

پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سیاهرود)

فریبا اسفندیاری درآباد-دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
ابراهیم بهشتی جاوید- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران^۱
محمدحسین فتحی- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۳۰ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۱۲

چکیده

در این پژوهش با استفاده از زمین‌لغزش‌های ثبت شده در منطقه و ۱۱ پارامتر طبیعی (سنگ-شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، شاخص حمل رسوب (STI)، شاخص توان آبراهه (SPI)، بارش، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)، درجه شیب، جهت شیب، کاربری زمین و تراکم پوشش گیاهی (NDVI) نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای حوضه سیاهرود استان گیلان تهیه گردیده است. جهت انجام این کار از تئوری بیزین استفاده شده است. با استفاده از احتمالات تئوری بیزین ارتباط بین پارامترها و مناطق لغزشی (دو سوم مناطق لغزشی) تعیین شد و وزن هر طبقه از پارامترها به دست آمد. اجرای مدل و اعمال وزن لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arcmap صورت گرفت و در نهایت نقشه حساسیت زمین‌لغزش در پنج کلاس حساسیت به دست آمد. با توجه به نقشه به دست آمده و نیز وزن کلاس‌های هر یک از پارامترها، کلاس تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط‌افکنه‌های مرتفع در لایه سازند، مرتع متوسط در بین کلاس‌های کاربری زمین، جهات شمالی و شمال غربی، شیب‌های ۲۰-۵ درجه و نیز فاصله ۱۰۰-۰ متر از رودخانه بیشترین وزن و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. دقت نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از یک سوم (۳۰ نقطه لغزشی) مناطق لغزشی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه ارزیابی نشان داد که مدل با قابلیت پیش‌بینی ۸۳/۳ درصد زمین‌لغزش‌ها در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد، دقت قابل قبولی در ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش دارد.

کلیدواژه‌ها: حساسیت زمین‌لغزش، تئوری بیزین، سیاهرود، وزن شواهد.

۱. مقدمه

زمین لغزش از جمله مهم‌ترین مخاطرات زمینی در جهان است. زمین لغزش‌ها زندگی انسان‌ها را با تخریب محیط، منابع و دارایی آن‌ها با خطر جدی روبه‌رو می‌کنند (سان وی هی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۰). در مقایسه با انواع مخاطرات طبیعی همچون آتشفشان و سیل، زمین لغزش‌ها آسیب‌های قابل توجهی را از نظر مالی و جانی ایجاد می‌کنند (گوزتی^۲ ۲۰۰۵: ۴۰۸). بر اساس برآوردهای اولیه در ایران سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی از طریق وقوع زمین لغزش وارد می‌شود (حسین زاده و دیگران، ۱۳۸۸: ۲۷). تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش و ارزیابی شدت خطر آن می‌تواند کمک شایانی در زمینه مدیریت محیط و اتخاذ تصمیمات درست در مقابله با این مخاطره باشد.

به‌طور کلی پژوهش‌های موجود در رابطه با ارزیابی خطر زمین لغزش را از لحاظ رویکرد روش‌شناسی می‌توان در سه گروه غالب کمی، کیفی و نگرش هوش مصنوعی^۳ (AI) دسته‌بندی کرد. به‌طور کلی نگرش‌های کیفی بر مبنای داورهای ذهنی یک یا گروهی از متخصصین صورت می‌گیرد. این در حالی است که نگرش‌های کمی بر مبنای قوانین سخت ریاضی صرف‌نظر از هرگونه سوگیری شخصی بنا شده‌اند. تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌توانند از دانش ذهنی یا تکنیک تطبیق الگو در مقابل حل مجموعه‌ای از معادلات ریاضی استفاده کنند. تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌طور وسیعی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۴، سیستم خبره^۵ و دیگر تکنیک‌های دانش پایه و قانون پایه را پوشش می‌دهند (نئوپان^۶ و پانتاناکونچایی^۷، ۲۰۰۶: ۲۸۱). با توجه به مطالب فوق و پژوهش‌های صورت گرفته برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش می‌توان از مدل‌هایی مثل رگرسیون لجستیک^۸، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۹، فرآیند تحلیل شبکه (ANP)، شبکه عصبی مصنوعی، انواع مدل‌های دومتغیره آماری، مدل LNRF، مدل منطق فازی و غیره استفاده کرد. معمولاً انتخاب مناسب‌ترین نگرش و مدل بر اساس نوع داده‌ها، مقیاس منطقه مورد مطالعه و مقیاس تحلیل‌ها صورت می‌گیرد و بستگی به دانش پژوهشگر دارد. از جمله کارهایی که در داخل و خارج کشور در زمینه مدل و موضوع پژوهش انجام شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

-
- 1 Sanwei He
 - 2 Guzzetti
 - 3 Artificial Intelligence
 - 4 Artificial neural network
 - 5 Expert system
 - 6 Neaupane
 - 7 Piantanakulchai
 - 8 logistic regression
 - 9 Analytical Hierarchical Process

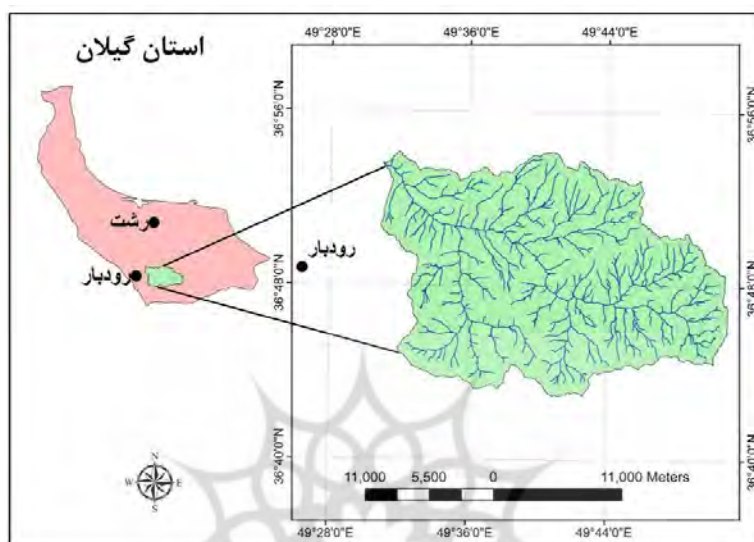
متو^۱ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تئوری بیز پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش را در بخشی از هند انجام دادند. در این پژوهش از ۱۵ عامل طبیعی و انسانی جهت پهنه‌بندی استفاده شد. ارزیابی نقشه نهایی نشان داد که دقت نقشه تهیه شده ۸۴/۶٪ و قابل قبول است. پیاستینیا^۲ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل تئوری بیزین پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش را برای جنوب منطقه تیرو^۳ در کشور ایتالیا انجام دادند. نتایج پژوهش نشان داد که نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها با درصد بالایی (۷۵٪) قابل اطمینان است؛ بنابراین مدل فوق می‌تواند به خاطر ثمربخش و کم‌هزینه بودن برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران محیطی مدلی سودمند و قابل اطمینان باشد. محمدی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از سه مدل بیز، دمپستر-شفر^۴ و نسبت تکرار^۵ در بخشی از استان گلستان حساسیت زمین‌لغزش را پهنه‌بندی کردند. در این پژوهش برای ارزیابی مدل‌ها از منحنی ROC استفاده شد و طبق این ارزیابی مدل نسبت تکرار بهترین نتیجه را (۷۵٪ دقت) در بین سه مدل فوق داشت. نیازی و همکاران (۱۳۸۹) حوضه سد ایلام را با استفاده از مدل آماری دو متغیره پهنه‌بندی کردند. نتایج کار نشان داد که روش تراکم سطح، وزن متغیرها (تئوری بیز) و ارزش اطلاعاتی به ترتیب بیش‌ترین دقت را در تفکیک کلاس‌های خطر زمین‌لغزش داشته‌اند. پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از تئوری بیزین و ۱۴ عامل طبیعی و انسانی پهنه‌بندی زمین‌لغزش را برای بخشی از استان گلستان انجام دادند. ارزیابی مدل و نتایج تحقیق نشان داد که دقت مدل احتمالاتی تهیه شده با رویکرد دوم مدل‌سازی (حذف عامل جهت شیب از تحلیل‌ها) در منطقه مورد مطالعه ۷۱/۳۷ درصد و خوب برآورد شده است. از دیگر کارهای صورت گرفته در زمینه زمین‌لغزش می‌توان به پژوهش امیر احمدی و همکاران (۱۳۸۹)، قرهی و همکاران (۱۳۹۰) و یمانی و همکاران (۱۳۹۱) اشاره کرد.

