فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال سی و دوم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۶، شماره پیاپی ۱۲۷

مجید ابراهیمی، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری **M. Ebrahimi**
دکتر ابوالقاسم امیر احمدی، دانشیار گروه ژئومورفولوژی و اقلیم‌شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری **Dr. A. Amirahmadi**
دکتر محمدعلی زنگنه اسدی، دانشیار گروه ژئومورفولوژی و اقلیم‌شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری **Dr. M.A. Zangeneh Asadi**
Majid_ebrahimi2@yahoo.com

مقایسه تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی در حوضه آبخیز سنگانه کلات

دریافت مقاله: ۹۶/۳/۱۸ پذیرش نهایی: ۹۶/۹/۱۷

DOI: 10.29252/geores.32.4.105

چکیده

فرسایش آبکندی پیشرفته‌ترین نوع فرسایش آبی است که با تولید حجم زیاد رسوب در حوضه‌های آبخیز خسارات زیادی ایجاد می‌کند. بنابراین تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی و شناسایی عوامل مؤثر بر آن می‌تواند به مدیران و تصمیم گیران کمک کند تا خطر وقوع این فرسایش را کاهش دهند. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی قابلیت‌های مدل‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی برای پیش‌بینی فضایی حساسیت به فرسایش آبکندی و تعیین اهمیت هر یک از عوامل محیطی مؤثر بر آن در حوضه آبخیز سنگانه کلات است. در ابتدا نقشه موقعیت آبکندهای موجود با استفاده از مطالعات میدانی گسترده تهیه گردید سپس نقشه‌های رستری متغیرهای مؤثر بر فرسایش آبکندی (سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، شیب، جهت شیب، شکل شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، تراکم زهکشی و ارتفاع) در قالب پایگاه داده و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ساخته شد. درمجموع از ۴۶ آبکند شناسایی‌شده، ۳۲ آبکند (۷۰٪) به‌صورت تصادفی برای ساخت مدل‌های حساسیت به فرسایش آبکندی و ۳۰ درصد باقی‌مانده (۱۴ آبکند) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. اثربخشی ارزیابی حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی بستگی به انتخاب مناسب از عوامل ایجاد آبکند، که نقش مهمی در فرسایش آبکندی بازی می‌کنند دارد. بنابراین در این پژوهش از الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری (LVQ) که یکی از روش‌های تحت نظارت می‌باشد؛ به‌منظور برآورد اهمیت متغیرها استفاده شد. درنهایت برای ارزیابی دقت مدل‌های مذکور، منحنی راک (ROC) به کار گرفته شد. تجزیه‌وتحلیل‌های حاصل از منحنی راک نشان می‌دهد که مدل نسبت فراوانی (۸۶/۳۲٪ =AUC) دقت بیشتری نسبت به مدل احتمالاتی وزن واقعه (۷۳/۴۹٪ =AUC) دارد. درنتیجه، عملکرد مدل نسبت فراوانی برای تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی بیشتر از نقشه تولیدشده توسط مدل احتمالاتی وزن واقعه است. علاوه بر این نتایج نشان داد که با توجه به الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری، عوامل مؤثر در پیش‌بینی حساسیت به فرسایش آبکندی شامل تراکم زهکشی، شیب، فاصله از رودخانه و شاخص رطوبت توپوگرافی هستند.

واژگان کلیدی: فرسایش آبکندی، مدل‌های آماری دومتغیره، الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری، حوضه آبخیز سنگانه کلات

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

مقدمه

فرسایش آبی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب اراضی در مناطق وسیعی از حوضه‌های آبخیز در نظر گرفته می‌شود (Boukheir et al, 2008:483, Conoscenti et al, 2014:402). در میان انواع فرسایش آبی، فرسایش آبکندی یکی از مهم‌ترین رخدادهای مؤثر در نابودی خاک و پسرفت اراضی می‌باشد که با تخریب افق‌های سطحی و زیرین خاک، موجب تولید رسوب در حجم زیاد و نابودی بستر تولید می‌شود (Poesen et al, 2002: 93, Chaplot, 2013: 3, Zakerinejad, Maerker, 2015). هدر رفت خاک در این نوع فرسایش چندین برابر بیشتر از فرسایش سطحی و شیاری است، که پیامد آن پر شدن مخازن سدها، منبعی برای آلوده کردن آب‌های سطحی، کاهش ظرفیت انتقال آبراهه‌ها، رودخانه‌ها و تخریب اراضی کشاورزی پائین‌دست آن‌ها می‌باشد (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۹۸). شناسایی و تهیه نقشه مناطق دارای خطر بالای فرسایش آبکندی، از اولین گام‌ها برای انجام عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک است. علاوه بر آن تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی و نقشه موقعیت مکانی رخساره‌های فرسایشی برای برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین بسیار مهم می‌باشد (ارخازلو و همکاران، ۱۳۹۵: ۲). اصلی‌ترین پیش‌نیاز مقابله با انواع فرسایش ازجمله فرسایش آبکندی، پیش‌بینی میزان خطر تشکیل آبکند در نقاط مختلف مناطق مستعد به این نوع فرسایش می‌باشد (Qilin et al, 2011: 263). پیشینه اقدامات انجام‌شده درباره مدل‌سازی فرسایش آبکندی نشان می‌دهد پژوهش‌های جدی درزمینه مدل‌سازی فرسایش شیاری و آبکندی از دهه ۱۹۷۰ در جهان آغازشده و بیشتر مدل‌های ارائه‌شده نیز از نوع استوکاستیک[1] و محدود به مناطق تحت تأثیر فرسایش هزاردره[2] بوده‌اند (Scheidegger, 2012). در زمینه موضوع این پژوهش، مطالعاتی صورت گرفته است که در اینجا به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

صابر چناری و همکاران (۱۳۹۵)، به پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی با استفاده از مدل دمپستر– شفر در حوضه آبخیز قره ناوه در استان گلستان پرداختند. نتایج طبقه‌بندی مدل نشان داد از کل پهنه‌های آبکندی در نظر گرفته‌شده برای مرحله اعتبارسنجی مدل در حوضه آبخیز قرناوه، ۶۸/۰۶ درصد در طبقه خطر زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند. مدل‌سازی حساسیت به فرسایش آبکندی در جنوب شرق مازندران به‌وسیله مدل‌های رگرسیونی توسط فرجه‌دار و همکارانش (۱۳۹۲)، نشان داد چهار متغیر کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، خاک‌شناسی و فاکتور رطوبت توپوگرافی بیشترین همبستگی را با حساسیت به فرسایش آبکندی داشته است. شهریور و همکاران (۱۳۹۶)، به ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز آبگندی در استان کهگیلویه و بویراحمد پرداختند. نقشه پهنه‌بندی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل شاخص همپوشانی و عملگرهای جمع جبری فازی، ضرب جبری فازی و گامای فازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و با در نظر گرفتن مساحت پهنه‌های مختلف و میزان آبکندهای رخ‌داده در هریک از آن‌ها، مدل گامای فازی ۰/۸ به‌عنوان مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی فرسایش آبکندی در حوضه موردمطالعه انتخاب گردید. بیاتی خطیبی و کرمی (۱۳۹۵)، به برآورد میزان فرسایش آبی و خاک تلف‌شده از یک آبکند در سطح حوضه آتش بیگ پرداختند. در ابتدا با استفاده از ضریب هیدروترمال (HTK[3]) استعداد منطقه برای ایجاد آبکندها بررسی و سپس با استفاده از روابط متناسب، ویژگی‌های رواناب‌ها ازنظر زمان جابجایی به‌صورت کمی بررسی شد و میزان رسوب حاصل از یک آبکند مجزا برآورد گردید. نتایج حاصل از به‌کارگیری ضریب هیدروترمال نشان داد که در حدود پنج ماه از سال سطح حوضه موردمطالعه ازنظر پارامترهای اقلیمی برای ایجاد آبکندهای عمیق مساعد می‌باشد.

نتایج بررسی آچتن[4] و همکاران (۲۰۰۸) با عنوان توزیع فضایی و آستانه‌های توپوگرافی فرسایش آبکندی در جنوب غرب تانزانیا نشان داد آبکندها در همه واحدهای چشم‌انداز پراکنده‌اند و وجود جاده‌ها بر وقوع آبکندها تأثیر زیادی داشتند. کاناسنتی

1 Stochastic
2 Badland Erosion
3 Hydro-Thermal Coefficient
4 Achten

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

و همکاران [۱] (۲۰۱۴)، از مدل رگرسیون لجستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی، به‌منظور تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی استفاده کردند. برای این منظور پس از تهیه نقشه پراکنش آبکندها در منطقه سیسیل (ایتالیا)، اثر عوامل مختلف لیتولوژیکی، توپوگرافی و ادافیکی مؤثر بر فرسایش آبکندی با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک بررسی شد. نتایج پژوهش مارزولف و پوزن [۲] (۲۰۰۹) درزمینه شناسایی مناطق مستعد فرسایش آبکندی در اسپانیا نشان داد مناطق نیمه‌خشک و خشک و خاک‌هایی با بافت سبک و لسی و سازند ضعیف سبب شده است که منطقه بیشتر در معرض تهدید فرسایش آبکندی قرار گیرد. ذاکر نژاد و مارکر [۳] (۲۰۱۵)، کارایی مدل بیشترین بی‌نظمی و روش آنالیز زمینه را برای پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی در منطقه مزایجان، غرب ایران بررسی کردند. نتایج نشان داد که به‌کارگیری این روش‌ها دقت مناسبی در پیش‌بینی مکانی وقوع فرسایش آبکندی دارد. دوب [۴] و همکاران (۲۰۱۴)، در پژوهش خود کاربرد مدل احتمالاتی وزن واقعه را در پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی در زیمبابوه ارزیابی کردند. آن‌ها پیشنهاد دادند که کاربری اراضی، نوع خاک، فاصله از رودخانه، شاخص قدرت رودخانه و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI [۵]) برای تولید نقشه پهنه‌بندی مفید هستند، اما ممکن است برای ایجاد نقشه قابل‌قبول کافی نباشند.

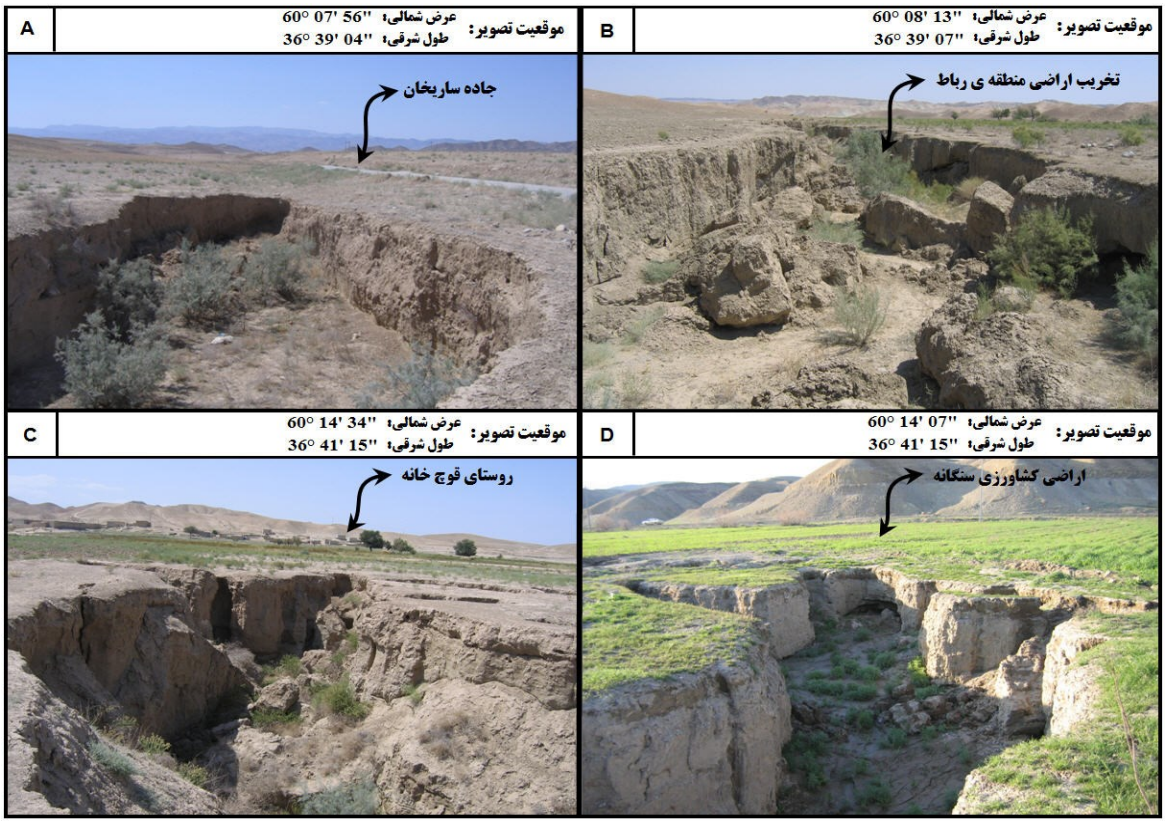
تحلیل و بررسی متغیرها از طریق الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری (LVQ [۶])؛ تجزیه‌وتحلیل شرایط جغرافیایی زیست‌محیطی که سبب ایجاد وقوع آبکندها می‌شود؛ ارزیابی توانایی مدل‌های احتمالاتی وزن واقعه (WofE [۷]) و نسبت فراوانی (FR [۸]) برای پیش‌بینی حساسیت به فرسایش آبکندی، از اهداف اصلی این پژوهش است. به‌منظور دستیابی به این اهداف، حوضه آبخیز سنگانه کلات به‌عنوان یک منطقه مستعد ابتلا به فرسایش آبکندی انتخاب گردید. دلیل این انتخاب غالب بودن فرسایش آبکندی و شاخص بودن آبکندها و ایجاد مشکل در زیر بخش‌های کشاورزی، مسکونی و تخریب اراضی است. در شکل ۱، چهار عکس از آبکندهای شناسایی‌شده در منطقه موردمطالعه نشان داده‌شده است.

