



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی فضای جغرافیایی

سال بیست و سوم، شماره‌ی ۸۱
بهار ۱۴۰۲، صفحات ۴۳-۱۹

DOI:10.52547/GeoSpa.23.1.19

* ابوالفضل رحمانی^۱
علی صادقی^۲
مجید ابراهیمی^۳

ارزیابی تأثیر عوامل زمین محیطی بر شکل‌گیری فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز سنگانه‌ی کلات

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۴

چکیده

فرسایش خاک یک مسئله‌ی مهم زیست‌محیطی مربوط به نگرانی مشترک در جهان امروز است. با وجود اهمیت خاک در اهداف توسعه پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مطالعه‌ی شرایط زمین محیطی و عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی به‌ندرت انجام شده است. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی عوامل زمین محیطی برای تشخیص ویژگی‌های مؤثر در شکل‌گیری فرسایش آبکندی در حوضه‌ی آبخیز سنگانه‌ی کلات می‌باشد. همچنین به‌منظور درک روابط فضایی بین آبکندها و عوامل زمین محیطی از مدل احتمالاتی شرطی استفاده گردید. تهیه نقشه‌ی آبکندهای موجود با استفاده از مطالعات میدانی به‌صورت نمونه‌برداری تصادفی به دو روش زیر انجام شد: در قسمت اول ۷۰ درصد از داده‌ها جهت آموزش مدل احتمالاتی شرطی استفاده شد و در قسمت دوم یک مجموعه داده معتبر (۳۰ درصد)، برای اعتبارسنجی مدل و تأیید صحت آن مورد استفاده قرار گرفت. پیش‌بینی عملکرد مدل احتمالاتی شرطی با منحنی مشخصه‌ی عملکرد گیرنده (ROC) بررسی شد. علاوه بر این تأثیر تمام عوامل زمین

E-mail:rahmani870916@gmail.com

* - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. (نویسنده مسئول).

۲ - گروه علوم انسانی و اجتماعی دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران.

۳ - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

محیطی در فرسایش آبکندی با انجام یک مدل تحلیل حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های اعتبارسنجی برای نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی نشان داد که دقت سطح زیر منحنی راک (ROC) برابر ۸۷/۳۲ درصد بود، همچنین بر اساس آنالیز تجزیه و تحلیل حساسیت عوامل سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه و عامل کاربری اراضی اثرات قابل توجهی بر وقوع فرسایش آبکندی در منطقه‌ی مورد مطالعه دارند.

کلیدواژه‌ها: فرسایش آبکندی، عوامل زمین محیطی، مدل احتمالاتی شرطی، سنگانه‌ی کلات.

مقدمه

آبکند یک کانال فرسایشی تقریباً دائمی با عمق بزرگ‌تر از ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد که دارای یک پیشانی فعال فرسایشی بوده و در اراضی کم شیب و مسطح ایجاد و توسط شخم عادی در زمین محو نمی‌شود (Posesen et al., 2003). آبکندها پدیده‌هایی شبیه به خندق هستند که در دره‌های مسدود شده به وسیله مواد تخریبی به وجود می‌آیند (Charlton, 1994). پیش‌تر تصور بر آن بود که خندق‌ها در اثر گسترش شیارها به وجود می‌آیند. با این حال، این فرایند پیچیدگی زیادی دارد و نظریه‌های مختلفی بر اساس مشاهدات مطرح شده است. تصور می‌شود که خندق‌ها هنگامی تشکیل می‌شوند که وقفه دررویش پوشش گیاهی امکان تشکیل حفره‌های فرسایشی را فراهم کند و آب در آن‌ها جمع شود. Morgan (2005) اظهار می‌کند در ابتدا تصور بر آن بود که آبکندها در اثر توسعه‌ی شیارها به وجود می‌آید ولی تحقیقات نشان داده است که فرآیند تشکیل آبکند بسیار پیچیده است. Amir (2014)، درباره شکل‌گیری و گسترش فرسایش آبکندی معتقد بر رخداد چهار مرحله جدا از هم به شرح زیر است:

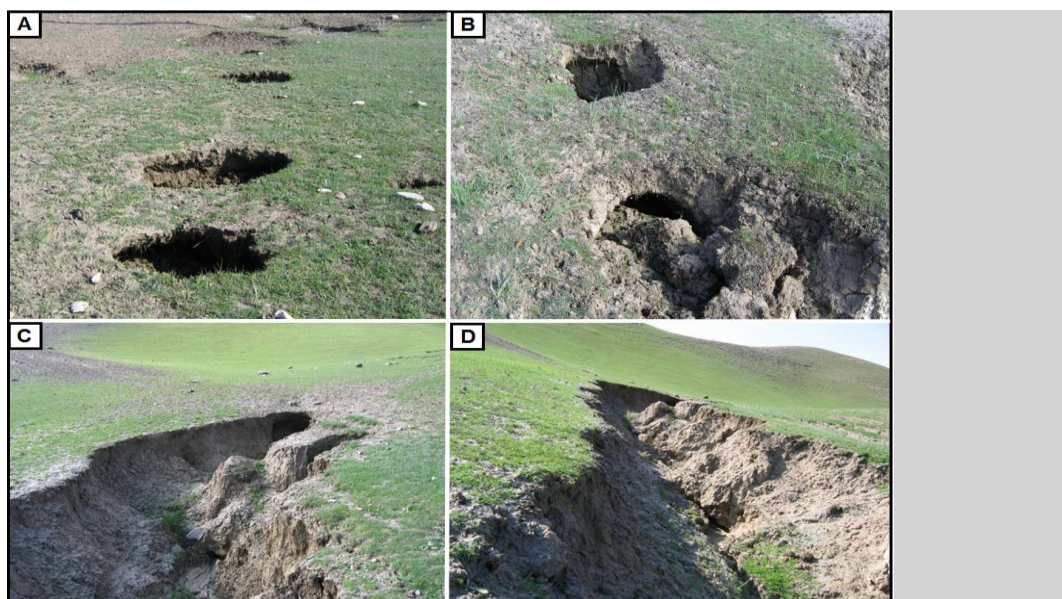
مرحله اول: وجود یک چاله یا گودال که بتواند فرصت نفوذ آب را افزایش دهد؛

مرحله دوم: پدیده انحلال که آبراهه زیرزمینی ایجاد می‌کند؛

مرحله سوم: توسعه و گسترش آبراهه زیرزمینی که موجب ریزش سقف کانال می‌گردد؛

مرحله چهارم: در مرحله نهایی آبکند در سطح زمین هویدا می‌شود. در شکل (۱) مراحل شکل‌گیری آبکند نشان داده شده است.

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 (Chaplot, 2013:3). آبکندها به‌عنوان یکی از شاخص‌های مفید برای بیابان‌زایی در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها نیاز به نظارت و تهیه نقشه دارند، زیرا پیامدهای ناشی از آن برای محیط‌زیست و مردم بسیار مضر هستند (Shit et al., 2015: 7). برای دستیابی به درک بهتر از مکانیزم و پیش‌بینی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی لازم است



شکل ۱: فرآیند و مکانیزم تشکیل آبکند در منطقه‌ی سنگانه‌ی کلات

Figure 1: The process and mechanism of gully formation in Sanganeh Kalat region

پایگاه نقشه‌های فرسایش آبکندی موجود را تهیه کنیم. از لحاظ فنی توپوگرافی، الگوی زهکشی، سنگ‌شناسی، بارندگی و کاربری اراضی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل زمین محیطی^۵ (GEF) در وقوع و رشد فرسایش آبکندی گزارش شده‌اند (Nazari Samani et al., 2010: 1535; McCloskey et al., 2016: 98). شناسایی و تهیه نقشه‌ی مناطق دارای خطر بالای فرسایش آبکندی، از اولین گام‌ها برای انجام عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک است. علاوه بر آن تهیه نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی و نقشه موقعیت مکانی رخساره‌های فرسایشی برای برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین بسیار مهم می‌باشد (Maleky and Miladi, 2012: 25; orkhazlo et al, 2016). با وجود این، تهیه نقشه‌ی آبکندهای موجود و تهیه نقشه‌ی حساسیت به فرسایش برای حفاظت آب‌و خاک و ارزیابی بین وقوع فرسایش آبکندی و عوامل زمین محیطی ضروری است (Lucà et al., 2011: 299). در زمینه‌ی موضوع این پژوهش، مطالعاتی صورت گرفته است که در اینجا به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. Farid Giglou & Ghazavi (2018) ضمن بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک آبکند و عوامل زمین محیطی حوضه بالادست آن بر گسترش فرسایش آبکندی در شمال استان اردبیل گزارش کرده‌اند که، گسترش طولی آبکند بیشتر تحت تأثیر مساحت پیرامون هر آبکند و درصد ماده آلی خاک بوده و افزایش مساحت حوضه آبخیز مشرف به آبکندها به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در گسترش طولی آن‌ها شناخته شد. Nasir et al (2017) تأثیر عوامل زمین محیطی بر شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی در سازندهای لسی استان گلستان را بررسی و بیان کردند که عوامل زمین محیطی در شکل‌گیری و گسترش فرسایش آبکندی در سازندهای لسی نقش مؤثری دارند. Asghari Saraskanroud (2017) در مطالعه‌ی خود در مورد تحلیل عوامل مؤثر در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی به این نتیجه رسیدند که شکل‌گیری