۲. منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه حوضه رودخانه سیاهرود از زیرشاخه‌های سفیدرود در استان گیلان است (شکل ۱). این حوضه در پایین دست سد منجیل قرار گرفته و مساحتی در حدود ۴۳۷ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد. ارتفاع حوضه بین ۱۳۲ تا ۲۷۰۰ متر از سطح دریا در نوسان است. بیشترین شیب حوضه برابر با ۷۲ درجه است. از نظر کاربری و پوشش زمین، بیش از ۵۰ درصد حوضه دارای کاربری از نوع مرتع متوسط و جنگل مترکم (بیشتر در ارتفاعات میانی حوضه) می‌باشد. از نظر جنس سازندها نیز غلبه با سازندهایی از جنس توف‌های داسیتی - آندزیتی با میان لایه‌هایی از گدازه (۳۸٪ منطقه) است. سازندهایی مثل شیل و ماسه،

1 Mathew
2 Piacentinia
3 Tyrol
4 Dempster – Shafer
5 Frequency ratio

تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط‌افکنه‌ها و سازندهایی از جنس تناوب ماسه‌سنگ، آهک و مارن و کنگلومرا نیز از دیگر سازندهای منطقه می‌باشند. در این منطقه با توجه به نوع سازندها، عمق زیاد رسوبات در دامنه‌ها و میانگین بارش بالا، زمین‌لغزش‌های زیادی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش با استفاده از تئوری احتمالات بیز، نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه فوق مطالعه و تهیه شده است.



شکل ۱ موقعیت حوضه سیاهرود در استان گیلان

۳. مواد و روش‌ها

۳.۱. داده‌ها

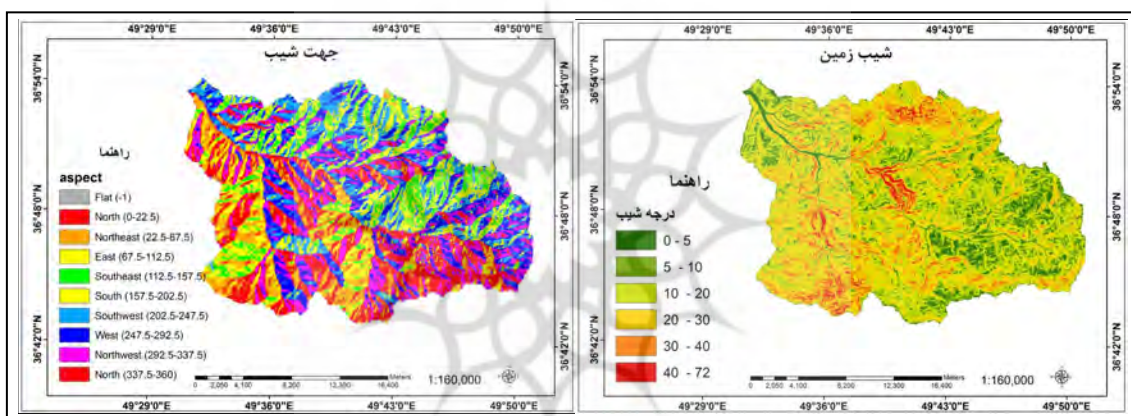
برای اجرای مدل و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، جمع‌آوری و تهیه پایگاه داده از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش از مهم‌ترین مراحل تحقیق است. در این پژوهش با استفاده از ۱۱ پارامتر (سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، بارش، شیب زمین، جهت شیب، کاربری زمین، تراکم پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص حمل رسوب^۱ (STI)، شاخص توان آبراهه^۲ (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافیک^۳ (TWI)) عمل پهنه‌بندی زمین‌لغزش انجام شده است. در اولین گام از این مرحله با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه لایه مدل ارتفاعی منطقه (DEM) با اندازه پیکسل ۳۰ متری تهیه شد. با داشتن این لایه با استفاده از عملگرهای مختلف موجود در بسته نرم‌افزاری جی‌آی‌اس لایه‌هایی همچون شیب (شکل ۲)، جهت شیب (شکل ۳) و شبکه زهکشی که به صورت فاصله از رودخانه (شکل ۴) در مدل استفاده شده است، استخراج شدند.

1 Sediment Transport Index

2 Stream Power Index

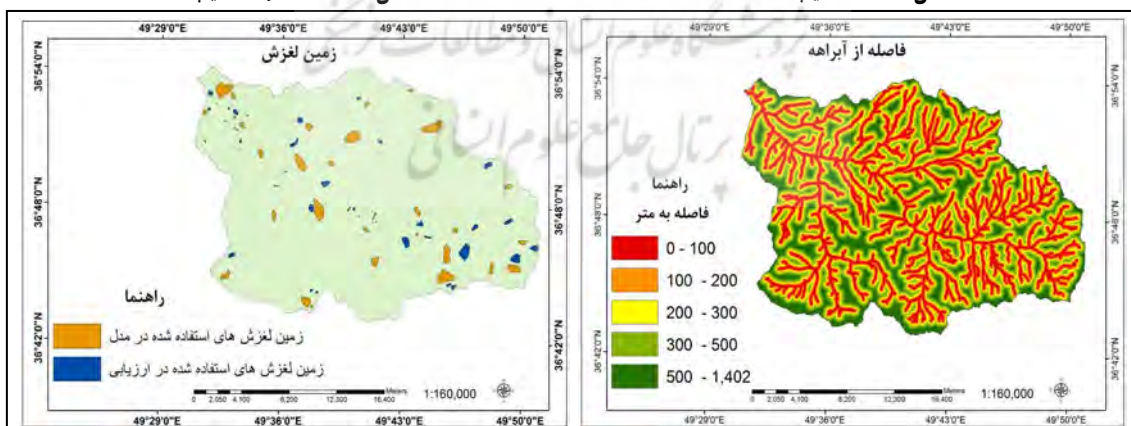
3 topographic wetness index

زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (IRS) و گوگل ارث^۱ برای مدل‌سازی استخراج شدند (۹۰ زمین لغزش). از بین این زمین لغزش‌ها دو سوم (۶۰ زمین لغزش) برای اجرای مدل و پیدا کردن وزن کلاس‌ها و یک سوم (۳۰ زمین لغزش) مابقی برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۵). همچنین با استفاده از باندهای ۳ و ۴ تصاویر ماهواره لندست شاخص پوشش گیاهی (NDVI) حوضه تهیه شد (شکل ۶). برای تهیه نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه از محیط نرم‌افزار پردازش تصویر ENVI و روش طبقه‌بندی نظارت شده (الگوریتم حداکثر مشابهت^۲ (MLC)) و نیز تصویر رنگی ماهواره لندست استفاده شده است (شکل ۷). همچنین با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جیرنده لایه جنس سازندها (شکل ۸) و لایه گسل به صورت فاصله از گسل‌ها (شکل ۹) تهیه شد. در نهایت برای به دست آوردن لایه پهنه‌های بارشی حوضه از آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه استفاده شد و لایه بارش به صورت پهنه‌های بارشی به دست آمد (شکل ۱۰).