مدل نسبت فراوانی و مدل احتمالاتی وزن واقعه به‌عنوان مدل‌های آماری دومتغیره [۹] برای سنجش حساسیت به فرسایش آبکندی به این دلایل انتخاب شدند که مدل‌های ذکرشده می‌توانند با انواع مختلف متغیرهای مستقل مانند دودویی مطلق، ترتیبی و پیوسته به کار روند و مطالعات اندکی از تحلیل و بررسی‌های روش‌های آماری دومتغیره برای محاسبه حساسیت به فرسایش آبکندی مورد آزمایش قرارگرفته است (Dube et al, 2014). علاوه بر این تولید نقشه‌های حساسیت به فرسایش آبکندی می‌تواند در مدیریت استفاده از زمین به تصمیم گیران و مدیران برای شناسایی مناطق مستعد، برای برنامه‌ریزی آینده (به‌عنوان‌مثال: توسعه جاده‌ها و شهرنشینی) مفید باشد.

1 Conoscenti
2 Marzolff and Poesen
3 Zakerinejad and Märker
4 Dube
5 Topographic wetness index
6 Learning Vector Quantization
7 Weight of Evidence
8 Frequency ratio model
9 bivariate statistical analysis

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]



شکل ۱- تصاویری از آبکندهایی که در منطقه موردمطالعه رخ‌داده است؛ آبکندها برای زیرساخت‌های انسانی (آنتروپوژنیک) **مانند جاده‌ها و ساختمان‌ها (A-C) و زمین‌های کشاورزی (D) خطرناک هستند.**

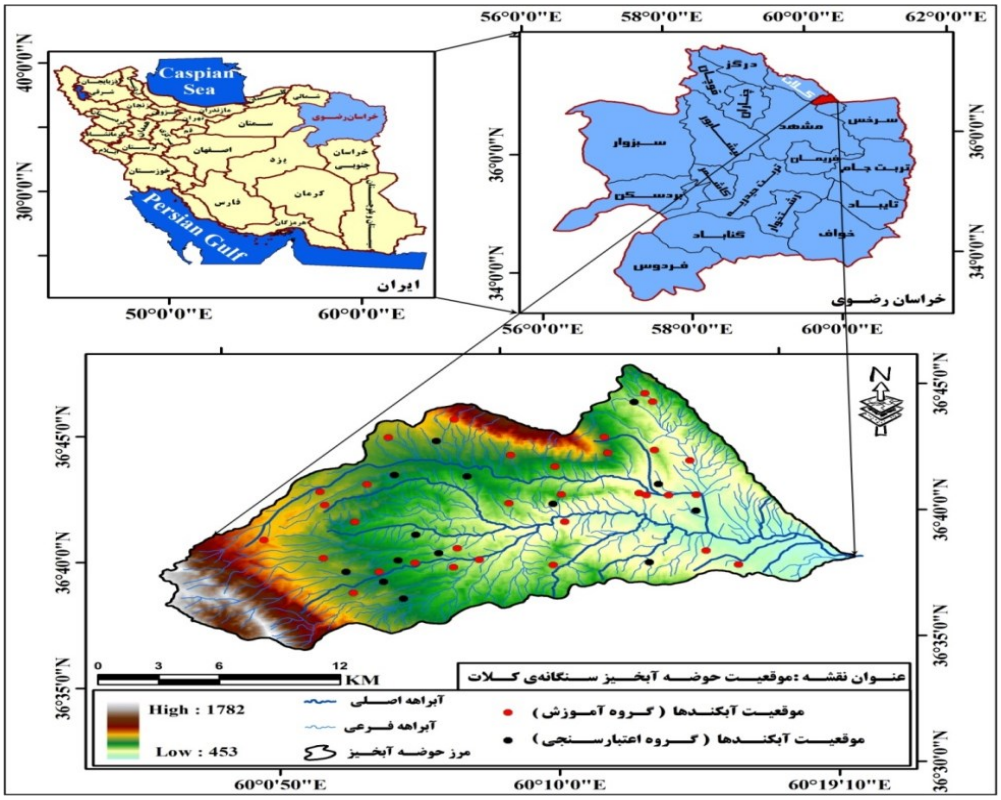
منطقه موردمطالعه

به لحاظ موقعیت جغرافیایی این حوضه در ″۵۶ ′۵۷ °۵۹ تا ″۵۷ ′۲۰ °۶۰ طول شرقی و ″۱۴ ′۲۷ °۳۵ تا ″۲۷ ′۴۷ °۳۶ عرض شمالی قرار دارد و مساحت این حوضه ۳۶۳/۸۰ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۲).حوضه آبخیز سنگانه در ۱۲۰ کیلومتری شمال شرق مشهد و در نوار مرزی ایران و ترکمنستان قرار داشته و در حوضه آبخیز قره‌قوم واقع‌شده است. متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا ۸۳۳ متر و میانگین دمای سالانه آن برابر ۱۵ درجه سانتی گراد و ضریب دومارتن آن برابر ۱۰/۲ است که با متوسط بارندگی سالانه ۲۵۷ میلی‌متر در اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار می گیرد (بشری و همکاران،۱۳۹۱: ۱۳۵). خاک‌های منطقه در گروه خاک‌های فلات‌ها بوده و در رده آنتی‌سول[1] و اریدی‌سول[2] قرار دارد (رنگ آور، ۱۳۸۶) بافت خاک سطحی نیز لومی- شنی می‌باشد (صادقی و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۳۲). محدوده موردمطالعه ازنظر تقسیمات زمین‌شناسی جزو پهنه ساختاری رسوبی کپه داغ در شمال شرق ایران می‌باشد. سازندهای رخنمون یافته در گستره موردمطالعه در شکل (۴a) قابل‌مشاهده است.

1 Entisols
2Aridisols

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سنگانه کلات

مواد و روش‌ها

رویکرد روش مورداستفاده در پژوهش حاضر، تجزیه‌وتحلیل روش‌های آماری دومتغیره می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، مراحل کار شامل ۶ مرحله اصلی به شرح زیر است:

۱- تهیه نقشه از آبکندهای موجود؛

۲- آماده‌سازی نقشه‌های عوامل مؤثر در فرسایش آبکندی؛

۳- تجزیه‌وتحلیل اهمیت عوامل مؤثر در ایجاد آبکندها؛

۴- استفاده از مدل‌های آماری دومتغیره شامل مدل‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فروانی؛

۵- تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی (GESM[1])؛

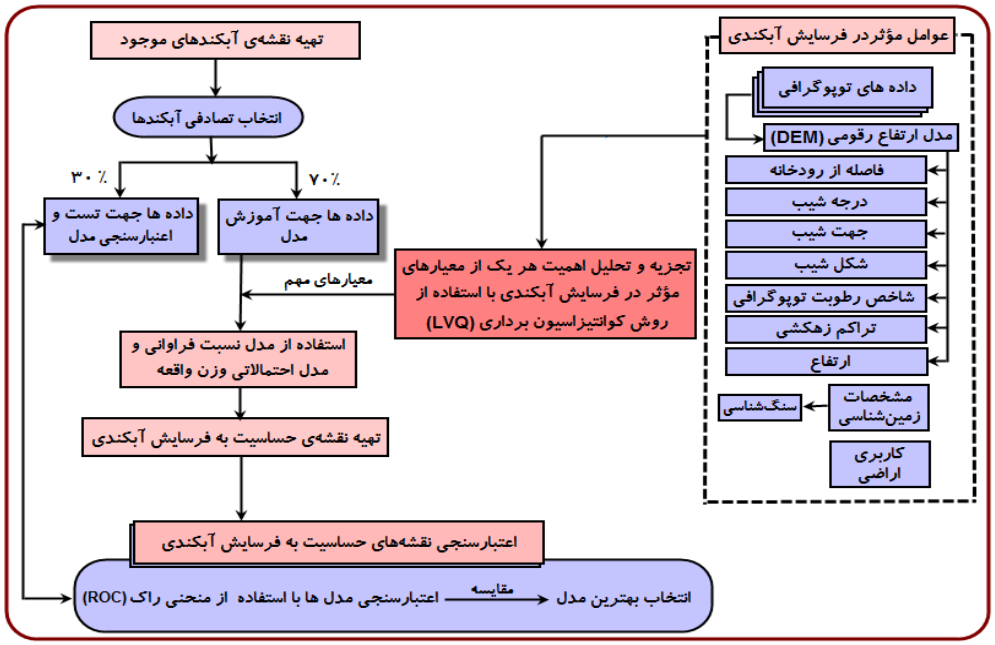
۶- اعتبارسنجی نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی؛

این مراحل در ادامه توضیح داده‌شده است.

1 Gully Erosion Susceptibility Maps

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]



شکل ۳- نمودار گردشی جهت تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی

تهیه نقشه آبکندهای موجود

برای تهیه نقشه فرسایش آبکندی دقیق و قابل‌اعتماد، بررسی‌های میدانی گسترده در منطقه موردمطالعه انجام گرفت و موقعیت مکانی هر آبکند با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی[1] (GPS) گارمین مدل (Garmin 76CSX) ثبت شد و نقشه پراکنش آبکندها در منطقه موردمطالعه به‌دست‌آمده آمد. در مرحله دوم فرمت پولیگونی آبکندها به نقاط آبکندی تبدیل و در ساخت مدل حساسیت به فرسایش آبکندی مورداستفاده قرار گرفت. از میان نقاط ثبت‌شده ۷۰ درصد (۳۲ واقعه آبکند) به‌عنوان آبکندهای گروه آموزش و ۳۰ درصد باقی‌مانده (۱۴ واقعه آبکند) به‌عنوان گروه اعتبارسنجی به‌طور تصادفی انتخاب شدند. موقعیت آبکندهای آموزشی و اعتبارسنجی در شکل۲ نشان داده‌شده است.

عوامل مؤثر در ایجاد آبکندها

فرآیند فرسایش آبکندی به‌وسیله عمل فرسایندگی[2] باران و عامل فرسایش‌پذیری خاک کنترل[3] می‌شود و باید توسط مجموعه‌ای از ویژگی‌های جغرافیایی زیست‌محیطی[4] در نظر گرفته شود (Agnesi et al, 2011:17). این فاکتورها برای تعیین عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش آبکندی ضروری می‌باشد (Conoscenti et al, 2008: 293, De Vente et al, 2009:1997). بنابراین در مرحله ابتدایی پایگاه داده‌های مکانی مربوط به فرسایش آماده گردید و با توجه به پژوهش‌های قبلی محققان مختلف درزمینه موردنظر و میزان در دسترس بودن داده‌ها، عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندها شناسایی گردید (Kuhnert et al, 2010, Conforti et al, 2010, Luca et al, 2011, Marker et al, 2011, Svoray et al, 2012, Conoscenti et al, 2014, Zakerinejad and Maerker, 2015). بنابراین ۹ عامل برای آماده‌سازی تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی[5] انتخاب گردید. این عوامل عبارت‌اند از: سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، شیب، جهت شیب، شکل شیب[6]، شاخص رطوبت توپوگرافی

1 Global Positioning System
2 Erosivity
3 Erodibility of soil
4 Geo-environmental
5 GESM
6 Plan curvature

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

(TWI)، تراکم زهکشی و ارتفاع (شکل ۴a-i). خطوط توپوگرافی و نقاط پایه از نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ به شماره‌های (8063III, 7963II, 8063II, 8063IV) و لایه‌های رقومی ۱:۲۵۰۰۰ توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور استخراج گردید. با توجه به اینکه یکی از عوامل مهم در تهیه مدل ارتفاع رقومی[1]، انتخاب اندازه سلول مناسب است و در عمل عمده‌ترین روش تهیه مدل ارتفاع رقومی بر اساس به‌کارگیری توابع درون‌یابی[2] موجود در سیستم اطلاعات جغرافیایی[3] بر روی بر روی نقشه‌های برداری اعمال می‌شود، لیکن مدل ارتفاع رقومی با توجه به فاصله خطوط تراز ارتفاعی و میزان پستی‌وبلندی در حوضه آبخیز سنگانه‌کلات با اندازه شبکه[4] ۲۰×۲۰ متر ساخته شد. با استفاده از مدل ارتفاع رقومی نقشه‌های درجه شیب، جهت شیب، تراکم زهکشی و شکل شیب ایجاد گردید. گفتنی است که به‌منظور به هنجار سازی تفاوت دقت مقیاس نقشه‌های عامل اولیه، لایه‌های اطلاعاتی پس از رقومی شدن، با استفاده از نرم‌افزارArc GIS به لایه‌های رستری با اندازه پیکسلی ۲۰×۲۰ متر (برای دقت بیشتر) برای استفاده در مدل احتمالاتی وزن واقعه[5] و مدل نسبت فراوانی تبدیل شدند. علاوه بر این، از روش طبقه‌بندی چارک[6] برای طبقه‌بندی هر یک از عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی استفاده گردید. در این روش طبقه‌بندی هر یک از کلاس‌ها در تعدادی از شبکه‌های مشابه به خود قرار می‌گیرد. این روش طبقه‌بندی در مطالعات متعددی به دلیل کارایی آن در طبقه‌بندی اعمال‌شده است (Tehrany et al, 2014b, Umar et al, 2014, Youssef et al, 2015). در این بخش هر یک از عوامل مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی تشریح شده است و نقشه‌های مربوطه ترسیم گردید.

