ارزیابی و اولویت‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های تراکم سطح و تاپسیس (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چنارلی، استان گلستان)

عیسی جوکار سرهنگی*: *دانشیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی و اجتمایی، دانشگاه مازندران، بابلسر*
طاهر صفرراد: *استادیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی و اجتمایی، دانشگاه مازندران، بابلسر*
مریم شطیت‌زاده: *کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱)
20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8

چکیده

فرسایش آبکندی یکی از اشکال پیشرفته و پررسوب فرسایش آبی است که به کاهش توان خاک و ایجاد محدودیت در کاربری اراضی منجر می‌شود و می‌تواند خطری برای سازه‌های مختلف باشد. هدف از پژوهش حاضر، تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های تراکم سطح و تاپسیس و مقایسهٔ میزان دقت آنها در حوضه آبخیز چنارلی واقع در استان گلستان است. برای اجرای این پژوهش، ابتدا موقعیت آبکندهای منطقه به کمک بازدیدهای میدانی و تصاویر گوگل ارث تعیین شد. از تعداد کل ۹۳ آبکند در منطقه، از ۶۴ آبکند برای مدل‌سازی و تهیهٔ نقشهٔ حساسیت و از ۲۹ آبکند برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. همچنین لایه‌های رستری جنس سنگ، ارتفاع، شیب، جهت دامنه، پوشش گیاهی و کاربری اراضی به‌عنوان متغیرهای اصلی مؤثر در فرسایش آبکندی منطقه، تهیه و طبقه‌بندی شد. از همپوشانی نقشه‌های عوامل مؤثر با نقشهٔ پراکنش آبکندها، تراکم سطح آن در طبقه‌های مختلف هر متغیر به دست آمد. ارزیابی نقشهٔ حساسیت فرسایش با استفاده از آبکندهای استفاده نشده در مدل‌سازی، بیانگر آن است که نقشهٔ تهیه شده با مدل تراکم سطح صحت بالایی ($p = 0.91$) دارد. در مرحلهٔ بعد به منظور اولویت‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی در سطح زیرحوضه‌ها، از مدل تاپسیس استفاده و متغیرهای مؤثر در هر زیرحوضه به کمک این مدل تعیین و اولویت‌بندی شد. بر این اساس، زیرحوضه‌های شمارهٔ ۲ و ۱ به ترتیب با ضریب نزدیکی ۰/۷۹۱ و ۰/۶۵۷، بالاترین حساسیت فرسایش را در منطقه دارد. نقشهٔ اولویت‌بندی مدل تاپسیس نیز با نقشهٔ حساسیت فرسایش آبکندی مبتنی بر مدل تراکم سطح به عنوان نقشهٔ مرجع مقایسه شد. محاسبهٔ ضریب تبیین (R^2) نشان داد که اولویت‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی در سطح زیرحوضه‌ها نیز کارایی معنی‌دار و مناسبی دارد ($R^2 = 0.6$)؛ از این‌رو، زیرحوضه‌های مذکور به‌عنوان نقطهٔ شروع برنامه‌های حفاظتی در اولویت قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: آبکند، پهنه‌بندی، ضریب تبیین، فرسایش خاک، مدل‌سازی.

* نویسنده مسئول: e.jokar@umz.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

۱ـ مقدمه

در طول سالیان سال، فعالیت‌های انسانی در محیط زیست مانند جنگل‌زدایی‌ها، کشاورزی فشرده و چرای بی‌رویهٔ دام اغلب به ایجاد فرسایش خاک توسط آب منجر شده‌است. فرسایش آبکندی از جمله این اشکال فرسایش است که خود به تخریب دائمی زمین، آسیب شدید به زمین‌های کشاورزی و مسیرهای ارتباطی منجر می‌شود (Mansur, 2014). فرسایش آبکندی چندین برابر فرسایش سطحی، رسوب تولید می‌کند که برای مخازن سدهای احداث شده، هدر رفتن خاک حاصلخیز و رسوب‌گذاری رودخانه‌ها بسیار مهم است (Poesen et al, 2003). با توجه به تنوع شرایط و عوامل مختلف در شکل‌گیری و گسترش فرسایش آبکندی، میزان آن از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر تغییر می‌کند (Sarvati et al, 2009). درک عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی، برای ارائه پیشنهادهای مدیریتی بر پایهٔ حفاظت زیستی و احیای پوشش گیاهی زمین‌های اطراف آبکند ضروری است (Tajari and Kardel, 2015). آبکندها در زمان شکل‌گیری جریان‌های موقتی می‌تواند مقدار رسوب زیادی را به مناطق پایین دست خود منتقل کند؛ از این‌رو، باید اقدامات مدیریتی شامل شناسایی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی، احیای پوشش گیاهی و مدیریت اقدامات انسانی به منظور پیشگیری و کاهش اثرات تخریبی آن انجام شود (Rahmati et al, 2017). منطقهٔ مورد مطالعه که در شمال شرقی استان گلستان قرار دارد، با تخریب جنگل‌های طبیعی و تبدیل آن به مراتع و مزارع و گسترش خاک لس در آن، مستعد فرسایش آبکندی است (شکل ۱). به منظور جلوگیری از گسترش این نوع فرسایش در منطقه، اجرای عملیات آبخیزداری ضروری است و چون اعتبارات محدود است بایستی برای اجرای این اقدامات به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها پرداخت.

