

## ارزیابی کارایی مدل آنالیز آماری دو متغیره در پهنه‌بندی خطر رانش زمین

محسن شریعت‌جعفری\*، جعفر غیومیان

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبات- آدرس الکترونیکی: [mshariatj@hotmail.com](mailto:mshariatj@hotmail.com)

(دریافت: ۸۴/۱۱/۱۷؛ پذیرش: ۸۶/۶/۴)

### چکیده

مدل‌های آماری مورد استفاده در پیش‌بینی خطر رانش زمین بر اساس مقادیر وزنی کمی شده (quantitative) اجرا می‌گردند. در مدل آنالیز آماری دو متغیره مقدار وزن برای هر کلاس از یک پارامتر مؤثر در رخداد رانش زمین مانند یک واحد لیتولوژیکی مشخص (از نقشه عامل لیتولوژی) و یا یک کلاس مشخص شیب عبارت از لگاریتم طبیعی دانسیته لغزش زمین در کلاس مربوطه تقسیم بر دانسیته لغزش در کل نقشه عامل است. روش مذکور بر اساس قطع (Crossing) نقشه ثبت لغزش با نقشه‌های پارامتریک مشخص، در سیستم اطلاعات جغرافیایی بنا شده است. این مدل در دو زیرحوضه امیری و هفت‌تن در محور هراز اجرا گردیده است. نتایج خروجی مدل بر اساس شاخص نسبت دانسیته (Dr) مورد ارزیابی واقع شده و در مقایسه با تحقیقات دیگر محققین در البرز و زاگرس مؤید کارایی مطلوب مدل در پیش‌بینی خطر رانش زمین است.

واژه‌های کلیدی: رانش زمین، آنالیز آماری، پهنه بندی خطر.

### مقدمه

(۱۳۷۳)، اشقلی‌فراهانی (۱۳۸۰)، جلالی (۱۳۸۱)، سفیدگری (۱۳۸۱)، شیرانی (۱۳۸۲)، شیرانی و همکاران (۱۳۸۴)، Van Westen et al. (1997), Carrara et al. (1991), Guzzetti et al. (2000), Sara & Kyungduck (2001), Ercangla & Cokceoglu (2002) می‌توان اشاره کرد. در مواردی از این منابع که صحت‌یابی نتایج خروجی مدل‌های آماری نیز در آنها انجام شده، عموماً کارایی مدل‌های آماری دو متغیره و چند متغیره را نسبت به دیگر روش‌ها مطلوب ارزیابی نموده‌اند. از جمله این موارد نیک اندیش (۱۳۷۸) در قالب تز دکتری در آزمون روشهای آماری: *ارزش اطلاعاتی، وزن پارامترها و تراکم سطح*، در منطقه کارون میانی در زاگرس، مدل آنالیز آماری دو متغیره ارزش اطلاعاتی را مناسبتر از دیگر روشها ارزیابی کرد. شیرانی و همکاران (۱۳۸۴) در آزمون روشهای آماری در منطقه دیگری از زاگرس (حوضه سمیرم اصفهان) در بین مدل‌های مورد آزمون به نتایج مشابهی دست یافتند. مولفین این موضوع را در شرایط ذاتی و محیطی حاکم بر بخشی از البرز تحقیق نمودند که نتایج آن در پی می‌آید.

رانش زمین رخدادی است که وقوع آن تابع عوامل متعدد ذاتی و محیطی است. وقتی وقوع یک رویداد مانند رانش زمین تابع وقوع یا عدم وقوع شرایط خاص باشد در این صورت احتمال وقوع آن پس از اینکه آن شرایط محقق شود قابل محاسبه است. تحلیل شرطی، یک تحلیل ساده آماری است که برای بیان چنین روابطی مورد استفاده واقع می‌شود (Van Westen et al. 1997). وقوع رانش زمین مانند هر رخداد دیگری توسط مجموعه‌ای از مدل‌های آماری دو متغیره و چند متغیره قابل بررسی و پیش‌بینی است. در روش آماری دو متغیره که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته وقوع رانش زمین بعنوان متغیر وابسته تابعی است از نحوه حضور و عملکرد متغیرهای مستقل که مجموعه‌ای از عوامل محیطی و ذاتی می‌باشند. در این روش در قدم نخست تأثیر هر عامل بطور مجزا و مستقل دیده می‌شود و در مرحله بعد با فرض وجود یک حد اقل همبستگی بین هر عامل با دیگر عوامل مؤثر احتمال نهایی وقوع رانش زمین برابر با احتمال وقوع مجموع عوامل خواهد بود.

### مواد و روشها

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه طرح در مختصات جغرافیایی ۵۵' و ۳۵° تا ۳۶° عرض شمالی و ۱۵' و ۵۲° تا ۲۰' و ۵۲° طول شرقی در دو زیرحوضه امیری و هفت‌تن واقع در محور هراز بین گزنگ-بایجان (واقع در ۶۵ کیلومتری جنوب

سابقه استفاده از روش‌های آماری جهت پیش‌بینی خطر ناپایداری شیب‌ها در دنیا عموماً از دهه ۱۹۹۰ به بعد مشاهده می‌شود. از نمونه کارهای علمی-تحقیقاتی انجام شده در این رابطه در ایران و جهان به مواردی مانند: حق‌شناس (۱۳۷۵)، پژم (۱۳۷۵)، بداعی (۱۳۷۶)، کهی میانجی (۱۳۷۷)، نیک‌اندیش (۱۳۷۸)، سیاریور (۱۳۷۸)، سعدالدین

نقشه ثبت رانش زمین بطور مستقل و محاسبه دانسیته لغزش در هر کلاس از نقشه عامل (Dens class) و همچنین در کل نقشه (Dens map).

