

# تهیه نقشه حساسیت پدیده زمین لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و مدل آماری دو متغیره در مخزن سد البرز

حمیدرضا قرهی<sup>۱</sup>، بهمن بهلولی<sup>۱</sup>، امیر سیار<sup>۲</sup> و محسن شریعت جعفری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup>شرکت مهندسی مشاوره مهتاب قدس، تهران، ایران

<sup>۳</sup>مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۴/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۲۳

## چکیده

رخداد زمین لغزش، باعث ورود خسارات زیادی به دارایی انسان‌ها و در مواردی تهدید زندگی آنها می‌شود. مدل‌های مناسب برآورد خطر زمین لغزش می‌تواند به کاهش خطرات لغزش و یا دوری جستن از نتایج ناخواسته گسیختگی دامنه‌ای کمک کند. به منظور تشخیص حساسیت زمین لغزش در مخزن سد البرز، ویژگی‌های ۱۸ مورد زمین لغزش به وقوع پیوسته در محدوده مورد مطالعه برداشت و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای LISS-IV و سامانه اطلاعات جغرافیایی تحلیل شد. روش تحلیل سلسله مراتبی سامانه‌ها (AHP)، روش شاخص آماری (Wi) و روش وزن‌دهی به عامل‌ها (Wf) برای تعیین اهمیت متغیرهای کنترل‌کننده و محرک زمین لغزش‌ها به کار گرفته شد. متغیرها شامل سنگ‌شناسی، شیب دامنه، سوی شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی است. نتایج نشان داد که سنگ‌شناسی، شیب و فاصله از آبراهه، نقش مؤثری در حساسیت زمین لغزش دارند. برای اطمینان از نقشه‌های تهیه شده، این نقشه‌ها با نقشه پراکنش ۱۲ زمین لغزش فعال مقایسه شد. نتایج به این صورت بود که در روش Wf، Wi و AHP به ترتیب ۸۳/۷۳، ۶۴/۲۶ و ۷۵/۲۷ درصد از زمین لغزش‌های فعال در طبقه‌های بالا و خیلی بالای حساسیت قرار گرفتند. همچنین در این مطالعه مشخص شد که روش شاخص آماری تصویر واقعی‌تری از پراکندگی حساسیت زمین لغزش نسبت به روش وزن‌دهی به عامل‌ها در محدوده مخزن سد البرز نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** زمین لغزش، نقشه حساسیت، سامانه اطلاعات جغرافیایی، تحلیل سلسله مراتبی، روش شاخص آماری، روش وزن‌دهی به عامل‌ها، سد البرز

E-mail: hgharahi@khayam.ut.ac.ir

\*نویسنده مسئول: حمیدرضا قرهی

## ۱- مقدمه

و چند متغیره، رگرسیون خطی، منطق فازی، شبکه عصبی مصنوعی و غیره است (Dai et al., 2001; Van Westen, 1997).

حائری و سمعی (۱۳۷۵)، در استان مازندران و گیلان اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ کردند. آنها پنج عامل سنگ‌شناسی، شیب، گسل، راه، رودخانه و میزان بارندگی را به‌عنوان عامل‌های مؤثر در استعداد گسیختگی دامنه در مدل خود مورد استفاده قرار دادند. آنها همچنین دو عامل زمین‌لرزه و شدت بارندگی را به‌عنوان عوامل محرک در نظر گرفته و در پایان با هفت کلاس خطر زمین لغزش، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را تهیه کردند.

احمدی و همکاران (۱۳۸۲)، پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای را با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغیره و تحلیل سلسله مراتبی در حوضه آبخیز گرمی‌چای استان اردبیل انجام دادند. با استفاده از این دو روش معلوم شد که، روش تحلیل سلسله مراتبی سامانه‌ها به دلیل داشتن متغیرهای بیشتر و طبقه‌بندی اصولی نسبت به روش رگرسیون چند متغیره، اهمیت و دقت بیشتری دارد. عوامل مؤثر در زمین لغزش‌های یادشده در بالا، سنگ‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، عناصر خطی، بارش، سوی دامنه و ارتفاع را شامل می‌شد.

Yalkin (2008)، بر مبنای سامانه اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و آماری دو متغیره، نقشه‌های حساسیت زمین لغزش برای منطقه Ardesen ترکیه تهیه کرد. عوامل سنگ‌شناسی، هوازدگی، شیب، سوی شیب، پوشش زمین، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی و فاصله از جاده برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش استفاده شد. سنگ‌شناسی، هوازدگی، پوشش زمین و شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در محدوده مورد بررسی تعیین شدند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، روش تحلیل سلسله مراتبی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل معرفی شد. Ayalew et al. (2005)، زمین لغزش‌های جزیره Sadou در ژاپن را بررسی کردند. ارتفاع، سنگ‌شناسی و شیب توپوگرافی به‌عنوان عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش

زمین لغزش یکی از شایع‌ترین خطرات طبیعی در مناطق شمالی ایران است. در این مناطق، زمین لغزش به‌علت‌های مختلف مثل ارتعاش، شیب زیاد، باران‌های شدید و فرسایش سریع در نتیجه جنگل‌زدایی و ساخت‌وساز رخ می‌دهد. با توجه به مسائل یادشده، برای انتخاب مکان‌های مناسب برای ساخت‌وساز، نیاز به بررسی شرایط زمین و پایداری دامنه‌ها است تا از خطرات احتمالی ناشی از زمین لغزش جلوگیری شود. برای کاهش خطر زمین لغزش تا حد قابل قبول، نیاز به فن‌آوری‌های پیشرفته، تبادل اطلاعات و تحلیل کامل عوارض زمین است تا با یک روش کامل و مناسب به‌همراه یک سیاست درست و به‌موقع در راستای کاهش خطر اقدام کرد. زمین لغزش‌ها نتیجه عملکرد دو مجموعه از نیروها هستند؛ عامل‌های مربوط به وضعیت دامنه (Precondition factors)، که به‌خاطر عوامل طبیعی ایجاد شده‌اند و عامل‌های تحریک‌کننده (Preparatory factors) که به‌وسیله عوامل طبیعی و مداخله انسان ایجاد می‌شوند. حساسیت به زمین لغزش، پتانسیل یک منطقه به ایجاد گسیختگی دامنه‌هاست. این کار با مرتبط کردن مجموعه‌ای از عامل‌های مؤثر در زمین لغزش با کمک دامنه‌هایی که پیش‌تر گسیخته شده‌اند، انجام می‌گیرد. نقشه‌های به‌دست آمده به‌عنوان ابزار اصلی در برنامه‌ریزی و طراحی برای بهره‌وری از زمین بویژه در مناطق کوهستانی مرطوب مانند مناطق شمالی ایران و بویژه در طرح‌های عمرانی است. به نقشه در آوردن مناطق با پتانسیل زمین لغزش بر مبنای شناخت به‌نسبت پیچیده حرکات دامنه‌ای و عامل‌های کنترل‌کننده آنهاست. اطمینان و اعتبار نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش بیشتر به کیفیت داده‌های در دسترس، مقیاس کاری، انتخاب مدل و روش تحلیل، وابسته است. فرایند ایجاد چنین نقشه‌هایی شامل چندین روش کیفی و کمی است. تلاش‌های اولیه برای تهیه چنین نقشه‌هایی با همپوشانی کیفی ویژگی‌های زمین‌شناسی و ریخت‌شناختی دامنه‌ها، نقشه‌های مربوط به پراکنش زمین لغزش‌ها و تعریف طبقات حساسیت تعریف می‌شود. روش‌های پیچیده‌تر شامل روش تحلیل سلسله مراتبی سامانه‌ها (AHP)، مدل‌های آماری دو متغیره