شکل ۳ نقشه جهت شیب

شکل ۲ نقشه شیب

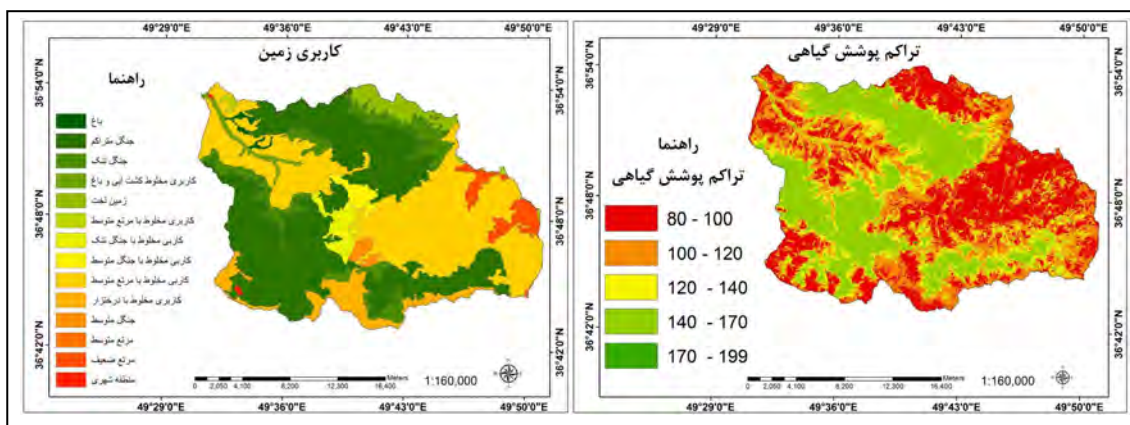


شکل ۵ نقشه زمین لغزه‌های منطقه

شکل ۴ نقشه فاصله از رودخانه

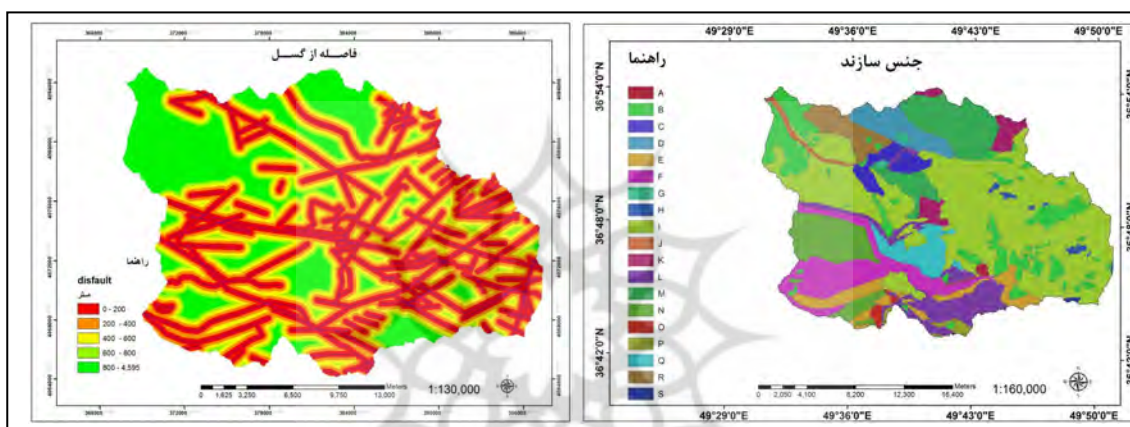
1 Google Earth

2 Maximum likelihood classifier



شکل ۶ نقشه تراکم پوشش گیاهی

شکل ۷ نقشه کاربری زمین



شکل ۸ نقشه فاصله از غسل

شکل ۹ نقشه جنس سازند

(A): اولوین گابرو- نوریت B: تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط‌افکنه‌های مرتفع C: تناوب توف داسیتی- اندزیتی با میان لایه‌ای از ماسه‌سنگ و کنگلومرا به رنگ قرمز تیره D: تناوب سنگ آهک، مارن، ماسه‌سنگ و آهک ماسه‌ای، نازک تا متوسط لایه E: تناوب کوارتزیت ماسه‌سنگ، سیلتستون و گل‌سنگ، با میان لایه‌ای از سنگ آهک F: تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ، با میان لایه کنگلومرا، سنگ آتشفشانی و عدسی‌های زغالی G: توده‌های نیمه آتشفشانی اندریت-بازالت H: توده‌های نیمه آتشفشانی اندزیت-بازالتی I: توف‌های داسیتی اندزیتی قرمز و خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از گدازه J: رسوبات رودخانه‌ای K: سنگ آهک فسیل دار خاکستری‌رنگ، ضخیم لایه تا توده‌ای به‌طور محلی چرتدار L: سنگ آهک، سنگ آهک توفی نازک لایه نومولیت‌دار به رنگ کرم و خاکستری M: سنگ آهک اوربیت و لین‌دار خاکستری متوسط لایه تا توده‌ای N: سنگ آهک متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری، چرتدار با سنگ آهک O: کنگلومرا به رنگ قرمز، به‌صورت متوسط و منظم لایه P: گدازه‌های اندزیت بازالتی به رنگ خاکستری تیره Q: گدازه‌های اندزیتی- بازالتی با میان لایه‌ای از توف داسیتی، شیل و سنگ آهک ماسه‌ای R: گدازه‌های مگاپورفیریتیک حفره‌دار با ترکیب تراکی اندزیتی قهوه‌ای S: گنبد یا توده‌های کوچک مونوزونیتی-تونالیتی)

شاخص قدرت آبراهه SPI

مور و همکاران (۱۹۹۱) معادله (۳) را برای محاسبه شاخص قدرت رودخانه (SPI) پیشنهاد کردند که در این معادله اندازه قدرت فرسایش جریان آب بر این فرض استوار است که عمل تخلیه متناسب با وسعت حوضه صورت می‌گیرد. به‌طور کلی این شاخص در نواحی که نیمرخ و مماسی^۱ محذب دارند (مناطق همگرا و تند) فرسایش ویژه و در نواحی که نیمرخ مقعر دارند (مناطق با کاهش ظرفیت جریان) رسوب ویژه را پیش‌بینی می‌کند.

$$SPI = A_s \cdot \tan\beta$$

رابطه ۳

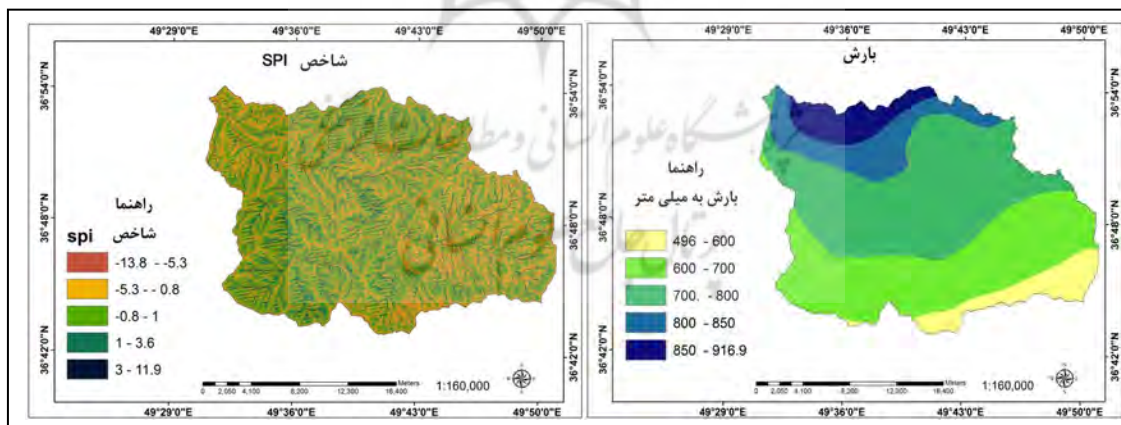
شاخص حمل رسوب STI

از جمله شاخص‌های هیدرولوژیکی که در این مطالعه استفاده شده شاخص حمل رسوب است. این شاخص قدرت فرسایشی جریان‌ها را در روی زمین نشان می‌دهد. رابطه تجربی (رابطه ۱) که برای به دست آوردن این شاخص وجود دارد شبیه معادله جهانی فرسایش خاک است؛ از این رو می‌تواند در نشان دادن موقعیت مناطق با خطر فرسایش مورد استفاده قرار گیرد (مور^۲ و بورچ^۳، ۱۹۸۶).