فرسایش خندقی در منطقه‌ی مورد مطالعه و گسترش آن تحت تأثیر عوامل اقلیمی از یک طرف که باعث ایجاد رواناب و تغییر در میزان نفوذپذیری و از طرف دیگر تحت تأثیر ویژگی‌ها و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه می‌باشد. (Rahmati et al (2016) ضمن مقایسه‌ی مدل‌های آماری دومتغیره^۶ جهت تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکنندی در منطقه‌ی چوار در استان ایلام گزارش کرده‌اند که نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکنندی تولیدشده توسط مدل نسبت فراوانی عملکرد خوبی با دقت (AUC=۷۸/۱۱ %) نسبت به روش‌های دیگر داشته است. محققان دیگری نیز اقدام به تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکنندی با روش‌های گوناگون کرده‌اند، به طوری که (Conoscenti et al (2014) از مدل رگرسیون لجستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، به منظور تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکنندی استفاده و اثر عوامل مختلف لیتولوژیکی، توپوگرافی و اداپیکي مؤثر بر فرسایش آبکنندی را بررسی کردند. نتایج بررسی (Achten et al (2008) با عنوان توزیع فضایی و آستانه‌های توپوگرافی فرسایش آبکنندی در جنوب غرب تانزانیا نشان داد آبکندها در همه‌ی واحدهای چشم‌انداز پراکنده‌اند و احداث جاده‌ها بر وقوع آبکندها تأثیر زیادی داشته است. حوضه آبخیز سنگانه‌ی کلات به‌عنوان یک منطقه‌ی مستعد ابتلا به فرسایش آبکنندی انتخاب گردید. دلیل این انتخاب غالب بودن فرسایش آبکنندی و شاخص بودن آبکندها و ایجاد مشکل در زیر بخش‌های کشاورزی، مسکونی و تخریب اراضی است. شکل (۲)، تصاویری از آبکندهای شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. هدف از انجام پژوهش حاضر، تهیه نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکنندی و تأثیر عوامل زمین محیطی بر وقوع فرسایش آبکنندی می‌باشد. اهداف مشخص این پژوهش شامل: (۱) ارزیابی تأثیر عوامل زمین محیطی در وقوع فرسایش آبکنندی و (۲) ارزیابی دقت مدل احتمالاتی شرطی در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکنندی (CP) که مناطق حساس به فرسایش آبکنندی را شناسایی می‌کند. اندازه‌گیری دقیق موقعیت آبکندها با استفاده از مطالعات میدانی همراه با اجرای روش تحلیل حساسیت برای ارزیابی مشارکت عوامل زمین محیطی در وقوع فرسایش آبکنندی از نوآوری‌های این پژوهش است. در منطقه‌ی مورد مطالعه این نوع فرسایش باعث تخریب اراضی بسیاری گردیده و با جاری شدن رواناب و سیل، حجم قابل توجهی از رسوبات را به دنبال دارد که این امر باعث غیرقابل استفاده شدن اراضی شده است. به نظر می‌رسد دستیابی به اهداف فوق کمک بسیار زیادی به تعیین راه‌کارهای کنترلی و اجرای موفقیت‌آمیزتر پروژه‌های حفاظت آب‌و خاک نماید.

محدوده مورد مطالعه

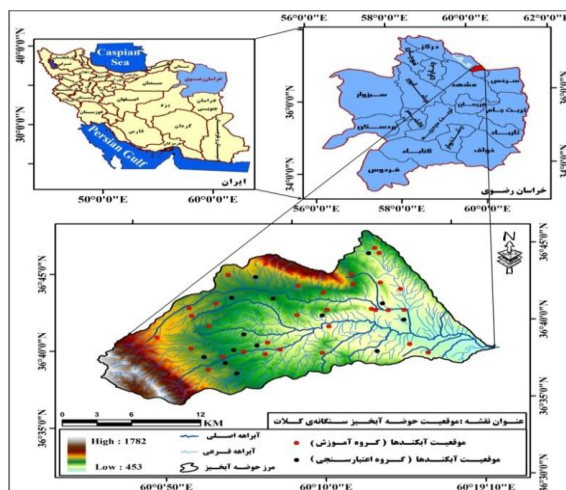
حوضه‌ی آبخیز سنگانه به‌عنوان یکی از مناطق شاخص فرسایش آبکنندی در قسمت شمالی استان خراسان رضوی واقع گردیده است. به لحاظ موقعیت جغرافیایی این حوضه در ۵۶° ۵۷' تا ۵۷° ۲۰' طول شرقی و ۱۴° ۲۷' تا ۱۴° ۳۶' عرض شمالی قرار دارد و مساحت این حوضه ۳۶۳/۸۰ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۳). حوضه آبخیز سنگانه در ۱۲۰ کیلومتری شمال شرق مشهد و در نوار مرزی ایران و ترکمنستان قرار داشته



شکل ۲: تصاویری از آبکندهایی که در منطقه مورد مطالعه رخ داده است؛ آبکندها برای زیرساخت‌های انسانی (آنتروپوژنیک) مانند جادها و ساختمان‌ها (A-C) و زمین‌های کشاورزی (D) خطرناک هستند.

Figure 2: Pictures of gullies that occurred in the study area; gullies are dangerous to human infrastructure (anthropogenic) such as roads and buildings (A-C) and agricultural land (D).

و در حوضه‌ی آبخیز قره‌قوم واقع شده است. متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا ۸۳۳ متر و میانگین دمای سالانه آن برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ضریب دومارتن آن برابر ۱۰/۲ است که با متوسط بارندگی سالانه ۲۵۷ میلی‌متر در اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار می‌گیرد (Bashari et al., 2012: 135). خاک‌های منطقه در گروه خاک‌های فلات‌ها بوده و در رده آنتی‌سول^۷ و اریدی‌سول^۸ قرار دارد (Rangavar et al., 2007: 17). بافت خاک سطحی نیز لومی-شنی می‌باشد (Sadeghi et al, 2008: 235). محدوده مورد مطالعه از نظر تقسیمات زمین‌شناسی جزو پهنه ساختاری رسوبی کپه داغ در شمال شرق ایران می‌باشد. سازندهای رخنمون یافته در گستره مورد مطالعه در شکل (۵a) قابل مشاهده است.



شکل ۳: موقعیت منطقه مورد مطالعه.

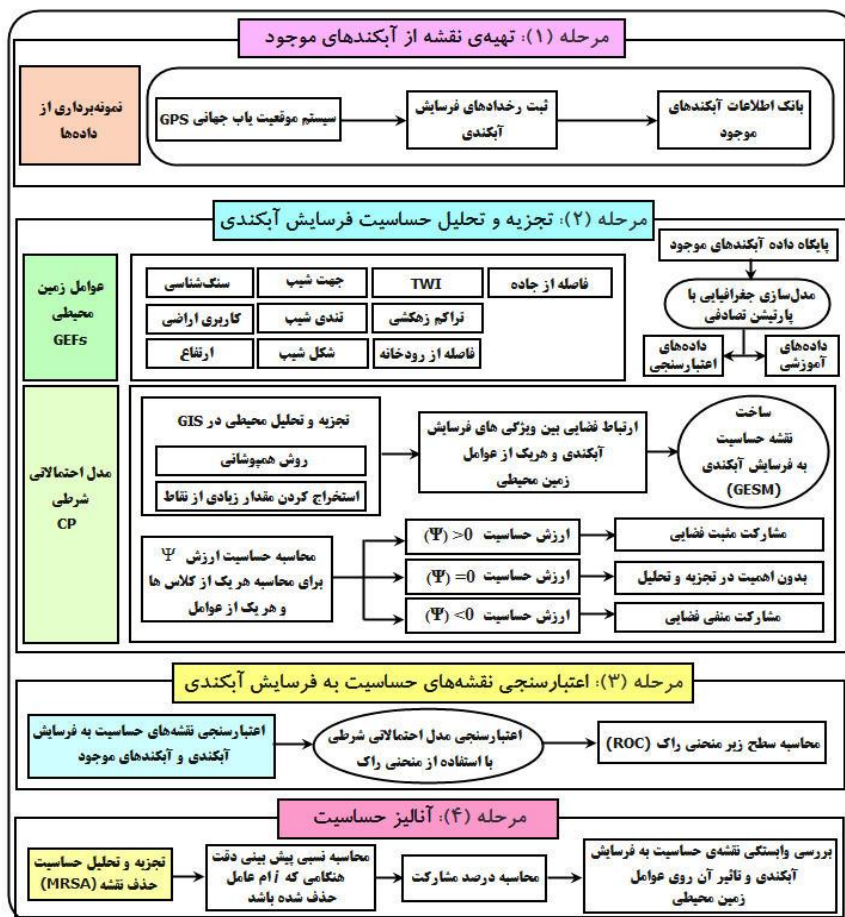
Figure 3: Location of the study area.

7- Entisols

8- Aridisols

مواد و روش‌ها

رویکرد این پژوهش شامل چند مرحله اصلی بود: (۱) تهیه نقشه از آبکندهای موجود، (۲) تجزیه و تحلیل حساسیت به فرسایش آبکندی، (۳) اعتبارسنجی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی و (۴) تحلیل حساسیت. روش کار در این پژوهش در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: روش کار مورد استفاده در این پژوهش

Figure 4: Methodology flowchart used in this study

تهیه نقشه‌ی آبکندهای موجود

برای تهیه نقشه‌ی فرسایش آبکندی دقیق و قابل اعتماد، بررسی‌های میدانی گسترده در منطقه‌ی مورد مطالعه انجام گرفت و موقعیت مکانی هر آبکندها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^۹ (GPS) گارمین مدل (Garmin 76CSX) ثبت شد. سپس آبکندهای شناسایی شده در مرحله‌ی قبل با استفاده از الحاقیه^{۱۰} استراتژی نمونه‌برداری

9- Global Positioning System

10- Extensions

تصادفی نقاط برداری در نرم‌افزار ArcMap10.5 به دو گروه داده‌های آموزش (۷۰٪) و اعتبار سنجی (۳۰٪) تقسیم شدند.