### ۳-۲. آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی

به دلیل واکنش متفاوت واحدهای زمین‌شناسی به فرایندهای زمین‌ریخت‌شناختی فعال، این عامل در تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش نقش مهمی را ایفا می‌کند. برای عامل زمین‌شناسی، نقشه واحدهای سنگ‌شناسی منطقه تهیه شد (شکل ۲). برای تهیه این نقشه، از اطلاعات موجود استفاده و مرزهای زمین‌شناسی مربوط به واحدهای سنگ‌شناسی در مشاهدات صحرایی بررسی و اصلاح شد. واحدها شامل Mn: ماسه‌سنگ و مارن، ls: ماسه‌سنگ و کنگلومرا، Cr: سنگ‌مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی، Pt: آهک بیوکلاستیک، Tr: آهک دولومیتی، Qt: پادگانه آبرفتی شامل ماسه‌شن‌دار با قلوه‌سنگ گرد تا نیمه‌گرد است. لازم به یادآوری است که واحدهای پادگانه آبرفتی (Qt) به دلیل تحلیل ساده‌تر در یک طبقه قرار گرفتند.

برای عامل‌های توپوگرافیک همچون شیب، سوی شیب و ارتفاع، از مدل ارتفاع رقمی با اندازه شبکه‌های ۱۰ متر و برای تهیه مدل ارتفاع رقمی از تصاویر ماهواره‌ای LISS-IV استفاده شد.

معمولاً دامنه‌هایی با شیب بیشتر در شرایط یکسان، آمادگی بیشتری برای لغزش دارند. بالاترین شیب دامنه باعث افزایش حجم و وزن نسبی توده لغزشی بر واحد سطح صفحه لغزش می‌شود و نیروی محرک لغزش را افزایش می‌دهد. در این پژوهش، بیشترین مساحت محدوده مخزن سد مربوط به شیب‌های کمتر از ۳۰ درجه است. ارتفاع نیز به دلیل کنترل میزان، نوع فرسایش و فعالیت انسان‌ها مهم تلقی می‌شود. تغییرات ارتفاع از ۲۷۵ تا ۹۵۰ متر بالاتر از سطح دریا در محدوده مخزن سد است. سوی شیب نیز می‌تواند پراکنندگی و تراکم زمین لغزش‌ها را به وسیله کنترل تمرکز رطوبت خاک تحت تأثیر قرار دهد.

ارتباط زمین لغزش با فاصله از گسل به صورت وارون است. در واقع هر چه فاصله از گسل کمتر باشد، احتمال زمین لغزش افزایش می‌یابد که ناشی از خردشدگی سنگ‌ها توسط گسل است. چهار پهنه برفی برای فاصله از گسل در نظر گرفته شد و همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد درصد رخداد لغزش در محدوده‌های نزدیک به گسل بیشتر بود.

تراکم زهکشی، نسبت طول کل آبراه‌ها به مساحت حوضه آبریز است. هر چه تراکم زهکشی‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد (Yalcin, 2008). برای وزن‌دهی به این عامل، تراکم زهکشی‌ها به پنج طبقه تقسیم شد. این طبقات شامل کمتر از ۱۵ (DD1)، ۱۵-۲۵ (DD2)، ۲۵-۳۵ (DD3)، ۳۵-۵۰ (DD4) و بیشتر از ۵۰ کیلومتر در هر کیلومتر مربع است.

آبراه‌ها ممکن است به صورت قابل توجهی پایداری دامنه را به وسیله فرسایش یا به وسیله اشباع بخش پایین مواد دامنه تحت تأثیر قرار دهند (Dai et al., 2001). برای یافتن حدود تأثیرات آبراه‌ها در رخداد لغزش، پنج محدوده برفی ایجاد شد که بیشترین درصد لغزش نیز در محدوده‌های برفی ابتدایی صورت گرفت.

### ۳-۳. روش تحلیل سلسله مراتبی

تحلیل سلسله مراتبی، همانند تئوری تصمیم‌گیری و تحلیل ناسازگاری (Conflict Resolution)، اندازه‌گیری را بر روی معیارهای با قابلیت کمی شدن و غیرعینی انجام می‌دهد (Vargas, 1990). روش تحلیل سلسله مراتبی یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره است که استفاده‌کننده را برای رسیدن به یک مقیاس ترجیحی از مجموعه‌ای از متغیرها توانا می‌سازد. این روش کاربرد زیادی در انتخاب سایت، آسان‌سازی تحلیل‌ها و تحلیل حساسیت به زمین لغزش دارد (Ayalew et al., 2005). برای وزن معیارها در روش AHP، باید یک ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شود. با ماتریس مقایسه زوجی، تأثیر هر معیار در رخداد زمین لغزش نسبت به دیگر معیارها به وسیله ارزیابی دوتایی و با استفاده از مقادیر نسبی میان ۱ تا ۹ برای عناصر تشکیل‌دهنده ماتریس مشخص می‌شود (جدول ۲). بنابراین، در ابتدا یک ماتریس

شناخته شدند. با استفاده از دو روش تحلیل سلسله مراتبی و رگرسیون منطقی، نقشه حساسیت زمین لغزش در محدوده مورد نظر انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده و کلاس‌های حساسیت مشخص شده، روش تحلیل سلسله مراتبی به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد.

توسعه سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، کاربرد روش‌های یاد شده را در مناطق با گسترش زیاد آسان کرده است. اجرای دستور همسایگی با سامانه اطلاعات جغرافیایی امکان به دست آوردن متغیرهای ریخت‌سنجی (Morphometry) و آب‌شناسی را از مدل ارتفاع رقمی فراهم می‌آورد.