سنگ‌شناسی: عامل سنگ‌شناسی به‌عنوان یک متغیر مهم در تجزیه‌وتحلیل مخاطرات محیطی شناخته می‌شود (Pourghasemi and Kerle, 2016). ویژگی‌های سنگ‌شناسی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و خصوصیات سطح زمین در ارتباط است (Dai et al, 2001: 385, Zinck et al, 2001: 42, Gorum et al, 2008, Zhu et al, 2014). علاوه بر این، فرسایش آبکندی به‌شدت به ویژگی‌های سنگ‌شناسی و مواد سطح زمین وابسته است (Casali et al, 1999:67, Stotle et al, 2003:119, Golestani et al, 2014:73). لایه رقومی لیتولوژی در منطقه موردمطالعه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی به شماره‌های (NJ41-13 (سرخس)، NJ41-16 (مشهد) در محیط ArcGIS 9.3 رقومی گردید. سازندهای رخنمون یافته منطقه موردمطالعه در شکل (۴a) نشان داده‌شده است.

کاربری اراضی: مدیریت استفاده از زمین تأثیر قابل‌توجهی بر روی پایداری شیب ژئومورفولوژی و وقوع آبکندها دارد (امیر احمدی و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۵۱، Anabalagan, 1992:272, Zucca et al, 2006:90). به‌طورکلی زمین‌های بایر و مناطقی با پوشش گیاهی کم بیشتر تحت تأثیر به فرسایش بوده و پوشش گیاهی به‌شدت عمل فرسایش و رواناب سطحی را کاهش می‌دهد (Dai et al, 2001:386, Cevik,Topal, 2003:496, Gomez et al, 2009:1897). به‌عبارت‌دیگر یک همبستگی منفی بین میزان فرسایش و تراکم پوشش گیاهی وجود دارد (Snelder, Bryan, 1995:109, Hughes et al, 2001, Chaplott al, 2005:321). برای تهیه نقشه کاربری اراضی از لایه رقومی سطح پوششی کشور که توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (۱۳۸۹)، تهیه‌شده است، استفاده گردید. انواع کاربری‌های اراضی در منطقه موردمطالعه در شکل (۴b) نشان داده‌شده است. به‌طورکلی کاربری اراضی رایج در منطقه موردمطالعه مرتع نیمه متراکم می‌باشد. که ۱۹۲/۵۲ کیلومترمربع، معادل ۵۲/۹۰ درصد از مساحت کل حوضه را در برمی‌گیرد.

1 DEM
2 Interpolation
3 GIS
4 Grid size
5 Weights-of-evidence model
6 Quantile

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

فاصله از رودخانه: در اغلب موارد آبکندها به شبکه جریان زهکشی مرتبط هستند که باعث سهیل تخلیه مواد فرسایش یافته از مناطق بالادست می‌شوند (Conoscenti et al, 2014:407). به‌منظور بررسی تأثیر شبکه زهکشی، عامل فاصله از رودخانه در نظر گرفته شد (Choi et al, 2008: 256, Dube et al, 2014:149, Zakerinejad, Maerker, 2015). بنابراین، عملیات محاسبه فاصله از رودخانه در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 انجام و طبقه‌بندی آن به چهار دسته بر اساس طبقه‌بندی چارک مطابق شکل (۴c) اعمال شد.

شیب: مناطقی با شیب ملایم پتانسیل زیادی برای تجمع جریان سطحی و در معرض قرار گرفتن جهت شروع فرسایش آبکندی دارند (Dramis, Gentili, 1977:155, Valentin et al, 2005:137, Rahmati et al, 2015, Ghorbani Nejad et al, 2016). در مطالعاتی، تشکیل آبکندها در حوضه‌هایی که درشیب ملایم قرار دارند تأییدشده است (Flugel et al, 2003:931, Chaplot et al, 2005, Kakembo et al, 2009:189, Le Roux,Sumner, 2012:446). برای تهیّه نقشه شیب از نقشه‌های رقومی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده گردید (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۷۲). برای این منظور نقشه‌های توپوگرافی رقومی شده در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 به مدل ارتفاع رقومی تبدیل‌شده و سپس نقشه شیب از مدل ارتفاع رقومی (DEM) محاسبه و استخراج‌شده است (شکل 4d).

جهت شیب: جهت شیب نیز به‌عنوان یک عامل بسیار مهم در تجزیه‌وتحلیل مخاطرات محیطی و تهیه نقشه‌های حساسیت در نظر گرفته می‌شود (Maharaj, 1993:56, Baeza,Corominas, 2001:1257, Umar et al, 2014:127). جهت شیب به‌طور غیرمستقیم می‌تواند فرآیندهای فرسایش را از طریق عرضه نور خورشید[1]، تبخیر و تعرق، نگهداری رطوبت، نوع پوشش گیاهی و توزیع پوشش گیاهی تحت تأثیر قرار دهد (Dai et al, 2001:386, Agnesi et al, 2011:19, Wang et al, 2011:95). نقشه جهت شیب در منطقه موردمطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 با استفاده از مدل ارتفاع رقومی (DEM) با اندازه شبکه سلولی[2] ۲۰×۲۰ متر در ۹ کلاس مطابق شکل (۴e) ساخته شد.

شکل شیب: اطلاعات مفید ژئومورفولوژی و توضیحات مورفولوژی زمین را می‌توان از طریق تجزیه‌وتحلیل شکل شیب تعیین کرد (Chaplot, 2013:7, Tehrany et al, 2014:336). به‌طورکلی، تأثیر شکل شیب‌بر وقوع فرسایش آبکندی از طریق واگرایی[3] یا همگرایی[4] آب در سراشیبی جریان است (Agnesi et al, 2011:20, Conforti et al, 2010:885, Conoscenti et al, 2013:408, Gomez-Gutierrez et al, 2015). بنابراین، عامل شکل شیب با توجه به اثر آن بر تحریک و توسعه آبکندها انتخاب شد. تحدب و تقعر یک سطح با استفاده از فواصل بین خطوط توپوگرافی متوالی در سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین می‌شود. به‌طورکلی انحنای زمین بین مقادیر مثبت (محدب) و منفی (مقعر) در نوسان است (ملکی و همکاران،۱۳۹۱: ۳۲). جهت تولید شکل شیب از مدل ارتفاع رقومی با اندازه سلول ۱۰ متر استفاده‌شده است و شکل شیب منطقه موردمطالعه مطابق شکل (۴f) در ۳ طبقه محدب (انحنای شیب افقی زمین)، مقعر (انحنای شیب عمودی زمین) و صاف (بدون شیب) ترسیم گردید.

شاخص رطوبت توپوگرافی[5] :شاخص رطوبت توپوگرافی به‌عنوان یک عامل مهم در ارزیابی پتانسیل فرسایش آبکندی شناخته‌شده است. فرسایش آبکندی زمانی رخ می‌دهد که سرعت جریان بیشتر از تنش برشی خاک[6] باشد و عمدتاً تابعی از پارامتر S می‌باشد که به سطح انرژی روناب سطحی مربوط است (Vandaele et al, 1996:164, Chaplot, 2013:325). قدرت فرسایش رواناب ازنظر سرعت جریان، پتانسیل تخلیه و ظرفیت حمل رسوب از طریق شاخص رطوبت توپوگرافی مدل‌سازی شد، که با توجه به رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

1 Sunlight exposition
2 Grid size
3 Divergence
4 Convergence
5 TWI
6 Soil shear stress

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

$$TWI = \ln\left(\frac{S}{\tan\alpha}\right) \quad (۱)$$

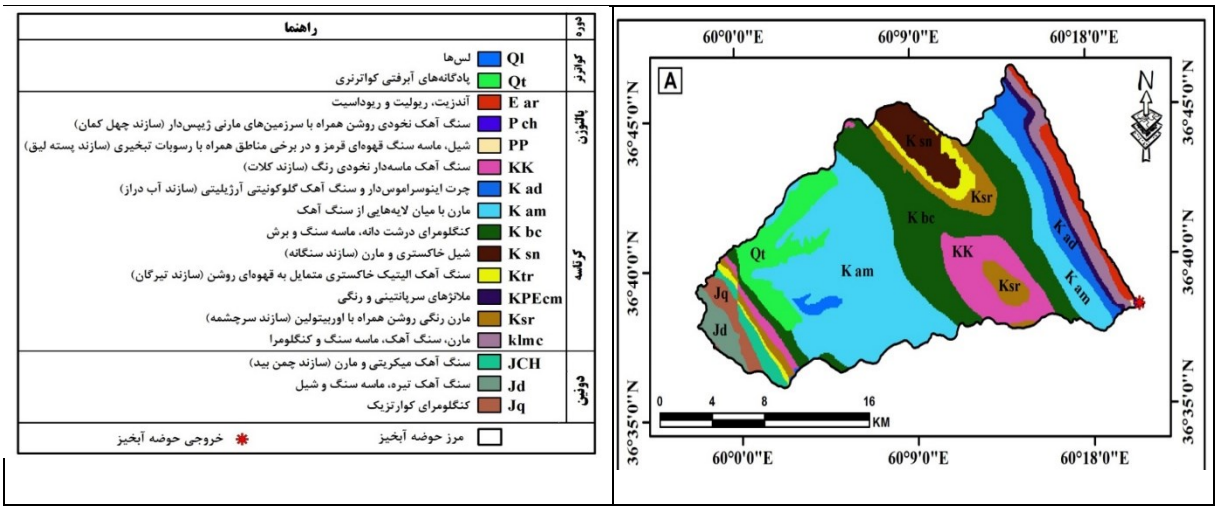
که در این رابطه؛ s: سطح ویژه حوضه آبخیز (به‌صورت مساحت اراضی بالادست عرض کنتور، تقسیم‌بر عرض کنتور تعریف می‌گردد) و α: شیب زمین (برحسب درجه) می‌باشد. برای تهیه این نقشه از نرم‌افزار سیستم تجزیه‌وتحلیل‌های خودکار زمین‌شناسی (SAGA GIS 2[1]) استفاده شد از طریق طبقه‌بندی چارک به ۴ کلاس تقسیم شد (شکل ۴g).

تراکم زهکشی: بر اساس مطالعات تهرانی و همکاران (۲۰۱۴b)، تراکم زهکشی بالا باعث می‌شود نسبت رواناب سطحی بزرگ‌تر شود و الگوی زهکشی را در یک منطقه که به عوامل متعددی مانند ماهیت و ساختار شکل‌گیری زمین‌شناسی، ویژگی‌های خاک، شرایط پوشش گیاهی، سرعت نفوذ و درجه شیب بستگی دارد، تحت تأثیر قرار دهد (Manap et al, 2014:715, Pourtaghi, Pourghasemi, 2014:649). برای محاسبه تراکم زهکشی از رابطه (۲) استفاده شد:

$$D = \frac{\sum L}{A} \quad (۲)$$

که در این رابطه؛ D: تراکم زهکشی (km/km^2)، $\sum L$: طول آبراهه‌ها به کیلومتر و A: مساحت حوضه آبخیز به کیلومترمربع می‌باشد. به‌منظور تهیه نقشه تراکم زهکشی در منطقه موردمطالعه، از ابزار خط فرمان تراکم در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 استفاده شد و ارزش آن در ۴ کلاس مطابق شکل (۴h) طبقه‌بندی گردید.

سطوح ارتفاعی: ویژگی‌های توپوگرافی (مانند ارتفاع و زاویه شیب) به‌طور عمده فرسایش آبکندی را کنترل و درنتیجه در تعیین توزیع فضایی آبکندها تأثیر دارند (Hongchun et al, 2014:333, Gomez-Gutierrez et al, 2015:295). علاوه بر این، ارتفاع نقش مهمی در نوع پوشش گیاهی و خصوصیات بارش ایفا می‌کند. این عامل، جهت آبراهه‌ها و میزان تراکم زهکشی را کنترل می‌کند و در میزان رطوبت خاک و میزان شیب دامنه‌ها تأثیر قابل‌توجهی دارد (حسین زاده و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۹). به‌منظور بیان ارتباط بین عامل ارتفاع و فرسایش آبکندی رخ‌داده، نقشه مدل ارتفاع رقومی منطقه در پنج کلاس مطابق شکل (۴i) تهیه گردید.