تجزیه و تحلیل حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل احتمالاتی شرطی (CP)

مدل احتمالاتی شرطی (CP) یک رویکرد مبتنی بر قانون بیز^{۱۱} است که توسط (Van Bonham-Carter 1994) و (Asselen and Seijmonsbergen 2006) به صورت ریاضی به آن اشاره شده است. مدل احتمالاتی شرطی اندازه‌گیری شانس یک فرضیه درست یا غلط با توجه به شواهد (شناخته شده به عنوان روش نسبت ورودی احتمال) می‌باشد. که هدف آن شناسایی درجه نفوذ هر عامل زمین محیطی بر وقوع فرسایش آبکندی است. مدل احتمالاتی شرطی را می‌توان برای حل مسائل تصمیم‌گیری عدم قطعیت‌ها (زمانی که وزن‌ها بر اساس توسعه فضایی فرسایش آبکندی در نقشه‌های عوامل زمین محیطی به عنوان شواهد در نظر گرفته شود) مورد استفاده قرار داد (Regmi et al., 2013: 739). مدل احتمالاتی شرطی بر مبنای یک قاعده از قانون بیز است که می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$P(A|B) = \frac{(P(B|A) \times P(A))}{P(B)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه؛ $P(A|B)$: احتمال وقوع رخداد A است در صورتی که رخداد B قبلاً رخ داده باشد. و $P(B|A)$ ، $P(A)$ و $P(B)$ به ترتیب احتمال رخداد B در صورتی که رخداد A اتفاق افتاده باشد، احتمال رخداد A و احتمال رخداد B می‌باشد. از دیدگاه آماری $P(A)$ احتمال قبلی^{۱۲} و $P(B)$ احتمال بعدی^{۱۳} است. در ارزیابی فرسایش آبکندی، قضیه‌ی بیز احتمال وجود یک منطقه را برای ویژگی توسعه فرسایش آبکندی با توجه به شرایط زمین محیطی تعیین می‌کند. همان‌طور که در معادله شماره (۲) دیده می‌شود (Chung and Fabbri, 1988):

$$P(A_G | \{V_0(a), V_1(a), \dots, V_m(a)\}) = \frac{P(\{V_0(a), V_1(a), \dots, V_m(a)\} | A_G) \times P(A_G)}{P(V_0(a), V_1(a), \dots, V_m(a))} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه؛ A_G نشان می‌دهد که یک آبکنند در منطقه A در یک واحد α یک نقشه رخ خواهد داد. که $\{V_0(\alpha), V_1(\alpha), \dots, V_m(\alpha)\}$ عوامل زمین محیطی شناخته شده هستند. این معادله نشان می‌دهد که احتمال اینکه یک واحد نقشه α در منطقه مورد مطالعه توسط فرسایش آبکندی تحت تأثیر قرار گیرد، برابر با احتمال فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه است. $P(A_G)$: ضریب احتمال ترکیب معینی از عوامل زمین محیطی (GEFs) با توجه به حضور یک آبکنند، تقسیم‌بر احتمال همان ترکیبی از عوامل زمین محیطی در کل منطقه مورد مطالعه است. در پژوهش حاضر، مدل احتمالاتی شرطی برای تجزیه و تحلیل حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از ۱۱ عامل ایجاد فرسایش آبکندی ذکر شده در بخش قبلی مورد استفاده قرار گرفت. در تجزیه و تحلیل حساسیت به فرسایش آبکندی، کتراست استاندارد شده (Ψ) ارتباط کلی بین عوامل زمین محیطی و فرسایش آبکندی را نشان می‌دهد. در واقع مقدار

11- Bayes

12- Prior probability

13- Posterior probability

Ψ رتبه هر کلاس از هر یک از عوامل زمین محیطی است که بر وقوع فرسایش آبکندی تأثیر می‌گذارد. میزان حساسیت (Ψ) برای یک رابطه فضایی منفی، منفی و برای یک رابطه فضایی مثبت، مثبت است. درحالی‌که $\Psi = 0$ نشان می‌دهد که کلاس موردنظر از عوامل زمین محیطی برای تجزیه و تحلیل مهم نیست. برای هر یک از عوامل زمین محیطی وزن‌ها بر اساس Ψ محاسبه شد. که در این پژوهش معیار حساسیت معادله‌ی (۳) شناخته می‌شود:

$$\Psi = \frac{C}{\sigma} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این فرمول؛ C و σ به ترتیب وزن کنتراست و انحراف استاندارد می‌باشد. در جزئیات، تفاوت بین وزن مثبت و منفی، به‌عنوان کنتراست وزن تعریف می‌شود. در مدل احتمالاتی شرطی، مقدار σ را می‌توان توسط معادلات زیر محاسبه کرد (Bonham-Carter, 1994):

$$\sigma = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این فرمول؛ $S^2(W^+)$ و $S^2(W^-)$ به ترتیب واریانس وزن مثبت و منفی هستند و می‌توانند به‌صورت زیر تعریف شوند:

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N(B \cap A)} + \frac{1}{B \cap \bar{A}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N(\bar{B} \cap A)} + \frac{1}{\bar{B} \cap \bar{A}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

بعد از اعمال مدل احتمالاتی شرطی، کنتراست استاندارد شده (Ψ) هر یک از عوامل برای تهیه نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی^{۱۴} (GESM) از رابطه شماره (۷) استفاده گردید:

$$GESI = \sum_{R=1}^{R=n} \Psi \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این رابطه؛ GESI نشان‌دهنده حساسیت به فرسایش آبکندی می‌باشد.

اعتبارسنجی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی

در این پژوهش ۷۰٪ (۳۲ آبکند) از کل موقعیت مکان‌های فرسایش آبکندی برای تحلیل مدل احتمالاتی شرطی استفاده گردید و در ادامه ۳۰٪ باقی‌مانده (۱۴ آبکند) که در مرحله آموزش استفاده نشده‌اند، به‌عنوان گروه اعتبارسنجی انتخاب شدند. نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل احتمالاتی شرطی تولید گردید و دقت آن با استفاده از منحنی راک (ROC^{15}) ارزیابی گردید. تجزیه و تحلیل منحنی راک یک تکنیک جالب برای ارزیابی دقت کلی یک آزمون تشخیصی است (Williams et al., 2014: 171). سطح زیر منحنی (AUC^{16})، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع (وقوع آبکند) و عدم رخداد (عدم وقوع آبکند) است.

14- Gully Erosion Susceptibility Maps

15- Receiver Operating Characteristics

16- Area Under Curve

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 نقشه‌ی تهیه‌شده است. همبستگی کیفی - کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت (۱- ۰/۹، عالی؛ ۰/۸- ۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۷- ۰/۸، خوب؛ ۰/۶- ۰/۷، متوسط؛ ۰/۵- ۰/۶، ضعیف) است (Yesilnacar, 2005: 63).

آنالیز حساسیت

تجزیه و تحلیل حساسیت نقش مهمی را در روند مدل‌سازی ایفا می‌کند. زیرا این امر به درک اینکه چگونه نتایج مدل‌ها توسط ورودی‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد، کمک می‌کند. از لحاظ فنی، تجزیه و تحلیل حساسیت، نتایج را تحت شرایط مختلف اجزاء و پارامترهای مدل، برای شناسایی متغیرهای تعیین‌کننده کمک می‌کند. در مطالعات متعددی تجزیه و تحلیل حساسیت برای ارزیابی کمی اهمیت نسبی هر یک از عوامل زمین محیطی مورد استفاده قرار گرفته است (Chen et al., 2016: 27). در مدل‌سازی فضایی، تجزیه و تحلیل حساسیت حذف نقشه^{۱۷} (MRSA) توسط Lodwick (1990) مورد استفاده قرار گرفته است. این حساسیت نقشه نهایی را با حذف یک یا چند پارامتر از تجزیه و تحلیل حساسیت تعیین می‌کند. در سال‌های اخیر بسیاری از محققان از تجزیه و تحلیل حذف نقشه (MRSA) برای بررسی نقش عوامل محیطی ایجاد آبکنند استفاده کرده‌اند. بنابراین تجزیه و تحلیل حساسیت حذف نقشه برای ارزیابی اثرات عامل زمین محیطی بر دقت مدل احتمالاتی شرطی و شناسایی متغیرهای کلیدی تأثیرگذار بر وقوع فرسایش آبکندی انجام شده است. علاوه بر این، سهم اهمیت هر یک از عوامل زمین محیطی در عدم قطعیت خروجی‌های مدل، تعیین گردید. در روند تجزیه و تحلیل حساسیت حذف نقشه (MRSA) درصد مشارکت هر یک از عوامل زمین محیطی با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد:

$$PC = \frac{(AUC_{all} - AUC_i)}{AUC_i} \times 100 \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این فرمول؛ AUC_{all} و AUC_i نشان‌دهنده مقادیر AUC حاصل از مدل‌سازی فرسایش آبکندی با استفاده از همه عوامل زمین محیطی و مدل‌سازی در زمانی که نام عوامل زمین محیطی به ترتیب حذف شده باشد، می‌باشد.

یافته‌ها و بحث

عوامل زمین محیطی مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی

برای ساخت نقشه‌های حساسیت به فرسایش آبکندی دقیق، باید نقش عوامل مختلف زمین محیطی (GEFs) مورد بررسی قرار گیرد. بسیاری از مطالعات عوامل مهمی را که موجب فرسایش آبکندی می‌شود از قبیل توپوگرافی، سنگ‌شناسی، ژئوهیدرولوژی، ویژگی‌های خاک، کاربری/پوشش اراضی و فعالیت‌های انسانی را شناسایی کرده‌اند. در

این مطالعه انتخاب عوامل زمین محیطی بر اساس دسترسی به انواع داده و بر اساس بررسی پیشینه پژوهش‌ها در ارزیابی به فرسایش آب‌کندی انجام شده است (Conforti et al., 2011: 885; Rahmati et al., 2016: 1238). این عوامل شامل: سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی^{۱۸} (TWI)، تندی شیب^{۱۹}، ارتفاع، شکل شیب، جهت شیب و فاصله از جاده می‌باشد.