هدف از این پژوهش، تشخیص عامل‌های تأثیرگذار در گسیختگی دامنه‌ها و تعیین ارتباط آنها با رخداد زمین لغزش در مخزن سد البرز، تعیین مدل مناسب حساسیت به زمین لغزش، مشخص کردن مناطق آماده لغزش با قابلیت اطمینان مناسب و در پایان، تعیین مناطقی که امکان رخداد زمین لغزش در بازه زمانی کوتاه را دارند، است. برای دستیابی به اهداف یاد شده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و آماری دو متغیره استفاده شد.

### ۲- موقیبت و ویژگی‌های محدوده مورد مطالعه

محدوده مخزن سد البرز، با گستردگی حدود ۶۳ کیلومتر مربع در سه شاخه فرعی رودخانه‌های بزرود، چاخانی و گزو در ۴۵ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان بابل و ۲۶۹ کیلومتری شمال خاوری تهران قرار گرفته است. گنجایش دریاچه با توجه به تراز عادی سد (۳۰۱ متر بالاتر از سطح دریا) حدود ۱۵۰ میلیون متر مکعب است. ویژگی‌های سه شاخه فرعی تشکیل‌دهنده مخزن سد البرز به صورت زیر است (شکل ۱):

- شاخه فرعی بزرود با راستای جنوب‌باختری- شمال‌خاوری، طول حدود ۳/۶ کیلومتر، شیب رودخانه ۱۹ در هزار، شیب دامنه‌ها به نسبت ملایم (حدود ۱۵ تا ۲۵ درجه) و از مارن‌ها و ماسه‌سنگ‌های میوسن تشکیل شده است.

- شاخه چاخانی با راستای شمالی- جنوبی، طول حدود ۳/۳ کیلومتر، شیب رودخانه حدود ۲۲ در هزار، شیب دامنه‌ها حدود ۱۵ تا ۳۰ درجه و بر روی نهشته‌های مارنی و ماسه‌سنگی میوسن واقع شده است.

- شاخه گزو با طول حدود ۳/۵ کیلومتر، شیب رودخانه در این شاخه ۱۵ در هزار، شیب دامنه‌ها حدود ۱۰ تا ۳۰ درجه و بر روی مارن‌های توده‌ای کوتاه قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع در محدوده مورد مطالعه ۹۵۰ متر بالاتر از سطح دریا است.

محدوده مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های آب‌شناسی دارای اقلیم مرطوب، متوسط میزان بارندگی ۷۵۰ میلی‌متر، کمترین درجه حرارت  $6/11^{\circ}\text{C}$ ، بیشترین درجه حرارت  $34^{\circ}\text{C}$  و تبخیر سالانه ۱۰۷۱ میلی‌متر می‌باشد. از نظر پوشش گیاهی، بیشتر سطح حوضه را اراضی جنگلی و بیشه‌زار متراکم تشکیل می‌دهد (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۷۷).

### ۳- روش پژوهش

#### ۳-۱. تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش

برای تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش نیاز به نقشه مربوط به پراکنش زمین لغزش‌ها است (شکل ۱). برای این منظور از عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ (تهیه شده توسط شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس) و تصاویر ماهواره‌ای LISS-IV (تهیه شده از سازمان جغرافیایی وزارت دفاع) استفاده شد. زمین لغزش‌های به نقشه در آمده (۱۸ زمین لغزش)، از نوع چرخشی هستند. اندازه کوچک‌ترین لغزش در حدود ۰/۱ کیلومتر مربع است، در حالی که بزرگ‌ترین زمین لغزش محدوده‌ای به وسعت ۰/۲۱ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. چندین زمین لغزش، اندازه‌ای نزدیک به کوچک‌ترین زمین لغزش داشتند در حالی که میانگین آنها در حدود ۰/۰۶ کیلومتر مربع است. مجموع ۱۸ زمین لغزش، حدود ۱/۶ کیلومتر مربع از حدود ۶۳ کیلومتر مربع محدوده مورد مطالعه را به خود اختصاص داده اند، که در حدود ۲/۵ درصد سطح منطقه است (جدول ۱).

که  $Wf$ ، مقدار وزن عامل‌ها برای هر عامل،  $TW_i$ ، مجموع مقادیر  $W_i$  مربوط به سلول‌هایی که در محدوده (پیکره) زمین‌لغزش‌ها قرار گرفته‌اند و برای هر عامل محاسبه می‌شود،  $TW_{i_{Min}}$ ، کمینه مجموع مقادیر  $W_i$  در میان عوامل انتخاب شده و  $TW_{i_{Max}}$ ، بیشینه مجموع مقادیر  $W_i$  در میان عوامل انتخاب شده است.

#### ۴- نتایج و بررسی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش

برای آگاهی از درستی نتایج بدست آمده، نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش تهیه شده با روش‌های  $Wf$ ،  $W_i$  و AHP با نقشه پراکنش ۱۴ زمین‌لغزش فعال تطابق داده شد. ابتدا هر کدام از نقشه‌ها به شش کلاس بر اساس انحراف معیار هیستوگرام تقسیم (Ayalew et al., 2005) (شکل ۳) و سپس با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های فعال مقایسه شد (شکل ۴). مناطق با حساسیت بالا و خیلی بالا (۵ و ۶) در روش‌های AHP،  $Wf$  و  $W_i$  به ترتیب ۷۵/۲۷، ۶۴/۲۶ و ۸۳/۷۳ درصد مناطق با لغزش‌های فعال را در بر می‌گیرند. حدود ۱۶، ۲۶ و ۲۵ درصد از مناطق لغزشی فعال در روش  $W_i$ ،  $Wf$  و AHP با حساسیت متوسط و به نسبت بالا (۳ و ۴) برابر هستند. در روش AHP هیچ‌گونه زمین‌لغزش فعالی در کلاس‌های حساسیت پایین و خیلی پایین قرار نگرفت اما در روش‌های  $W_i$  و  $Wf$  فقط ۰/۱۶ و ۰/۹ درصد از لغزش‌های فعال در کلاس حساسیت پایین (۲) قرار گرفت و کلاس حساسیت خیلی پایین هیچ لغزش فعالی را در بر نگرفت (شکل‌های ۵، ۶ و ۷).