محاسبه مقدار وزن برای هر کلاس از نقشه عامل (Wi) (مانند یک واحد لیتولوژیکی مشخص از نقشه عامل لیتولوژیکی یا یک کلاس مشخص شیب از نقشه عامل شیب) که عبارت از لگاریتم طبیعی (Natural logarithm) دانسیته لغزش (Landslide density) در کلاس مربوطه تقسیم بر دانسیته لغزش در کل نقشه عامل است.

Van Westen (۱۹۹۷) رابطه زیر را برای محاسبه وزن معرفی نمود:

$$\text{رابطه ۱} \quad \ln Wi = \ln \left( \frac{\text{DensClass}}{\text{DensMap}} \right) = \ln \left[ \frac{Npix(Si)/Npix(Ni)}{\sum Npix(Si)/\sum Npix(Ni)} \right]$$

در این رابطه:

Wi: وزن هر یک از کلاسها در یک نقشه عامل (مانند یک نوع سنگ یا یک رده از شیب).

Dens class: دانسیته رانش زمین در هر یک از کلاسهای یک نقشه عامل.

Dens map: دانسیته رانش زمین در کل نقشه عامل.

Npix (Si): تعداد پیکسلهای لغزشی در یک کلاس مشخص از نقشه عامل.

Npix (Ni): تعداد پیکسلهای (لغزشی و غیرلغزشی) در همان کلاس مشخص از نقشه عامل.

$\sum Npix(Si)$ : مجموع پیکسلهای لغزشی در کل منطقه طرح.

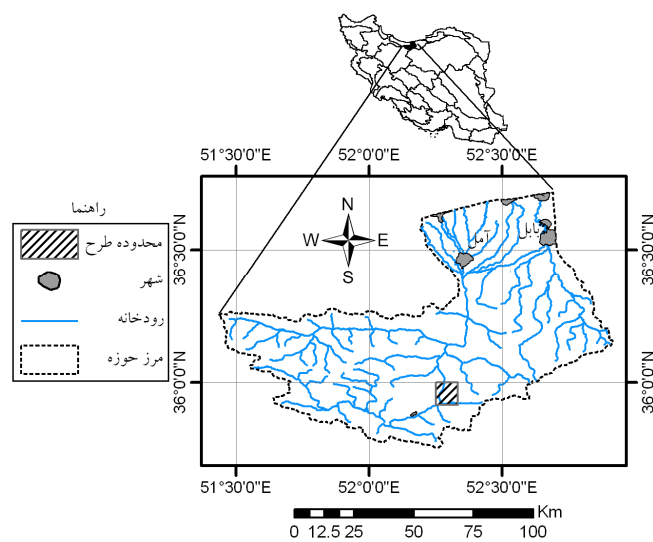
$\sum Npix(Ni)$ : مجموع پیکسلهای لغزشی و غیر لغزشی در کل منطقه طرح.

در این مدل استاندارد کردن (Standardization) مقادیر دانسیتهها در هر کلاس از نقشه عامل، با نسبت دادن آن به دانسیته کل منطقه انجام شده است. به بیانی برای تحقق این هدف دانسیته رانش زمین در هر کلاس بر دانسیته رانش زمین در کل نقشه تقسیم می‌شود.

در یک مجموعه وزنهای استاندارد شده (Wi) برای اینکه بتوان واحدهای با دانسیته لغزش کمتر از حد نرمال را از واحدهایی با دانسیته لغزش بیشتر از حد نرمال جدا کرد از لگاریتم طبیعی استفاده شده است. استفاده از لگاریتم طبیعی در این مدل باعث می‌شود تا در مواقعی که دانسیته لغزش کمتر از نرمال است وزنهای با نماد منفی بدهد و در مواردی که دانسیته لغزش بیشتر از حد نرمال است وزنهای با نماد مثبت داشته باشیم.

نهایتاً از قطع نقشه رانش زمین با نقشه‌های عامل تفکیک شده و محاسبه دانسیته‌های لغزش و وزن طبق مدل فوق‌الذکر نقشه‌های عامل وزنی حاصل می‌شوند. در هر یک از این نقشه‌ها به هر پیکسل، وزنی تعلق می‌گیرد که بیانگر میزان اهمیت آن عامل (مثلاً رده ای از شیب

آمل) واقع شده است (شکل ۱). هفتاد درصد منطقه در واحد ژئومرفولوژیکی کوهستانی (با ارتفاع بیش از ۱۴۰۰ متر و شیب بیش از ۲۵ درجه)، ۲۵ درصد در واحد تپه ماهوری (با ارتفاع ۱۳۰۰ تا ۱۴۰۰ متر و شیب ۱۱ تا ۲۵ درجه) و ۳ درصد در واحد دشت و جلگه (با ارتفاع کمتر از ۱۳۰۰ متر و شیب کمتر از ۱۰ درجه) واقع شده است. منطقه دارای اقلیم کوهستانی با آب و هوای نسبتاً سرد و مرطوب می‌باشد. پوشش گیاهی در بخش کوهستان شامل درختچه‌های کوهستانی و در واحد تپه ماهوری، کم ارتفاع و جلگه‌ای عموماً شامل مراتع، چمنزار و باغات میوه وزمینهای کشاورزی است.