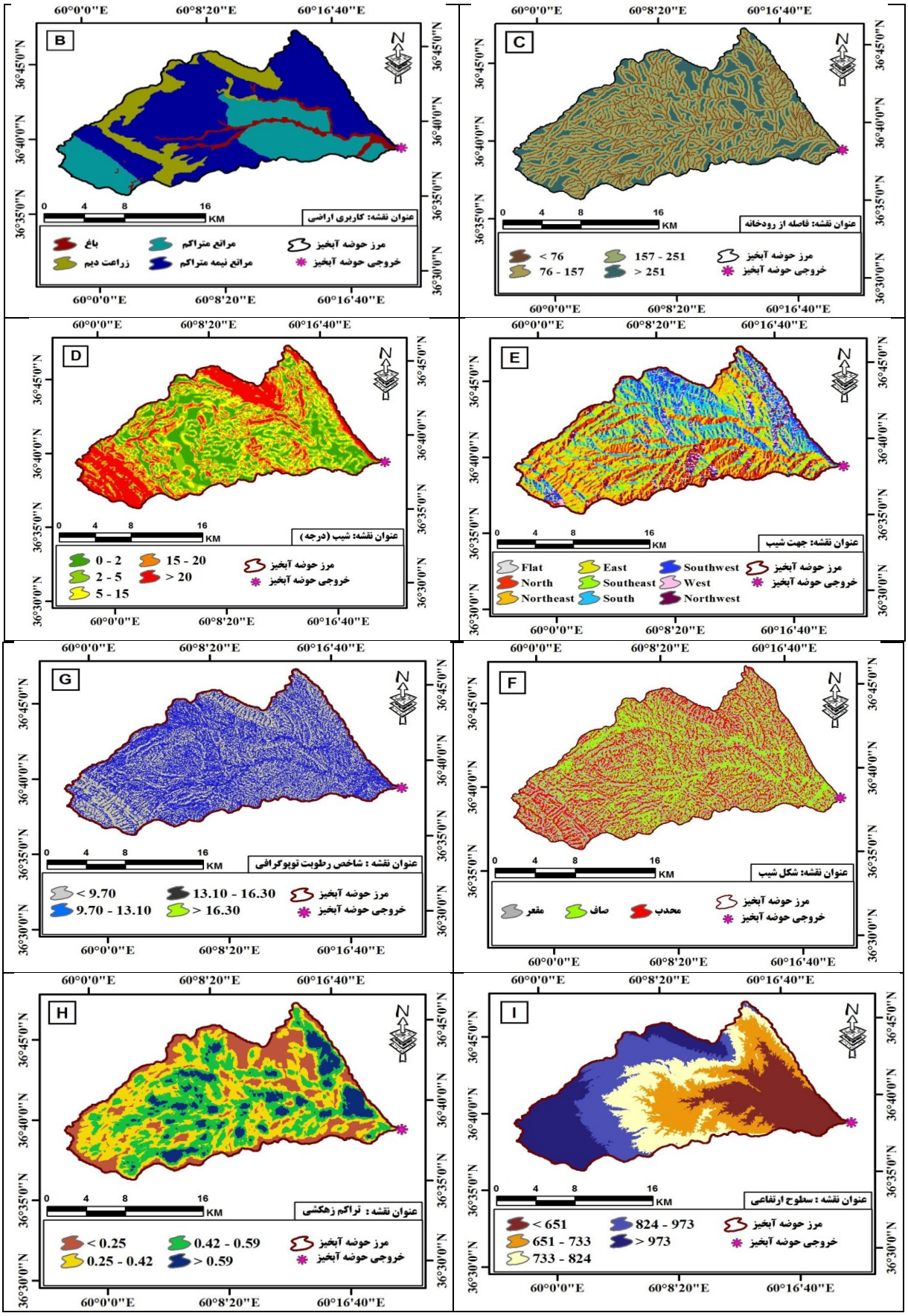


شکل ٤- عوامل ایجاد آبکندها: A: لیتولوژی، B: کاربری اراضی، C: فاصله از رودخانه، D: شیب، E: جهت شیب، G: شاخص رطوبت توپوگرافی، F: شکل شیب و H: تراکم زهکشی

1 System for Automated Geoscientific Analyses

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]



ادامه شکل ٤

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

تجزیه‌وتحلیل اهمیت عوامل مؤثر در ایجاد آبکندها

الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری[1] یکی از انواع شبکه‌های عصبی با الگوی یادگیری نظارت‌شده[2] است که برای اولین بار توسط کوهن[3] ارائه‌شده است (Kohonen et al, 1996). که به‌عنوان یک روش با رویکرد یادگیری الگو[4] به کار گرفته که درواقع فاصله اقلیدسی[5] را به‌عنوان یک قانون اساسی رقابت در نظر می‌گیرد. فاصله (D_i)، بین بردار آموزش X و بردار مرجع Z_i از نورون[6] i برابر است با:

$$D_i = Z_i - X = \sqrt{\sum (z_{ij} - x_j)^2} \quad (۳)$$

که در این فرمول؛ X_i و Z_i به ترتیب عناصر jth و x و Z_i می‌باشند. معادله یادگیری برای به‌روز کردن Z_i و درنتیجه برای تجزیه‌وتحلیل اهمیت هر یک از متغیرها به شرح زیر است. اگر نورون در طبقه اشتباه قرار گیرد:

$$Z_i(t+1) = Z_i(t) - \lambda(t)\, h_i(t)(X(t) - Z_i(t)) \quad (۴)$$

اگر نورون در طبقه اشتباه باشد، بنابراین:

$$Z_i(t+1) = Z_i(t) + \lambda(t)\, h_i(t)(X(t) - Z_i(t)) \quad (۵)$$

که در آن؛

$$hi(t) = \begin{cases} 1, & \text{اگر نورون } i \text{ ام یک برنده باشد؛} \\ 0, & \text{در غیر اینصورت؛} \end{cases} \quad (۶)$$

که دلالت بر درجه تحریک نورون‌ها دارد. $\lambda(t)$ نرخ یادگیری در زمان t است. جزئیات الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری را می‌توان در مطالعات آهلت[7] و همکاران (۱۹۹۰) و کوهن[8] و همکاران (۱۹۹۶) یافت (Ahalt et al,1990, Kohonen et al, 1996). این الگوریتم با موفقیت در بسیاری از مطالعات مختلف مانند پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش (پاول[9] و همکاران، ۲۰۰۸؛ پاول و همکاران، ۲۰۱۱)؛ تهیه نقشه پتانسیل معدنی (طیبی و تنگستانی، ۲۰۱۵)؛ طبقه‌بندی نوع سنگ‌ها (پاتل و کاترجی[10]، ۲۰۱۶)؛ طبقه‌بندی نوع پوشش گیاهی (فیلیپ و جنسن[11]، ۲۰۰۶) و اخیراً توسط نقیبی و همکاران (۲۰۱۶)، که از این الگوریتم جهت تعیین مهم‌ترین متغیر و تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی استفاده‌شده است. در این پژوهش، سهم نسبی متغیرهای مستقل به وقوع آبکند (به‌عنوان متغیر وابسته) از طریق الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری دربسته نرم‌افزار آماری R[12] موردبررسی قرار گرفت.

مدل‌های آماری دومتغیره

مدل نسبت فراوانی

در میان چندین روش آماری دومتغیره برای تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی، مدل نسبت فروانی (FR) در این پژوهش به کار گرفته شد. درواقع مدل نسبت فراوانی یک ابزار ساده ارزیابی مکانی برای شناسایی روابط احتمالاتی بین متغیرهای

1 LVQ
2 Supervised
3 Kohonen
4 winner-take-all
5 Euclidean
6 Neurons
7 Ahalt
8 Kohonen
9 Pavel
10 Patel and Chatterjee
11 Filippi and Jensen
12 R Statistical Software

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

مستقل و وابسته می‌باشد (Bonham-Carter,1994, Tehrany et al, 2013). در این پژوهش عوامل ایجاد آبکند (سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، شیب، جهت شیب، شکل شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی [1]، تراکم زهکشی و ارتفاع) به‌عنوان متغیر مستقل و موقعیت آبکندها به‌عنوان متغیر وابسته به کار گرفته شدند. نسبت فراوانی (FR) می‌تواند به‌عنوان نسبت مساحتی که در آن آبکند در کل منطقه رخ‌داده است، تعریف شود (Conforti et al, 2010). در این مدل برای هر یک از عوامل ایجاد آبکند، تراکم آن از مجموعه داده‌های آموزشی در هر کلاس، با استفاده از معادله شماره (۷) محاسبه گردید.

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \qquad (۷)$$

که در این فرمول؛ A: تعداد پیکسل فرسایش آبکندی برای هر یک از عوامل مؤثر در ایجاد آبکندها؛ B: تعداد کل آبکندهای اتفاق افتاده در منطقه موردمطالعه؛ C: تعداد پیکسل در هر یک از کلاس‌های طبقاتی و D: تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه موردمطالعه می‌باشد. با استفاده از مدل عملیاتی نسبت فراوانی، روابط مکانی بین نقاط آبکندی و هر یک از عوامل وقوع فرسایش آبکندی استخراج شد. سپس مقدار نسبت فرکانس هر یک از کلاس‌ها از طریق تجزیه‌وتحلیل رابطه بین موقعیت آبکندها و عوامل مؤثر در ایجاد آن‌ها محاسبه گردید. در یک پیکسل داده، می‌توان با جمع‌بندی مقادیر پیکسل با توجه به معادله (۸)، شاخص حساسیت به فرسایش آبکندی [2] را به دست آورد.

$$GESI = \sum_{R=1}^{R=n} FR \qquad (۸)$$

که در آن؛ GESI: شاخص حساسیت به فرسایش آبکندی و FR: وزن نهایی مدل نسبت فراوانی می‌باشد.

مدل احتمالاتی وزن واقعه

مدل احتمالاتی وزن واقعه یک مدل بر اساس روش‌های آماری دومتغیره بیزین [3] می‌باشد که به‌طور موفقیت‌آمیزی برای تهیه نقشه حساسیت به زمین‌لغزش (Mohammady et al, 2012, Pourghasemi et al, 2016) و تهیه نقشه حساسیت به سیل‌خیزی (Tehrany et al, 2014) استفاده‌شده است. شرح مفصلی از معادله ریاضی مدل احتمالاتی وزن واقعه توسط بهابرگام کارتر [4] توضیح داده‌شده است (Bonham-Carter,1994). مدل احتمالاتی وزن واقعه یکی از روش‌های آماری دومتغیره می‌باشد که با استفاده از فرم ورود به لگاریتم خطی [5]، از روش احتمالاتی بیزین برای تعیین اهمیت نسبی عوامل مؤثر به‌وسیله ابزارهای آماری می‌پردازد. با همپوشانی موقعیت هر یک از آبکندها با هر یک از عوامل، رابطه آماری بین آن‌ها شناسایی‌شده و اینکه چگونه هر یک از متغیرها مسئول بروز فرسایش آبکندی درگذشته بوده است، ارزیابی گردید. مدل احتمالاتی وزن واقعه بر اساس محاسبه وزن مثبت (w^+) و منفی (w^-) تعریف‌شده است. در این مدل محاسبه وزن هر یک از عوامل وقوع آبکند (A) بر اساس وجود یا عدم وجود مکان‌های آبکند (B) در منطقه موردمطالعه به شرح زیر است (Bonham-Carter,1994):

$$w_i^+ = \ln \frac{p\{B|A\}}{P\{B|\bar{A}\}} \qquad (۹)$$

$$w_i^- = \ln \frac{p\{\bar{B}|A\}}{P\{\bar{B}|\bar{A}\}} \qquad (۱۰)$$

1 TWI
2 GESI
3 Bayesian
4 Bonham-Carter
5 Log-linear form

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

که در این فرمول؛ P: احتمال وقوع پیش‌آمد و ln: تابع لگاریتم طبیعی است. B و $\bar{B}$ به ترتیب نشان‌دهنده وجود و عدم وجود عوامل وقوع آبکندها می‌باشد. A نشان‌دهنده وجود آبکند و $\bar{A}$ نشان‌دهنده عدم وجود آبکند است. وزن مثبت (w^+) این واقعیت را توضیح می‌دهد که عوامل وقوع آبکند وجود دارد و مقدار آن نشانه‌ای از همبستگی مثبت بین وجود عوامل وقوع آبکندها است (Bonham-Carter 1991; Mohammady et al, 2012). وزن (w^-) تعیین شرایط عدم وجود عامل وقوع آبکندها و نشان‌دهنده سطح همبستگی منفی است (Regmi et al, 2013). در تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی میزان وزن (c) را اندازه و ارتباط فضایی بین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی مشخص می‌کند. مقدار (c) برای یک رابطه فضایی منفی، منفی و برای یک رابطه مثبت، مثبت است (Pourghasemi et al, 2016). انحراف استاندارد $s(c)$ از w توسط معادله (۱۱) تعیین می‌شود:

$$S(C) = \sqrt{s^2(w^+) + s^2(w^-)} \quad (۱۱)$$

که در این فرمول؛ $S^2(W^+)$ واریانس W^+ و $S2(W^-)$ واریانس W^- می‌باشد. واریانس‌های وزن می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود (Bonham-Carter, 1991):

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N\{B \cap A\}} + \frac{1}{B \cap \bar{A}} \quad (۱۲)$$

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N\{\bar{B} \cap A\}} + \frac{1}{\bar{B} \cap \bar{A}} \quad (۱۳)$$

توزیع تی- استیودنت[1] (G_{Final}) برای اندازه‌گیری مقدار اطمینان به‌وسیله معادله زیر محاسبه‌شده است:

$$G_{Final} = \left(\frac{C}{S(C)}\right) \quad (۱۴)$$

که در آن C ارتباط فضایی کلی بین یک عامل ایجاد آبکند و وقوع فرسایش آبکندی را نشان می‌دهد (Bonham-Carter, 1994).

