیم منحنی ROC برای هر یک از نقشه‌های خطر است. منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند [۱۶، ۲۶، ۳۳].

در حقیقت منحنی ROC یک نمایش تصویری از موازنه‌ی بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از نقاط برش (یا همان مقادیر مربوط به رده‌های خطر) است. سطح زیر منحنی ROC با عنوان 'AUC بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین لغزش) و رخ نداده (عدم وقوع زمین لغزش) است. به عبارت دیگر این سطح نشانگر این است که با چه احتمالی همواره مقدار

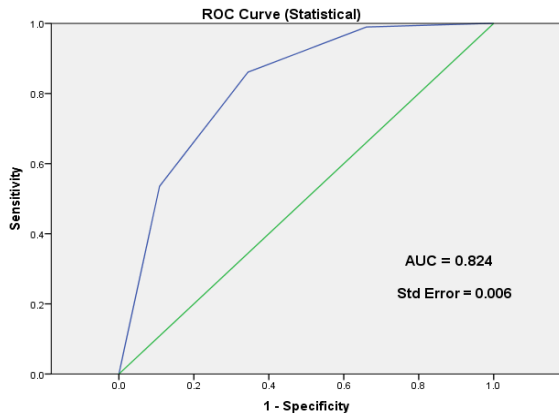
$$L_i = \frac{\left(\frac{S_i}{A_i}\right)}{\left(\sum_i^n \frac{S_i}{A_i}\right)} \times 100 \quad (5)$$

که در آن: L_i = شاخص خطر زمین لغزش
 A_i = مساحت زمین لغزش‌ها در هر پهنه‌ی خطر
 S_i = مساحت پهنه‌ی خطر
 n = تعداد طبقه‌های مربوط به پهنه‌های خطر زمین لغزش

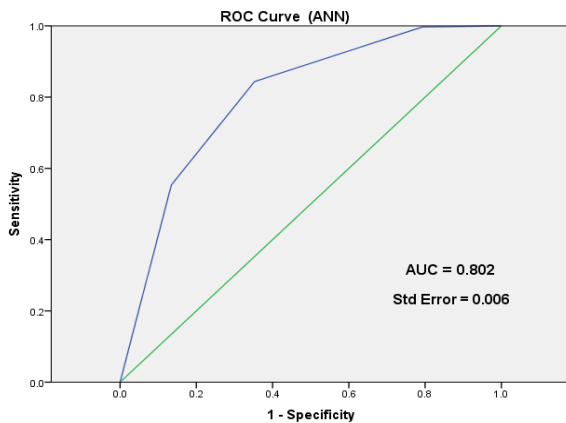
با افزایش مساحت لغزش‌های رخ داده در هر پهنه، شاخص لغزش نیز فزونی می‌یابد. بنابراین در پهنه‌های جدا شده چنانچه با افزایش رده‌ی خطر، شاخص لغزش نیز به طور معقول و قابل ملاحظه‌ای بیشتر گردد نشانگر توانایی و دقت بالای روش مورد استفاده خواهد بود. نتایج به دست آمده به روش شاخص لغزش نیز در جدول ۵ برای هر یک از روش‌های پهنه‌بندی ارائه شده‌اند.

همان‌گونه که از جدول ۴ استنتاج می‌شود، روش آماری و با اختلافی ناچیز با روش شبکه عصبی، بیشترین دقت را در بین سایر روش‌ها دارد. در جدول ۵ نیز روند تغییرات شاخص لغزش (L_i) در روش‌های مختلف

¹ Area Under Curve



شکل ۱۶: منحنی ROC و سطح زیر منحنی در روش آماری دومتغیره
Fig.16. ROC curve with AUC value in Two-varient statistical method



شکل ۱۷: منحنی ROC و سطح زیر منحنی در روش شبکه عصبی مصنوعی
Fig.17. ROC curve with AUC value in ANN method

همبستگی کیفی-کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت زیر تعریف شده است [۳۵]:

- الف- (۰/۹-۱) خیلی عالی
- ب- (۰/۸-۰/۹) خیلی خوب
- ج- (۰/۷-۰/۸) خوب
- د- (۰/۶-۰/۷) متوسط
- ه- (۰/۵-۰/۶) ضعیف

بدین ترتیب می‌توان همبستگی به‌دست آمده برای نقشه‌های پهنه‌بندی را در محدوده مورد مطالعه در رده خیلی خوب و خوب در نظر گرفت.