پژوهش‌های زیادی در زمینهٔ فرسایش آبکندی صورت گرفته‌است تا بتوانند عوامل مؤثر در آن را شناسایی و روش‌های مختلف پیش‌بینی آن را ارزیابی کنند. Cebecauer and Hofierka (۲۰۰۷) با مطالعهٔ تغییرات کاربری اراضی در اسلواکی به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش آبکندی در زمین‌های دیم رهاشده نسبت به زمین‌های کشاورزی بیشتر است. همچنین در این پژوهش مشخص شد که زمین‌های اطراف پیشانی آبکند، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند. Boukheir و همکاران (۲۰۰۸) نیز در پژوهش خود دریافتند که عمق آبکندها برای مارن‌ها بیش از خاک رندزینا بوده‌است. Sarvati و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که شکل‌گیری و شدت گسترش فرسایش آبکندی در اراضی لسی منطقهٔ تحقیق، تابعی از شیب و جهت اراضی، سازند زمین‌شناسی، منابع اراضی، نوع خاک و تیپ گیاهی، نحوهٔ استفاده از اراضی و متوسط سالانهٔ ارتفاع رواناب سطحی است. Knapen and Poesen (۲۰۱۰)، به بررسی نقش مقاومت برشی خاک بر نقطهٔ شروع و ابعاد شیارها و آبکندها پرداختند. نتایج نشان داد که تشکیل شیارها و آبکندها تنها تحت‌تأثیر آستانهٔ توپوگرافی نیست و مقاومت برشی خاک، بر آغاز این کانال‌ها و ابعاد آنها نقش دارد. Momm و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی کارایی مدل‌های مختلف آستانه شیب ـ مساحت در تخمین مکان تشکیل آبکند پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مدل‌های مورد استفاده عملکرد مشابهی در این زمینه دارند. Maugnard و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی تغییرات زمانی و مکانی آستانه توپوگرافی شروع آبکندهای موقتی در بلژیک، به این نتیجه رسیدند که بین آستانهٔ توپوگرافی در زمان‌ها و مکان‌های متفاوت تفاوت‌های معناداری دیده می‌شود. Yasrebi و همکاران (۲۰۱۳) در شهرستان دره شهر با طبقه‌بندی هیجده آبکند بر اساس الگو، به مطالعهٔ آستانه توپوگرافی پرداختند. نتایج نشان داد که