پس از استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه، وزن هر یک از عوامل (G_{Final}) محاسبه شد تا یک نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی بر اساس معادله زیر به دست آید:

$$GESI = \sum_{R=1}^{R=n} G_{Final} \quad (۱۵)$$

که در این فرمول؛ GESI نشان‌دهنده شاخص حساسیت به فرسایش آبکندی است.

بحث و نتایج

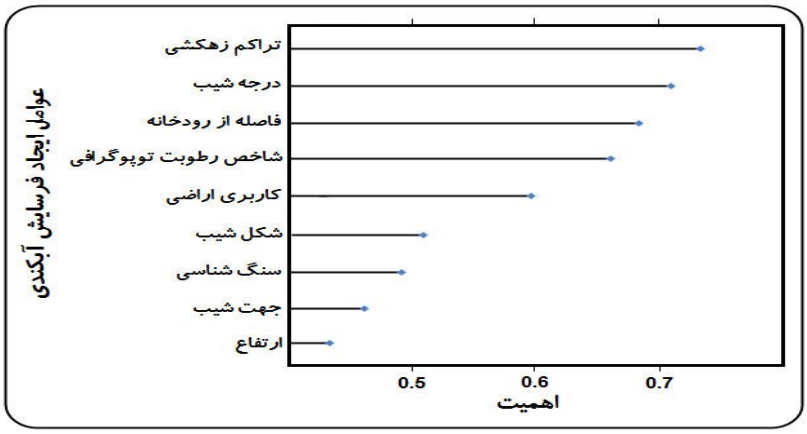
تجزیه‌و تحلیل اهمیت نسبی عوامل ایجاد آبکند

نتایج حاصل از روش الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری در شکل (۵) نشان داده‌شده است. نتایج نشان داد که مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد آبکندها شامل تراکم زهکشی (۷۳/۲۱٪)، شیب (۷۰/۸۹٪) و فاصله از رودخانه (۶۶/۱۹٪) و شاخص رطوبت توپوگرافی (۶۸/۱۲٪) می‌باشند و بعد از آن‌ها عوامل کاربری اراضی (۵۹/۵۲٪)، شکل شیب (۵۱/۳۲٪)، سنگ‌شناسی (۴۹/۲۰٪)، جهت شیب (۴۵/۹۲٪) و ارتفاع (۴۳/۵۶٪) به ترتیب در ایجاد آبکندها نقش دارند. بنابراین تمام لایه‌ها به‌عنوان متغیرهای ورودی برای تولید نقشه حساسیت به وقوع فرسایش آبکندی انتخاب شدند. زیرا این متغیرها سهم نسبی در ایجاد آبکندها بر اساس تجزیه‌وتحلیل الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری، در منطقه موردمطالعه دارند.

1 Student's t-distribution

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]



شکل ۵- تجزیه‌وتحلیل اهمیت متغیرها با استفاده از روش الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری (LVQ)

کاربرد مدل نسبت فراوانی[1]

برای تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی و برآورد سطح همبستگی بین نقاط آبکندی و عوامل ایجاد آبکندها، مدل نسبت فروانی استفاده گردید. شکل (۶a-i) ارزش نسبت فراوانی که برای هر طبقه از عوامل ایجاد آبکند تهیه‌شده است را نشان می‌دهد. درصورتی‌که ارزش نسبت فراوانی کمتر از ۱ باشد همبستگی پایین و درصورتی‌که ارزش نسبت فراوانی بزرگ‌تر از ۱ باشد همبستگی بالاتر وجود خواهد داشت (Oh and Lee, 2010). به‌طورکلی یک مقدار نسبتاً بالا از نسبت فراوانی، احتمال بیشتر وقوع آبکند را نشان می‌دهد درحالی‌که مقدار کم نسبت فراوانی نشان‌دهنده احتمال کمتر به حساسیت آبکند می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۶a) نشان داده‌شده است، عامل سنگ‌شناسی تأثیر مهمی بر فرسایش‌پذیری در منطقه موردمطالعه داشته است. به‌طوری‌که کلاس Kam (مارن بامیان لایه‌هایی از سنگ‌آهک) دارای بالاترین ارزش نسبت فراوانی (۲/۳۲) و پس‌ازآن کلاس Kbc (کنگلومرای درشت‌دانه، ماسه‌سنگ و برش) (FR=۱/۵۳) و طبقه سنگ‌آهک، سازند چهل کمان (Pch) (FR= ۱/۱۰) قرار دارد. بنابراین این سازندها با توجه به نفوذپذیری زیاد حساسیت زیادی به فرسایش آبکندی دارند. در مورد کاربری اراضی، کاربری مراتع نیمه متراکم باارزش نسبت فراوانی، (۱/۴۸) منعکس‌کننده حساسیت آبکندها در این نوع کاربری می‌باشد (شکل ۶b). در مورد فاصله از رودخانه، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از رودخانه، وقوع فرسایش آبکندی کاهش می‌یابد. بالاترین ارزش نسبت فراوانی، (۱/۴۹) برای فاصله ۷۶> متر به‌دست‌آمده آمد (شکل ۶c). بااین‌حال، تجزیه‌وتحلیل نتایج نسبت فراوانی نشان می‌دهد که FR<۱ برای فاصله از رودخانه بیشتر از ۲۵۱ متر، نماینده احتمال کم وقوع فرسایش آبکندی در این کلاس است. تجزیه‌وتحلیل‌ها برای ارتباط بین وقوع آبکندها و درجه شیب نشان می‌دهد که شیب °۲-° ۰ بالاترین ارزش نسبت فراوانی، (۱/۵۶) و پس‌ازآن کلاس شیب °۵-°۲ درجه (۱/۳۰) قرار دارد (شکل ۶d). یافته‌های فوق با مطالعات کانوسنتی و همکاران (۲۰۱۴)، که بیان می‌کنند درجه شیب یک عامل عمده برای کنترل تمرکز جریان زمینی، موقعیت و توسعه آبکندها است، منطبق است (Conoscenti et al, 2014:409). در رابطه با عامل جهت شیب، ارزش نسبت فراوانی، بیشتر از ۱ برای جهت‌های جنوب، جنوب شرقی، شمال‌غربی و سطوح صاف به‌دست‌آمده آمد که نشان می‌دهد این طبقات احتمال بیشتر وقوع آبکند را در مقایسه با سایر طبقات جهت شیب‌دارند (شکل ۶e). شکل شیب تأیید کرد که شکل مقعر (باارزش نسبت فراوانی، ۱/۸۷) بیشترین حساسیت را به تشکیل آبکند دارند و پس‌ازآن مناطق مسطح (باارزش نسبت فراوانی، ۱/۱۰) قرار دارد (شکل ۶f). با توجه به شکل (۶g) شاخص رطوبت توپوگرافی[2]، ضریب بیشتر از ۱ در محدوده کلاس‌های ۱۳/۱۰-۹/۷۰، ۱۶/۳۰-۱۳/۱۰ و ۱۶/۳۰ < تشخیص داده

1 FR
2 TWI

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

شد. درنتیجه ارتباط معناداری بین وقوع آبکندها و شاخص رطوبت توپوگرافی (در رابطه با حجم رواناب) وجود دارد؛ که با یافته‌های دوب و همکاران (۲۰۱۴)، منطبق است (Dube et al, 2014:148). بررسی تراکم زهکشی نشان داد کلاس‌های km/km^2 ۰/۵۹-۰/۴۲ و km/km^2 ۰/۵۹ < دارای بالاترین ارزش نسبت فراوانی (FR>1) هستند (شکل ۶h). تجزیه‌وتحلیل نسبت فراوانی (FR)، برای ارتباط بین تراکم آبکندها و ارتفاع نشان می‌دهد که ارتفاع ۶۵۱ > متر (باارزش FR، ۱/۲۰) و ۷۳۳-۶۵۱ متر (باارزش FR، ۱/۵۱) همبستگی بالایی با وقوع ایجاد آبکند دارند (شکل ۶i).