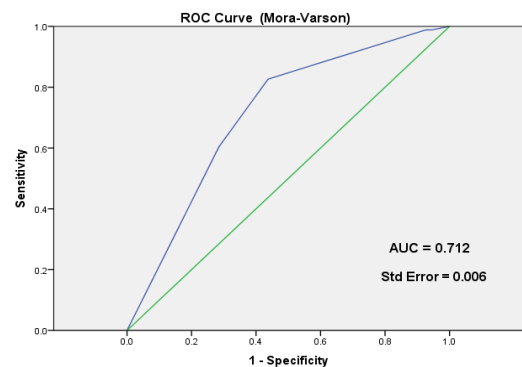
۵- نتیجه‌گیری

پس از تهیه نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌های قدیمی و بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های محدوده مخزن سد بهشت‌آباد و نیز مقایسه هریک از روش‌های پهنه‌بندی و ارزیابی دقت هریک از این نقشه‌ها با

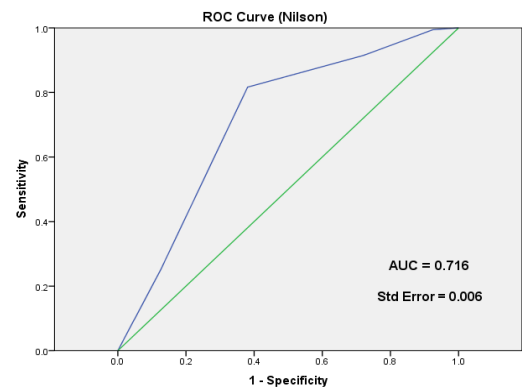
نسبت فراوانی (ریسک) یک نقطه زمین‌لغزش انتخابی، از مقدار ریسک یک نقطه بدون لغزش بیشتر است [۲].

ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد 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 برابر ۰/۵ است و زمانی که سطح زیرمنحنی ROC برابر با یک باشد بیانگر بهترین دقت برای نقشه‌ی پهنه‌بندی است [۳۳].

برای بکارگیری منحنی ROC در این تحقیق، داده‌هایی شامل پیکسل‌های مربوط به مناطق لغزشی و تعدادی پیکسل تصادفی دیگر از مناطق بدون زمین‌لغزش تهیه شدند. با توجه به وجود تعداد ۱۲۶۶ پیکسل مختص مناطق لغزشی در نقشه پراکنش، در نهایت یک ماتریس 2×1266 برای هریک از مدل‌های پهنه‌بندی ایجاد شد که برای بررسی تخمین‌های صورت گرفته از وقوع و یا عدم وقوع زمین‌لغزش در رده‌های خطر (در نقشه‌های پهنه‌بندی) در نرم‌افزار SPSS استفاده شدند. منحنی‌های ROC به‌دست آمده از این نرم‌افزار برای هریک از این ماتریس‌ها در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ دیده می‌شود. بدین ترتیب نقشه‌های خطر زمین لغزش با استفاده از منحنی ROC و با در نظر گرفتن سطح زیر منحنی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۴: منحنی ROC و سطح زیر منحنی در روش مورا-وارسون
Fig.14. ROC curve with AUC value in Mora-Vahrson method



شکل ۱۵: منحنی ROC و سطح زیر منحنی در روش نیلسن
Fig.15. ROC curve with AUC value in Nilson method