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

آبکندهای پنجه‌ای بر اثر فرایند روان آب سطحی تشکیل شده‌اند و رابطهٔ آستانهٔ توپوگرافی آنها منفی است؛ درحالی‌که آبکندهای خطی و جبهه‌ای دارای آستانه توپوگرافی مثبت بوده و فرایندی غیر از روان آب سطحی باعث تشکیل آنها شده‌است. Daggupati و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی کارایی دو مدل شیب ـ مساحت و مدل فیزیکی جریان‌های سطحی آشفته برای تخمین مکان آبکندهای موقتی در امریکا پرداختند. این مدل، ورودی‌هایی مانند مساحت حوضه، زبری سطحی، شیب، تنش برشی بحرانی خاک و رواناب سطحی دارد. نتایج نشان داد که در نهایت، این دو مدل در تخمین مکان تشکیل آبکندها عملکرد یکسانی داشته‌اند. در تحقیقی دیگر، Mansur (۲۰۱۴) به بررسی فرسایش آبکندی در منطقهٔ داست سوهلیان[1] نیجریه پرداخت که در آن انواع جنگل‌زدایی‌ها به منظور صادرات بی‌رویهٔ چوب برای ایجاد شهرک‌های جدید، به تخریب زمین و فقیر شدن نوع خاک منجر می‌شد. نتایج نشان داد که تشکیل فرسایش آبکندی به از دست رفتن خاک به میزان دو تا سه کیلوگرم بر متر در سال منجر شده‌است. Rostamizad و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تعیین محل رخداد فرسایش آبکندی بر اساس آستانهٔ ژئومرفولوژیک و عوامل مؤثر بر آن در منطقهٔ چم ژاب دره شهر در استان ایلام پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقدار ضریب تبیین از ۰/۱۶۲ به ۱/۲۱۴ برای داده‌های کاربری اراضی کشاورزی افزایش یافته‌است. Shadfar (۲۰۱۶) با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، به بررسی فرسایش آبکندی در حوضهٔ طرود پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشتر مناطق تحت‌تأثیر فرسایش آبکندی به شیب کمتر از ده درصد، واحدهای سنگ‌شناسی Qt2 و EM و کاربری مرتع اختصاص دارد و ۲۲/۹۳ درصد از سطح حوضه در طبقهٔ خیلی زیاد فرسایش آبکندی قرار گرفته‌است. Sumner and Mararakany (۲۰۱۷)، به مقایسهٔ عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی در دو حوضه آبخیز آفریقای جنوبی پرداختند و نتایج نشان داد که بیشترین میزان فرسایش آبکندی به دلیل از بین رفتن پوشش گیاهی منطقه است. Khojeh و همکاران (۲۰۱۷)، تأثیر عوامل زمین محیطی بر شکل‌گیری و گسترش فرسایش آبکندی در منطقهٔ تمرقره قوزی استان گلستان را از طریق تجزیه و تحلیل چند متغیره بررسی کردند و دریافتند که عوامل زمین‌محیطی از قبیل طبقات ارتفاعی، شیب زمین، جهت دامنه، ارتفاع دامنه، بارندگی سالانه، واحدهای سنگی، تیپ اراضی و تراکم پوشش گیاهی، در گسترش فرسایش آبکندی در سازند لسی نقش مؤثری دارد. Nikpour و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیق خود با عنوان مورفومتری فرسایش آبکندی و عوامل مؤثر بر ایجاد و گسترش آن در جنوب غرب استان ایلام به این نتیجه رسیدند که عوامل اقلیمی، شیب و جهت شیب، زمین‌شناسی و تکتونیک از عوامل مهم و تأثیرگذار در گسترش فرسایش آبکندی منطقه است. Selkimaki and Gonzalez- Olabarria (۲۰۱۷) با استفاده از مشاهدات میدانی، اطلاعات موجود در اداره جنگل ملی اسپانیا و کاربرد مدل لجستیک، به بررسی وقوع فرسایش آبکندی در اراضی جنگلی کاتالونیا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مساحت‌های زهکشی‌شده با شیب تند، بافت ریز خاک، استفاده از زمین برای شهرسازی و ایجاد جاده به فرسایش آبکندی منجر می‌شود. Rezaei Moghaddam و همکاران (۲۰۱۹) با کمک مدل EGEM، به برآورد فرسایش ناشی از آبکندهای موقتی در حوضهٔ لنبران پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که بین پارامترهای اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از مدل، بالاترین ضریب همبستگی بین عمق، سطح مقطع، حجم و پهنای برآورد شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۸۴۹، ۰/۸۴۵، ۰/۸۱۸ و ۰/۸۱۴ وجود دارد. در تحقیقی دیگر، Rahmati و همکاران (۲۰۱۹)

[1] Duste Sohelian

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

به بررسی کارایی مدل بیشینه آنتروپی در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آبکندی در حوضه کشکان پل‌دختر پرداختند. آنها برای اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی تحقیق، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده کردند که بر اساس آن، نقشهٔ مناطق مستعد فرسایش آبکندی حاصل از مدل آنتروپی ۹۰/۷ درصد دقت داشت. Rowshanzamir (۲۰۲۰) در پهنه‌بندی حساسیت اراضی حوضهٔ مراغه به فرسایش آبکندی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصهٔ فازی به این نتیجه رسیدند که حدود ۸۷ درصد از آبکندهای گروه ارزیابی، در طبقات با حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند و رسوبات آبرفتی Qt1، اجزای واحد اراضی فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، خاک‌های T.H.X و کاربری مراتع ضعیف به عنوان عوامل اصلی، سپس به ترتیب طبقه شیب ۱۵ تا ۳۰ درصد، حداکثر بارش روزانهٔ ۷/۲۳-۴/۲۶ میلی‌متر، فاصلهٔ ۲۰۰ متر از آبراهه‌ها و جهت‌های غرب و جنوب، در ایجاد فرسایش آبکندی حوضه بیشترین تأثیر را داشته‌اند.