#### ۵- نتیجه‌گیری

آگاهی از فرایندهایی که منجر به رخداد زمین‌لغزش می‌شود و تلاش برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش اطلاعات مفیدی از تکامل عوارض زمین فراهم می‌آورد و مبنای مدیریت بحران به شمار می‌آید. در این پژوهش، بررسی کاملی برای تشخیص خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در مخزن سد البرز انجام گرفت. برای این منظور، از روش‌های شاخص آماری ( $W_i$ )، وزن‌دهی به عامل‌ها ( $Wf$ ) و تحلیل سلسله مراتبی سامانه‌ها (AHP) استفاده شد. محدوده مورد مطالعه به علت شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی، به‌طور قابل توجهی در معرض گسیختگی دامنه‌ها قرار دارد. عوامل سنگ‌شناسی، شیب، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل به عنوان مهم‌ترین عامل‌ها در رخداد زمین‌لغزش شناخته شدند. برای بررسی صحت نتایج، سه نقشه حساسیت تهیه شده با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های فعال مقایسه و مشخص شد که هر سه نقشه همخوانی خوبی با کلاس‌های حساسیت بالا و خیلی بالا (۵ و ۶) دارند. در میان روش‌های به کار رفته، روش شاخص آماری، تصویر واقعی‌تری از پراکندگی حساسیت زمین‌لغزش نسبت به دیگر روش‌ها در محدوده مخزن سد البرز نشان می‌دهد.

با قطع دادن نقشه عوامل مختلف، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و قضاوت‌های کارشناسی مشاهده شد که بیشتر لغزش‌ها در شیب‌های ۲۰ - ۱۰ درجه پیش از آبگیری مخزن و تا شیب ۱۰ درجه پس از آبگیری مخزن، واحد زمین‌شناسی Mn، ارتفاع کمتر از ۳۵۰ متر، سوهای شیب جنوب، جنوب خاوری و مسطح، فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متری گسل‌های پیش‌بینی شده، فاصله از آبراهه کمتر از ۴۵۰ متر و تراکم زهکشی DD1 (کمتر از ۱۵ کیلومتر در هر کیلومتر مربع) دیده می‌شوند.

#### سپاسگزاری

از همکاری‌های آقایان هاشم بابایی و ذبیح‌اله چهاراهی در مطالعات صحرایی و نظرات ارزنده‌شان در انجام این پژوهش تشکر می‌شود.

۸×۸ تپه و سپس عناصر آن با استفاده از جدول ۱ و نظر کارشناسی به صورت زوجی مقایسه و تکمیل شد. نیمه راست ماتریس، وارون بخش چپ آن است. برای مثال اگر اهمیت سنگ‌شناسی به شیب برابر دو باشد، اهمیت شیب نسبت به سنگ‌شناسی برابر با  $\frac{1}{2}$  خواهد بود.

#### ۳-۴. محاسبه وزن عوامل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

نتایج ماتریس مقایسه زوجی، وزن و نرخ سازگاری ماتریس مقایسه‌ای مربوط به معیارها در جدول ۳ نشان داده شده است. (Saaty & Vargas, 2001) پیشنهاد می‌کنند که اگر سازگاری تصمیم بیشتر از ۰/۱ باشد بهتر است تصمیم‌گیرنده در قضاوت‌های خود تجدید نظر کند. پس از محاسبه وزن عوامل کنترل‌کننده لغزش (سنگ‌شناسی، شیب، سوی شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی)، وزن تمامی طبقات مربوط به عوامل مؤثر در لغزش محاسبه شد (جدول ۴).

#### ۳-۵. روش آماری دو متغیره

قطع دادن نقشه عوامل و محاسبه تراکم زمین‌لغزش‌ها به عنوان بخش اصلی تحلیل در روش‌های آماری دو متغیره محسوب می‌شود. از این راه، می‌توان اهمیت هر کدام از متغیرهای تأثیرگذار در زمین‌لغزش را به دست آورد (Yalcin, 2008). در تحلیل‌های آماری دو متغیره هر عامل مستقل، با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها مقایسه می‌شود. مقادیر وزن هر کدام از رده‌ها (شاخص‌ها) به منظور طبقه‌بندی هر کدام از عوامل و بر اساس تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر رده مستقل به کار می‌رود. در این روش نیازمند به انتخاب و به نقشه درآوردن عوامل مهم و طبقه‌بندی آنها به تعدادی از کلاس‌های وابسته، تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها، قطع دادن نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها با نقشه هر کدام از عوامل، تعیین تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر کلاس از عوامل و تعریف مقادیر وزن، مشخص کردن مقادیر وزن برای نقشه‌های مربوط به عوامل مختلف و در پایان قطع دادن نقشه‌ها و محاسبه خطر پایانی یا مقادیر حساسیت هر کدام از عوامل است (Aleotti & Chowdhury, 1999).

#### ۳-۶. روش شاخص آماری

در روش شاخص آماری، مقدار وزن برای کلاس‌های مربوط به هر عامل به صورت لگاریتم طبیعی تراکم زمین‌لغزش هر کلاس تقسیم بر تراکم کل زمین‌لغزش تعریف می‌شود (Van Westen, 1997) (جدول ۵). رابطه زیر، اساس این روش را نشان می‌دهد:

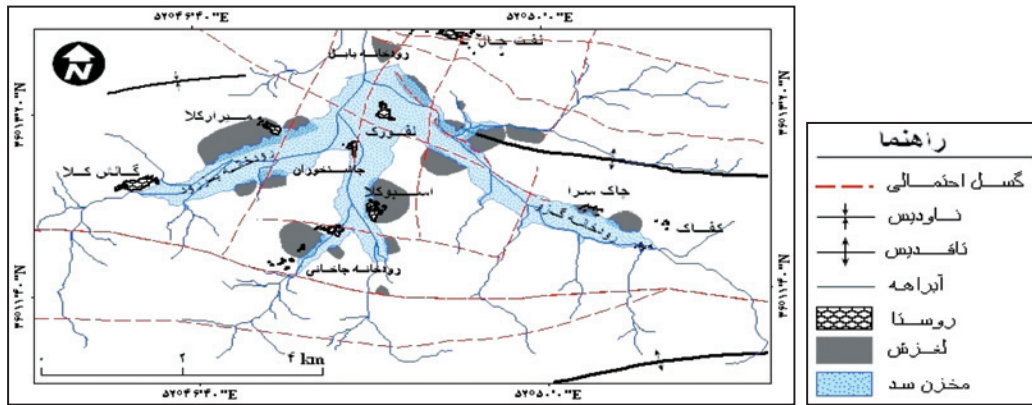
$$W_i = \ln \frac{\text{Densclass}}{\text{Densmap}} = \ln \frac{N_{pix}(S_i) / N_{pix}(N_i)}{SN_{pix}(S_i) / SN_{pix}(N_i)} \quad (1)$$

$W_i$ ، وزن داده شده به کلاس‌های هر معیار، Densclass، تراکم زمین‌لغزش مربوط به هر کلاس، Densmap، تراکم زمین‌لغزش در تمام نقشه،  $N_{pix}(S_i)$ ، تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزش در هر کلاس،  $N_{pix}(N_i)$ ، تعداد کل پیکسل‌های کلاس‌ها،  $SN_{pix}(S_i)$ ، تعداد کل پیکسل‌های لغزش و  $SN_{pix}(N_i)$ ، تعداد کل پیکسل‌های نقشه است.