شکل ۱- موقعیت منطقه طرح.

## روش تحقیق

مدل مورد استفاده در این تحقیق یک مدل آماری دو متغیره است. در این مدل رخداد رانش زمین بعنوان متغیر وابسته و هر یک از عوامل ذاتی و محیطی به عنوان متغیرهای مستقل هستند. در این روش میزان اثر هر یک از عوامل مؤثر در وقوع رانش زمین، مستقل از دیگر عوامل ارزیابی می‌گردد و تحلیل نهایی پتانسیل ناپایداری برای هر واحد از منطقه بر اساس مجموع اثر کلیه عوامل در آن واحد انجام می‌شود.

کاربرد مدل آماری مورد استفاده در این تحقیق در ۱۹۹۳ و ۱۹۹۷ توسط Van Westen بیان گردیده است. از این مدل با نام روش شاخص رانش زمین (Landslide index method) نام برده شده است. مراحل تحقیق و اجرای مدل به ترتیب زیر است:

تهیه لایه‌های اطلاعات شامل نقشه ثبت رانش زمین و مجموعه نقشه‌های عامل لیتولوژی، شیب، بارش و لرزه‌خیزی. کلیه مراحل ثبت، پردازش، تولید و تلفیق لایه‌ها در محیط GIS انجام می‌گیرد.

هم‌پوشانی (Over lay) و قطع (Cross) تک‌تک نقشه‌های عامل با

در شرایط مشابه حادث شده‌اند. برای تولید نقشه ثبت لغزش (Landslide inventory map) کلیه اطلاعات مربوط به زمین‌لغزش‌های منطقه پس از استخراج به صورت رقومی، پردازش و ثبت گردیدند. مجموع کل مساحت زمین‌لغزش‌ها در منطقه طرح ۶ کیلومتر مربع می‌باشد که معادل ۸ درصد مساحت کل منطقه را به خود اختصاص می‌دهد. مناطق ناپایدار شامل مجموعه لغزش‌های فعال، پهنه‌های لغزشی، پهنه‌های گسیخته شده ناپایدار و لغزش‌های قدیمی می‌باشند.

### تولید نقشه وزنی سنگ شناسی

منطقه طرح از لحاظ زمین‌شناسی در پهنه رسوبی- ساختاری البرز مرکزی واقع شده و تابع وقایع زمین‌شناختی این پهنه است. عمده رخنمون‌های سنگی، مربوط به سازندهای شمشک، دلیچای، لار، تیزکوه، فجن، زیارت و کرج است. نهشته‌های کواترنر و عهد حاضر نیز بخشی از سطح منطقه را پوشش داده‌اند.

نقشه عامل واحدهای سنگ‌شناسی با نقشه ثبت رانش زمین قطع (Cross) داده شد که در نتیجه آن درصد هم‌پوشانی (Overlay) هر واحد سنگ‌شناسی با زمین‌لغزش‌های موجود مشخص گردید. مجموع واحدهای سنگ‌شناسی بر اساس نتایج خروجی و نظر کارشناسی در چهار گروه رده‌بندی گردیدند. مجموعه واحدهای سنگ‌شناسی موجود در هر طبقه واحدهایی هستند که از لحاظ حساسیت به رانش زمین نسبتاً بهم نزدیک می‌باشند. تأثیر عامل سنگ‌شناسی (متغیر مستقل) در وقوع رانش زمین (متغیر وابسته) با استفاده از نتایج خروجی حاصل از قطع دو نقشه فوق‌الذکر و وزن‌دهی به واحدهای سنگ‌شناسی در قالب مدل آماری معرفی شده (فرمول ۱) انجام شد. نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از قطع نقشه عامل واحدهای سنگ‌شناسی با نقشه ثبت رانش زمین.

گروه سنگ‌شناسی	$NPix(Si) *$	$NPix(Ni) *$	$Dens class *$	$Dens map *$	$Weight * (Wi)$
A	۵۸۴	۳۶۷۹	۰/۱۵۸۷	۰/۰۸۶۱	۰/۶۱
B	۸۷۴	۹۹۴۱	۰/۰۸۷۹	۰/۰۸۶۱	۰/۰۲
C	۵۲	۳۵۴۰	۰/۰۱۴۷	۰/۰۸۶۱	-۱/۷۶
D	۱۱	۵۱۲	۰/۰۱۲۵	۰/۰۸۶۱	-۱/۳۸
$\Sigma NPix (Si)$	۱۵۲۱				
$\Sigma NPix (Ni)$		۱۷۶۷۲			