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^{0.62} \left(\frac{\sin\beta}{0.0896} \right)^{1.2}$$

رابطه (۱)

این پارامتر بر اساس مساحت حوضه (A_s) و سینوس گرادیان شیب ($\sin\beta$) قابلیت حمل رسوب در حوضه را کنترل می‌کند. بر همین اساس ممکن است سیستم زهکشی را آشفته کند و دامنه‌هایی با گرادیان شیب کم به ایجاد زمین‌لغزش تمایل پیدا کنند (نفلسلی اوغلو^۴ و همکاران، ۲۰۰۸). شکل ۱۲ نقشه مربوط به این لایه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ نقشه شاخص قدرت آبراهه (SPI)

شکل ۱۰ نقشه بارش

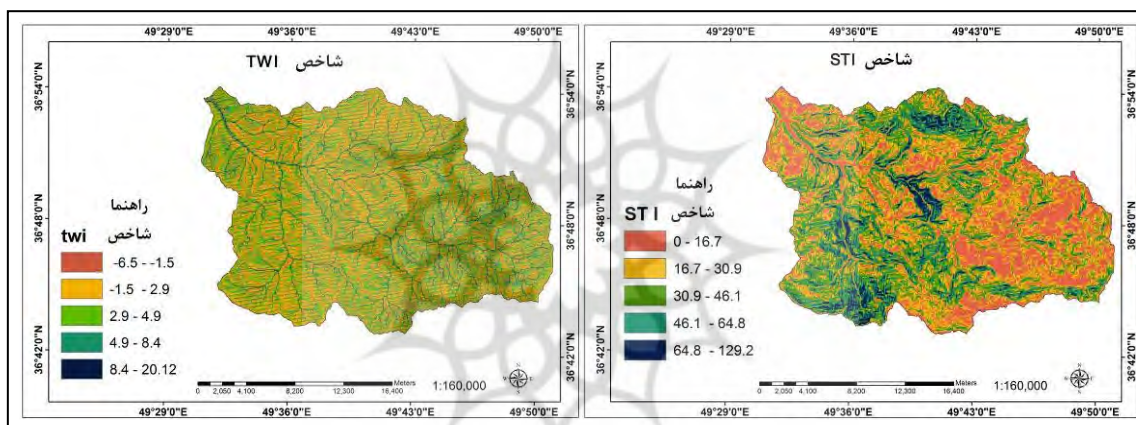
- 1 Tangential
- 2 Moore
- 3 Burch
- 4 Nefeslioglu

شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)

شاخص رطوبت توپوگرافیک (شاخص ترکیب توپوگرافیک^۱ (CTI) یا رطوبت خاک^۲) که برای توصیف الگوی فضایی رطوبت خاک استفاده می‌شود (ویلسون^۳ و گالانت^۴، ۲۰۰۰) به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$TWI = LN\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

این شاخص برای مطالعه حساسیت زمین لغزش استفاده می‌شود (گوروم و همکاران، ۲۰۰۸). از شاخص رطوبت توپوگرافیک می‌توان برای ارزیابی الگوی فضایی رطوبت خاک و تغییراتی که به دلیل فرسایش در بافت خاک رخ داده استفاده کرد (اسمیت^۵ و پرسون^۶، ۲۰۰۳. گریس^۷ و همکاران، ۲۰۰۷). این شاخص عموماً برای تعیین کنترل توپوگرافیک بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (سورنسون^۸ و همکاران، ۲۰۰۶) و مقادیر بالای TWI معمولاً در بدنه زمین لغزش‌ها پیدا می‌شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳ شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)

شکل ۱۲ شاخص قدرت آبراهه (STI)

۳،۲. روش مطالعه

برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش در منطقه از روش وزن شواهد^۹ (کارتر^{۱۰} و همکاران، ۱۹۸۹) استفاده شده است. این مدل به عنوان مدلی سودمند و آزمایش شده در زمینه‌های مختلف، همچون مطالعه

- 1 Compound Topographic Index
- 2 soil wetness
- 3 Wilson
- 4 Gallant
- 5 Schmidt
- 6 Persson
- 7 Grabs
- 8 Sorensen
- 9 weight of evidence (WofE)
- 10 Carter

حرکات توده‌ای، تحقیقات معدنی و نقشه‌کشی چشمه‌های آب زیرزمینی است (پولی^۱ و استرلاچینی^۲، ۲۰۰۷. باربیری^۳ و کامبولی^۴، ۲۰۰۹).

مدل وزن شواهد (WofE) یک روش آماری مبتنی بر تئوری احتمالات بیز است (دنيسون^۵ و همکاران، ۲۰۰۲) این مدل وابستگی موجود بین یک واقعه (زمین‌لغزش‌های رخ داده) و عامل‌های سببی (عوامل مستعد کننده زمین‌لغزش) را تخمین می‌زند. مدل فوق در سال ۱۹۸۸ برای اکتشافات معدنی مورد استفاده قرار گرفت (کارتر و همکاران، ۱۹۸۸). متعاقباً در سال ۲۰۰۲ ون وسترن^۶ آن را برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرارداد.

اگر ما عامل‌های سببی (عوامل مستعد کننده زمین‌لغزش) را B_i ، کلاس‌های هر پارامتر را B_i و زمین‌لغزش رخ داده را S در نظر بگیریم، در این صورت تئوری بیز را برای محاسبه احتمال شرطی وقوع زمین‌لغزش (S) در کلاس معین (B_i)، می‌توان به صورت رابطه زیر به کار برد:

$$P(S|B_i) = \frac{P(B_i|S) \times P(S)}{P(B_i)} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه فوق $P(S)$ احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده مورد مطالعه (AS)، $P(B_i)$ احتمال وقوع کلاس B_i در محدوده مورد مطالعه (AS)، $P(B_i|S)$ احتمال وقوع پیشامد B_i به شرطی که پیشامد S اتفاق افتاده باشد $P(S|B_i)$ احتمال وقوع پیشامد S به شرطی که پیشامد B_i اتفاق افتاده باشد (پیاستینی^۷ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۹۹).

احتمال شرطی وقوع زمین‌لغزش زمانی که کلاس B_i اتفاق نیفتاده باشد نیز به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$P(S|B_i^c) = \frac{P(B_i^c|S) \times P(S)}{P(B_i^c)} \quad \text{رابطه ۵}$$

در معادله فوق $P(S)$ احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده مورد مطالعه (AS)، $P(B_i^c|S)$ احتمال شرطی نبود کلاس B_i به شرطی که S اتفاق افتاده باشد، احتمال اولیه نبود کلاس B_i در محدوده مورد مطالعه (AS). بخش‌های مختلف معادلات فوق را می‌توان به صورت روابط ۶ تا ۱۲ محاسبه کرد (پیاستینی و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۹۹).

- 1 Poli
- 2 Sterlacchini
- 3 Barbieri
- 4 Cambuli
- 5 Denison
- 6 Van Western
- 7 Piacentini

$$P(S) = \frac{\text{area } S}{\text{area } AS} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$P(B_i) = \frac{\text{area } B_i}{\text{area } AS} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$P(B_i^{\wedge}) = \frac{\text{area } B_i^{\wedge}}{\text{area } AS} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$P(S|B_i) = \frac{(\text{area } S \text{ AND } \text{area } B_i / \text{area } B_i)}{P(B_i)} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$P(B_i|s) = \frac{(\text{area } S \text{ AND } \text{area } B_i / \text{area } B_i)}{P(S)} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$P(s|B_i^{\wedge}) = \frac{(\text{area } S \text{ AND } \text{area } B_i^{\wedge} / \text{area } B_i^{\wedge})}{P(B_i^{\wedge})} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$P(B_i^{\wedge}|s) = \frac{(\text{area } S \text{ AND } \text{area } B_i^{\wedge} / \text{area } B_i^{\wedge})}{P(S)} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در روش وزن شواهد، وزن کلاس‌های هر پارامتر به وسیله ترکیبی از ارزش‌های مثبت و منفی (W^+ و W^-) از طریق تئوری بیز و نیز اختلاف تفاضل بین آن‌ها محاسبه می‌شود و در نهایت با استفاده از رابطه ۱۶ وزن نهایی کلاس‌ها حاصل می‌شود.

$$W^+ = LN \left(\frac{P(B_i|s)}{P(B_i)} \right) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$W^- = LN(P(B_i^{\wedge}|s)/P(B_i^{\wedge})) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$C = W^+ - W^- \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$W_{final} = \frac{C}{S_e} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

در روابط فوق LN لگاریتم بر مبنی عدد نپر، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} وزن نهایی استاندارد شده و S_e انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۱۷). در جدول شماره ۱ اوزان به دست آمد برای هر یک از کلاس‌های پارامترها موردنظر به همراه سایر اطلاعات مربوط به آن آمده است.