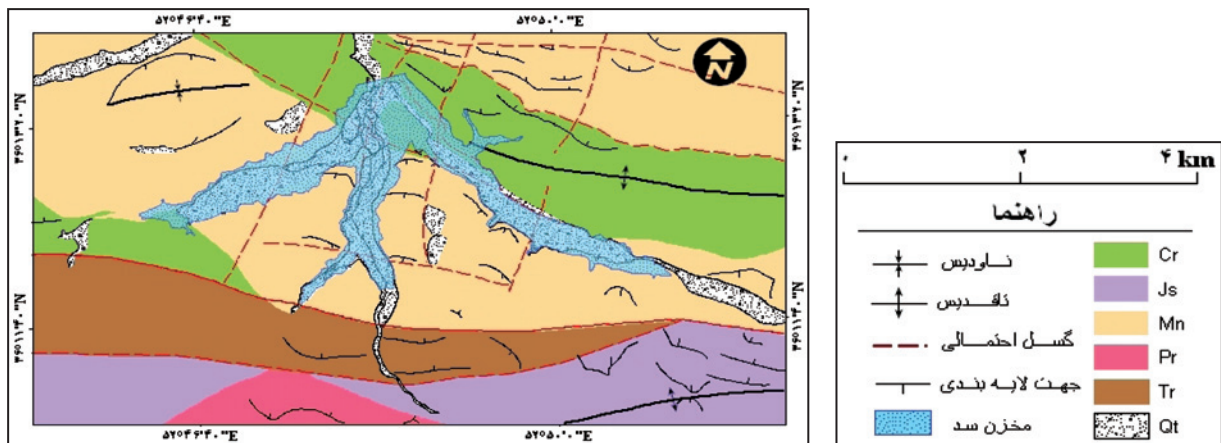
#### ۳-۷. روش وزن‌دهی به عامل‌ها

روش وزن‌دهی به عامل‌ها، روش اصلاح شده  $W_i$  است (Cevik & Topal, 2003). در این روش، مقادیر وزن عامل‌ها با استفاده از شیوه بررسی مقادیر  $W_i$  برای هر متغیر تعیین و در هر لایه، مقادیر  $W_i$  برای هر پیکسل زمین‌لغزش محاسبه می‌شود. سپس تمامی مقادیر پیکسل‌های متعلق به هر عامل با هم جمع خواهند شد. با استفاده از بیشینه و کمینه همه عامل‌ها، نتایج به دست خواهد آمد (جدول ۶). در پایان، بازه وزن‌دهی به عامل‌ها از ۱ تا ۱۰۰ برای هر لایه مشخص شد، که می‌توان آن را به صورت رابطه زیر نشان داد:

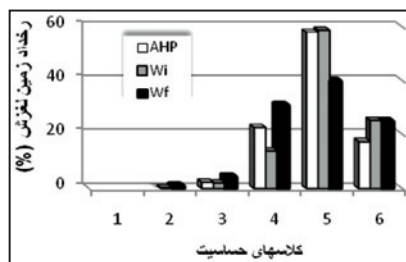
$$Wf = \frac{TW_i - TW_{i_{Min}}}{TW_{i_{Max}} - TW_{i_{Min}}} \times 100 \quad (2)$$



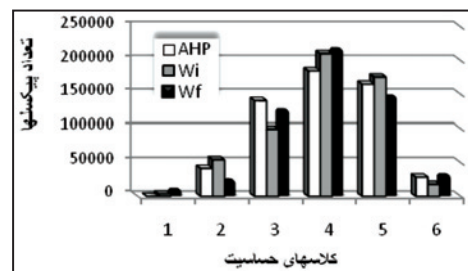
شکل ۱- نقشه پراکنش زمین لغزش ها در محدوده مخزن سد البرز.



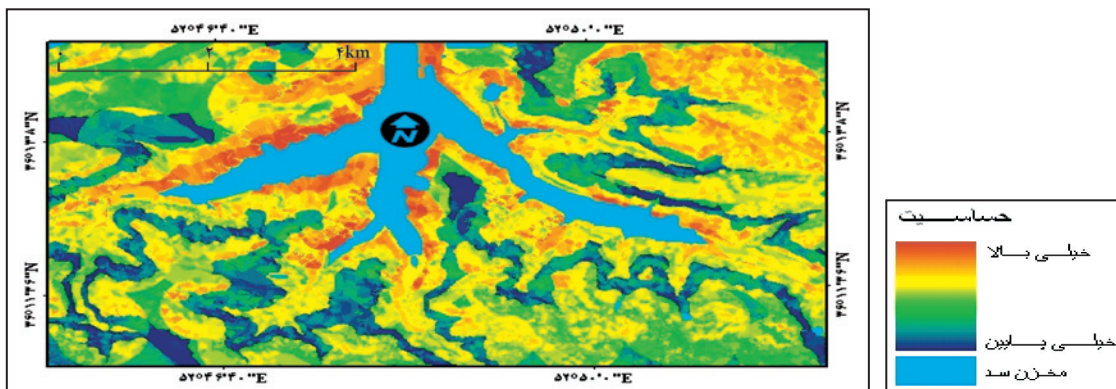
شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه.



شکل ۴- درصد پراکنده گی زمین لغزش های فعال در کلاس های حساسیت.