- سنگ‌شناسی

عامل سنگ‌شناسی به‌عنوان یک متغیر مهم در تجزیه و تحلیل مخاطرات محیطی شناخته می‌شود (Pourghasemi and Kerle, 2016: 189). ویژگی‌های سنگ‌شناسی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و خصوصیات سطح زمین در ارتباط است (Zhu et al., 2014). علاوه بر این، فرسایش آب‌کندی به شدت به ویژگی‌های سنگ‌شناسی و مواد سطح زمین وابسته است (Golestani et al., 2014: 134). لایه رقمی لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی به شماره‌های (NJ41-13 (سرخس)، NJ41-16 (مشهد)) در محیط ArcGIS 10.5 رقمی گردید. سازندهای رخنمون یافته منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل (5a) نشان داده شده است.

- کاربری اراضی

مدیریت استفاده از زمین تأثیر قابل توجهی بر روی پایداری شیب ژئومورفولوژی و وقوع آب‌کندها دارد (Amir-Ahmadi et al., 2014: 248). به‌طور کلی زمین‌های بایر و مناطقی با پوشش گیاهی کم بیشتر تحت تأثیر به فرسایش بوده و پوشش گیاهی به شدت عمل فرسایش و رواناب سطحی را کاهش می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر یک همبستگی منفی بین میزان فرسایش و تراکم پوشش گیاهی وجود دارد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از لایه رقمی سطح پوششی کشور که توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (۱۳۸۹)، تهیه شده است، استفاده گردید. انواع کاربری‌های اراضی در منطقه مورد مطالعه در شکل (5b) نشان داده شده است. به‌طور کلی کاربری اراضی رایج در منطقه مورد مطالعه مرتع نیمه‌مترکم می‌باشد. که ۱۹۲/۵۲ کیلومتر مربع، معادل ۵۲/۹۰ درصد از مساحت کل حوضه را در برمی‌گیرد.

شاخص‌های توپوگرافی

پارامترهای توپوگرافی نقش مهمی در تغییرات فضایی شرایط هیدرولوژی مانند نرخ تولید رواناب^{۲۰}، رطوبت خاک^{۲۱}، جریانات زیرسطحی^{۲۲} و پایداری شیب‌ها^{۲۳} دارند (Moore et al., 1991: 17). بنابراین عوامل اصلی

18- Topographic Wetness Index

19- Steepness

20- Runoff generation rate

21- Soil moisture

22- Subsurface flow

23- Slope stability

آب‌کندی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، تندی شیب و شکل شیب است. برای تهیه‌ی مدل ارتفاع رقومی (DEM^{۲۴}) از نقشه‌های رقومی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده گردید و مدل ارتفاع رقومی با اندازه شبکه سلولی ۲۵ × ۱۰ متر تهیه گردید. مدل ارتفاع رقومی به‌عنوان ورودی برای استخراج شاخص‌های توپوگرافی ذکر شده استفاده گردید. اطلاعات دقیق در مورد عوامل توپوگرافی (چگونگی ایجاد، طبقه‌بندی و تأثیر هر یک از آنها در شروع فرسایش آب‌کندی) در ادامه توضیح داده شده است:

- ارتفاع

ویژگی‌های توپوگرافی به‌طور عمده فرسایش آب‌کندی را کنترل و در نتیجه در تعیین توزیع فضایی آب‌کندها تأثیر دارند. 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 قابل توجهی دارد (Hosseinzadeh et al., 2009:32). به‌منظور بیان ارتباط بین عامل ارتفاع و فرسایش آب‌کندی رخ داده، نقشه‌ی سطوح ارتفاعی منطقه در ۵ کلاس مطابق شکل (۵c) تهیه گردید.

- جهت شیب

جهت شیب نیز به‌عنوان یک عامل بسیار مهم در تجزیه و تحلیل مخاطرات محیطی و تهیه نقشه‌های حساسیت در نظر گرفته می‌شود (Maharaj, 1993: 61; Umar et al., 2014: 128). جهت شیب به‌طور غیرمستقیم می‌تواند فرآیندهای فرسایش را از طریق عرضه‌ی نور خورشید^{۲۶}، تبخیر و تعرق، نگهداری رطوبت، نوع پوشش گیاهی و توزیع پوشش گیاهی تحت تأثیر قرار دهد (Agnesi et al., 2011: 17). نقشه جهت شیب در منطقه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 با استفاده از مدل ارتفاع رقومی (DEM) با اندازه‌ی شبکه‌ی سلولی ۱۰ × ۱۰ متر در ۹ کلاس مطابق شکل (۵d) ساخته شد.

- تندی شیب

تندی شیب به‌عنوان عامل توپوگرافی، اثر میزان، سرعت و پتانسیل فرسایش‌دهی رواناب را نمایش می‌دهد. تندی شیب باعث افزایش جریان و نیروی برشی آن شده و مطابق با آن فرسایش نیز بیشتر می‌شود. از این رو شدت رواناب عموماً در نتیجه افزایش شیب افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که عمل رسوب‌گذاری آغاز شده و جریان‌های روی یک دامنه در یک کانال معین (آبراهه، سطوح تمرکز جریان، کانال ترانس، آب‌کنند، چاله و ...) ادغام و متمرکز می‌شوند. جهت محاسبه تندی شیب از معادله زیر استفاده گردید:

24- Digital Elevation Model

25- Grid size

26 -Sunlight exposition

$$S = \left[\frac{0.43 + 0.30s + 0.043s^2}{6.613} \right] \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در این رابطه، S: تندی شیب و s: درصد شیب می‌باشد. نقشه‌ی تندی شیب در ۴ کلاس (۹/۴۴٪ <، ۲۲/۷۳٪ - ۹/۴۴٪، ۲۲/۷۳٪ - ۴۸/۲۸٪، ۴۸/۲۸٪ >) تهیه و به روش شکست طبیعی^{۲۷} طبقه‌بندی گردید (شکل ۵e).

- شکل شیب

اطلاعات مفید ژئومورفولوژی و توضیحات مورفولوژی زمین را می‌توان از طریق تجزیه و تحلیل شکل شیب تعیین کرد (Chaplot, 2013: 5; Tehrany et al., 2014: 337). به‌طورکلی، تأثیر شکل شیب بر وقوع فرسایش آبکندی از طریق واگرایی^{۲۸} یا همگرایی^{۲۹} آب در سرایشی جریان است (Conforti et al., 2011: 887). 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 (GIS) تعیین می‌شود. به‌طورکلی انحنای زمین بین مقادیر مثبت (محدب) و منفی (مقعر) در نوسان است (Maleki and Miladi, 2012). شکل شیب منطقه مورد مطالعه مطابق شکل (۵f) در ۳ طبقه‌ی محدب (انحنای شیب افقی زمین)، مقعر (انحنای شیب عمودی زمین) و صاف (بدون شیب) ترسیم گردید.

عوامل مرتبط با آب

عوامل مرتبط با آب شامل شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی و فاصله از رودخانه می‌باشد که اغلب برای ارزیابی فرسایش آبکندی مورداستفاده قرار می‌گیرد (Choi et al., 2008). اطلاعات دقیق در مورد عوامل مرتبط با آب (چگونگی ایجاد، طبقه‌بندی و تأثیر هر یک از آنها در شروع فرسایش آبکندی) در ادامه توضیح داده شده است:

- شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

شاخص رطوبت توپوگرافی به‌عنوان یک عامل مهم در ارزیابی پتانسیل فرسایش آبکندی شناخته شده است. فرسایش آبکندی زمانی رخ می‌دهد که سرعت جریان بیشتر از تنش برشی خاک^{۳۰} باشد و عمدتاً تابعی از پارامتر S می‌باشد که به سطح انرژی رو ناب سطحی مربوط است (Chaplot, 2013: 257). قدرت فرسایش رواناب از نظر سرعت جریان، پتانسیل تخلیه و ظرفیت حمل رسوب از طریق شاخص رطوبت توپوگرافی مدل‌سازی شد، که با توجه به رابطه‌ی (۱۰) تعریف می‌گردد.

$$TWI = \ln \left(\frac{S}{\tan \alpha} \right) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

- 27- Natural breaks
- 28- Divergence
- 29- Convergence
- 30- Soil shear stress

که در این رابطه؛ S: سطح ویژه حوضه آبخیز (به صورت مساحت اراضی بالادست عرض کنتور، تقسیم بر عرض کنتور تعریف می‌گردد) و α : شیب زمین (برحسب درجه) می‌باشد. برای تهیه این نقشه از نرم‌افزار سیستم تجزیه و تحلیل‌های خودکار زمین‌شناسی (SAGA GIS 2³¹) استفاده شد و از طریق طبقه‌بندی شکست طبیعی به ۴ کلاس تقسیم شد (شکل ۵g).