جدول ۱ جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها مأخذ: نگارندگان

پارامترها	class	w+	w-	C	s2(w+)	s2(w-)	Sc	Weight
شاخص TWI	-۱/۵ - -۶/۵	۰/۱۸۹	-۰/۰۴۸	۰/۲۳۷۶	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۲۳	۱۰/۲۷
	۲/۹ - ۴/۹	۰/۲۹۸	-۰/۱۹۲	۰/۴۸۹	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۰۹۹	۰/۰۱۹۵	۱/۳۵
	۴/۹ - ۸/۴	۰/۶۳۶	-۰/۱۳۸	۰/۷۷۳	۰/۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۲۶	۳۴/۳
	۸/۴ <	۰/۵۲۳	-۰/۰۲۰۴	۰/۵۴۳	۰/۰۰۱۸۸	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۴۴	۱۲/۳
شاخص STI	۰ - ۱۶/۷	۰/۵۲۳	-۰/۲۸۹	۰/۸۱۲	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۱۸	۴۵/۰۲
	۱۶/۷ - ۳۰/۹	۰/۳۶۳	-۰/۱۹۹	۰/۵۶۲	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۱۸	۳۰/۷
	۳۰/۹ - ۴۶/۱	۰/۰۲۵	-۰/۰۰۷۶	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰۳۸۹	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۲۲	۱/۵
	۴۶/۱ - ۶۴/۸	-۰/۱۷۸	۰/۰۲۹	-۰/۲۰۸	۰/۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰۸۲	۰/۰۲۷	-۷/۵
شاخص SPI	۶۴/۸ <	-۰/۴۷۸	۰/۰۲۳۷	-۰/۵۰۲	۰/۰۰۲۳۵	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۴۹	-۱۰/۲
	-۵/۳ - -۱۳/۵	۰/۱۸۸	-۰/۰۴۷۸	۰/۲۳۶	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۲۳	۱۰/۲۱
	-۵/۳ - -۰/۸	۰/۲۹۴	-۰/۱۲۰۶	۰/۴۱۵	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۰۱۹۸	۲۰/۹۴
	-۰/۸ - ۱	۰/۱۹۹	-۰/۱۵۳	۰/۳۵۲	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۱۷۶	۲۰/۰۶
تراکم پوشش گیاهی	۱ - ۳/۶	۰/۳۳۴	-۰/۰۶۲	۰/۳۹۶	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۲۵۴	۱۵/۵۷
	۳/۶ <	۰/۴۸۲	-۰/۰۲۹۷	۰/۵۱۲	۰/۰۰۱۱۵	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۳۵۱	۱۴/۵۹
	۸۰ - ۱۰۰	۰/۰۷۴	-۰/۰۳۲	۰/۱۰۵۶	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۲۱۸	۴/۸۴۳
	۱۰۰ - ۱۲۰	۰/۴۵۴	-۰/۲۵	۰/۷۰۵۹	۰/۰۰۰۲۴۷	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۱۹	۳۶/۴۸
فاصله از گسل	۱۲۰ - ۱۴۰	-۰/۴۷۷	-۰/۱۰۸	۰/۵۸۵۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۲۴	۲۳/۸۷
	۱۴۰ - ۱۷۰	۰/۰۴	-۰/۰۱۶۶	۰/۰۵۶۹	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۲۰۸	۲/۷۳
	۱۷۰ - ۱۹۹	۰/۶۲۲	-۰/۰۰۰۶	۰/۶۲۲۵	۰/۰۵۵۵۵	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۲۳۵۹	۲/۶۴
	۰ - ۲۰۰	-۰/۱	۰/۰۴۸۸	-۰/۱۴۹	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۱۹	-۷/۷۷
جهت شیب	۲۰۰ - ۴۰۰	۰/۲۱۷	-۰/۰۷۴۲	۰/۲۹۱	۰/۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۲۲	۱۳/۴۵
	۴۰۰ - ۶۰۰	۰/۵۲۹	-۰/۱۲۸۱	۰/۶۵۷	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۲۳	۲۸/۴۸
	۶۰۰ - ۸۰۰	۰/۷۱۵	-۰/۰۹۷	۰/۸۱	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۲۷	۲۹/۹۸
	۸۰۰ <	۰/۴۴۷	-۰/۱۵۱	۰/۵۹۸	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۰۱۹	۳۰/۱۳
مسطح شمال شمال شرقی شرق جنوب شرقی جنوب جنوب غربی غرب شمال غرب	مسطح	۰/۲۶	-۰/۰۰۰۰۷	۰/۲۶۰۴	۰/۳۳۳	۰/۰۰۰۰۷۳	۰/۵۷۷	۰/۴۵
	شمال	۰/۶۴۱	-۰/۱۸۸۱	۰/۸۲۹۶	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۹۹	۰/۰۱۹	۴۲/۲۱۵
	شمال شرقی	۰/۱۴	-۰/۰۲۳۲	۰/۱۶۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۲۶	۶/۱۵۶
	شرق	۰/۱۷۱	-۰/۰۱۶۲	۰/۱۸۸	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۷۹	۰/۰۳۱۵	۵/۹۶
	جنوب شرقی	-۰/۶۲۶	۰/۰۳۷۳	-۰/۶۶۳۶	۰/۰۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۷۵	۰/۰۵۳	-۱۲/۴۲
	جنوب	-۰/۳۲۶	۰/۰۳۸	-۰/۳۶۴۵	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۳۶	-۱۰/۱۴
	جنوب غربی	۰/۱۶۵	-۰/۰۳۰۳	۰/۱۹۵	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۲۵۶	۷/۶۰۸
	غرب	۰/۵۳۳	-۰/۱۲۴۸	۰/۶۵۸	۰/۰۰۰۴۷۸	۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۰۲۳۸	۲۷/۶۹
	شمال غرب	۰/۵۶۳	-۰/۱۳۶	۰/۶۹۹۱	۰/۰۰۰۴۱۸	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۲۲۵	۳۱/۰۴۹