بر اساس نتایج بدست آمده هر پیکسل از واحدهای سنگ‌شناسی دارای وزنی بین ۰/۶۱ تا -۱/۷۶ می‌باشد که نشان دهنده درجه تأثیر نسبی واحد سنگ‌شناسی در رانش زمین است. تأثیر نسبی به مفهوم میزان تأثیر هر طبقه از یک عامل نسبت به طبقات مجاور آن است، که به نوعی بیان کننده اهمیت وارزش آن عامل نیز هست. آنچه مسلم

یا لیتولوژی) در وقوع رانش زمین است. تعیین و تفکیک کلاس‌ها در هر نقشه عامل بر اساس نقاط عطف منحنی تجمعی اوزان و اعمال نظر کارشناس خبره انجام می‌گیرد، لذا لا جرم در نقشه‌های عامل متفاوت تعداد کلاسها یکسان نخواهد بود. این روش نسبت به روش تفکیک یکسان کلاسها که در مواردی در گذشته استفاده می‌شد با توجه به اینکه منطبق بر واقعیات محیطی است دارای توجیح علمی بیشتری است.

- وزن نهائی در هر پیکسل از نقشه پایه منطقه از جمع جبری کلیه مقادیر وزنی حاصل می‌شود، که بیانگر میزان تأثیر مجموعه عوامل مؤثر در رانش زمین در آن واحد است.

- در مرحله بعد هیستوگرام و منحنی فراوانی تجمعی نقشه وزنی خطر (Hazard scores map) که حاصل همپوشانی و تلفیق کلیه نقشه‌های وزنی عوامل مؤثر وارد شده در مدل است تهیه می‌گردد.

- در مرحله آخر با تعیین نقاط عطف و جدایش (slicing) منحنی فراوانی تجمعی وزنی، کلاسهای خطر مشخص و نقشه پهنه‌بندی خطر رانش زمین تولید می‌گردد.

### نتایج

در این تحقیق داده‌های ورودی مدل آنالیز آماری دو متغیره شامل چهار لایه اطلاعات: سنگ‌شناسی، شیب، بارش و اطلاعات لرزه خیزی منطقه است. اطلاعات مربوط به زمین‌لغزش‌های موجود منطقه به عنوان شاخص ارزیابی و ارزشگذاری عوامل مؤثر در رانش زمین (Scores Index) در تبیین نظرات کارشناسی مورد استفاده واقع می‌شوند و به عنوان یک لایه اطلاعات مستقل مانند شیب یا بارش مورد استفاده مدل قرار نمی‌گیرند. این از جمله مزایای مدل هائی مانند مدل‌های آنالیز آماری بر مدل‌های تجربی مانند مدل نیلسن (۱۹۷۹) است که بطور مستقیم از لغزش‌های موجود بعنوان یکی از سه لایه مستقل ورودی مدل استفاده می‌کنند. مجموعه این داده‌ها بطور مستقل و بصورت رقومی در محیط GIS و با استفاده از نرم افزار Ilwis (۱۹۹۷) و دستورعمل‌های تکمیلی آن ساماندهی و پردازش شده‌اند.

### تولید نقشه ثبت رانش زمین

شناسائی و ثبت زمین‌لغزش‌های منطقه با استفاده از تفسیر عکس‌های هوائی ۱/۲۰۰۰۰ و پیمایش صحرائی انجام گرفت. دربخش عمده ای از منطقه امیری که عموماً بر روی کوهرفت‌ها و واریزه‌های تکتونیزه سازند آهکی لار و سازند شیل و ماسه‌سنگ همراه با میان لایه‌های زغالی شمشک واقع شده آثار لغزش زمین در مناطق مسکونی، جاده‌ها، باغات و مراتع قابل مشاهده است. لغزش‌های متعدد زیرحوضه مجاور حوضه امیری مانند زمین‌لغزش‌های روستاهای هفت تن، لوط، کرف و تینه نیز

استفاده شد. این نقشه به ۵ کلاس شامل: (A) کمتر از ۱۰ درجه، (B) ۱۰ تا ۲۰ درجه، (C) ۲۱ تا ۳۰ درجه، (D) ۳۱ تا ۴۵ درجه و (E) بیشتر از ۴۵ درجه تقسیم گردید.

تأثیر عامل شیب در وقوع رانش زمین با استفاده از نتایج خروجی حاصل از قطع دو نقشه فوق‌الذکر و وزن دهی به کلاس‌های شیب با استفاده از مدل آماری معرفی شده (رابطه ۱) انجام شد. نتایج حاصل در جدول ۲ ارائه گردیده است.