- تراکم زهکشی

بر اساس مطالعات (Tehrany et al., 2014) 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. برای محاسبه تراکم زهکشی از رابطه‌ی (۱۱) استفاده شد:

$$D = \frac{\sum L}{A} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

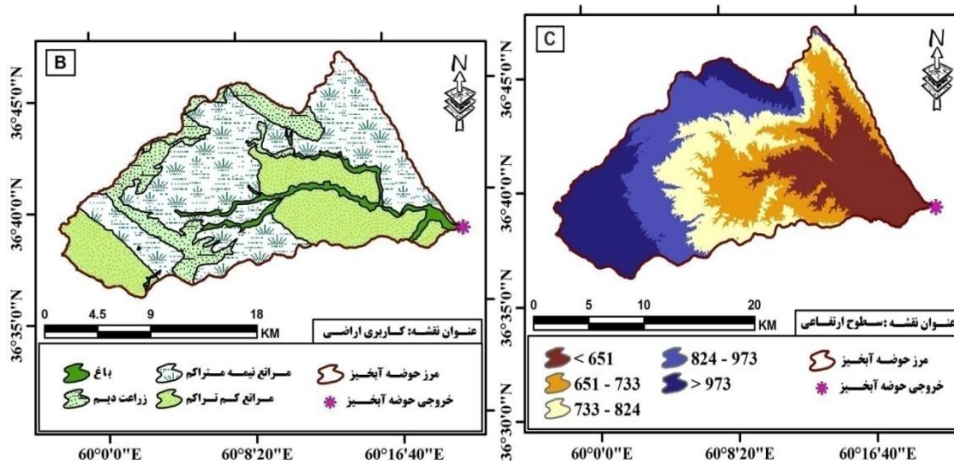
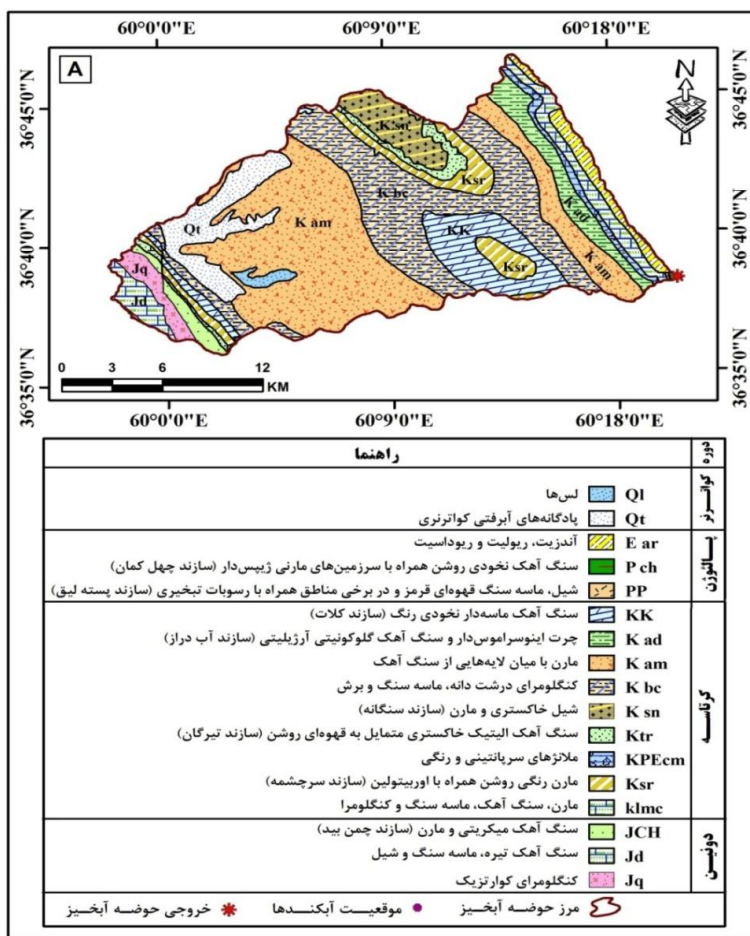
که در این رابطه؛ D: تراکم زهکشی (km/km^2)، $\sum L$: طول آبراه‌ها به کیلومتر و A: مساحت حوضه آبخیز به کیلومترمربع می‌باشد. به منظور تهیه نقشه تراکم زهکشی در منطقه مورد مطالعه، از ابزار خط فرمان تراکم در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استفاده شد و ارزش آن در ۴ کلاس مطابق شکل (۵h) طبقه‌بندی گردید.

- فاصله از رودخانه

در اغلب موارد آب‌کندها به شبکه جریان زهکشی مرتبط هستند که باعث سهیل تخلیه‌ی مواد فرسایش یافته از مناطق بالادست می‌شوند. به منظور بررسی تأثیر شبکه زهکشی، عامل فاصله از رودخانه در نظر گرفته شد. بنابراین، عملیات محاسبه فاصله از رودخانه در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 انجام و طبقه‌بندی آن به چهار دسته بر اساس طبقه‌بندی شکست طبیعی مطابق شکل (۵c) اعمال شد.

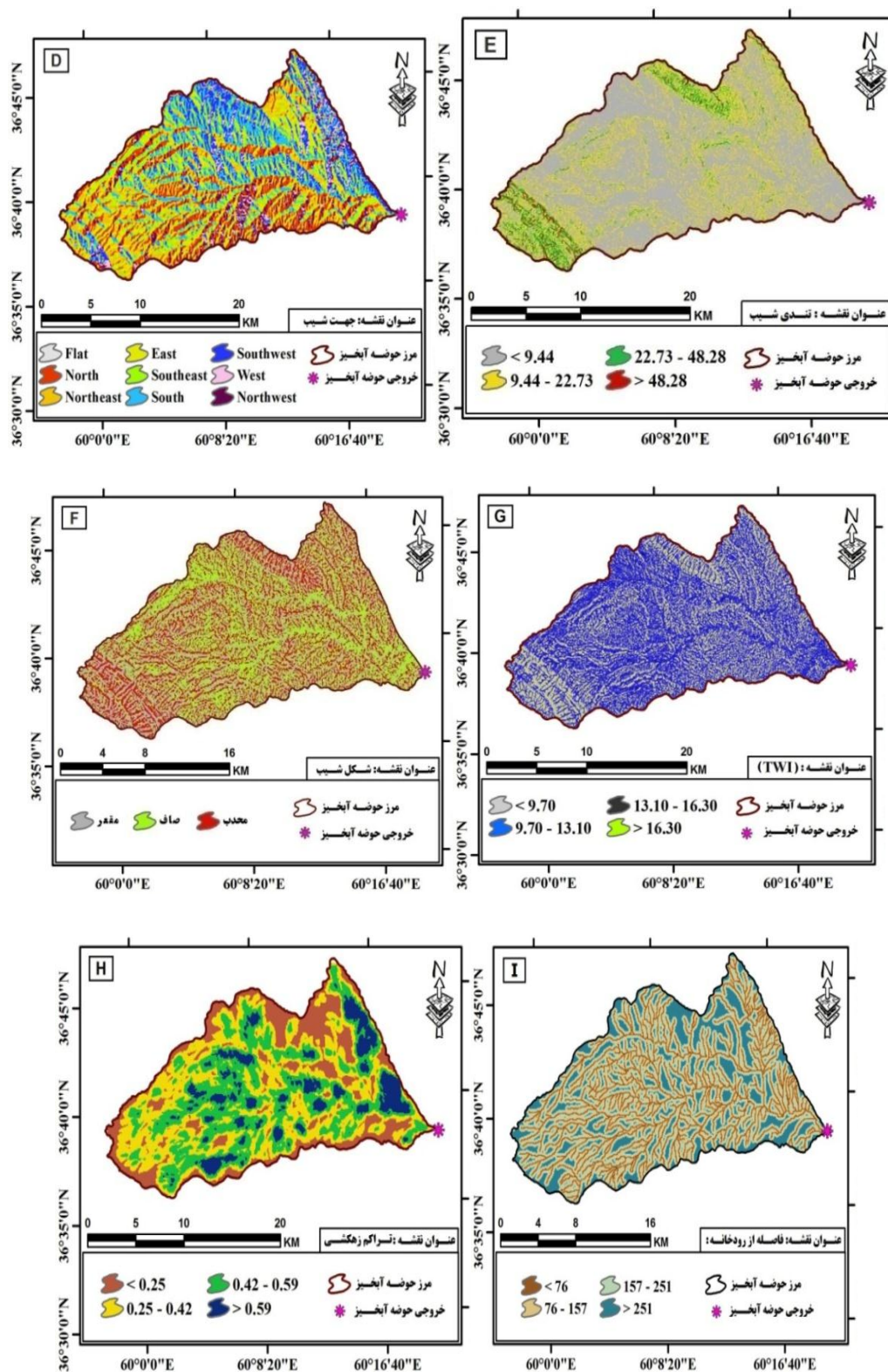
- فاصله از جاده

سیستم‌های زهکشی ضعیف در جاده‌ها یکی از دلایل فرسایش آب‌کندی است (Jungerius et al., 2002: 1239; Belayneh et al., 2014: 727; Shellberg et al., 2016: 119). از این رو عامل فاصله از جاده به عنوان یکی از عوامل ایجاد آب‌کندها انتخاب گردید. نقشه فاصله از جاده در چهار طبقه ۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۳۰۰ و ۳۰۰+ متر تهیه گردید (شکل ۵j). تمام عوامل زمین محیطی در ایجاد فرسایش آب‌کندی در یک شبکه بستری ۱۰×۱۰ متر جهت ایجاد مدل احتمالاتی شرطی (CP) تبدیل گردید.



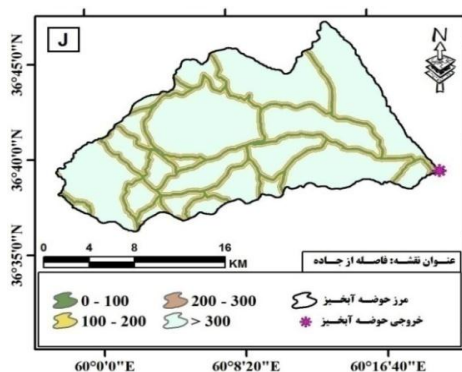
شکل ۵: عوامل ایجاد آبکندها: A: سنگ‌شناسی، B: کاربری اراضی، C: ارتفاع، D: جهت شیب، E: تندی شیب، F: شکل شیب، G: شاخص رطوبت توپوگرافی، H: تراکم زهکشی، I: فاصله از رودخانه، G: فاصله از جاده.