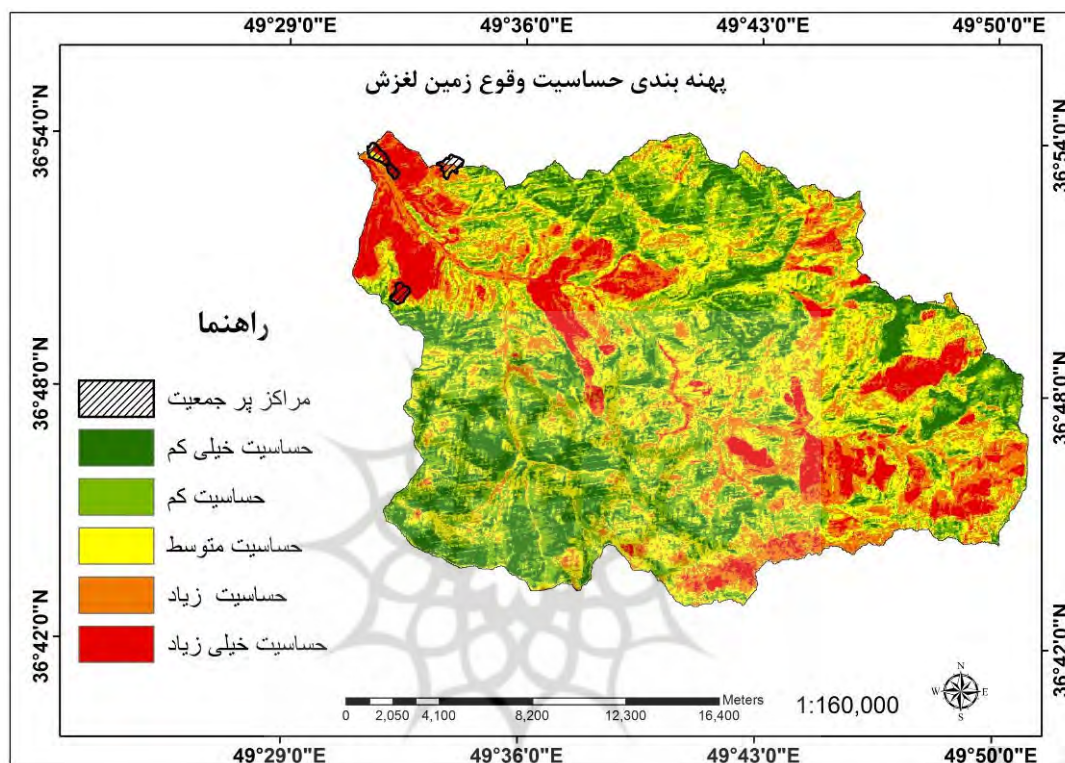
ادامه جدول ۱ جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاسها مأخذ: نگارندگان

Weight	Sc	s2(w-)	s2(w+)	C	w-	w+	class	پارامترها
-	-	+۰۰۰۰۷	-	-۲/۷۵۶	+۰۰۰۲۲	-۲/۷۵۴	A	نوع سازند
۱۷۹/۸۷	+۰۰۱۷۵	+۰۰۰۰۱۸	+۰۰۰۰۱۲	۳/۱۴۴	-۱/۱۱۳	۲/۰۳۱	B	
۵۳/۸۷	+۰۰۲۸۸	+۰۰۰۰۰۸	+۰۰۰۰۷۵	۱/۵۵۱	-۰/۰۰۸	۱/۴۷۱	C	
-۱۲/۲۱	+۰۲۶۷۴	+۰۰۰۰۰۷۴	+۰۰۷۱۴	-۳/۲۶	+۰۰۳۶۴	-۳/۲۳	D	
-۸/۴	+۰۰۹۷	+۰۰۰۰۰۷۴	+۰۰۰۹۴	-۰/۸۲	+۰۰۲۴۷	-۰/۷۹۵	E	
-۲۲/۰۹	+۰۱۵۶	+۰۰۰۰۰۷۴	+۰۰۲۴۴	-۳/۴۵۶	+۰۰۸۶۳	-۳/۳۶۹	F	
-	-	+۰۰۰۰۰۷۴	-	-	+۰۰۰۳	-	G	
-	-	+۰۰۰۰۰۷	-	-	+۰۰۰۵۵	-	H	
-۴۷/۹۴	+۰۰۳۰۲	+۰۰۰۰۰۸	+۰۰۰۰۰۸	-۱/۴۴۶	+۰۳۴۷۵	-۱/۰۹۸	I	
-۳/۹۷	+۰۱۷۹۸	+۰۰۰۰۰۷۴	+۰۰۳۲	-۰/۷۱۵	+۰۰۰۳۹	-۰/۷۱۱	J	
۴۵/۸	+۰۰۳۰۷	+۰۰۰۰۰۸	+۰۰۰۰۸۶	۱/۴۰۷	-۰/۰۶۶۶	۱/۳۴۱	K	
-۱۳/۰۷	+۰۰۸۵۵	+۰۰۰۰۰۷	+۰۰۰۷۲	-۱/۱۱۸	+۰۰۴۴۷۸	-۱/۰۷۴	L	
-۱۸/۵	+۰۰۴۹۸	+۰۰۰۰۰۷۶	+۰۰۰۲۴	-۰/۹۲	+۰۰۵۳	-۰/۸۶۷	M	
-۱۹/۶۸	+۰۰۵۸۶	+۰۰۰۰۰۷	+۰۰۰۳۳	-۱/۱۵۳	+۰۰۴۶	-۱/۱۰۶	N	
۵۸/۷	+۰۰۴۲۳	+۰۰۰۰۰۷۷	+۰۰۰۱۷	۲/۴۸۳	-۰/۰۴۳۷	۲/۴۳۹	O	
-	-	+۰۰۰۰۰۷۳	-	-۴/۴۲	+۰۰۰۰۶	-۴/۴۱۴	P	
-۱۱/۰۲	+۰۰۸۱۶۲	+۰۰۰۰۰۷۴	+۰۰۰۰۶۵۸	-۰/۸۹۹	+۰۰۲	-۰/۸۷۸	Q	
-۵/۹	+۰۰۴۸۳۴	+۰۰۰۰۰۷۳	+۰۱۶۶۷	-۲/۴۱۳	+۰۰۲۹	-۲/۳۸۴	R	
-	-	+۰۰۰۰۰۷۳	-	-	+۰۰۰۰۹۹	-	S	
۱۵/۷۸	+۰۰۳۷۲	+۰۰۰۰۰۷۸	+۰۰۰۰۱۳	+۰/۵۸۶	-۰/۰۳۷	+۰/۵۴۹	۰-۵	درجه شیب
۳۸/۵۸	+۰۰۲۰۸	+۰۰۰۰۰۹۴	+۰۰۰۰۳۴	+۰/۸۰۵	-۰/۱۸۰۷	+۰/۶۲۴	۵-۱۰	
۳۳/۳۹	+۰۰۱۷	+۰۰۰۰۰۱۳	+۰۰۰۰۱۶	+۰/۵۷۵	-۰/۲۷۵۹	+۰/۲۹۹	۱۰-۲۰	
-۴/۰۷۶۶	+۰۰۲۱۱	+۰۰۰۰۰۹۳	+۰۰۰۰۳۵	-۰/۰۸۶	+۰/۰۲۲۳	-۰/۰۶۴	۲۰-۳۰	
-۱۰/۶۲	+۰۰۳۶۵	+۰۰۰۰۰۷۸	+۰۰۰۰۱۲	-۰/۳۸۷۵	+۰/۰۳۱۹	-۰/۳۵۵	۳۰-۴۰	
-۵/۶۶۷	+۰۰۸۸۵	+۰۰۰۰۰۷۴	+۰۰۰۰۷۷	-۰/۵۰۱۳	+۰/۰۷۰۹	-۰/۴۹۴	۴۰<	
۳۶/۴۵	+۰۰۱۸	+۰۰۰۰۰۱	+۰۰۰۰۲۳	+۰/۶۷۳	-۰/۲۰۱	+۰/۴۷۲	۰-۱۰۰	فاصله از رودخانه
۳۷/۰۹۵	+۰۰۱۸۹	+۰۰۰۰۰۱	+۰۰۰۰۲۵	+۰/۷	-۰/۲۰۲	+۰/۴۹۸	۱۰۰-۲۰۰	
۲۰/۶۵	+۰۰۲۲۶	+۰۰۰۰۰۸۹	+۰۰۰۰۴۲	+۰/۴۷	-۰/۰۹۵	+۰/۳۷۳	۲۰۰-۳۰۰	
۴/۵۲	+۰۰۲۲۴	+۰۰۰۰۰۸۹	+۰۰۰۰۴۱	+۰/۱۰۱	-۰/۰۲۵	+۰/۰۷۶	۳۰۰-۵۰۰	
-۱۷/۵	+۰۰۴۲۱	+۰۰۰۰۰۷۷	+۰۰۰۰۱۷	-۰/۷۳۶	+۰/۰۷۵	-۰/۶۶۲	۵۰۰<	

ادامه جدول ۱ جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها مأخذ: نگارندگان