بر اساس نتایج حاصل هر پیکسل از نقشه شیب دارای وزنی بین ۰/۳۲ تا ۰/۳۴ است، که بیان‌کننده میزان تأثیر نسبی آن بطور مستقل در وقوع رانش زمین می‌باشد. کلاس‌های شیب با دانسیته لغزش کمتر از حد نرمال به دلیل استفاده از لگاریتم طبیعی در مدل با نماد منفی ظاهر شده‌اند. نماد منفی در جدول ۲ در کلاس‌های کم شیب مسئله‌ای طبیعی است. اما در کلاس‌های پر شیب با شیب بیش از ۴۵ درجه، کاهش دانسیته لغزش به کمتر از حد نرمال به دلیل تعدیل بردار نیروهای مهاجم ناشی از افزایش شیب است. این تعدیل پیرو افزایش نیروهای مقاوم ناشی از تغییر فاسیس لیتولوژیکی از سازندهای سست به سازندهای مقاوم و صخره ساز اتفاق می‌افتد. لذا عموماً مشاهده می‌شود که مناطق پرشیب عمدتاً در محدوده گسترش واحدهای سنگی سخت و مقاوم واقع شده‌اند، و طبیعی است که دانسیته لغزش در مناطق تحت پوشش سازندهای سخت و مقاوم علی‌رغم افزایش شیب کاهش یابد و مکانیزم ناپایداریها و آستانه گسیختگی‌ها نیز متفاوت باشد.

### تهیه نقشه وزنی بارش

بارش از عوامل محیطی شتاب‌دهنده یا محرک (Triggering factor) ناپایداری دامنه‌هاست و عموماً یکی از عوامل اصلی وقوع لغزش‌های بزرگ است. نرخ تأثیرگذاری آن سریع است ولی نه در حد زلزله بطوری که فرصت گریز از خطر را فراهم می‌کند.

موقعیت اقلیم منطقه در اقلیم نمای دومارتن مرطوب (در ایستگاه آبعلی) و در اقلیم نمای آمبرژه در رده نیمه مرطوب سرد قرار می‌گیرد. نقشه هم‌باران بر اساس معادله نهایی گرادیان ارتفاع-بارندگی در شیب‌های مختلف و برای کلیه ایستگاه‌های موجود که عبارت از  $R = -120 + 30 \cdot H$  است و با استفاده از مدل رقومی ارتفاع زمین (DEM) تهیه شد. نقشه هم‌باران به ۴ کلاس بارش تقسیم گردید و با نقشه ثبت لغزش قطع داده شد. میزان تأثیر عامل بارش در وقوع رانش زمین با استفاده از نتایج خروجی حاصل از قطع دو نقشه مذکور و وزن دهی به کلاس‌های بارش بر اساس مدل آماری معرفی شده (رابطه ۱) انجام شد. نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه گردیده است.

هر پیکسل از نقشه بارش دارای وزنی بین ۰/۴۶ تا ۰/۴۸ است که

است به دلیل پیچیدگی‌های محیطی زمین‌شناسی و عدم امکان دسترسی به اطلاعات دقیق و جامع بیان‌درجه تأثیر مطلق در این موارد معمول نیست. استفاده از لگاریتم طبیعی در مدل باعث گردیده تا در مواقعی که دانسیته لغزش کمتر از حد نرمال است وزن‌هایی با نماد منفی داشته باشیم همانطور که در جدول ۱ و همچنین در جداول ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود.

### جدول ۲- نتایج حاصل از قطع نقشه شیب با نقشه ثبت رانش زمین.

Weight (Wi)	Dens map	Dens class	NPix(Ni)	NPix(Si)	کلاسهای شیب (درجه)
-0/3156	0/0861	0/0628	2674	168	<10
-0/2301	0/0861	0/0684	2660	182	10-20
0/3493	0/0861	0/1221	4997	610	21-30
-0/307	0/0861	0/0825	4887	408	31-45
-0/3235	0/0861	0/0623	2454	153	45<
			ΣNPix (Si)	1521	
			ΣNPix (Ni)	17672	

### جدول ۳- نتایج حاصل از قطع نقشه عامل بارش با نقشه ثبت رانش زمین.

Weight (Wi)	Dens map	Dens class	NPix(Ni)	NPix(Si)	کلاسهای بارش (mm/yr)
-0/944	0/0861	0/0335	1849	62	<300
-0/1248	0/0861	0/076	9182	698	300-500
0/4804	0/0861	0/1392	5402	752	501-700
-2/2676	0/0861	0/0073	1239	9	701-900
			ΣNPix (Si)	1521	
			ΣNPix (Ni)	17672	

### جدول ۴- نتایج حاصل از قطع نقشه عامل شتاب با نقشه ثبت رانش زمین.

Weight (Wi)	Dens map	Dens class	NPix(Ni)	NPix(Si)	کلاسهای شتاب
0/18051	0/0861	0/1926	4144	798	0/38-0/42g
-0/16736	0/0861	0/0439	9018	396	0/34-0/37g
-0/1719	0/0861	0/0725	4510	327	<0/34
			ΣNPix (Si)	1521	
			ΣNPix (Ni)	17672	