- susceptibility mapping using the weight of evidence method in the Tinau watershed, Nepal”, *Natural hazards* 63 (2), 479- 498, 2012.
- [3] Guzzetti, F; Carrara, A; Cardinali, M; “Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy”, *Geomorphology* 31 (1- 4), 181- 216, 1999.
- [4] Schicker, R; Moon, V; ”Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale”, *Geomorphology* 161- 162, 40- 57, 2012.
- [5] Lan, H. X.; Zhau, C. H.; Wang, L. J.; Zhang, H. Y.; Li, R. H.; ”Landslide Hazard Spatial Analysis and Prediction Using GIS in the Xiaojiang Watershed, Yunnan: China”, *engineering geology* 76, 109- 128, 2004
- [6] Kayastha, P; Dhital, M.R; Smedt, F.D; “Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal”, *Comput. Geosci.* 52, 398- 408, 2013.
- [7] Atkinson, P.M; Massari, R; “Generalized linear modelling of landslide susceptibility in the central Apennines, Italy”, *Comput. Geosci.* 24, 373- 385, 1998.
- [8] Ercanoglu, M; Gokceoglu, C; “Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey)”, *Eng. Geol.* 75 (3&4), 229- 250, 2004.
- [9] Soyoung, P; Chuluong, C; Byungwoo, K; Jinsoo, K; “Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea”, *Environ. Earth Sci.* 68 (5), 1443- 1464, 2013.
- [10] Ermini, L.; Catani, F.; Casagli, N; “Artificial Neural Networks Applied to Landslide Susceptibility Assessment”, *geomorphology* 66, 327- 343, 2005.
- [11] Ercanoglu, M., “Landslide Susceptibility Assessment of SE Bartın(West Black Sea region, Turkey) by Artificial Neural Networks”, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 979- 992. 2005.
- [12] Kanungo, D.P; Arora, M.K; Sarkar, S; Gupta, R.P; “A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas”, *Eng. Geol.* 85, 347- 366, 2006.
- [13] Ning, J; Yasuhiro, M; Mowen, X; Ibrahim, D; “Shallow landslide hazard assessment using a three-dimensional deterministic model in a mountainous area”, *Comput. Geotech.* 45, 1- 10, 2012.
- [14] Nash, D; “A comparative review of limit equilibrium
- استفاده از روش‌های مختلف و به ویژه ترسیم منحنی‌های ROC، نتایج تحلیل به طور کمی توسط سطح زیر منحنی ROC یا همان AUC مبنای نتیجه‌گیری قرار گرفته است که در ادامه بیان می‌شوند:
- ۱- مقدار AUC به‌دست آمده برای روش مور-وارسون (۰/۷۱۲) حاکی از همبستگی خوب در این نقشه است. با این حال، بدلیل در نظر گرفتن اندازه‌ی بزرگ (۱۰۰۰ متر) برای واحدهای مورد نظر به منظور شبکه‌بندی منطقه، استفاده از این روش برای مناطقی که دارای غیریکنواختی زیادی در لایه‌های اطلاعاتی هستند، توصیه نمی‌شود.
- ۲- در روش نیلسن اصلاحی، پهنه‌های موجود دارای بی‌نظمی از لحاظ توزیع رده‌های خطر بوده و به دلیل جدایی غیرمنطقی رده‌های خطر (به‌ویژه رده‌های ۴ و ۵) نسبت به دو روش آماری و شبکه عصبی دارای مقدار AUC کمتری هستند.
- ۳- روش آماری بکار گرفته شده در این مطالعه، دارای مقدار AUC برابر با ۰/۸۲۴ بوده که در مقایسه با مقادیر به‌دست آمده برای سایر روش‌ها بیانگر همبستگی خیلی خوب در تفکیک رده‌های خطر و ارزیابی تخمین است.
- ۴- روش شبکه‌ی عصبی با مقدار AUC برابر با ۰/۸۰۲ و با وجود در اختیار داشتن اطلاعات ناکافی به منظور وارد کردن در سیستم، در کنار روش آماری نشان‌دهنده‌ی همبستگی خیلی خوب در جدایی رده‌های خطر و ارزیابی تخمین است.
- ۵- باید به واقعیت‌های موجود در پهنه‌بندی برای منطقه‌ی مورد مطالعه و قضاوت کارشناسی در بکارگیری روش‌های پهنه‌بندی نیز توجه داشت. شرایط حاکم بر منطقه‌ی مورد مطالعه از سد بهشت آباد شامل شرایطی از قبیل گسترش واحدهای کاری مختلف (سنگ‌شناسی، شیب و غیره)، بیانگر اهمیت این واحدها در آن منطقه است و از سوی دیگر با وجود نادیده گرفتن عواملی مانند بارندگی در روش نیلسن ولی این روش برخلاف جدول ۵ در مقایسه با روش مور-وارسون در اولویت قرار دارد.
- ۶- بر اساس نتایج منحنی ROC، روش‌های آماری دومتغیره و شبکه عصبی مصنوعی با مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) به ترتیب برابر با ۰/۸۲۴ و ۰/۸۰۲ بیشترین دقت را در محدوده مورد مطالعه دارند. با این حال بنظر می‌رسد که اگر اطلاعات کامل‌تری از قبیل تعداد زمین‌لغزش‌های قدیمی بیشتر برای شبکه‌ی عصبی در اختیار کاربر قرار گرفته و نیز مقیاس بزرگ‌تر برای محدوده مورد مطالعه انتخاب گردد، برای بکارگیری در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش این روش از اولویت برخوردار خواهد بود.