Weight	Sc	s2(w-)	s2(w+)	C	W-	W+	class	پارامترها
۵۵/۵۶۲۵	۰/۰۲۳۵	۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۰۴۶۶	۱/۳۰۴	-۰/۱۷۳	۱/۱۳۱	۴۹۶-۶۰۰	میزان بارش
۳/۹۳۵	۰/۰۲۰۴	۰/۰۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۸۰۴	-۰/۰۲۸	۰/۰۵۲	۶۰۰-۷۰۰	
۱۲/۶۱۵	۰/۰۱۷۴	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۲۱۹	-۰/۰۹۶	۰/۱۲۳	۷۰۰-۸۰۰	
۲۴/۸۱	۰/۰۲۴۲	۰/۰۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۰۵	۰/۶۰۰۹	-۰/۰۸۷	۰/۵۱۴	۸۰۰-۹۰۰	
۲/۰۲۲	۰/۰۴۱	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۱	۰/۰۸۲۹	-۰/۰۰۵۷	۰/۰۷۷	۹۰۰ <	
۰/۶۴	۰/۵۷۷	۰/۰۰۰۰۷	۰/۳۳	۰/۳۷۱	-۰/۰۰۲۳	۰/۳۶۹	باغ	کاربری زمین
-۱/۰۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۱۸۹	۰/۰۰۷۴	-۰/۰۱۱	جنگل متراکم	
۲۳/۴	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۶	۰/۶۰۷	-۰/۰۶۷۶	۰/۵۳۹	جنگل تنک	
-۲/۴۵	۰/۲۳۵۸	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۵۵	-۰/۵۷۸	۰/۰۰۴۵	-۰/۵۷۴	کشاورزی-باغ	
-۱۴/۷۲	۰/۱۱۲	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۱۲۵	-۱/۶۵	۰/۰۲۳	-۱/۶۲۷	لم یزرع	
۶۶/۱۸	۰/۰۴	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۱۷	۲/۷۶	-۰/۰۴۲۹	۲/۷۱۸	مرتع خوب	
-۶/۸۷	۰/۰۹۶	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۹۲	-۰/۶۶	۰/۰۱۱	-۰/۶۵	جنگل تنک (مختلط)	
۱/۵۷	۰/۰۷۱	۰/۰۰۰۰۷۵	۰/۰۰۴۹	۰/۱۱	-۰/۰۰۱۶	۰/۱۱	جنگل متوسط (مختلط)	
۴۷/۵۲	۰/۰۱۷۴	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۸۳	-۰/۳۶۷	۰/۴۶۲	مرتع متوسط (مختلط)	
۱/۴۲	۰/۰۴۶۴	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۶۶	-۰/۰۰۳۷	۰/۰۶۲	جنگل درختچه ای	
-۰/۸۳	۰/۰۸۹	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۷	-۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۷۳۸	جنگل متوسط	
-	-	۰/۰۰۰۰۷	-	-	۰/۰۰۰۸۱	-	مرتع متوسط	
-	-	۰/۰۰۰۰۷	-	-۱/۴۶	۰/۰۲۳	-۱/۴۳۸	مرتع فقیر	
-	-	۰/۰۰۰۰۷	-	-	۰/۰۰۱۲	-	شهری	
۱۵/۷۸	۰/۰۳۷۲	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۰۱۳	۰/۵۸۶	-۰/۰۳۷	۰/۵۴۹	۰-۵	
۳۸/۵۸	۰/۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۰۳۴	۰/۸۰۵	-۰/۱۸۰۷	۰/۶۲۴	۵-۱۰	
۳۳/۳۹	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۵۷۵	-۰/۳۷۵۹	۰/۲۹۹	۱۰-۲۰	
-۴/۰۷۶۶	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۳۵	-۰/۰۸۶	۰/۰۲۲۳	-۰/۰۶۴	۲۰-۳۰	
-۱۰/۶۲	۰/۰۳۶۵	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۰۱۲	-۰/۳۸۷۵	۰/۰۳۱۹	-۰/۳۵۵	۳۰-۴۰	
-۵/۶۶۷	۰/۰۸۸۵	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۰۰۷۷	-۰/۵۰۱۳	۰/۰۰۷۰۹	-۰/۴۹۴	۴۰ <	

پس از اینکه وزن هر یک از کلاس‌های پارامترهای در نظر گرفته شده به دست آمد، در محیط نرم افزار Arc map وزن مربوط به هر کلاس اعمال شد و با روی هم گذاری پارامترها نقشه نهایی برای حساسیت زمین لغزش به دست آمد. با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی^۱ نقشه به دست آمده در ۵ کلاس حساسیت وقوع زمین لغزش دسته بندی شد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴ نقشه پهنه بندی حساسیت وقوع زمین لغزش در حوضه رودخانه سیاهرود

۴. بحث و نتایج

با توجه به نقشه تهیه شده و اطلاعات جدول یک در لایه نوع سازند، کلاس B (تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط افکنه‌های مرتفع) بیشترین تأثیر و وزن را به خود اختصاص داده است. تناوب توف داسیتی-اندزیتی با میان لایه‌ای از ماسه سنگ و کنگلومرا در رده بعدی قرار دارد. همچنین سازندهای سنگ آهک و کنگلومرا در بین سایر لایه‌های سنگ شناسی کمترین وزن و اثر را در ایجاد زمین لغزش‌های منطقه داشته‌اند. در بین کلاس‌های مختلف کاربری زمین، مرتع متوسط با بیشترین وزن بیشترین تأثیر را در رخ داد زمین لغزش‌های منطقه داشته است که می‌تواند در رابطه با تمرکز فعالیت‌های انسانی و مراکز جمعیتی در این

1 Natural breaks

مناطق باشد. در بین جهت‌های مختلف شیب، جهات شمالی و شمال غربی بیشترین و جهات جنوبی و جنوب شرقی کم‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند. همچنین شیب‌های ۱۰-۵ و ۲۰-۱۰ به ترتیب بیشترین تأثیر و وزن را در وقوع زمین‌لغزش دارا می‌باشند. در لایه فاصله از رودخانه نیز کلاس ۰-۱۰۰ متر بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند.

برای اینکه بتوانیم مدل اجرا شده در منطقه را مورد ارزیابی قرار دهیم با استفاده از روش وزن شواهد و یک سوم زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه (۳۰ زمین‌لغزش) که در اجرای مدل استفاده نشده بودند، پراکنش فضایی لغزش‌ها در کلاس‌های پنج‌گانه نقشه حساسیت زمین‌لغزش مورد ارزیابی آماری قرار گرفت که نتایج آن در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مساحت کلاس‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و درصد زمین‌لغزه‌های رخ داده

کلاس حساسیت	مساحت هر کلاس به درصد	مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده به درصد
حساسیت خیلی کم	۱۵/۵	۱/۷
حساسیت کم	۲۶/۹	۵/۷
حساسیت متوسط	۲۸/۲	۹/۳
حساسیت زیاد	۱۸/۹	۲۴/۳
حساسیت خیلی زیاد	۱۰/۵	۵۹

با توجه به نتایج ارزیابی بیشترین مقدار زمین‌لغزش‌ها در کلاس پنج رخ داده است. طبق اطلاعات جدول با افزایش کلاس خطر تراکم زمین‌لغزش‌ها در آن کلاس افزایش می‌یابد؛ به طوری که کلاس با حساسیت خیلی زیاد حدود ۵۹ درصد زمین‌لغزش‌ها را در خود جای داده است. این در حالی است که مساحت این کلاس نسبت به کل منطقه مورد مطالعه تنها ۱۰/۵ درصد است. کلاس‌های با حساسیت خیلی کم، کم و حساسیت متوسط با اینکه حدود ۷۱ درصد مساحت منطقه را شامل می‌شوند، اما تنها بخش ناچیزی از زمین‌لغزش‌های رخ داده (۱۶/۷ درصد) در این کلاس‌ها واقع شده‌اند. این در حالی است که مابقی لغزش‌های رخ داده در منطقه، یعنی ۸۳/۳ درصد آن‌ها در کلاس‌های چهارم و پنجم نقشه پهنه‌بندی (پهنه با حساسیت زیاد و خیلی زیاد) واقع شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تئوری بیز و ۱۱ پارامتر در نظر گرفته شده عمل پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبریز سیاهرود انجام شد و نتیجه کار به صورت یک نقشه پهنه‌بندی شده در پنج کلاس حساسیت ارائه گردید. طبق نقشه پهنه‌بندی ۱۰/۵ درصد منطقه در کلاس با پهنه حساسیت خیلی زیاد، ۱۸/۹