### تهیه نقشه وزنی عامل شیب

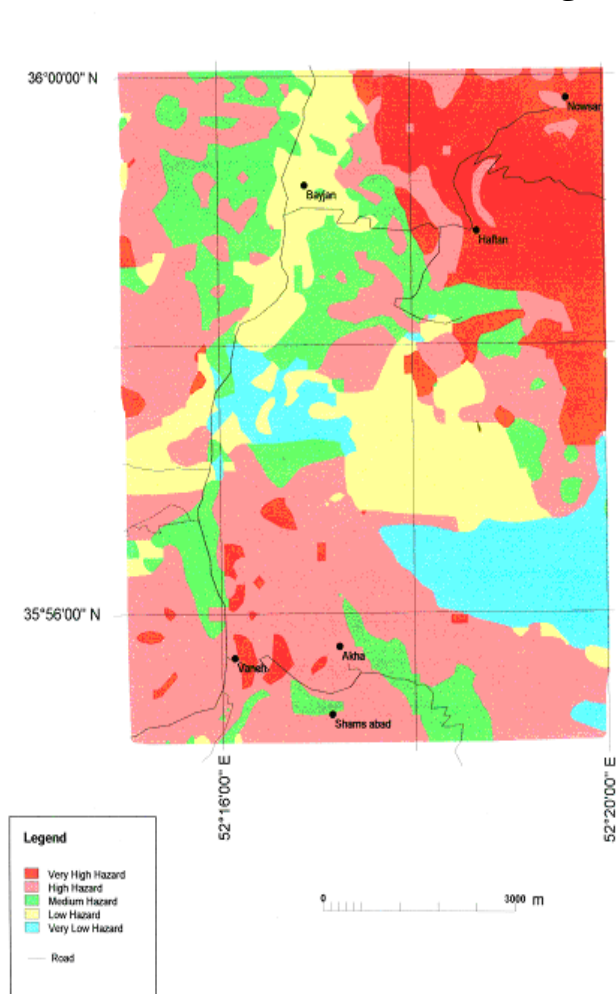
شیب از عوامل ژئومورفولوژیکی مؤثر در ناپایداری دامنه‌هاست. رابطه شیب بطور مستقل و تئوریک با ناپایداری دامنه یک رابطه خطی است، که به دلیل افزایش بردار مهاجم نیروی وزن توده در امتداد رو به پایین و در نتیجه افزایش درجه شیب برقرار می‌شود. تأثیر دیگر عوامل مؤثر و بویژه عوامل پایدار کننده که تعدیل‌کننده نیروهای مهاجم هستند می‌توانند بر این رابطه تأثیر عکس بگذارند بطوریکه در عمل شاهد یک رابطه غیر خطی در شیب‌های بیشتر از ۴۵ درجه باشیم.

در تهیه نقشه شیب از نقشه پایه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ (به صورت رقومی) و مدل رقومی ارتفاع (DEM) در محیط نرم‌افزاری الویس

## هم‌پوشانی و ترکیب نقشه‌های عامل وزنی

با توجه به اینکه ایجاد ناپایداری و وقوع رانش زمین تابع تأثیر همزمان مجموعه عوامل ذاتی و محیطی در هر واحد نقشه است با فرض وجود همبستگی بین این عوامل، احتمال نهایی وقوع زمین لغزش برابر با احتمال وقوع مجموع عوامل خواهد بود. لذا وزن نهایی هر پیکسل برابر با جمع جبری وزن مربوط به مجموعه عوامل مؤثر در آن واحد است. این هدف با هم‌پوشانی و ترکیب مجموعه نقشه‌های عامل وزنی حاصل می‌شود. نقشه نهایی حاصل در این مرحله نقشه ای است که تک تک پیکسل‌های تشکیل دهنده آن با مقداری از وزن در محدود  $۵/۲۳۳۴$ - تا  $۲/۲۴۶۳$  که بیان کننده میزان حساسیت آن واحد به رانش زمین است مشخص گردیده اند و برای عملیاتی شدن آن لازم است نقشه به پهنه های هم خطر تفکیک گردد.

**تفکیک واحدهای نقشه وزنی خطر رانش زمین به پهنه‌های هم خطر**  
برای عملیاتی شدن نقشه وزنی بدست آمده از هم‌پوشانی و ترکیب مجموعه نقشه‌های عامل وزنی، لازم است نقشه موجود به پهنه‌هایی با ارزش وزنی مشخص تفکیک شود.



شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی خطر رانش زمین به روش آنالیز آماری دو متغیره.

بیان کننده میزان تأثیر آن بطور مستقل در وقوع رانش زمین می باشد. نماد منفی اوزان بیانگر کلاس های بارش با دانسیته لغزش کمتر از حد نرمال است. آنچه که مسلم است به طور طبیعی با افزایش بارش افزایش وقوع لغزش امری طبیعی است که در جدول ۳ این روند افزایشی را تا کلاس ۳ داریم. کاهش دانسیته لغزش به کمتر از حد نرمال در کلاس ۴ با توجه به افزایش بارش به بیش از ۷۰۰ میلی‌متر در سال دو دلیل می‌تواند داشته باشد، اول تغییر رژیم بارش باران به برف که با افزایش ارتفاع اتفاق می افتد و دوم تغییر فاسیس لیتولوژیکی از واحدهای لیتولوژیکی سست و کم مقاومت به واحدهای سنگی سخت، پر مقاومت و صخره ساز که با افزایش ارتفاع و شیب به طور معمول مشاهده می‌شود.