Figure 5: Gully conditioning factors): A: lithology, B: land use, C: altitude, D: slope aspect, E: slope steepness, F: plan curvature, G: Topographic Wetness Index (TWI), H: drainage density, I: distance from rivers, G: distance from roads.



ادامه شکل ۵: عوامل ایجاد آبکندها): A: سنگ‌شناسی، B: کاربری اراضی، C: ارتفاع، D: جهت شیب، E: تندای شیب، F: شکل شیب، G: شاخص رطوبت توپوگرافی، H: تراکم زهکشی، I: فاصله از رودخانه، G: فاصله از جاده.

Continue of figure 5): Gully conditioning factors): A: lithology, B: land use, C: altitude, D: slope aspect, E: slope steepness, F: plan curvature, G: Topographic Wetness Index (TWI), H: drainage density, I: distance from rivers, G: distance from roads .



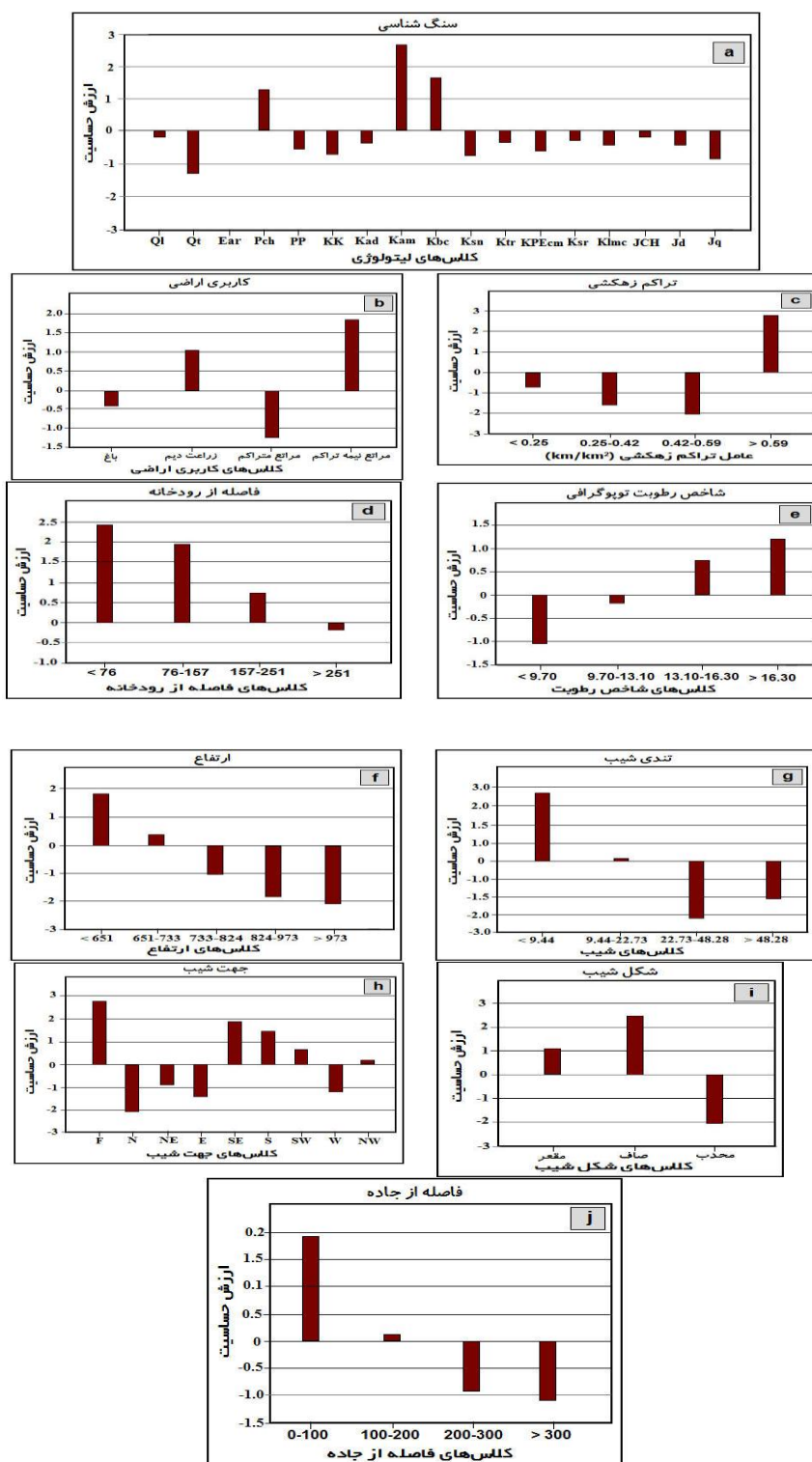
ادامه شکل ۵: عوامل ایجاد آبکندها): A: سنگ‌شناسی، B: کاربری اراضی، C: ارتفاع، D: جهت شیب، E: تندی شیب، F: شکل شیب، G: شاخص رطوبت توپوگرافی، H: تراکم زهکشی، I: فاصله از رودخانه، G: فاصله از جاده.

Continue of figure 5): Gully conditioning factors): A: lithology, B: land use, C: altitude, D: slope aspect, E: slope steepness, F: plan curvature, G: Topographic Wetness Index (TWI), H: drainage density, I: distance from rivers, G: distance from roads .

استفاده از مدل احتمالاتی شرطی برای تجزیه و تحلیل عوامل زمین محیطی

نتایج روابط فضایی بین ویژگی‌های فرسایش آبکندی و کلاس‌های هر یک از عوامل زمین محیطی با استفاده از مدل احتمالاتی شرطی در شکل (۶a-j) نشان داده شده است. در مورد عامل سنگ‌شناسی بالاترین ارزش‌های حساسیت برای سازندهای Kam (مارس بامیان لایه‌هایی از سنگ‌آهک) (+۲/۳۲) و پس‌از آن سازند Kbc (کنگلومرای درشت‌دانه، ماسه‌سنگ و برش) (+۱/۵۳) و سازند سنگ‌آهک، سازند چهل کمان (Pch) (+۱/۱۰) به دست آمد. درحالی‌که برای سایر واحدهای سنگ‌شناسی ارزش آن < 0 بود. به عبارت دیگر، رابطه بین ویژگی‌های فرسایش آبکندی و سنگ‌شناسی در سازندهای فوق‌الذکر بالا است. که نشان‌دهنده‌ی مناطقی است که در معرض فرسایش آبکندی قرار دارند (شکل ۶a). در مورد کاربری اراضی، تجزیه و تحلیل مدل احتمالاتی شرطی نشان داد که کاربری‌های مراتع نیمه متراکم و زراعت دیم دارای حساسیت بالایی به فرسایش آبکندی هستند، زیرا ارزش Ψ برای رابطه بین فرسایش آبکندی و عامل استفاده از زمین در کلاس‌های کاربری مراتع نیمه متراکم ($\Psi = +1/73$) و زراعت دیم ($\Psi = +1/10$) مثبت بود (شکل ۶b). علاوه بر این کلاس‌های باغ و مراتع متراکم وزن منفی را به ترتیب به دست آوردند که نشان‌دهنده تأثیر منفی آن‌ها بر فرسایش آبکندی است زیرا پوشش گیاهی می‌تواند سطح رواناب را کاهش دهد، بنابراین فرسایش آبکندی را کنترل کند. این نتایج با مطالعات قبلی که تأیید می‌کنند که، مناطقی که دارای پوشش گیاهی (مانند جنگل و مرتع) فرسایش کمتری را نسبت به مناطق کشاورزی تجربه می‌کنند (Shellberg et al., 2016). تجزیه و تحلیل تراکم زهکشی در مدل احتمالاتی شرطی نشان داد که ارزش حساسیت مثبت به میزان قابل توجهی در کلاس تراکم زهکشی $> 0/09 \text{ km}^2/\text{km}^2$ با ارزش (+۲/۸۸) و وزن منفی در کلاس‌های تراکم زهکشی $< 0/25$ ، $0/25 - 0/42$ و $0/42 - 0/59$ وجود دارد (شکل ۶c). برعکس، تراکم آبکندها در مناطقی که تراکم زهکشی کم است، پایین است. الگوی زهکشی همچنین به عنوان یک عامل مرتبط در پیش‌بینی موقعیت و مسیر آبکندها مورد توجه قرار گرفته است. در مورد فاصله از رودخانه، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از رودخانه، وقوع فرسایش آبکندی کاهش می‌یابد. ارزش Ψ در مناطقی که فاصله از رودخانه < 76 متر باشد، مثبت درحالی‌که طبقات