تاکنون تحقیقاتی که در آن از مدل تاپسیس استفاده شده‌است، اغلب برای برآورد میزان فرسایش خاک در یک حوضه (Gholami and Entezari, 2013 & Vulevic et al, 2015) یا ارزیابی عوامل مؤثر بر شدت فرسایش خاک (Jozi et al, 2015) بوده و کارایی این مدل در زمینهٔ مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش آبکندی مورد توجه قرار نگرفته‌است. در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی مدل تاپسیس ــ که از روش‌های مبتنی بر نظر کارشناسی است ــ از مدل تراکم سطح استفاده شد. مدل تراکم سطح، مدلی داده‌کاوی است که براساس رخدادهای فرسایش آبکندی در منطقهٔ مورد مطالعه، به تجزیه و تحلیل روابط بین عوامل مؤثر بر آن می‌پردازد و پیش از این برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از آن استفاده شد که در بین آنها Ebrahimi and Ilanloo (۲۰۱۶) و Ghobadi و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند مدل تراکم سطح از میان روش‌های به‌کار برده شده برای پهنه‌بندی نتایج مطلوب‌تری نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در زمینهٔ اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها به منظور اجرای پروژه‌های آبخیزداری در داخل کشور و خارج از آن تحقیقات کمی انجام شده‌است (Mohamadi, 2018)، هدف اصلی این پژوهش، تهیهٔ نقشهٔ حساسیت فرسایش آبکندی منطقه با استفاده از مدل تراکم سطح و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها به کمک مدل تاپسیس و ارزیابی کارایی آنهاست تا با شناسایی حوضه‌های حساس به فرسایش و تمرکز اقدامات اجرایی برنامه‌های حفاظتی در سطح مورد نیاز، از اتلاف وقت و سرمایه جلوگیری شود.