درصد در کلاس با حساسیت زیاد، ۲۸/۲ درصد در کلاس با حساسیت متوسط، ۲۶/۹ درصد در کلاس با حساسیت کم و ۱۵/۵ درصد نیز در کلاس با حساسیت خیلی کم قرار گرفته‌اند. مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد به‌طور عمده در قسمت خروجی حوضه (غرب حوضه)، بخش مرکزی و جنوب شرقی آن واقع شده‌اند. بخش جنوب غربی حوضه بیشتر به‌صورت پهنه‌های با حساسیت کم و خیلی کم پهنه‌بندی شده است و تنها در مناطق حاشیه‌ای رودخانه‌ها می‌توان مناطقی با حساسیت زیاد مشاهده کرد. پس از به دست آمدن نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از یک سوم زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه، نقشه تهیه‌شده از نظر صحت و دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل مورداستفاده در پژوهش با قابلیت پیش‌بینی ۸۳/۳ درصد زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه در کلاس‌های چهارم و پنجم نقشه پهنه‌بندی توانایی مناسبی را برای انجام پهنه‌بندی زمین‌لغزش و پیش‌بینی آن دارد.

روی‌هم‌گذاری مراکز جمعیتی مهم منطقه مثل شهر توتکابن، گاوخسب و خاصه کول با نقشه نهایی (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که این مناطق عمدتاً در پهنه‌هایی با حساسیت زیاد و خیلی زیاد واقع شده‌اند و وقوع زمین‌لغزه گاوخسب در سال ۱۳۶۹ تأییدی بر این امر است و لازم است تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان محیطی در آینده توجه ویژه‌ای به این امر داشته باشند.

کتابنامه

- امیر احمدی، ابوالقاسم؛ کامرانی دلیر، حمید؛ صادقی، محسن؛ ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مطالعه موردی حوضه آبخیز چلاو آمل. فصلنامه علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، شماره ۲۷. صص ۲۰۳-۱۸۱.
- پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید؛ مصطفی‌زاده رئوف، گلی جیرنده؛ ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بی‌زین. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب‌وخاک. سال شانزدهم شماره شصت و دوم. صص ۱۲۱-۱۰۹.
- حسین‌زاده، محمد مهدی؛ ثروتی محمد رضا؛ منصوری عادل؛ میرباقری بابک؛ خضری سعید؛ ۱۳۸۸. پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک. فصلنامه زمین‌شناسی ایران. سال سوم شماره یازدهم. صفحات ۲۷-۳۷.
- قرهی، حمیدرضا. بهلولی، بهمن؛ سیار، امیر؛ شریعت جعفری، محسن؛ ۱۳۹۰. تهیه نقشه حساسیت پدیده زمین‌لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و مدل آماری دو متغیره در مخزن سد البرز. مجله علوم زمین، پاییز ۱۳۹۰ سال ۲۱ شماره ۸۱، صفحات ۹۳-۱۰۰.

نیازی، یعقوب؛ اختصاصی، محمدرضا؛ طالبی، علی؛ آرخی، صالح؛ مختاری، محمدحسین؛ ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی مدل آماری دومتغیره در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در حوضه سد ایلام. مجله علوم مهندسی آبخیزداری ایران. سال ۴ شماره ۱۰. صص ۲۰-۹.

یمانی، مجتبی؛ احمدآبادی، علی؛ زارع، غلامرضا؛ ۱۳۹۱. ارزیابی کارایی فنون هوش مصنوعی در مطالعات زمین‌لغزش با تأکید بر الگوریتم SVM (مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه). فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۱، شماره ۳.

- Amirahmadi, A.a.gh., kamranidalir, H., sadeghi, M., 2011. Landslide hazard zonation through hierarchical analysis method (ahp). Case Study: chelav basin. *Geography* 2. 182 - 203.
- Barbieri, G., Cambuli, P., 2009. The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy). In: Anderssen, R.S., Braddock, R.D., Newham, L.T.H. (Eds.), 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and NewZealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation. 2658–2664.
- BonhamCarter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F.P., Bonham-Carter. G.F. (Eds.). *Statistical applications in the Earth Sciences: Geological Survey of Canada* 89. 171–183.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 1585-1592.
- Denison, D.G.T., Holmes, C.C., Mallick, B.K., Smith, A.F.M., 2002. *Bayesian methods for nonlinear classification and regression*. John Wiley & Sons, Chichester, west Sussex.
- Gharahi h., bohlooli b., sayyar a., shariat jafari m., 2011. Landslide susceptibility mapping in the reservoir of alborz dam using analytical hierarchy process and bivariate statistics. *Geosciences* 81. 93 - 100.
- Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., 2008. Implementation of reconstructed geomorpholog icunitsin landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NWTurkey). *Natural Hazards* 46, 323–351.
- Grabs, T., Seibert, J., Laudon, H., 2007. Modelling spatial patterns of saturated areas: a comparison of the topographic wetness index and a distributed model. *Journal of Hydrology* 373. 15-23.
- Guzzetti, F., 2005. *Landslide hazard and risk assessment*. Ph. D Dissertation. Bonn.
- Hosenzadeh. M.m., servatie. M.r., mansurie. A., mirbagherie. B., khezrie. S., 2009. Zoning risk of mass movements using a logistic regression model. *Journal of Geology* 11. 27 - 37.
- Mathew, J., Jha, V.K., Rawat, G.S., 2007. Weights of evidence modeling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. *Current Science* 92, 628-638.

- Mohammadi, M., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison Between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models, *Journal of Asian Earth Sciences* 61, 221–236.
- Moore, I.D., Burch, G.J., 1986. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. *Water Resource* 22, 1350–1360.
- Neaupane K.M., Piantanakulchai, M. 2006: Analytic network process model for landslide hazard zonation, *Engineering Geology* 85, 281–294.
- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Duemaz, S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology* 94, 401–418.
- Niyazi. Y., ekhtesasie. M.r., talebi. A., saleh. a., mokhtarei. m.h., 2010. Assess the performance of the bivariate statistical model predicts landslide in Ilam dam basin. *Journal of Engineering Science Watershed* 10, 9 - 20.
- Piacentinia, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Strada, C., 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy), *Geomorphology* 151, 196–206.
- Poli, S., Sterlacchini, S., 2007. Landslide representation strategies in susceptibility Studies using weights-of-evidence modeling technique. *Natural Resources Research*, vol (16), 121–134.
- Pourghasemi. H. R., Moradi, h. R., Mohammadi, m., Mostafazadeh, r., Goli jirandeh. a., 2013. Landslide hazard zoning using bayesian theory. *Jwss - Isfahan University of technology* 62, 109-120.
- Sanwei, H., Peng, P., Lan, D., Haijun, W., Jiping, L., 2012. Application of kernel based Fisher discriminant analysis to map landslide Susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China, *Geomorphology* 171, 30–41.
- Schmidt, F., Persson, A., 2003. Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. *Precision Agriculture* vol (4), pp. 179–192.
- Sorensen, R., Zinko, U., Seibert, J., 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2, 1807–1834.
- Van Westen, C.J., 2002. Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping. *International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC)*, Enschede, the Netherlands.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000, *Digital terrain analysis*. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1–27.
- Yamani, M., Ahmadabadi, A., Zare, gh., 2012. The Zonation of landslide occurrence Using of Support Vector Machines algorithm (Case Study: Darakeh Basin), *Geography and Environmental Hazards* 3, 125 - 142.