۱۵۷-۷۶ و ۲۵۱-۱۵۷ متر ارزش حساسیت کمتری را به دست آوردند (شکل ۶d). باین حال مقدار Ψ در مناطقی که فاصله تا رودخانه بیشتر از ۲۵۱ متر باشد کاملاً منفی است. جالب این است که حساسیت به فرسایش آبکندی عموماً با افزایش فاصله از رودخانه کاهش می‌یابد. تأثیر شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) در شکل (۶e) قابل مشاهده است. یک رابطه مثبت در کلاس $> 16/30$ و بین $13/10 - 16/30$ مشاهده شده است. علاوه بر این تجزیه و تحلیل احتمال شرطی شاخص رطوبت توپوگرافی و توسعه فرسایش آبکندی مقدار ارزش Ψ منفی را برای کلاس رطوبت توپوگرافی $0/70 <$ نشان داد. این نتیجه را می‌توان با رابطه بین شاخص رطوبت توپوگرافی و مناطق بالادست جریان و همچنین نقش توپوگرافی در فرسایش خاک توضیح داد. در نتیجه ارتباط معناداری بین وقوع آبکندها و شاخص رطوبت توپوگرافی (در رابطه با حجم رواناب) وجود دارد. مقدار Ψ برای ارتفاع بیانگر روابط معکوس بین فاکتور توپوگرافی و رخداد فرسایش آبکندی بود. این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که کلاس ارتفاع < 712 متر بیشترین مقدار ارزش Ψ را دارد ($\Psi = +3/19$) (شکل ۶f). بر اساس شکل (۶g)، یک همبستگی فضایی قوی بین توسعه فرسایش آبکندی و مناطقی با شیب ملایم وجود دارد. نقش مربوط به عامل تندی شیب در فرآیندهای فرسایش آبکندی با ارزش قابل توجهی ($\Psi = +2/75$) در کلاس تندی شیب $< 9/44$ تأیید شده است. این نتایج با یافته‌های گزارش شده توسط (Nazari samani et al (2009)، که به بررسی تأثیر شرایط آستانه‌ی توپوگرافی بر روند فرآیندهای فرسایش آبکندی در یک منطقه خشک در ایران پرداخته، مطابقت دارد. عامل جهت شیب نیز نقش مهمی در توسعه فرسایش آبکندی ایفا می‌کند در این مطالعه همچنین ارتباط معنی‌داری بین کلاس جهت شیب و ایجاد آبکندها وجود داشت ($\Psi \neq 0$). همبستگی معنی‌داری بین تراکم آبکندها و کلاس‌های مسطح ($\Psi = +2/80$) و جهت‌های جنوب، جنوب شرقی و جنوب غربی یافت شد (شکل ۶h). که نشان‌دهنده‌ی 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. در رابطه با شکل شیب ویژگی‌های شکل شیب به‌طور عمده‌ای در طبقه‌ی مسطح قرار دارد. نتایج نشان داد که کلاس شکل شیب صاف دارای بالاترین ارزش وزن مثبت ($\Psi = +2/48$) بوده و به دنبال آن کلاس مقعر ($+1/10$) قرار دارد (شکل ۶i). این نتایج مشابه گزارشات کانفورتی و همکاران (۲۰۱۱)، در حوضه توربو^{۳۲} ایتالیا که نشان داد که توسعه‌ی فرسایش آبکندی معمولاً در کلاس‌های مسطح و مقعر اتفاق می‌افتد، مطابقت دارد. عامل فاصله از جاده نیز رابطه معکوس حساسیت به فرسایش آبکندی را نشان داد (شکل ۶j). ارزش Ψ به‌طور قابل توجهی مثبت ($\Psi = +1/92$) در فاصله بین ۰ تا ۱۰۰ متر، نشان‌دهنده‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی بالا و فاصله بیشتر از > 300 متر نشان‌دهنده‌ی حساسیت پایین فرسایش آبکندی است. با توجه به اینکه جاده‌های مسطح باعث ایجاد سطح غیرقابل نفوذ و تغییر در کارکرد هیدرولوژیکی دامنه‌ها شده و کمک قابل توجهی به جریانات زمینی کرده و اجازه افزایش رواناب را فراهم می‌کند.

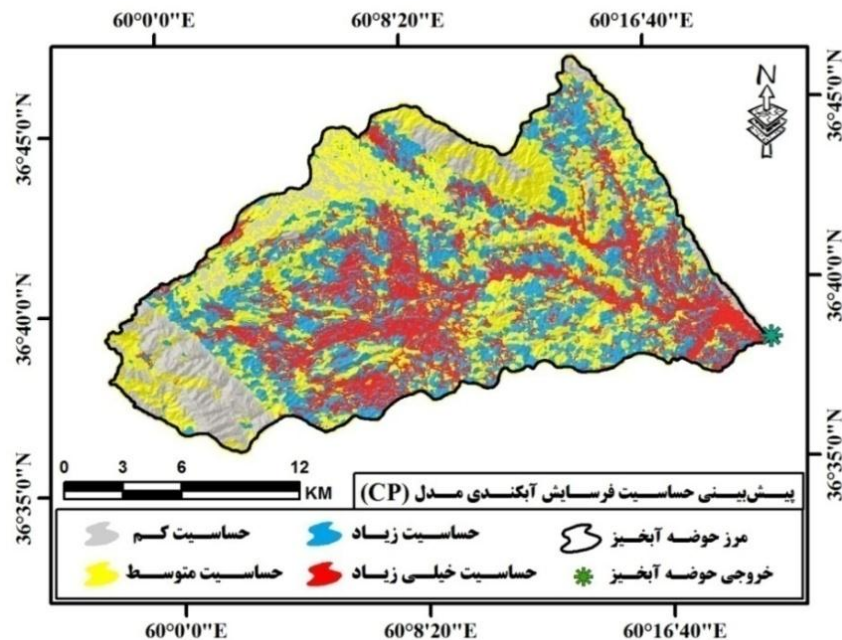


شکل ۶: ارزش حساسیت برای هر کلاس عوامل ایجاد آب‌بند: a: سنگ‌شناسی، b: کاربری اراضی، c: تراکم زهکشی، d: فاصله از رودخانه، e: شاخص رطوبت توپوگرافی، f: ارتفاع، g: تندی شیب، h: جهت شیب، i: شکل شیب، j: فاصله از جاده.

Figure 6: Gully susceptibility value for each class of conditioning factors): a: lithology, b: land use, c: drainage density, d: distance from rivers, e: Topographic Wetness Index (TWI), f: altitude, g: slope steepness, h: slope aspect, i: plan curvature, j: distance from roads.

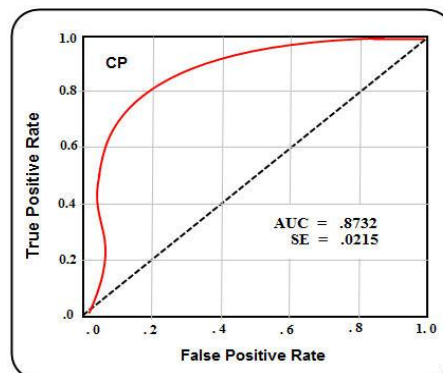
نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی و ارزیابی دقت

همان‌طور که در بخش روش‌شناسی توضیح داده شد نقشه‌ی پیش‌بینی فرسایش آبکندی حوضه آبخیز سنگانه‌ی کلات با استفاده از مدل احتمالاتی شرطی تولید و نقشه‌ی پیش‌بینی فرسایش آبکندی به چهار کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید (شکل ۷). از لحاظ بصری بیشترین حساسیت به فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز سنگانه‌ی کلات در قسمت مرکزی و بخش‌های شرقی مشاهده می‌شود، که در آن سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، عامل فاصله از رودخانه و کاربری اراضی با بیشترین ارزش حساسیت تأثیر زیادی در شکل‌گیری فرسایش آبکندی دارند. ارزش سطح زیر منحنی راک برای مدل احتمالاتی $87/32\%$ با انحراف استاندارد $0/0215$ برآورد گردید (شکل ۸).



شکل ۷: نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل احتمالاتی شرطی (CP).

Figure 7: Gully susceptibility maps produced based on a CP models.

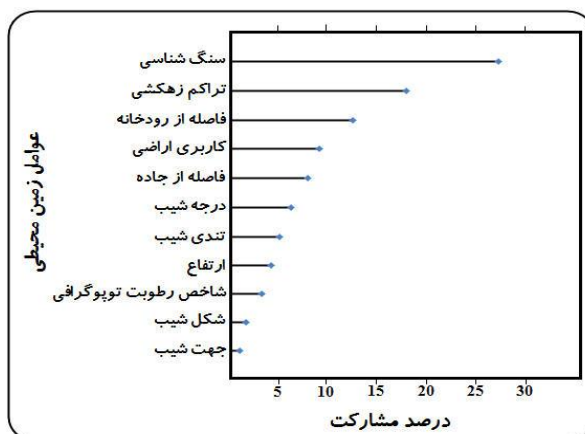


شکل ۸: منحنی راک و سطح زیر منحنی مربوط به دقت نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی به روش مدل احتمالاتی شرطی.

Figure 8: ROC curve and the area under the curve for the accuracy of the erosion susceptibility map by CP model.

تحلیل حساسیت

برای ارزیابی تأثیر عوامل زمین محیطی بر وقوع فرسایش آبکندی و بررسی عوامل ایجاد آبکند به منظور پیش‌بینی نتایج فرسایش آبکندی، تجزیه و تحلیل حساسیت به کار گرفته شد. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود سنگ‌شناسی (۲۶/۷۳٪= درصد مشارکت)، تراکم زهکشی (۱۸/۳۲٪= درصد مشارکت)، فاصله از رودخانه (۱۲/۳۸٪= درصد مشارکت) و عامل کاربری اراضی (۹/۴۷٪= درصد مشارکت) سهم قابل توجهی بر وقوع فرسایش آبکندی دارند. علاوه بر این عوامل فاصله از جاده، درجه شیب، تندی شیب، ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافی دارای حساسیت متوسط برای ایجاد به فرسایش آبکندی بودند. بالعکس عوامل شکل شیب (۱/۸۲٪= درصد مشارکت) و جهت شیب (۱/۱۰٪= درصد مشارکت) سهم مشارکت ناچیزی در پیش‌بینی حساسیت به فرسایش آبکندی داشتند. نتایج نشان می‌دهد که نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه بسیار حساس به عوامل سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، عامل فاصله از رودخانه و کاربری اراضی است.



شکل ۹: نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت متغیرها، زمانی که هر یک از عوامل در مدل احتمالاتی شرطی حذف شده باشد.

Figure 9: Sensitivity analysis results of variables when each factor is excluded in CP model.

نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل‌های حاصل از مدل راک نشان داد که مدل احتمالاتی شرطی مورد استفاده در این مطالعه نتایج بسیار خوبی با دقت ۸۷/۳۲ برای تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آبکندی در منطقه‌ی مورد مطالعه داشته است. با توجه به اینکه مدل احتمالاتی شرطی بر اساس وقایع آبکندی گذشته و محاسبه احتمال شرطی نقشه‌ی پیش‌بینی مناطق مستعد به فرسایش آبکندی را نشان می‌دهد، میزان عدم قطعیت آن پایین بوده و نتایج به دست آمده از آن مفید و قابل اعتماد می‌باشد. نتایج حاصل از تعیین وزن پارامترها نشان داد که عوامل زمین محیطی دارای میزان مشارکت متفاوت در وقوع فرسایش آبکندی هستند. همچنین نتایج آنالیز حساسیت گویای این واقعیت است که یک رابطه‌ی مهم بین وقوع فرسایش آبکندی و عوامل سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، عامل فاصله از رودخانه و کاربری اراضی در

رابطه با حساسیت به فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه وجود دارد و توجه به آنها در مدیریت و حفاظت خاک منطقه حائز اهمیت است. یافته‌های این پژوهش برای نظارت بر فرسایش آب‌کندی معتبر بوده و نقشه‌ی حساسیت به فرسایش آب‌کندی می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را برای درک مکانیزم‌های فرسایش آب‌کندی ارائه دهد.

References

- 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*, 52(2): 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*, 17:15-20.
- Amir-Ahmadi, A., Ebrahimi, M., Habibolahian, M., Zangeneh Asadi, M.A., (2014), "A study of the Instability of the Geomorphologic Range using Anbalang Method (Case study: Kalat Basin in the heights of Hezar Masjed)", *Geographical Research Journal*, 29(4): 241-259. [In Persian].
- Asghari Saraskanroud, S., (2017), Analysis of affecting factors on creating gully erosion, *Geographical Space*, 17 (2): 285-301. [In Persian].
- Bashari, M., Sadeghi, S.H.R., Rangavar, A., (2012), "Comparison of sediment yield at two north and south facing slopes using small plots", *Watershed Engineering and Management*, 3: 134-140. [In Persian].
- Belayneh, L., Bantider, A., Moges, A., (2014), "Road construction and gully development in Hadero Tunto-Durgi road project, Southern Ethiopia", *Journal of Environmental Studies and Management*, 7(1): 720-730.
- Bonham-Carter, GF., (1994), "Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS", In: Bonham-Carter F (ed), *Computer methods in the geosciences*, Pergamon pub: Oxford.
- Chaplot, V., (2013), "Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion", *Geomorphology*, 186:1-11.
- Charlton , Ro., (2017), *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*, Translated by Mehdi Saghafi and Mohammad Hussein Rezaei Moghaddam, samt pub. [In Persian].
- Chen, Z., Chen,W., Li, C., Pu, Y., Sun, H., (2016), "Effects of polyacrylamide on soil erosion and nutrient losses from substrate material in steep rocky slope stabilization projects", *Science of the Total Environment*, 554: 26-33.
- 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*, 67(2): 251-258.
- Chung, C.J.F., Fabbri, A.G., (1988), "Three Bayesian predictionmodels for landslide hazard", Proceedings of International Association for Mathematical Geology 1998 Annual Meeting (IAMG'98), October 1998, Ischia, Italy.pp.81-100.
- Conforti, M., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G., Scarciglia, F., (2011), "Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (northern Calabria, Italy)", *Natural hazards*, 56(3): 881-898.
- Farid Giglou, B., Ghazavi, R., (2017), "The role of physicochemical characteristics of gully soil and environmental factors of its upper-catchment area in the expansion of gully erosion", *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 3(3): 273-286. [In Persian].
- Golestani, G., Issazadeh, L., Serajamani, R., (2014), "Lithology effects on gully erosion in Ghoori chay watershed using RS & GIS", *Journal Bioscience*, 4(2): 71-76.

- Hosseinzadeh, M.M., Sarvati, M.R., Mansori, A., Mirbaghari, B., Khazri, S., (2009), "Zoning the risk of mass movement occurrences using logistic regression model Case Study in vicinity of Sanandaj- Dehgolan road", *Iranian Journal of Geology*, 11(3): 27-37. [In Persian].
- Jungerius, P.D., Matundura, J., Van-De-Ancker, J.A.M., (2002): "Road construction and gully erosion in West Pokot, Kenya", *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(11): 1237-1247.
- Lodwick, W.A., Monson, W., Svoboda, L., (1990), "Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis", *International Journal of Geographical Information System*, 4(4): 413-428.
- Lucà, F., Conforti, M., Robustelli, G., (2011), "Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: northern Calabria, South Italy", *Geomorphology*, 134: 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*, 34(1-2): 53-79.
- Maleki, A., Miladi, B., (2012), "Simulation of creating of gully appropriate regions using SPI in river basins Merag", *Quantitative Geomorphological Researches*, 3(1): 23-38. [In Persian].
- McCloskey, G.L., Wasson, R.J., Boggs, G.S., Douglas, M., (2016), "Timing and causes of gully erosion in the riparian zone of the semi-arid tropical Victoria River, Australia: management implications", *Geomorphology*, 266: 96-104.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R., (1991), "Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications", *Hydrological Processes*, 5(1): 3-30.
- Nasir, K., Ghoddosi, J., Esmaili, R., (2017), "Investigation of the effect of earth environmental factors on initiation and expansion of gully erosion by using geographical information system (Case study in Temer Ghareh Khozi, Kalaleh, Golestan Province)", *Journal of Watershed Management Research*, 15(1): 202-212. [In Persian].
- Nazari Samani, A., Ahmadi, H., Mohammadi, A., Ghoddousi, J., Salajegheh, A., Boggs, G., Pishyar, R., (2010), "Factors controlling gully advancement and models evaluation (Hableh Rood Basin, Iran)", *Water Resources Management*, 24(8): 1531-1549.
- Orkhzlo, H.S., Emami, H., Haqniya, Q.H., Esmali, A., (2016), "Comparison of two methods of hierarchical analysis and fuzzy logic for mapping the risk of gully erosion in three regions of the province", *Environmental Erosion Research Journal*, 21(1): 1-16. [In Persian].
- Posesen, J., Nachtorgale, J., Verstrac, G., (2003), "Gully erosion and environmental change: Importance and research needs", *Catena*, 50(2-4): 91-133.
- Pourghasemi H.R., Kerle, N., (2016), "Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran", *Environmental earth sciences*, 75(3):185-221.
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., Noormohamadi, F., (2016), "Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison", *Natural Hazards*, 82(2): 1231-1258.
- Rangavar, A.S., Abasi, A., Zagiabadi, M., (2007), "Gully erosion and assess the economic damage caused by it (Case study: Sanganeh Kalat Basin, Khorasan Razavi)", 4th National Seminar on Watershed Management, 1-2 March 2008, Faculty of Natural Resources at University of Tehran. [In Persian].
- 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*, 7(2): 725-742.

- Sadeghi, H.R., Bashari Seghaleh, M., Rangavar, A.S., (2008), "Comparing the sediment variation with hillside direction and plot length in storm wise soil erosion", *Journal of Water and Soil*, 22(2): 230-239. [In Persian].

- Shellberg, J.G., Spencer, J., Brooks, A.P., Pietsch, T.J., (2016), "Degradation of the Mitchell River fluvial megafan by alluvial gully erosion increased by post-European land use change, Queensland, Australia", *Geomorphology*, 266: 105-120.

- Shit, P.K., Paira, R., Bhunia, G., Maiti, R., (2015), "Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbheta block, West Bengal in India", *Modeling Earth Systems and Environment*, 10: 10-22.

- Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N., (2014), "Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weight-of-evidence and support vector machine models in GIS", *Journal of hydrology*, 512: 332-343.

- 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 Sumatra Province, Indonesia", *Catena*, 118: 124-135.

- Van-Asselen, S., Seijmonsbergen, A.C., (2006), "Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM", *Geomorphology*, 78 (3-4): 309-320.

- Williams, R.N., Souza, J., Jones, E.M., (2014), "Analysing coastal ocean model outputs using competitive learning pattern recognition techniques", *Environmental modelling and software*, 57: 165-176.

- Yesilnacar, E.K., (2005), "The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey", Ph.D Thesis, Department of Geomatics : University of Melbourne.

- 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*, 214(3): 128-138.

Abstract

Assessment of the Influence of Geo-Environmental Factors on the Initiation of Gully Erosion in Sanganeh Kalat Basin

Soil erosion is a significant environmental issue of common concern in the world today. Despite the importance of soil erosion in sustainable development goals in arid and semi-arid areas, the study of the geo-environmental conditions and factors influencing gully erosion occurrence is rarely undertaken. The main purpose of this study is to evaluate the environmental factors to Initiation the effective factors in the characterization of gully erosion at the Sanganeh Kalat Basin. We also aimed to apply a Conditional Probability (CP) model for establishing the spatial relationship between gullies and the Geo-Environmental Factors (GEFs). The gully erosion inventory map field surveying was randomly partitioned into two subsets: part 1 that contains 70% was used in the training phase of the CP model; part 2 is a validation dataset (30%) for validation of the model and to confirm its accuracy. Prediction performances of the CP model Receiver Operating Characteristics (ROC) curve methods, respectively. In addition, the influence of all GEFs on gully erosion was evaluated by performing a sensitivity analysis model. The validation area under the ROC curve for the CP model were 87.32%, respectively. Also, based on sensitivity analysis, lithology, drainage density, distance from river and land use represent significantly effects on the gully erosion occurrence.

Keywords: Gully Erosion, Geo-environmental Factors, Conditional Probability, Sanganeh Kalat