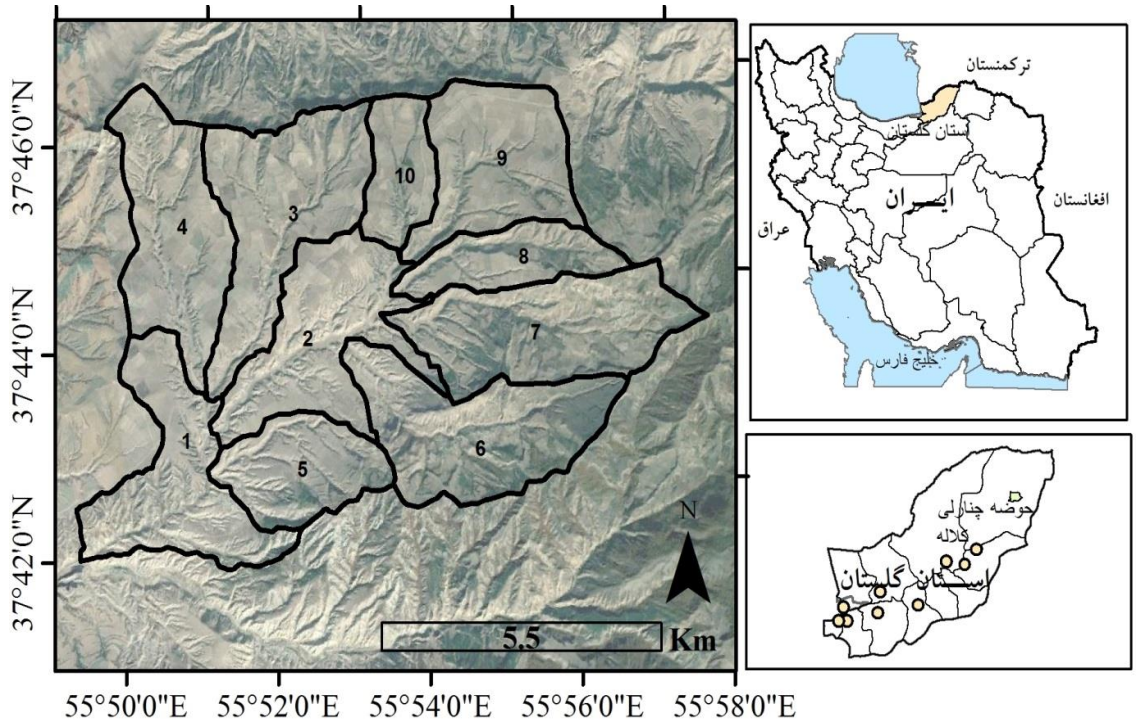


شکل ۱: نمونه فرسایش آبکندی در منطقهٔ مورد مطالعه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

حوضه آبخیز چنارلی، در شمال شرقی کلاله در استان گلستان واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا در حدود ۶۲۸ متر است. مهم‌ترین روستای منطقه، چنارلی نام دارد که میانگین سالانهٔ بارندگی آن حدود ۴۴۰ میلی‌متر است. شکل ۲، موقعیت جغرافیایی منطقه و زیر حوضه‌ها را در استان گلستان نشان می‌دهد.



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

۳ـ مواد و روش

در این پژوهش برای تهیهٔ نقشه‌های حساسیت فرسایش آبکندی از متغیرهای ارتفاع، شیب، جهت دامنه، جنس سنگ، پوشش گیاهی و کاربری اراضی استفاده شد. لایه اطلاعاتی واحدهای سنگ‌شناسی منطقه از نقشهٔ ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور و لایه‌های رستری ارتفاع، شیب و جهت دامنه از مدل رقومی ارتفاع (DEM) ۳۰ متری منطقه به دست آمد. نقشهٔ پوشش گیاهی و کاربری منطقه، از تصاویر لندست سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه شد. نقشهٔ پراکنش فرسایش آبکندی در منطقه نیز با برداشت‌های میدانی و به کمک تصاویر گوگل ارث تهیه شد که شامل ۹۳ آبکند است. از تعداد کل ۹۳ آبکند در منطقه، از هفتاد درصد آن برای مدل‌سازی و سی درصد آن برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. برای تعیین وزن طبقات عوامل مؤثر نیز از مدل تراکم سطح استفاده شد. این مدل ابتدا توسط Van Westen و همکاران (۱۹۹۷) بر اساس ارزیابی میزان تأثیر متغیرهای مستقل از قبیل جنس سنگ، شیب، کاربری اراضی و ... بر یک متغیر وابسته مثل ناپایداری دامنه‌ای ایجاد شد. در این پژوهش لایه‌های متغیرهای مستقل با لایهٔ پراکنش فرسایش آبکندی در محیط ArcGIS همپوشانی و تراکم آبکند در هر طبقه از عوامل محاسبه شد. مقادیر وزنی طبقات نیز با استفاده از رابطهٔ ۱ به دست آمد:

$$W_{area}= (A/B*100)- (C/D*100)$$ رابطهٔ ۱

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

که در آن، W_{area} وزن تراکم سطح، A تعداد پیکسل‌های آبکند در هر طبقه، B تعداد پیکسل‌های طبقه، C کل پیکسل‌های آبکند در منطقه و D کل پیکسل‌های منطقه است. برای محدوده‌هایی که فاقد آبکند بود، واریانس آن در نظر گرفته شد. برای اعتبارسنجی نقشهٔ حساسیت با مدل تراکم سطح، ۲۹ آبکندی که از آن استفاده نشد با این نقشه تلاقی داده شد و پراکنش آبکندها در طبقات مختلف حساسیت به دست آمد. در مرحلهٔ بعد با استفاده از رابطهٔ ۲، میزان دقت مدل تراکم سطح تعیین شد که در آن p احتمال تجربی، ks تعداد پیکسل‌های آبکند در طبقهٔ متوسط به بالا و s تعداد کل پیکسل‌های منطقه است.