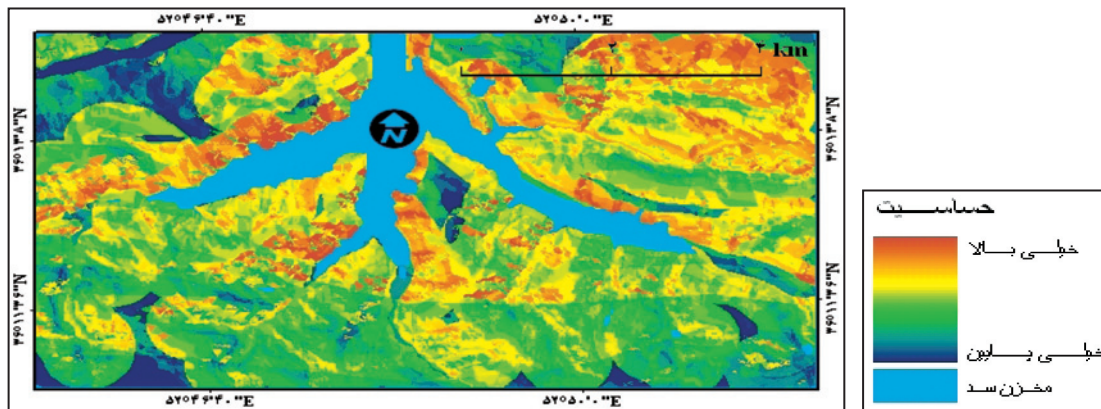


شکل ۳- پراکنده گی نسبی سطوح حساسیت پس از طبقه بندی نقشه حساسیت بر اساس انحراف معیار.

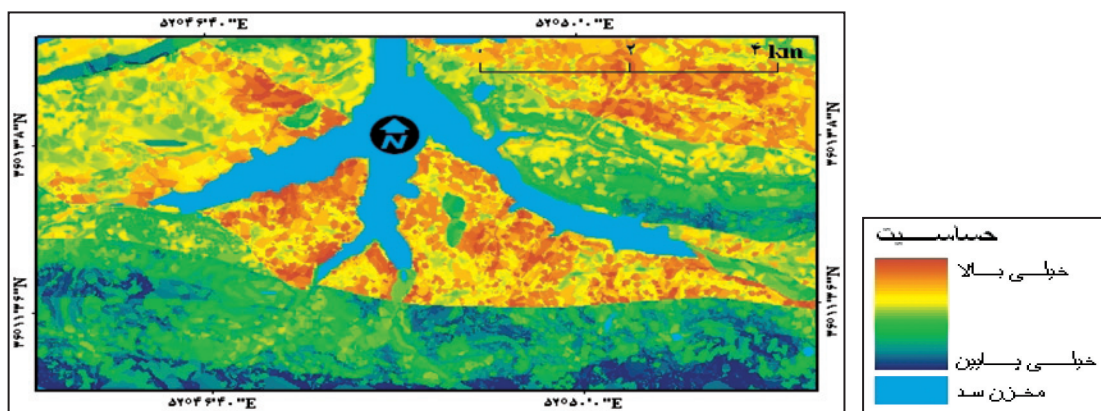


شکل ۵- نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده با روش Wi.





شکل ۶- نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده با روش WF.



شکل ۷- نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده با روش AHP.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به لغزش‌های ثبت شده در محدوده مخزن سد البرز.

ردیف	نام زمین لغزش	حجم تقریبی M <sup>3</sup>	حجم بالای تراز دریاچه M <sup>3</sup>	مساحت زمین لغزش (%)	مختصات زمین لغزش‌ها	نوع زمین لغزش	شواهد زمین لغزش	لایه زمین شناسی درگیر لغزش
۱	BRL1	۱۲۹۰۴۰۰	-	۳/۷۳	۵۲° ۴۸' ۳۰/۱" E ۳۶° ۱۳' ۵۳/۲" N	چرخشی	پایدار شده	سنگ مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی
۲	BRL2	۲۰۱۱۰۰۰	۴۷۰۶۰۰	۲۶/۵	۵۲° ۴۸' ۴۷/۹" E ۳۶° ۱۳' ۳۰/۷" N	چرخشی	دارای پتانسیل لغزش	سنگ مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی
۳	BRL3	۱۵۰۰۰۰	۲۰۷۰۰۰	۳/۸۲	۵۲° ۴۹' ۷/۲" E ۳۶° ۱۳' ۱۰/۱" N	چرخشی	دارای پتانسیل لغزش	سنگ مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی
۴	BRL4	۱۸۵۶۲۰۰	۱۸۰۵۶۰۰	۴/۵	۵۲° ۴۹' ۴۸/۵" E ۳۶° ۱۳' ۵/۵" N	چرخشی	فعال	سنگ مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی
۵	BRL5	۲۵۰۰۰۰	۱۸۷۶۹۰۰	۸/۱۱	۵۲° ۴۹' ۲۵/۳" E ۳۶° ۱۳' ۲/۴" N	چرخشی	فعال	سنگ مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی
۶	BRL6	۲۴۱۰۰۰	-	۰/۵۲	۵۲° ۴۹' ۱۳/۲" E ۳۶° ۱۳' ۲۱/۹" N	چرخشی	فعال	سنگ مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی
۷	GLL1	۳۵۱۰۰۰	۲۷۷۳۰۰۰	۷/۴	۵۲° ۴۹' ۰/۷" E ۳۶° ۱۲' ۵۰/۸" N	چرخشی	فعال	ماسه‌سنگ و مارن
۸	GRL1	۷۶۱۰۰۰	۳۷۵۰۰۰	۶۵/۱	۵۲° ۵۰' ۲۴/۰" E ۳۶° ۱۲' ۲۳/۶" N	چرخشی	پایدار شده	سنگ مارن با میان‌لایه‌های مارن ماسه‌ای و ماسه‌سنگ مارنی؛ ماسه‌شن‌دار با قلوه‌سنگ گرد تا نیمه گرد
۹	GRL2	۱۳۸۰۰۰۰	۱۲۳۶۰۰	۴/۵۶	۵۲° ۵۰' ۴۶/۶" E ۳۶° ۱۲' ۱۶/۵" N	چرخشی	پایدار شده	ماسه‌سنگ و مارن
۱۰	BZL1	۱۶۷۷۴۰۰	۵۲۲۴۰۰	۳/۸۸	۵۲° ۴۷' ۲۵/۰" E ۳۶° ۱۲' ۴۱/۸" N	چرخشی	فعال	ماسه‌سنگ و مارن
۱۱	BZL2	۹۰۴۷۰۰	۴۸۷۶۰۰	۲/۳	۵۲° ۴۷' ۸/۷" E ۳۶° ۱۲' ۳۷/۶" N	چرخشی	فعال	ماسه‌سنگ و مارن