## تهیه نقشه وزنی عامل شتاب (زلزله)

عامل محیطی شتاب ناشی از زلزله از عوامل مؤثر اصلی رانش زمین در کمربندهای زلزله‌خیز دنیا است. این عامل نیز جزو عوامل محرک (Triggering factor) مانند بارش است با این تفاوت که نرخ تأثیرگذاری آن معمولاً آبی و سریع است. در مواردی که مجموعه عوامل پایدار کننده توده خوب عمل کنند و اعمال شتاب منجر به رانش زمین نشود این عامل می‌تواند در جهت کاهش ضریب اطمینان و به عنوان عامل زمینه‌ساز ناپایداری عمل کند.

نقشه هم‌شتاب بر اساس روابط میرائی Esteva & Villavaide (1973) و Hcgviv (1974) [دانشجو، ۱۳۷۸] تهیه گردید. بر اساس نتایج حاصل از قطع نقشه عامل شتاب با نقشه ثبت رانش زمین و با استفاده از منحنی فراوانی تجمعی اوزان و نظر کارشناسی، جدایش طبقات هم‌شتاب به سه گروه انجام شد. چگونگی تأثیر عامل شتاب در وقوع رانش زمین با استفاده از داده‌های خروجی حاصل از قطع دو نقشه مذکور و وزن دهی به کلاس‌های شتاب بر اساس مدل آماری معرفی شده (رابطه ۱) انجام گرفت. نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل هر پیکسل از نقشه وزنی شتاب، دارای مقدار وزنی بین  $۰/۶۷$  تا  $۰/۸۰$  می‌باشد که بیان کننده میزان تأثیر نسبی عامل شتاب در وقوع رانش زمین در آن نقطه است. بیشترین دانسیته لغزش را در بالاترین کلاس شتاب (بیشتر از  $۰/۳۸g$ ) داریم و برای کلاس‌هایی با شتاب کمتر دانسیته لغزش کم تر از حد نرمال شده که روالی منطقی و منطبق بر واقعیت است. درست است که زمین لرزه های کم شتاب تاثیر و موفقیت کمتری در ایجاد شرایط حدی و وقوع لغزش دارند، اما از عوامل زمینه ساز ناپایداری های بعدی هستند.

برای تعیین مرز پهنه‌های خطر می‌توان از هیستوگرام نقشه وزنی نهایی استفاده کرد.

بنابراین بر اساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی ارزش وزنی هر پیکسل در نقشه تلفیقی خطر، مرز واحدها مشخص و نقشه‌ای با پنج کلاس خطر از کلاس خطر بسیار بالا تا کلاس خطر بسیار پایین تولید گردید (شکل ۲).

## بحث

در ارزیابی نتایج و صحت‌یابی مدل آنالیز آماری دو متغیره وسنجش دقت پیش‌بینی احتمال وقوع رانش زمین در پهنه‌های خطر از شاخص نسبت دانسیته (Dr) استفاده گردید. شاخص بدون بعد نسبت دانسیته (رابطه ۲) برای ارزیابی دقت مدل در هر یک از کلاس‌های خطر ارائه گردیده است.

$$\text{رابطه ۲} \quad Dr = \frac{Si/Ai}{\sum_i^n Si / \sum_i^n Ai}$$

مقادیر شاخص Dr برای ۵ کلاس خطر محاسبه شد و در جدول ۵ درج گردید. مقدار  $Dr=1$  به مفهوم دارا بودن دانسیته‌ای معادل با متوسط دانسیته لغزش در کل منطقه است. پهنه‌های واقع در کلاس خطر بسیار زیاد با  $Dr=2/58$  در نقشه نهایی تولید شده به مفهوم مناطقی با نسبت دانسیته‌ای معادل  $2/58$  برابر متوسط دانسیته لغزش در منطقه است. هر چه تفکیک بین کلاس‌های خطر در نقشه خروجی پهنه‌بندی توسط شاخص نسبت دانسیته بهتر صورت گرفته باشد نقشه از مطلوبیت بیشتری برخوردار خواهد بود.

## منابع:

- اشقلی فراهانی ع. ۱۳۸۰: ارزیابی خطر ناپایداری دامنه‌های طبیعی در منطقه رودبار با استفاده از تئوری فازی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی. دانشگاه تربیت معلم تهران. ۱۴۲ص
- بدایعی ب. ۱۳۷۶: پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در بخشی از حوضه شاهرود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران، ۱۵۸ ص
- پژم م. ۱۳۷۵: پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای در حوضه آبخیز الموت‌رود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران، ۹۰ ص
- جلالی ن. ۱۳۸۱: ارزیابی روش‌های متداول پهنه‌بندی خطر حرکات توده‌ای و معرفی روش سازگار در اقلیم نیمه مرطوب حوضه آبخیز طالقان. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. شماره ثبت ۸۲/۳۶۰. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
- حق‌شناس ا. ۱۳۷۴: پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارتباط آن با تولید رسوب در طالقان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی. دانشگاه تربیت‌مدرس، ۱۸۳ ص
- دانشجو ف. ۱۳۷۸: مبانی مهندسی زلزله و آنالیز ریسک. نشر دانش فردا، ۲۱۲ص
- سعدالدین ا. ۱۳۷۳: بررسی اثرات پارامترهای هیدروژئومورفیک بر حرکات توده‌ای در حوضه آبخیز چاشم- خطیرکوه سمنان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۲۳ص
- سفیدگری ر. ۱۳۸۱: ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مقیاس ۱/۵۰۰۰ (مطالعه موردی حوضه دماوند). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران، ۱۵۹ص
- سیارپور م. ۱۳۷۸: پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش در جنوب خلخال-استان اردبیل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران، ۹۳ص
- شیرانی ک. ۱۳۸۲: ارزیابی مهمترین روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به منظور انتخاب روش مناسبی برای جنوب استان اصفهان منطقه سمیرم در مسیر رودخانه ماربر. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. شماره ثبت ۸۲/۹۶۱. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
- شیرانی ک. غیومیان ج. مختاری ا. ۱۳۸۴: بررسی و ارزیابی آماری دو متغیره و چند متغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، نشریه آب و آبخیز، ج ۲، شماره ۲، ص ۳۶-۴۷
- فرهادی نژاد ط. ۱۳۸۱: ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه سرخاب گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، شماره ثبت ۸۳/۷۰۱. پژوهشکده حفاظت خاک و