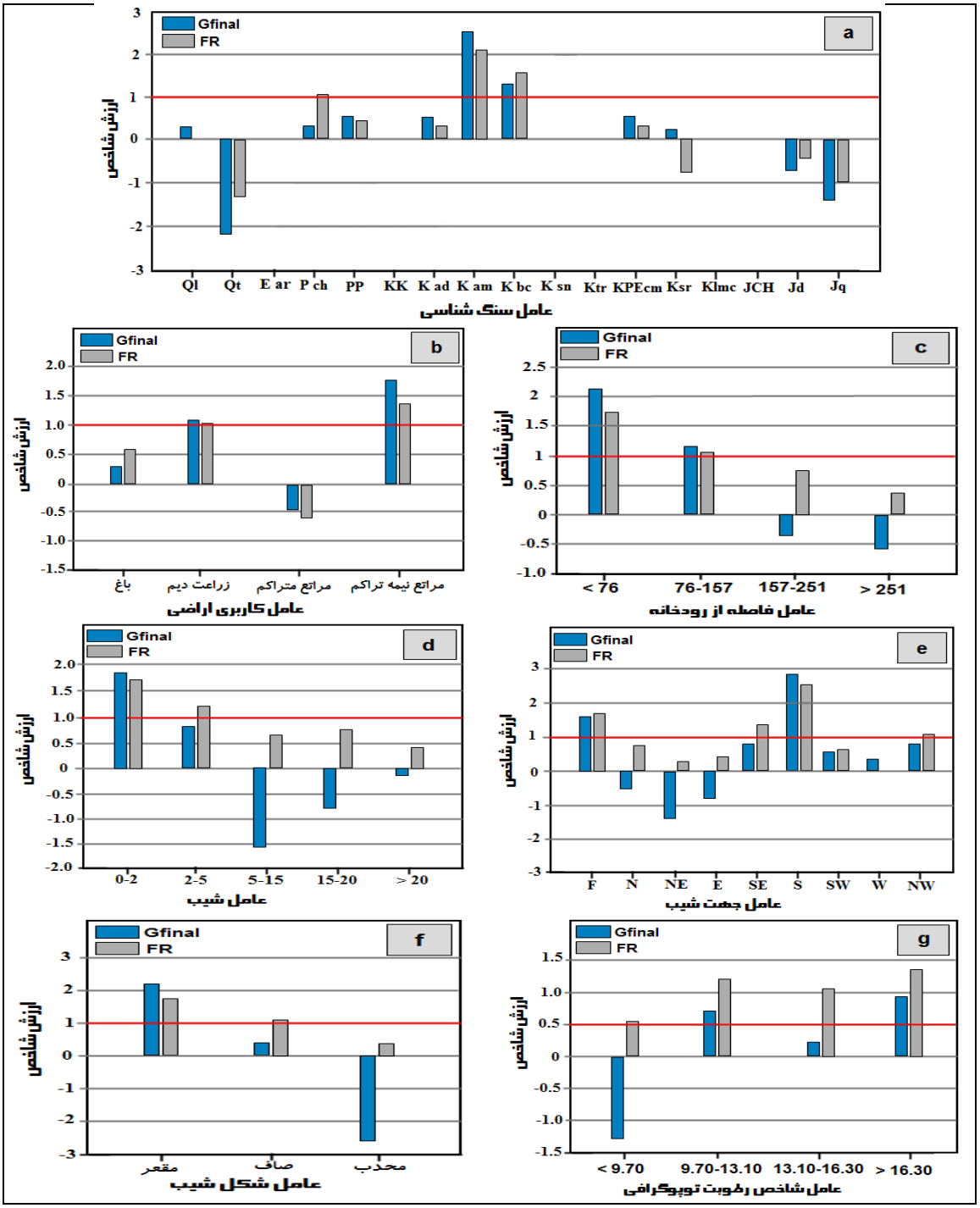
کاربرد مدل احتمالاتی وزن واقعه

همان‌طور که در بخش قبلی توضیح داده شد، تمام پارامترهای مدل احتمالاتی وزن واقعه برای هر یک از عوامل ایجاد آبکند محاسبه می‌شود. در شکل (۶a-i) وزن نهایی (G_{Final}) و ارتباط بین وقوع آبکندها و کلاس‌های هر یک از عوامل ایجاد آبکند نشان داده‌شده است. وزن نهایی (G_{Final}) برای ارتباط فضایی منفی، منفی و برای یک ارتباط فضایی مثبت، مثبت است. G_{Final} برابر با صفر نشان می‌دهد که کلاس‌های در نظر گرفته‌شده برای تجزیه‌وتحلیل عوامل ایجاد آبکند معنی‌دار نبوده (Regmi et al, 2010:731). در مورد ارتباط بین وقوع آبکندها و سنگ‌شناسی بالاترین ارزش (G_{Final}) به ترتیب برابر ۲/۵۵+ و ۱/۲۱+ برای کلاس Kam (مارن بامیان لایه‌هایی از سنگ‌آهک) و Kbc (کنگلومرای درشت‌دانه، ماسه‌سنگ و برش) به‌دست‌آمده آمد (شکل ۶a). این واحدهای سنگ‌شناسی بالاترین استعداد ابتلا به آبکند را نمایش داده است. در میان انواع مختلف کاربری اراضی در منطقه موردمطالعه، کاربری مراتع نیمه متراکم، بالاترین ارزش (G_{Final}=۱/۷۰) را داشت که حداکثر حساسیت به فرسایش آبکندی را دارد. علاوه بر این، کلاس مراتع متراکم وزن ۰/۴۸- را به‌دست‌آمده آورد که نشان از تأثیر منفی بر وقوع آبکندها دارد (شکل ۶b). مناطقی که دارای پوشش گیاهی هستند می‌تواند رواناب سطحی را کاهش دهد و درنتیجه باعث کاهش فرسایش آبکندی شود. نتایج فوق با مطالعات زنگ (۲۰۰۶)، که تأیید می‌کند که مناطق جنگلی فرسایش کمتری در مقایسه با مناطق لخت و کشاورزی در قالب فرسایش آبکندی دارند، مطابقت دارد (Zheng, 2006). در مورد فاصله از رودخانه طبقه کمتر از ۷۶ متر بالاترین وزن را داشته (G_{Final}=۲/۱۵) که نشان از حساسیت بالا به فرسایش آبکندی در این فاصله از رودخانه است (شکل ۵c). که با یافته‌های دوب[1] و همکاران (۲۰۱۴)، کانوسنتی[2] و همکاران (۲۰۱۴) در ارتباط است (Dube et al, 2014:179, Conoscenti et al, 2014:409). که بیان کردند فاصله کم یک ارتباط مثبت (G_{Final} >0) برای ایجاد یک آبکند و توسعه آن نسبت به مناطق دور از رودخانه است. در مورد شیب، کلاس‌های شیب °۲-۰° و °۵-۲° درجه به ترتیب وزن ۱/۸۶+ و ۰/۷۹+ را داشتند (شکل ۶d). این به این معنی است که احتمال فرسایش آبکندی در این کلاس‌ها بالاتر است. در مقابل شیب بیشتر از ۲۰ درجه حداقل ارزش (G_{Final}= -۰/۰۷) رادارند. رابطه بین مکان‌های آبکند و جهت شیب به شرح زیر است. قابل‌توجه است که ارزش G_{Final} بالا برای جهت‌های جنوب و مناطق مسطح مشاهده‌شده است (شکل ۶e). که نشان‌دهنده احتمال بالای وقوع به فرسایش آبکندی است. که عمدتاً به دلیل تراکم پوشش گیاهی بیشتر در جهت‌های شمالی در مقایسه با مناطق رو به جنوب است (Wang et al, 2011:97). در مورد شکل شیب، تجزیه‌وتحلیل مدل احتمالاتی وزن واقعه نشان داد که کلاس سطوح مقعر دارای بالاترین ارزش G_{Final} (۲/۱۰+) و بعدازآن کلاس سطح صاف (۰/۴۸+) قرار دارد (شکل ۶f). که با نتایج تحقیق کانوسنتی و همکاران (۲۰۱۰)، در حوضه توربلو[3] ایتالیا منطبق است (Conoscenti et al, 2010:410). نتایج ثابت کرد که فرآیندهای فرسایش آبکندی معمولاً در دامنه‌های مقعر رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۶g) شاخص رطوبت توپوگرافی بیشتر از ۱۶/۳۰ (G_{Final}=+۰/۹۸) دارای همبستگی بالا برای ایجاد آبکندها هستند. علاوه بر این ارزش G_{Final} به‌طور کلی با افزایش طبقات شاخص رطوبت توپوگرافی افزایش می‌یابد. تراکم زهکشی

1 Dube
2 Conoscenti
3 Turbolo

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

km/km^2 >۰/۵۹ با بیشترین ارزش G_{Final}، ۲/۶۳+ اشاره به این واقعیت دارد که ویژگی‌های این کلاس قوی‌ترین رابطه را به حساسیت آبکند دارند (شکل ۶h). در مورد سطوح ارتفاعی، بالاترین وزن (G_{Final}=+۱/۶۳) مربوط به کلاس ۷۳۳-۶۵۱ متر است، که اثر مثبت بر وقوع فرسایش آبکندی دارد (شکل ۶i).

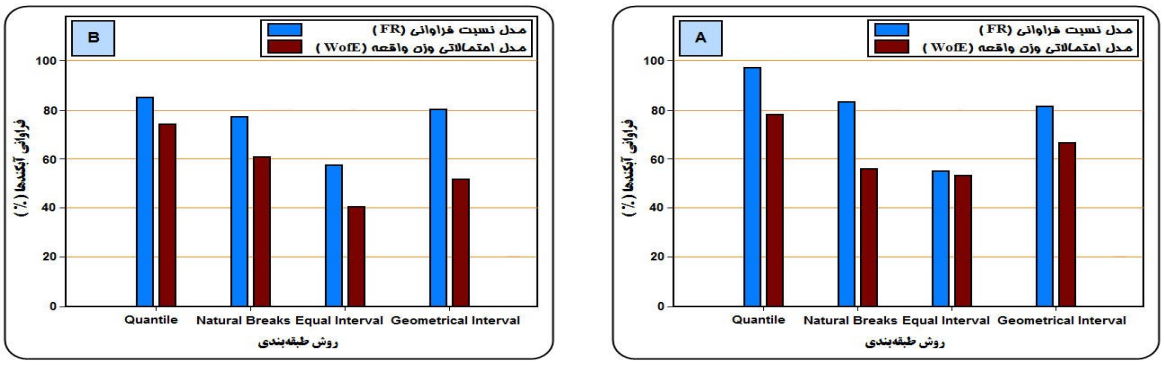


شکل ٦- وزن‌های محاسبه‌شده عوامل ایجاد آبکندها توسط مدل‌های نسبت فراوانی (FR) و مدل احتمالاتی وزن واقعه (WofE): a: لیتولوژی، b: کاربری اراضی، c: فاصله از رودخانه، d: شیب، e: جهت شیب، f: شکل شیب، g: شاخص رطوبت توپوگرافی، h: تراکم زهکشی، i: ارتفاع.

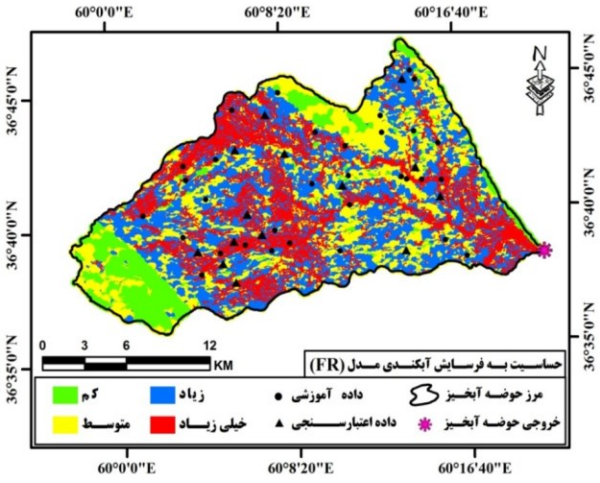
در مورد مدل نسبت فراوانی، ارزش ۱ (خط افقی قرمز) یک همبستگی مثبت بین آبکند و عوامل ایجاد آن را نشان می‌دهد. ارزش‌های نسبت فراوانی صفر، که منفی یا مثبت هستند اگر FR<1 باشد نشان‌دهنده همبستگی پایین‌تر و اگر FR>1 باشد

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

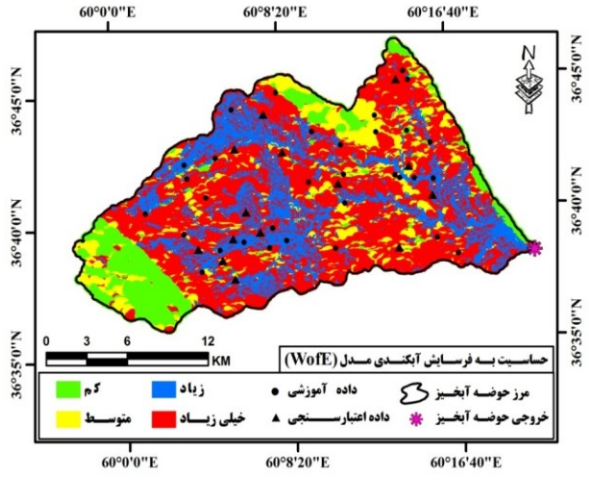
نشان‌دهنده همبستگی بالاتر است. در مورد مدل احتمالاتی وزن واقعه[1] ارزش نهایی (G_{Final}) نشان‌دهنده ارتباط فضایی کلی بین عوامل ایجاد آبکند و موقعیت آبکندها است. ارزش نهایی (G_{Final}) برای یک ارتباط فضایی منفی، منفی و بالعکس برای یک ارتباط فضایی مثبت، مثبت است. درنهایت با توجه به معادله‌های شمارهای (۸ و ۱۵)، نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی، برای هر مدل با توجه به چهار روش طبقه‌بندی شامل: طبقه‌بندی چارک[2]، شکست مساوی[3]، فواصل مساوی[4] و فواصل هندسی[5] مطابق شکل‌های ۸ و ۹ به چهار منطقه حساسیت به فرسایش آبکندی شامل حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد ترسیم گردید. با مقایسه نتایج حاصل از هر روش طبقه‌بندی و توزیع نقاط آموزش و اعتبارسنجی آبکندها بر مناطق حساس به فرسایش آبکندی زیاد و خیلی زیاد مشخص شد که روش طبقه‌بندی چارک توزیع دقیق‌تری را نشان می‌دهد (شکل ۷). که با یافته‌های یوسف و همکاران (۲۰۱۵) که روش طبقه‌بندی چارک را به‌عنوان یک روش طبقه‌بندی مناسب در تهیه نقشه‌های حساسیت می‌دانند، مطابقت دارد (Youssef et al, 2015).



شکل ۷- رابطه بین طبقات حساسیت (زیاد + خیلی زیاد) و درصد فراوانی آبکندهای آموزشی (a) و اعتبارسنجی (b)، با استفاده از روش‌های مختلف طبقه‌بندی برای مدل‌های نسبت فراوانی (FR) و مدل احتمالاتی وزن واقعه (WofE)



شکل ۸- نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل نسبت فراوانی (FR)



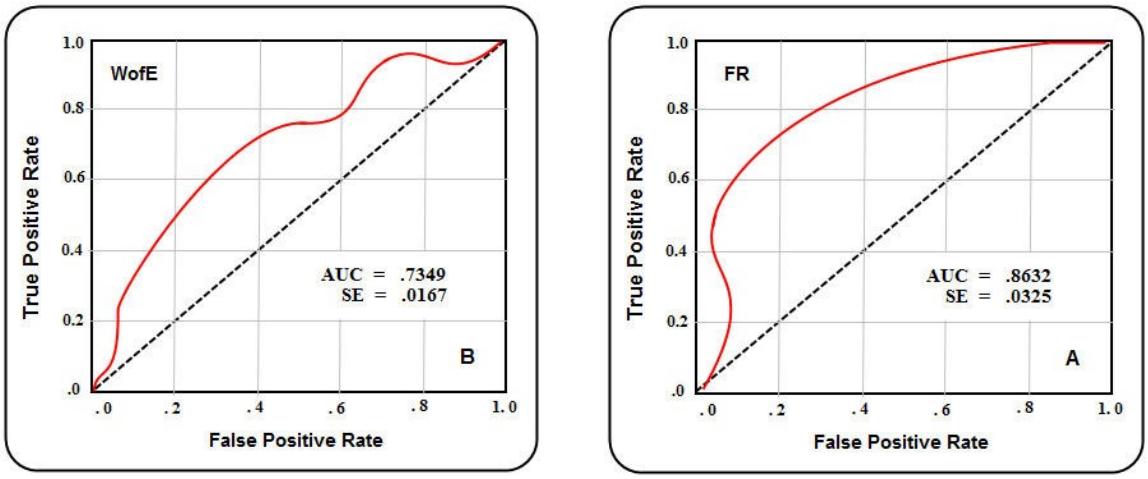
شکل ۹- نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه (WofE)