ردیف	نام زمین لغزش	حجم تقریبی M <sup>۳</sup>	حجم بالای تراز دریاچه M <sup>۳</sup>	مساحت زمین لغزش (%)	مختصات زمین لغزشها	نوع زمین لغزش	شرایط زمین لغزش	لایه زمین شناسی درگیر لغزش
۱۲	BZL3	۸۳۷۰۰۰۰	۶۷۵۰۰۰۰	۲۱/۰۳	۵۲° ۴۷' ۵/۱" E ۳۶° ۱۳' ۵/۱" N	چرخشی	پایدار شده	ماسه سنگ و مارن
۱۳	BZL4	۱۶۹۱۰۰۰	۴۹۴۰۰۰	۴/۵۸	۵۲° ۴۷' ۳۹/۸" E ۳۶° ۱۳' ۱۱/۰" N	چرخشی	فعال	ماسه سنگ و مارن
۱۴	BLL1	۵۶۸۵۰۰۰	۴۴۲۵۰۰۰	۱۳/۹۸	۵۲° ۴۸' ۲۸/۲" E ۳۶° ۱۲' ۲۹/۶" N	چرخشی	فعال	ماسه سنگ و مارن
۱۵	BLL2	۸۹۷۰۰۰	۷۷۷۰۰۰	۱/۷۸	۵۲° ۴۸' ۳۱/۸" E ۳۶° ۱۲' ۵/۸" N	چرخشی	فعال	ماسه سنگ و مارن
۱۶	BLL3	۴۹۵۰۰۰	۴۴۷۰۰۰	۱/۴۲	۵۲° ۴۸' ۰/۷" E ۳۶° ۱۲' ۲/۵" N	چرخشی	فعال	ماسه سنگ و مارن؛ ماسه شن دار با قله سنگ گرد تا نیمه گرد
۱۷	BLL4	۴۸۷۵۰۰۰	۴۱۸۵۰۰۰	۱۰/۵۷	۵۲° ۴۷' ۳۷/۹" E ۳۶° ۱۲' ۱۰/۹" N	چرخشی	فعال	ماسه سنگ و مارن
۱۸	BLL5	۳۹۰۰۰۰	-	۰/۸۴	۵۲° ۴۸' ۲۷/۱" E ۳۶° ۱۱' ۴۱/۸" N	چرخشی	فعال	ماسه سنگ و مارن؛ ماسه شن دار با قله سنگ گرد تا نیمه گرد

جدول ۲- قضاوت کارشناسی در مقایسه زوجی عوامل مؤثر در تحلیل سلسله مراتبی سامانه‌ها (Saaty &amp; Vargas, 2001).

مقدار عددی قضاوت شفاهی	بیان زبانی اهمیت نسبی عامل A نسبت به B
۱	اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۳	کمی محسوس
۵	به نسبت مشخص
۷	بسیار مشخص
۹	کاملاً مشخص
۲، ۶، ۴، ۸	رده‌های بینابین

جدول ۳- ماتریس مقایسه زوجی، وزن‌ها و نرخ سازگاری معیارها.

معیارها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	وزن
(۱) سنگ شناسی	۱							۰/۳۶۹
(۲) شیب	۰/۵	۱						۰/۲۵۸
(۳) سوی شیب	۰/۱۷	۰/۲۰	۱					۰/۰۶
(۴) ارتفاع	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۵	۱				۰/۰۴۲
(۵) فاصله از آبراهه	۰/۲۵	۰/۳۳	۳	۴	۱			۰/۱۲۶
(۶) تراکم زهکشی	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۲۰	۱		۰/۱۲۹
(۷) فاصله از گل	۰/۲۵	۰/۳۳	۳	۳	۱	۴	۱	۰/۱۱۵
نرخ سازگاری	۰/۰۴۴							

جدول ۴- محاسبه وزن و نرخ سازگاری مربوط به کلاس‌های عوامل.

عاملها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وزن‌ها
<b>شیب توپوگرافی (درجه)</b>										
(۱) ۰-۱۰	۱									۰/۲۵۴
(۲) ۱۰-۲۰	۳	۱								۰/۴۴۴
(۳) ۲۰-۳۰	۰/۳۳	۰/۲۵	۱							۰/۱۶۲
(۴) ۳۰-۴۰	۰/۲	۰/۱۴	۰/۲۵	۱						۰/۰۶۶
(۵) ۴۰-۵۰	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۲	۰/۵	۱					۰/۰۴۴
(۶) > ۵۰	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۳۳	۰/۵	۱				۰/۰۳
نرخ سازگاری	۰/۰۸۳									
<b>سوی شیب</b>										
(۱) شمالی	۱									۰/۰۲۶
(۲) جنوبی	۶	۱								۰/۱۴۸
(۳) خاوری	۰/۵	۰/۱۴	۱							۰/۰۱۹
(۴) باختری	۴	۰/۳۳	۵	۱						۰/۰۷۶
(۵) شمال خاوری	۲	۰/۲	۳	۰/۳۳	۱					۰/۰۳۷
(۶) جنوب خاوری	۷	۲	۸	۴	۶	۱				۰/۲۰۵
(۷) جنوب باختری	۵	۰/۵	۶	۲	۴	۰/۳۳	۱			۰/۱۰۸
(۸) شمال باختری	۳	۰/۲۵	۴	۰/۵	۲	۰/۲	۰/۳۳	۱		۰/۰۵۳
(۹) مسطح	۸	۴	۹	۵	۷	۳	۴	۶	۱	۰/۳۳
نرخ سازگاری	۰/۰۶۴									
<b>ارتفاع (متر)</b>										
(۱) ۲۷۵-۳۵۰	۱									۰/۴۷۵

ادامه جدول ۴

عامل‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وزن‌ها
۳۵۰-۴۲۵ (۲)	۰/۳۳	۱								۰/۲۷۹
۴۲۵-۵۰۰ (۳)	۰/۲	۰/۲۵	۱							۰/۰۹۴
۵۰۰-۵۷۵ (۴)	۰/۱۴	۰/۲	۰/۵	۱						۰/۰۵۳
۵۷۵-۶۵۰ (۵)	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۵	۱	۱					۰/۰۵
> ۶۵۰ (۶)	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۵	۱	۱	۱				۰/۰۴۸
نرخ سازگاری	۰/۰۳۲									
<b>سنگ شناسی</b>										
Qt (۱)	۱									۰/۱۲۲
Mn (۲)	۵	۱								۰/۴۷۱
Cr (۳)	۳	۰/۳۳	۱							۰/۲۳۱
Js (۴)	۰/۵	۰/۱۷	۰/۳۳	۱						۰/۰۸۳
Tr (۵)	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۲	۰/۵	۱					۰/۰۵۱
Pr (۶)	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۱۷	۱	۰/۵	۱				۰/۰۴۳
نرخ سازگاری	۰/۰۷۷									
<b>فاصله از گسل (متر)</b>										
۰-۵۰۰ (۱)	۱									۰/۵۶۹
۵۰۰-۱۰۰۰ (۲)	۰/۳۳	۱								۰/۲۵۵
۱۰۰۰-۱۵۰۰ (۳)	۰/۲	۰/۳۳	۱							۰/۱۱
> ۱۵۰۰ (۴)	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۵	۱						۰/۰۶۶
نرخ سازگاری	۰/۰۳۳									
<b>فاصله از آبراهه (متر)</b>										
۰-۱۵۰ (۱)	۱									۰/۴۸۵
۱۵۰-۳۰۰ (۲)	۰/۳۳	۱								۰/۲۲۷
۳۰۰-۴۵۰ (۳)	۰/۲۵	۰/۵	۱							۰/۱۴۳
۴۵۰-۶۰۰ (۴)	۰/۲	۰/۳۳	۰/۵	۱						۰/۰۸۹
> ۶۰۰ (۵)	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۵	۱					۰/۰۵۷
نرخ سازگاری	۰/۰۳۳									
<b>تراکم زهکشی</b>										
<b>کیلومتر در هر کیلومتر مربع</b>										
۰-۱۵ (۱)	۱									۰/۵۸۹
۱۵-۲۵ (۲)	۱/۸	۱								۰/۰۵۶
۲۵-۳۵ (۳)	۱/۷	۲	۱							۰/۰۹۴
۳۵-۵۰ (۴)	۱/۸	۱	۱/۲	۱						۰/۰۵۶
> ۵۰ (۵)	۱/۵	۴	۳	۴	۱					۰/۲۰۴
نرخ سازگاری	۰/۰۶۰									