جدول ۵ - ویژگی‌های کلاس‌های خطر رانش زمین و مقادیر شاخص Dr.

ویژگی‌ها	مساحت کل (Ai)		مساحت زمین لغزشها (Si)		شاخص Dr
	Km <sup>2</sup>	درصد	Km <sup>2</sup>	درصد	
کلاس خطر بسیار زیاد	۱۲/۲۵	۱۷/۵۵	۲/۹۸	۴۹/۷۲	۲/۵۸
زیاد	۲۸/۴۲	۴۰/۷۷	۲/۴۱	۴۰/۲۶	۰/۹
متوسط	۱۱/۳۷	۱۶/۳۲	۰/۴۸۵	۸/۰۹	۰/۴۵
کم	۱۰/۹۲	۱۵/۶۷	۰/۰۸۳	۱/۳۸	۰/۰۸
خیلی کم	۶/۷۵	۹/۶۹	۰/۰۳۲	۰/۵۳	۰/۰۵

این نکته‌ای است که در تأثیر و منطقی بودن خروجی مدل آماری دو متغیره فوق‌الذکر می‌توان از آن استفاده نمود. نتایج خروجی مدل با نتایج کار دیگران در حوضه هائی مشابه در البرز و زاگرس مقایسه شد. از جمله شیرانی (۱۳۸۲ و ۱۳۸۴) در حوضه سمیرم در زاگرس، به ترتیب برای کلاس‌های خطر بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم، مقادیر ۲/۱۲، ۱/۱۴، ۰/۵۸ و ۰/۱۴ را بدست آورده که مقادیر بسیار نزدیک به مقادیر حاصل شده در این تحقیق (در البرز) می‌باشد. سفیدگری (۱۳۸۱) نیز در ارزیابی مدل‌های مختلف در حوضه دماوند در البرز مدل آماری مذکور را بهتر از دیگر روشها معرفی کرده است. نتایج در مجموع بیانگر موفقیت مدل آماری دو متغیره (ارزش اطلاعاتی) در پیش‌بینی خطر رانش زمین است. لذا در بین روش‌های آماری و تجربی موجود می‌توان آنرا به عنوان گزینه‌ای موفق توصیه کرد.

آبخیزداری.

کهی میانجی، ی. ۱۳۷۷: تحلیل چند متغیره آماری احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه طالقان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش از دور. دانشکده جغرافیا. دانشگاه تربیت مدرس، ۲۰۴ص

نیک اندیش ن. ۱۳۷۸: بررسی نقش عوامل هیدرواقليم در وقوع حرکات توده ای با توجه به نقش رسوب زائی آنها در حوضه کارون. پایان نامه دکتری هیدرو اقليم. دانشگاه اصفهان، ۱۸۱ص

Carrara A., Cardinali M, Detti R, Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach p., 1991: GIS techniques and statistic models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes Landforms*. **16**: 427 – 455

Ercanoglu M. & Cokceoglu C. 2002: Assessment of landslide susceptibility for a landslide pron area north of yenice, NW turkey by fuzzy Approach. *Environmental geology*. **41**: 720-730.

Guzzetti F., Cardinali M., Relchenbach P. Carrara A., 2000: comparing landslide map: A case study in the upper tiber river basin, central Italy. *Environmental management*. **25**: 247-263.

Ilwis applications Guide 1997: International Institute for Aerospace Survey and Earth science (ITC). Ensched. Netherlands.

Nilsen T H. Wright RH. (1979), Relative slope stability and land use planning in the Sanfrancisco Bay region, Geological Survey Professional Paper 944. U S. Department of interior, Washington, 103pp

Sara L., kyungduck M. 2001: Statistical analysis of landslide susceptibility at Yonging, Kkorea. *Enviromented geology*. **40**:1095–1113.

Van Westen C.J., Rengers N., Terline M.T.J., Soeters R. 1997: Predication of the occurrence of slope instability phenomena through GIS – based hazard zonation. *Geologisches Rundschav*. **86**: 404–414.

Van Westen CJ. Van Duren I. Kruse HMG. Tercien MTG. (1993), GISSIZ, ITC Pub. Vol.15. 245pp