اعتبارسنجی نقشه‌های حساسیت به فرسایش آبکندی و مقایسه آن‌ها

1 WofE
2 Quantile
3 Natural breaks
4 Equal interval
5 Geometrical interval

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

برای تعیین دقت مدل حساسیت به فرسایش آبکندی در منطقه موردمطالعه، منحنی راک (ROC[1]) به کار گرفته شد (Mohammady et al, 2012:235, Pourghasemi et al, 2016:15, Devkota et al, 2013:163, Rahmati et al, 2014:1016). تجزیه‌وتحلیل منحنی راک یک تکنیک جالب برای ارزیابی دقت کلی یک آزمون تشخیصی است (Williams et al, 1999:174, Zare et al, 2013:2886). سطح زیر منحنی (AUC[2])، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع (وقوع آبکند) و عدم رخداد (عدم وقوع آبکند) است (Tien Bui et al, 2012, Naghibi et al, 2014). ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر (AUC) از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. چنانچه مدل نتواند رخداد فرسایش آبکندی را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین زند مقدار زیر منحنی آن ۰/۵ است و زمانی که سطح زیر منحنی برابر با یک باشد بیانگر بهترین دقت از نقشه تهیه‌شده است. همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و آرزیابی تخمین به‌صورت (۱- ۰/۹، عالی؛ ۰/۸- ۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۸- ۰/۷، خوب؛ ۰/۷- ۰/۶، متوسط؛ ۰/۶- ۰/۵، ضعیف) است (Yesilnacar, 2005: 237). نتایج ارزیابی منحنی راک در شکل (۱۰a,b) نشان داده‌شده است که نقشه حساسیت تولیدشده برای فرسایش آبکندی از طریق مدل احتمالاتی وزن واقعه برابر (۷۳/۴۹٪) و برای مدل نسبت فراوانی (۸۶/۳۲٪) است. بنابراین نقشه حساسیت به وقوع آبکند تهیه‌شده توسط مدل نسبت فراوانی، عملکرد بهتری نسبت به مدل احتمالاتی وزن واقعه در منطقه موردمطالعه به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۰ - منحنی راک (ROC) و سطح زیر منحنی مربوط به‌دقت نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی؛ (A): مدل نسبت فراوانی (B)؛ مدل احتمالاتی وزن واقعه (WofE)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو مدل آماری نسبت فراوانی و مدل احتمالاتی وزن واقعه برای تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی استفاده گردید. در ابتدا نقشه فرسایش آبکندی از طریق مطالعات میدانی ساخته شد. از مجموع ۴۶ آبکند مشخص‌شده در منطقه موردمطالعه، ۳۲ آبکند جهت آموزش مدل و ۱۴ آبکند باقی‌مانده جهت اعتبارسنجی مدل به کار گرفته شد. در مرحله بعد عوامل مؤثر در ایجاد آبکندها شامل: سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، شیب، جهت شیب، شکل شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی و ارتفاع آماده گردید و پس از ارزیابی سهم نسبی هر متغیر پیش‌بینی کننده به مدل از طریق الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری، نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی در منطقه سنگانه کلات با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و مدل احتمالاتی وزن واقعه تهیه گردید. درنهایت برای ارزیابی دقت مدل‌های مذکور، منحنی راک به کار گرفته شد.

1 Receiver Operating Characteristics
2 Area Under Curve

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]
[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

تجزیه‌وتحلیل‌های حاصل از مدل راک نشان می‌دهد که مدل نسبت فراوانی (AUC= ۸۶/۳۲٪) دقت بهتری نسبت به مدل احتمالاتی وزن واقعه (AUC=۷۳/۴۹٪) دارد. درنتیجه، عملکرد مدل نسبت فراوانی برای تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی بیشتر از نقشه تولیدشده توسط مدل احتمالاتی وزن واقعه است. با توجه به الگوریتم یادگیری کوانتیزاسیون برداری، عوامل مؤثر در پیش‌بینی حساسیت به فرسایش آبکندی شامل تراکم زهکشی، شیب، فاصله از رودخانه و شاخص رطوبت توپوگرافی بودند و عوامل دیگر انتخاب‌شده اهمیت منطقی قابل قبولی داشتند. پژوهش حاضر ثابت کرد که مدل‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی می‌توانند با موفقیت برای تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی اعمال شوند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی با مدل‌های مذکور می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان به‌منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل خطر فرسایش آبکندی و اولویت‌بندی آن‌ها برای توسعه شیوه‌های مناسب حفاظت آب‌وخاک و جلوگیری از فرسایش خاک حاصلخیز و تولید رسوب در منطقه موردمطالعه و حوضه‌های آبخیز مشابه کمک قابل‌توجهی کند.

منابع و مآخذ

- ارخازلو، حسین‌شهاب، امامی، حجت، حق نیا، غلامحسین، اسمعیلی، اباذر (۱۳۹۵)، مقایسه دو روش تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی برای پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی در سه منطقه از استان اردبیل، فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال ۲۱، شماره ۱، صص ۱۶-۱.
- امیر احمدی، ابوالقاسم، ابراهیمی، مجید، حبیب‌اللهیان، محمود، زنگنه اسدی، محمدعلی (۱۳۹۳)، بررسی ناپایداری ژئومورفولوژیک دامنه‌ای به روش آنبالاگان با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کلات در ارتفاعات هزار مسجد)، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۹، شماره ۴، صص ۲۵۹-۲۴۱.
- انتظاری، مژگان، ملکی، امجد، مرادی، خدیجه، الفتی، سعید (۱۳۹۴)، بررسی فرسایش خندقی حوضه آبریز دیره از روش تلفیق وزنی و شاخص توان آبراهه‌ای، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۳۰، شماره ۳، صص ۳۱۲-۲۹۷.
- بشری، مهدی، صادقی، سید حمیدرضا، رنگ‌آور، عبدالصالح (۱۳۹۱)، مقایسه تولید رسوب در دو جهت شمالی و جنوبی با استفاده از کرت کوچک، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۳، صص ۱۴۰-۱۳۴.
- بیاتی‌خطیبی، مریم، کرمی، فریبا (۱۳۹۴)، برآورد میزان فرسایش آبی و خاک تلف‌شده از یک خندق در سطح حوضه آتش بیگ، فصلنامه هیدروژئومورفولوژی، شماره ۷، صص ۱۰۶-۸۷.
- حسین‌زاده، محمدمهدی، ثروتی، محمدرضا، منصوری، عادل، میرباقری، بابک، خضری، سعید (۱۳۸۸)، پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: محدوده مسیر سنندج- دهگلان)، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۳، شماره ۱۱، صص ۳۷-۲۷.
- رنگ‌آور، عبدالصالح، عباسی، علی‌اکبر، زنگی‌آبادی، مهدی (۱۳۸۶)، فرسایش آبکندی و بررسی خسارت اقتصادی ناشی از آن (مطالعه موردی: منطقه سنگانه کلات، خراسان رضوی). اسفندماه، چهارمین همایش ملی علوم مهندسی آبخیزداری، کرج، صص ۲۳-۱۶.
- سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (۱۳۸۹)، فایل رقومی کاربری اراضی پوشش سراسری کشور، شهریورماه ۱۳۸۹.
- شهریور، عبدالله، شاد فر، صمد، خزایی، مجید، عادلی، بهزاد (۱۳۹۶)، ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز آبگندی)، فصلنامه اکوهیدرلوژی، دوره ۴، شماره ۱، صص ۱۳۲-۱۱۹.
- صابر چناری، کاظم، بهره‌مند، عبدالرضا، شیخ، واحد بردی، بایرام‌کمکی، چوقی (۱۳۹۵)، پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از مدل دمپستر- شفر در حوضه آبخیز قرناوه، استان گلستان، فصلنامه اکوهیدرلوژی، دوره ۳، شماره ۲، صص ۲۳۱-۲۱۹.
- صادقی، سیدحمیدرضا، بشری سه قلعه، مهدی، رنگ‌آور، عبدالصالح (۱۳۸۷) مقایسه تغییرات رسوب با جهت دامنه و طول کرت در برآورد فرسایش خاک ناشی از رگبارها، مجله آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۲۲، دوره ۲، صص ۲۳۹-۲۳۰.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

- فرج‌زاده، منوچهر، افضلی، عباسعلی، خلیلی، یاسر، قلیچی، عبادالله (۱۳۹۲)، ارزیابی میزان حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره (مطالعه موردی: جنوب شرق استان مازندران؛ کیاسر)، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۲، دوره ۲، صص ۵۷-۴۲.
- ملکی، آمجد، میلادی، بهزاد (۱۳۹۱)، شبیه‌سازی مناطق مستعد خندق‌زایی با استفاده از روش SPI در حوضه‌ی رودخانه مِرگ، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، شماره ۳، دوره ۱، صص ۳۸-۲۳.
- Achten, W.M.J., Dondeyne, S., Mugogo, S., Kafiriti, E., Poesen, J., Deckers, J. (2008), Gully Erosion in South Eastern Tanzania: Spatial Distribution and Topographic Thresholds, Zeitschrift für Geomorphologie, Vol. 52, No. 2, pp. 225-235.
- Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Conoscenti, C., Rotigliano, E. (2011), Multi-parametric GIS Analysis to Assess Gully Erosion Susceptibility a Test in Southern Sicily, Italy, Landform Analysis, Vol.7, pp.15-20.
- Ahalt, SC., Krishnamurthy, AK., Chen, P., Melton, D.E. (1990), Competitive learning algorithms for vector quantization. Neural networks, Vol. 3, No. 3, pp. 277-290.
- Anabalagan, R. (1992), Landslide Hazard Evaluation and Zonation Mapping in Mountainous Terrain, Engineering geology, Vol. 32, pp. 269-277.
- Baeza, C., Corominas, J. (2001), Assessment of Shallow Landslide Susceptibility by Means of Multivariate Statistical Techniques, Earth surface processes and landforms, Vol. 26, pp.1251-1263.
- Bonham-Carter, GF. (1991), Integration of Geoscientific Data using GIS, in Goodchild MF, Rhind DW, Maguire DJ (eds) Geographic information systems: principle and applications, Longdom, London, pp. 171-184.
- Bonham-Carter, G.F. (1994), Geographic Information Systems for Geoscientists Modeling with GIS, In: Bonham-Carter F (ed), Computer methods in the geosciences, Pergamon, Oxford, p. 398.
- Boukheir, R., Chorowicz, J., Chadi, A., Dhont, D. (2008), Soil and Bedrock Distribution Estimated from Gully form and Frequency a GIS-based decision-tree model for Lebanon, Geomorphology, Vol, 93, pp. 482-492.
- Casali, J., Lopez, J.J., Giraldez, J.V. (1999), Ephemeral Gully Erosion in Southern Navarra (Spain), Catena, Vol. 36, pp. 65-84.
- Cevik, E., Topal, T. (2003), GIS-based Landslide Susceptibility Mapping for a Problematic Segment of the Natural Gas Pipeline, Hendek (Turkey), Environmental geology, Vol. 44, pp. 949-962.
- Chaplot, V. (2013), Impact of Terrain Attributes, Parent Material and Soil Types on Gully Erosion, Geomorphology, Vol. 186, pp.1-11.
- Chaplot, V., Giboire, G., Marchand, P., Valentin, C. (2005), Dynamic Modelling For Linear Erosion Initiation and Development Under Climate and Land-use Changes in Northern Laos, Catena, Vol. 63, pp.318-328.
- Choi ,Y., Park, H., Sunwoo, C. (2008), Flood and Gully Erosion Problems at the Pasir Open Pit Coal Mine, Indonesia a Case Study of the Hydrology Using GIS, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol.67, pp.251-258.
- Conforti, M., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G., Scarciglia, F. (2010), Geomorphology and GIS Analysis for Mapping Gully Erosion Susceptibility in the Turbolo Stream Catchment (Northern Calabria, Italy), Natural hazards, Vol. 56, pp. 881-898.
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., Marker, M. (2014), Gully Erosion Susceptibility Assessment by Means of GIS-based Logistic Regression a Case of Sicily (Italy), Geomorphology, Vol. 204, No.1, pp. 399-411.
- Conoscenti, C., Di Maggio, C., Rotigliano, E. (2008), Soil Erosion Susceptibility Assessment and Validation Using a Geostatistical Multivariate Approach a Test in Southern Sicily, Natural hazards, Vol. 46, pp. 287-305.
- 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, Vol. 40, pp. 381-391.
- De Vente, J., Poesen, J., Govers, G., Boix-Fayos, C. (2009), The Implications of Data Selection for Regional Erosion and Sediment Yield Modeling, Earth surface processes and landforms, Vol. 34, pp. 1994-2007.
- Devkota, KC., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Dhital, M.R., Althuwaynee, O.F. (2013), Landslide Susceptibility Mapping Using Certainty Factor, index of Entropy and Logistic Regression Models in GIS and their Comparison at Mugling-Narayanghat Road Section in Nepal Himalaya, Natural Hazards, Vol. 65, pp.135-165.
- Dramis, F., Gentili, B. (1977), Contributo Allo Studio Delle Acclivita Dei Versanti nell'Appennino Umbro, Marchigiano, Stud Geol Camerti, Vol. 3, pp.153-164.
- Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J., Mashauri, D.A. (2014), Potential of Weight of Evidence Modelling for Gully Erosion Hazard Assessment in Mbire District-Zimbabwe, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 67, pp.145-152
- El Maaoui, M.A., Sfar Felfoul, M., Boussema, M.R, Snane, M.H. (2012), Sediment Yield from Irregularly Shaped Gullies Located on the Fortuna Lithologic Formation in Semi-arid area of Tunisia, Catena, Vol. 93, pp. 97-104.
- Filippi, A.M., Jensen, J.R. (2006), Fuzzy Learning Vector Quantization for Hyperspectral Coastal Vegetation Classification, Remote Sensing of Environment, Vol. 100, pp. 512-530.
- Flugel, W.A., Marker, M., Moretti, S., Rodolfi, G., Sidorchuk, A. (2003), Integrating Geographical Information Systems, remote sensing, ground truthing and modelling approaches for regional erosion classification of semi-arid catchments in South Africa, Hydrology Process, Vol. 17, pp. 929-942.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