$$p= ks /s$$ رابطهٔ ۲

به منظور اولویت‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی در سطح زیرحوضه‌ها، از مدل تاپسیس استفاده شد که یکی از معروف‌ترین مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است. در این مدل، m گزینه به وسیلهٔ n معیار، ارزیابی و به عنوان گزینه‌ای تعریف می‌شود که از نظر شباهت، دورترین حالت را از ایده‌آل منفی و نزدیک‌ترین حالت را به ایده‌آل مثبت دارد (Jun et al, 2013). در این پژوهش زیر حوضه‌ها به عنوان گزینه و عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی به عنوان معیار مدنظر قرار گرفت و مراحل زیر اجرا شد:

۱ــ برای تشکیل ماتریس اولیه، ابتدا داده‌های کیفی به داده‌های کمّی تبدیل شدند. در اندازه‌گیری یک مقیاس کیفی ممکن است از مقیاس‌های فاصله‌ای و رتبه‌ای (از چهار مقیاس موجود) استفاده شود (Asgharpour, 2013). در این پژوهش برای اندازه‌گیری و تبدیل واحدهای کیفی زمین‌شناسی، جهت دامنه و کاربری اراضی به کمّی، از مقیاس دوقطبی[1] فاصله‌ای استفاده شد. این اندازه‌گیری بر اساس یک مقیاس ده نقطه‌ای است؛ به طوری که صفر بیانگر حداقل ارزش ممکن و ده بیانگر حداکثر ارزش ممکن از شاخص مورد نظر است. ارزش‌های صفر و ده کمتر به کار می‌روند؛ زیرا به متغیر کیفی، مقدار مطلق می‌دهند. به هر یک از متغیرها با توجه به پراکنش آبکند در آنها و استفاده از مقیاس مذکور، امتیاز اختصاص یافته‌است. اعداد بزرگ‌تر در ماتریس تصمیم، بیانگر اهمیت بیشتر پارامترها در فرسایش آبکندی منطقه است.

۲ــ بی مقیاس‌سازی و از بین بردن تأثیر واحد به روش فازی. مقیاس اندازه‌گیری در بی مقیاس‌سازی فازی دقیقاً بین صفر و یک است؛ به طوری که صفر برای بدترین نتیجه و یک برای بهترین نتیجه است.

۳ــ به دست آوردن وزن هر یک از معیارها با استفاده از روش وزن‌دهی AHP.

۴ــ ضرب هر یک از این وزن‌ها به ماتریس بی مقیاس شده که در نتیجهٔ آن، ماتریس بی مقیاس موزون از طریق رابطهٔ ۳ به دست آمد:

$$V = N \times W_{n\times n}$$ رابطهٔ ۳

در این مرحله، ماتریس بی مقیاس شده به ماتریس قطری وزن‌ها ضرب شد.

۵ــ تعیین رابطهٔ ایده‌آل مثبت منفی از طریق رابطه‌های ۴ و ۵:

$\left(V_j^+\right)$ راه‌حل ایده‌آل مثبت =[بردار بهترین مقادیر هر شاخص ماتریس V] رابطهٔ ۴

[1] Bipolar-Scale

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

رابطهٔ ۵ [بردار بدترین مقادیر هر شاخص ماتریس V]= راه‌حل ایده‌آل منفی $\left(V_j^-\right)$

بهترین مقادیر برای شاخص‌های مثبت، بزرگ‌ترین مقادیر و برای منفی، کوچک‌ترین مقادیر است و بدترین بردار برای شاخص‌های مثبت، کوچک‌ترین مقدار و برای شاخص‌های منفی، بزرگ‌ترین مقدار است.

۶ ـ محاسبهٔ فاصلهٔ هر گزینه از آیده‌آل مثبت و منفی که از رابطه‌های ۶ و ۷ به‌دست آمده‌است.

رابطهٔ ۶

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^+\right)}$$

رابطهٔ ۷

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^-\right)}$$

۷ـ تعیین نزدیکی نسبی یک گزینه به راه‌حل ایده‌آل از طریق رابطهٔ زیر:

رابطهٔ ۸

$$CL^* = \frac{d_j^-}{d_j^- + d_j^+}$$

۸ ـ رتبه‌بندی و نزولی کردن هر گزینه بر اساس خروجی نزدیکی نسبی.