منابع

- [1] Wu, Y.P; Chen,L; Cheng,C; Yin,K.L; Török, Á; “GIS-based landslide hazard predicting system and its real-time test during a typhoon, Zhejiang Province, Southeast China”, *Engineering Geology* 175, 9- 21, 2014.
- [2] Kayastha, P; Dhital, M.R; Smedt, F.D; “Landslide

- Persian)
- [25] Coates, D. R; "Landslide Perspectives, In: Landslides", *Geological Society of America*, pp.3- 28, 1977.
- [26] Van Western, C.J; "Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping", *International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation*", 21 pp, 2002.
- [27] Jalali, N; "Assessment of common methods for "Landslide susceptibility mapping in Taleqan watershed area", *1th Symposium on Landslides researches, Tehran*, pp. 103-115, 1381. (In Persian)
- [28] Van Westen, C. J; "Application of Geographic Information Systems to landslide Hazard Zonation", vol. 1, Theory, *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) Publication*, No. 15, 1993.
- [29] Gholami, M; Ajalloeian, R; "Determination of most effective parameters in landslide occurrence in Behesht Abad Dam reservoir by using CF model", *3th Iranian Rock Mechanics conference, Tehran, Iran*, 1386. (In Persian)
- [30] Gholami, M; Musazadeh, M; Ajalloeian, R; "Application of ANN to determine the weight of effective parameters on landslide, case study", *11th Iranian Geology Association conference, Mashhad, Iran*, 1386. (In Persian)
- [31] Research Center of Natural catastrophes; "A guideline to prepare Landslide Hazard Zonation Maps in Iran", *Final report, Tehran*, 108p, 1384. (In Persian)
- [32] Rakei, B; "Landslide Hazard Zonation by using ANN in Sefidargole, Semnan Porvince", MS.c Thesis, Modarres university, 1382. (In Persian)
- [33] Gee, M. D; "Classification of Landslide Hazard Zonation Methods and a Test of Predictive Capability", *6th International Symposium on Landslides: Christchurch, New Zealand*, pp. 947- 952, 1992.
- [34] Demuth, H; Beale, B; "Neural Network Toolbox(User's Guide) For Use With MATLAB", 1994.
- [35] Zhu, C; Wang. X; "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* 187, 342- 346, 2009.
- methods of slope stability analysis", In: Anderson, M.G., Richards, K.J. (Eds.), *Slope Stability*. Wiley, New York, pp. 11- 75, 1987.
- [15] Montgomery, D.R; Dietrich, W.E; "A physically based model for the topographic control on shallow landsliding", *Water Resources Research* 30 (4), 1153-1171, 1994.
- [16] Lee, S; Ryu, J.H; Min, K; Won, J.S; "Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network", *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 1361- 1376, 2003.
- [17] Jade, S., Sarkar, S.; "Statistical Models for Slope Instability Classification", *engineering geology* 6, 91- 98, 1993.
- [18] Yilmaz, I; "Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine", *Environ. Earth Sci.* 61, 21- 836, 2010.
- [19] Yesilnacar, E; Topal, T; "Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey)", *Eng. Geol.* 79 (3- 4), 251- 266, 2005.
- [20] Nefeslioglu, H.A; Gokceoglu, C; Sonmez, H; "An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps", *Engineering Geology* 97 (3- 4), 171- 191, 2008.
- [21] Gorsevski, P.V; Gessler, P.E; Foltz, R.B; Elliot, W.J; "Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis", *Transactions in GIS* 10 (3), 395- 415, 2006.
- [22] Purgasemi, H. R; Moradi, H. R; Mohammadi, M; Mostafazadeh, R; Golijirandeh, A, "A Landslide susceptibility mapping by usin Bayesian Theory", *Articultural Magazine.* 62, 1391. (In Persian)
- [23] Frattini ,P; Crosta, G; Carrara, A; "Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models", *Engineering Geology* 111, 62- 72, 2010.
- [24] ZayandAb CO; "Geology report of BeheshtAbad Dam reservoir", *Preliminary Report*, Isfahan, 1382. (In

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

M. Gholami, R. Ajalloeian, "Comparison Between Selected Experimental Methods And Statistical And Artificial Neural Network For Landslide Hazard Zonation Case Study: Behesht Abad Dam Reservoir".

Amirkabir J. Civil Eng., 49(2) (2017) 363-377.

DOI:10.22060/ceej.2015.374