- Ghorbani Nejad, S., Falah, F., Daneshfar, M., Haghizadeh, A., Rahmati, O. (2016), Delineation of Groundwater Potential Zones using Remote Sensing and GIS-based Data-driven Models, Geocarto International, Vol. 32, No. 2, pp. 167-187.
- Golestani, G., Issazadeh, L., Serajamani, R. (2014), Lithology Effects on Gully Erosion in Ghoori chay Watershed using RS , GIS, International Journal of Biosciences (IJB), Vol. 4, No. 2, pp. 71-76.
- Gomez, G.A., Schnabel, S., Felicısimo, A.M. (2009), Modelling the Occurrence of Gullies in Rangelands of Southwest Spain. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 34, No.14, pp. 1894-1902.
- Gomez-Gutierrez, A., Conoscenti, C., Angileri, S.E., Rotigliano, E., Schnabel, S. (2015), Using Topographical Attributes to Evaluate Gully Erosion Proneness (Susceptibility) in Two Mediterranean Basins Advantages and Limitations, Natural Hazards, Vol.79, No. 1, pp. 291-314.
- Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A. (2008), Implementation of Reconstructed Geomorphologic Units in Landslide Susceptibility Mapping the Melen Gorge (NW Turkey), Natural Hazards, Vol. 46, No. 3, pp. 323-351.
- Hongchun, Z.H.U, Guoan, T., Kejian, Q., Haiying, L. (2014), Extraction and Analysis of Gully Head of Loess Plateau in China Based on Digital Elevation Model, Chinese Geographical Science, Vol. 24, No. 3, pp. 328-338.
- Hughes, A.O, Prosser, I.P., Stevenson, J., Scott, A., Lu, H., Gallant, J., Moran, C.J. (2001), Gully Erosion Mapping for the National Land and Water Resources Audit, Csiro Land and Water Technical Report, Canberra, Technical Report, Vol. 26, pp. 1-20.
- Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H.R., Rezaeian, J., Sattarian, A. (2014), GIS-based Frequency Ratio and Index of Entropy Models for Landslide Susceptibility Assessment in the Caspian Forest, northern Iran, Environmental Earth Sciences, Vol. 75, No. 9, p.780.
- Kakembo, V., Xanga, W.W., Rowntree, K. (2009), Topographic Thresholds in Gully Development on the Hillslopes of Communal Areas in Ngqushwa Local Municipality, Eastern Cape, South Africa, Geomorphology, Vol. 110, No. 3-4, pp. 188-194.
- Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J., Laaksonen, J., Torkkola, K. (1996), Learning Vector Quantization. Technical Report A30. Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science, Espoo.
- Kuhnert, PM., Henderson, A.K., Bartley, R., Herr, A. (2010), Incorporating Uncertainty in Gully Erosion Calculations Using the Random Forests Modelling Approach, Environmetrics, Vol. 21, pp. 493-509.
- Le Roux, J.J., Sumner, P.D. (2012), Factors Controlling gully Development Comparing Continuous and Discontinuous Gullies, Land Degradation Development, Vol. 23, No. 5, pp. 440-449.
- Luca, F., Conforti, M., Robustelli, G. (2011), Comparison of GIS-based Gullying Susceptibility Mapping Using Bivariate and Multivariate Statistics: Northern Calabria, South Italy, Geomorphology, Vol. 134, pp. 297 308.
- Maharaj, R. (1993), Landslide Processes and Landslide Susceptibility Analysis from an Upland Watershed a Case Study from St Andrew, Jamaica, West Indies. Engineering Geology, Vol. 34, pp. 53-79.
- Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F. (2014), Application of Probabilisticbased Frequency Ratio Model in Groundwater Potential Mapping Using Remote Sensing Data and GIS, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 7, No. 2, pp. 711-724.
- Marker, M., Pelacani, S., Schroder, B. (2011), A Functional Entity Approach to Predict Soil Erosion Processes in a Small Plio-Pleistocene Mediterranean Catchment in Northern Chianti, Italy, Geomorphology, Vol. 125, pp. 530-540.
- Marzolff, I., Poesen, J., (2009), The Potential of 3D Gully Monitoring with GIS Using High-resolution Aerial Photography and a Digital Photogrammetry System, Geomorphology, Vol. 111, No. 1, pp. 48-60.
- Moghaddam, D.D., Rezaei, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S., Pradhan, B. (2013), Groundwater Spring Potential Mapping Using Bivariate Statistical Model and GIS in the Taleghan Watershed, Iran, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 8, No. 2, pp. 913-929. DOI:10.1007/s12517-013-1161-5.
- Mohammady, 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, Vol. 61, pp. 221-236.
- Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Dixon, B. (2016), GIS-based Groundwater Potential Mapping Using Boosted Regression Tree, Classification and Regression Tree, and Random Forest Machine Learning Models in Iran, Environmental monitoring and assessment, Vol. 188, No. 1, pp. 44. DOI:10.1007/s10661-015-5049-6.
- Patel, A.K., Chatterjee, S. (2016), Computer Vision-based Limestone Rock-type Classification Using Probabilistic Neural Network, Geoscience Frontiers, Vol. 7, No. 1, pp. 53-60.
- Pavel, M., Nelson, J.D., Fannin, R.J. (2011), An Analysis of Landslide Susceptibility Zonation Using a Subjective Geomorphic Mapping and Existing Landslides, Computers geosciences, Vol. 37, No. 4, pp. 554-566.
- Poesen, J., Nachetergaele, J., Verstraeten, J., Valentin, C. (2003), Gully Erosion and Environmental Change: imporTance and Research Needs, Catena, Vol. 50, No. 2-4, pp. 91-133.
- Poudyal, C.P., Chang, C., Oh, H.J., Lee, S. (2010), Landslide Susceptibility Maps Comparing Frequency Ratio and Artificial Neural Networks: a Case Study from the Nepal Himalaya, Environmental Earth Sciences, Vol. 6, pp. 1049-1064.
- Pourghasemi, H.R., Kerle, N. (2016), Random Forests and Evidential Belief function-based Landslide Susceptibility Assessment in Western Mazandaran Province, Iran, Environmental Earth Sciences, Vol. 75, No. 3, p. 185.
- Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H.R. (2014), GIS-based Groundwater Spring Potential Assessment and Mapping in the Birjand Township, Southern Khorasan Province, Iran, Hydrogeology, Vol. 22, pp. 643-662.
- Pradhan, B. (2010), Landslide Susceptibility Mapping of a Catchment Area Using Frequency Ratio, Fuzzy Logic and Multivariate Logistic Regression Approaches, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 38, No. 2, pp. 301-320.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]

- Qilin, Y., Jiarong, G., Yue, W., Bintian, Q. (2011), Debris Flow Characteristics and Risk Degree Assessment in Changyuan Gully, Huairou District, Beijing, Procedia Earth and Planetary Science, Vol. 2, pp. 262 -271.
- Rahmati, O., Zeinivand, H., Besharat, M. (2015), Flood Hazard Zoning in Yasooj Region, Iran, Using GIS and Multi-criteria Decision Analysis, Geomatics, Natural Hazards and Risk, Vol. 7, No. 3, pp. 1000-1017.
- Razandi, Y., Pourghasemi, H.R, Samani Neisani, N., Rahmati, O. (2015), Application of Analytical Hierarchy Process, Frequency Ratio, and Certainty Factor Models for Groundwater Potential Mapping Using GIS, Earth Science Informatics, Vol. 8, No. 4, pp.867-883. DOI:10.1007/s12145-015-0220-8.
- Regmi, A.D., Devkota, K.C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H.R., Kumamoto, T., Akgun, A. (2013), Application of Frequency Ratio, Statistical Index, and Weights-of-evidence Models and their Comparison in Landslide Susceptibility Mapping in Central Nepal Himalaya, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 7, No. 2, pp. 725-742. DOI:10.1007/s12517-012-0807z.
- Scheidegger, A.E. (2012), Theoretical Geomorphology, Springer Science Business Media, 2012 Dec 6.
- Snelder, D.J., Bryan, R.B. (1995), The Use of Rainfall Simulation Tests to Assess the Influence of Vegetation Density on Soil Loss on Degraded Rangelands in the Baringo District, Kenya, Catena, Vol. 25, No. 4, pp. 105-116.
- Stotle, J., Liu, B., Ritsema, C.J., Van, H.G.M., Den Elsen, R., Hessel, R. (2003), Modeling Water Flow and Sediment Processes in a Small Gully System on the Loess Plateau in China, Catena, Vol. 54, pp.117-130.
- Svoray, T., Michailov, E., Cohen, A., Rokah, L., Sturm, A. (2012), Predicting Gully Initiation: Comparing Data Mining Techniques, Analytical Hierarchy Processes and the Topographic Threshold, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 37, No. 6, pp. 607-619.
- Tayebi, M.H., Tangestani, M.H. (2015), Sub Pixel Mapping of Alteration Minerals Using SOM Neural Network Model and Hyperion Data, Earth Science Informatics, Vol. 8, No. 2, pp. 279-291.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N. (2014), Flood Susceptibility Mapping Using a Novel Ensemble Weightsof-evidence and Support Vector Machine Models in GIS, Journal of hydrology, Vol. 512, pp. 332-343.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O.B. (2012), Spatial Prediction of Landslide Hazards in Vietnam: a Comparative Assessment of the Efficacy of Evidential Belief Functions and Fuzzy Logic Models, Catena, Vol. 96, pp. 28-40.
- Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., Jebur, M.N., Tehrany, M.S. (2014), Earthquake Induced Landslide Susceptibility Mapping Using an Integrated Ensemble Frequency Ratio and Logistic Regression Models in West Sumatera Province, Indonesia, Catena, Vol. 118, pp. 124-135.
- Valentin, C., Poesen, J., Yong, L. (2005), Gully Erosion: Impacts, Factors and Control Catena,Vol. 63, pp.132 153.
- Vandaele, K., Poesen, J., Govers, G., Wesemael, B. (1996), Geomorphic Threshold Conditions for Ephemeral Gully Incision, Geomorphology, Vol. 16, pp. 161-173.
- Wang, L., Wei, S., Horton, R., Shao, M. (2011), Effects of Vegetation and Slope Aspect on Water Budget in the Hill and Gully Region of the Loess Plateau of China, Catena, Vol, 87, No. 1, pp. 90-100.
- Williams, R.N., Souza. J.r, Jones, E.M. (2014), Analysing Coastal Ocean Model Outputs Using Competitivelearning Pattern Recognition Techniques, Environ Modell Softw, Vol. 57, pp. 165-176.
- Yesilnacar, E.K. (2005), The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey, Ph.D Thesis Department of Geomatics the University of Melbourne, p. 423.
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., El-Haddad, B.A, Dhahry, B.K. (2015), Landslide Susceptibility Maps Using Different Probabilistic and Bivariate Statistical Models and Comparison of their Performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 75, No. 1, pp. 63-87.
- Zakerinejad, R., Maerker, M. (2015), An Integrated Assessment of Soil Erosion Dynamics with Special Emphasis on Gully Erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran, Natural Hazards, Vol. 79, No. 1, pp. 25-50.
- Zare, M., Pourghasemi, H.R., Vafakhah, M., Pradhan, B. (2013), Landslide Susceptibility Mapping at Vaz Watershed (Iran) Using an Artificial Neural Network Model a Comparison Between Multilayer Perceptron (MLP) and Radial basic Function (RBF) Algorithms, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 6, No. 8, pp. 2873-2888.
- Zheng, F. (2006), Effect of Vegetation Changes on Soil Erosion on the Loess Plateau, Pedosphere, Vol. 16, No. 4, pp. 420-427.
- Zhu, A., Wang, R., Qiao, J., Qin, C., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y., Zhu, T. (2014), An Expert Knowledge-based Approach to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Fuzzy Logic, Geomorphology, Vol. 214, pp. 128-138.
- Zinck, J.A., Lopezb, J., Metternichtc, G.I., Shresthaa, D.P., Vazquez-Selemd, L. (2001), Mapping and Modeling Mass Movements and Gullies in Mountainous Areas Using Remote Sensing and GIS Techniques, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 3, No. 1, pp. 43-53.
- Zucca, C., Canu, A., Della Peruta, R. (2006), Effects of Land use and Landscape on Spatial Distribution and Morphological Features of Gullies in an Agropastoral Area in Sardinia (Italy), Catena, Vol. 68, pp. 87-95.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-09-08]

[DOI: 10.29252/geores.32.4.105]