برای ارزیابی اعتبار نتایج این مدل، از خروجی مدل تراکم سطح ـ که اعتبارسنجی شده‌است ـ به عنوان نقشهٔ مرجع استفاده و ضریب تبیین (R^2) محاسبه شد. ضریب تبیین اندازه‌گیری آماری داده‌ها به خط رگرسیون برازش شده‌است که در این پژوهش، میزان تطابق و احتمال همبستگی میان نتایج حاصل از مدل تاپسیس با مدل تراکم سطح در منطقهٔ مورد مطالعه است. ضریب تبیین همیشه بین صفر و یک قرار دارد. صفر نشان می‌دهد که مدل، هیچ یک از تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین نمی‌کند و یک نشان می‌دهد که مدل همهٔ تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند (Asgharpour, 2013 & Sarai, 2019).

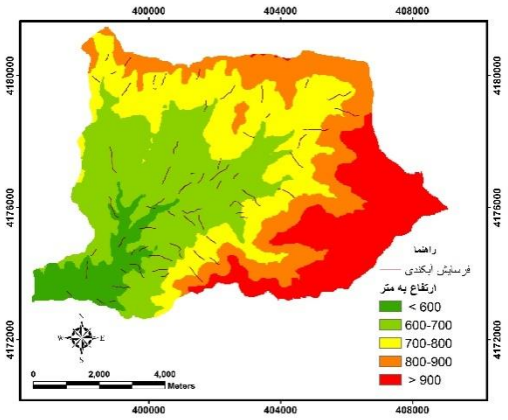
۴ـ یافته‌ها (نتایج)

در این پژوهش، فراوانی فرسایش آبکندی در منطقه از طریق تلفیق نقشه‌های عامل شامل ارتفاع، شیب، جهت دامنه، جنس سنگ، پوشش گیاهی و کاربری اراضی (شکل‌های ۳ تا ۷) با نقشهٔ پراکنش آبکندها در محیط ArcGIS شناسایی و مقادیر وزنی طبقات هر عامل با بهره‌گیری از مدل تراکم سطح محاسبه شد (جداول ۱ و ۲). اعداد مثبت وزن تراکم سطح، مربوط به پهنه‌هایی است که حساسیت بیشتری به فرسایش آبکندی دارند. از نظر ارتفاع، طبقهٔ کمتر از ۶۰۰ متر با وزن تراکم سطح ۱/۵۹ بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد. در کنار آن، طبقهٔ ارتفاعی ۶۰۰ تا ۸۰۰ متر نیز حساسیت بالایی دارد. اما با افزایش ارتفاع در منطقهٔ مورد مطالعه، با برون‌زدگی سنگی و پوشش گیاهی متراکم و در نتیجه کاهش حساسیت فرسایش آبکندی مواجه هستیم. بررسی شیب نشان می‌دهد که طبقه شیب کمتر از ده درصد با وزن تراکم سطح ۰/۸۵ و پس از آن طبقه شیب ۱۰-۲۰ درصد، بیشترین حساسیت به فرسایش آبکند را به خود اختصاص داده‌است. معمولاً آبکندها در زمین‌های با شیب کم اتفاق می‌افتند. در شیب‌های کم، فرصت نفوذ آب به داخل خاک و عمل انحلال و ایجاد حفره برای تشکیل آبکند بیشتر است. نتایج پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش آبکندی در حوضه زواریان توسط Maghsoudi و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان داد که بیشترین پراکنش آبکند در طبقه شیب ۰ تا ۱۰ درصد است.

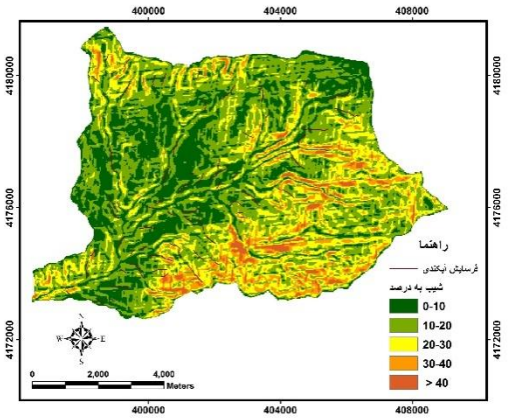
[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