جدول ۵- پراکنندگی زمین لغزش و مقادیر Wi در کلاس‌های مختلف.

معیارها	کلاس‌ها	رخداد لغزش (%)	Wi	معیارها	کلاس‌ها	رخداد لغزش (%)	Wi
شیب (متر)	۰-۱۰	۳۰/۵	۰/۰۳	سنگ شناسی	Qt	۳/۷۱	۰/۸۴
	۱۰-۲۰	۴۸/۰۵	۰/۳۷		Mn	۶۸/۱۸	۰/۴۸
	۲۰-۳۰	۲۹/۱۶	۰/۳۸		Cr	۲۸/۰۹	۰/۳۷
	۳۰-۴۰	۷۸/۳	۰/۱۸۷		Js	-	-
	۴۰-۵۰	۱۳/۱	۰/۶۱		Tr	-	-
	> ۵۰	۲۶/۰	۰/۵۷		Pr	-	-
سوی شیب	شمالی	۱۵/۴	۰/۵۵	تراکم زهکشی (کیلومتر در هر کیلومتر مربع)	۰-۱۵	۵۰/۲۷	۰/۴۳
	جنوبی	۱۳/۸۴	۰/۴۵		۱۵-۲۵	۱۱/۶۸	۰/۰۶
	خاوری	۴۲/۳	۰/۷۳		۲۵-۳۵	۱۲/۹۲	۰/۱۲
	باختری	۵۶/۱۰	۰/۲۵		۳۵-۵۰	۱۱/۹۰	۰/۰۸
	شمال خاوری	۴۱/۶	۰/۵۵		> ۵۰	۱۲/۷۹	۰/۰۱
	جنوب خاوری	۱۷/۹۶	۰/۹۱				
	جنوب باختری	۹۶/۱۱	۰/۴۰				
	شمال باختری	۲۱/۸	۰/۲۴				
مسطح	۴۹/۲۳	۰/۲۶					

Wi	رخداد لغزش (%)	کلاس‌ها	معیارها	Wi	رخداد لغزش (%)	کلاس‌ها	معیارها
				۱/۱۶	۸۵/۷۳	۲۷۵-۳۵۰	ارتفاع (متر)
				۰/۰۹	۲۴/۲۵	۳۵۰-۴۲۵	
				-۳/۱۷	۹۱/۰	۴۲۵-۵۰۰	
				-	-	۵۰۰-۵۷۵	
				-	-	۵۷۵-۶۵۰	
				-	-	> ۶۵۰	
				-۰/۲۸	۱۲/۲۴	۰-۱۵۰	فاصله از آبراهه (متر)
				۰/۱۲	۲۷/۲۸	۱۵۰-۳۰۰	
				۰/۳۵	۷۷/۲۷	۳۰۰-۴۵۰	
				۰/۳۷	۲۱/۱۷	۴۵۰-۶۰۰	
				-۱/۵۴	۶۳/۲	> ۶۰۰	
				۰/۱۶	۷۹/۷۸	۰-۵۰۰	فاصله از گسل (متر)
				-۰/۲۸	۱۵/۴۷	۵۰۰-۱۰۰۰	
				-۰/۵۱	۴/۷۵	۱۰۰۰-۱۵۰۰	
				-	-	> ۱۵۰۰	

 جدول ۶- وزن عامل‌ها (W<sub>f</sub>).

عامل‌ها	Wf	عامل‌ها	Wf
شیب	۱	فاصله از گسل	۷۰/۱۷
سوی شیب	۸۴/۰۱	فاصله از آبراهه	۶۶/۳۵
ارتفاع	۸/۱۱	تراکم زهکشی	۷۷/۸
سنگ‌شناسی	۱۰۰		

## کتابنگاری

- احمدی، ح.، اسماعیلی، ا.، فیض‌نیا، س. و شریعت‌جعفری، م.، ۱۳۸۲- پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغیره (MR) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۶، شماره ۴، ص ۳۳۶-۳۲۳.
- حائری، م. و سمیعی، ا.، ۱۳۷۵- روش جدید پهنه‌بندی مناطق شیب‌دار در برابر خطر زمین لغزش با تکیه بر بررسی‌های پهنه‌بندی استان مازندران، مجله علوم زمین، بهار و تابستان ۷۶، سال هشتم، شماره ۲۴-۲۳، ص ۱۵-۱.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۸۷- تصاویر ماهواره‌ای.
- مهندسین مشاور مهتاب قدس (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران)، ۱۳۷۷- گزارش سد البرز.

## References

- Aleotti, P. & Chowdhury, R., 1999- Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, 21- 44.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H. & Kanno, T., 2005- Landslides in Sado Island “of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology* 81, 432-445.
- Cevik, E. & Topal, T., 2003- GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology* 44, 949-962.
- Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J. & Xu, Z. W., 2001- Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology* 43 (3), 381-391.
- Saaty, T. L. & Vargas, G. L., 2001- *Models, Methods, Concepts, and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer Academic Publisher, Boston.
- Van Westen, C. J., 1997- Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC Publication, Enschede, pp. 73-84.
- Vargas, L. G., 1990- An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research* 48, 2-8.
- Yalcin, A., 2008- GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations” *CATENA*, Volume 72 Pages 1-12.