جدول ۱: فراوانی آبکندها در طبقات مختلف ارتفاع و شیب و وزن تراکم سطح آنها

عوامل مؤثر	طبقه‌های عوامل مؤثر	تعداد پیکسل طبقه	تعداد پیکسل آبکند	وزن تراکم سطح
ارتفاع	< ۶۰۰	۶۶۴۱	۲۰۱	۱/۵۹
	۷۰۰-۶۰۰	۲۷۴۷۲	۵۴۷	۰/۵۵۴
	۸۰۰-۷۰۰	۲۳۱۵۳	۴۷۴	۰/۶۱
	۹۰۰-۸۰۰	۱۶۹۲۶	۷۹	-۰/۹۷
	> ۹۰۰	۱۶۳۳۵	۰	-۱/۴۳۷
شیب	۱۰-۰	۲۳۷۸۶	۵۴۵	۰/۸۵۴
	۲۰-۱۰	۳۸۷۹۸	۵۷۴	۰/۰۴۲
	۳۰-۲۰	۱۸۷۸۲	۱۵۴	-۰/۶۱۷
	۴۰-۳۰	۶۷۵۴	۲۴	-۱/۰۸۲
	> ۴۰	۲۴۰۷	۴	-۱/۲۷۱



شکل ۳: نقشهٔ پراکنش آبکندها در طبقات مختلف ارتفاع



شکل ۴: نقشهٔ پراکنش آبکندها در طبقات شیب

بررسی جهت دامنه نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت فرسایش آبکندی به ترتیب در جهت‌های غرب با وزن تراکم سطح ۰/۵۷ و جنوب با وزن ۰/۱۶- وجود دارد. تفاوت در آفتاب‌گیری جهات مختلف دامنه‌ها، شرایط دمایی متفاوت خاک و در نتیجه شرایط متفاوت هوا را به وجود می‌آورد. جهت‌های جنوبی و جنوب‌غربی گرم‌تر است (Kavyani and Alijani, 1997) و عوامل تخریب و فرسایش به صورت فعال‌تر عمل می‌کنند. نتایج تحقیق Nikpour و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان داد که بهترین جهت دامنه برای ایجاد و تحول فرسایش آبکندی در منطقهٔ مورد مطالعه یعنی استان ایلام، جنوب غرب بوده‌است. بررسی زمین‌شناسی نشان می‌دهد که سیلت‌های شیلی و مارنی سازند خانگیران با وزن تراکم سطح ۲/۳۶، بیشترین حساسیت را به فرسایش آبکندی دارد و پس از آن، رسوبات بادی یخچالی یعنی لس‌ها نیز حساسیت زیادی دارند. در زمینهٔ پوشش گیاهی و کاربری اراضی در منطقهٔ مورد مطالعه، بیشترین تراکم سطح آبکندها با وزن ۱/۲۷ در مراتع مشاهده می‌شود و پس از آن، مناطق زراعی نیز حساسیت زیادی به فرسایش آبکندی

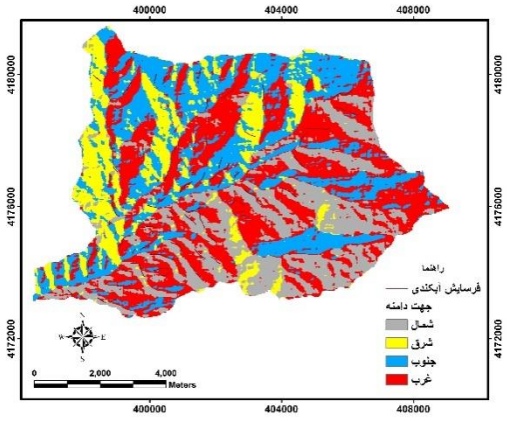
[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

دارند. Shadfar (۲۰۱۶) نیز در بررسی فرسایش آبکندی حوضهٔ طرود بیان کرد که کاربری مرتع بیشترین تـأثیر را در رخداد فرسایش آبکندی دارد.

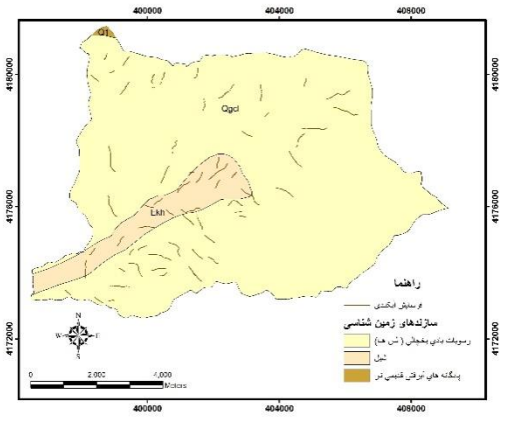
پس از محاسبهٔ وزن هر طبقه از عوامل تأثیرگذار بر رخداد آبکندها در منطقه، نقشه‌های وزنی مذکور ترکیب شد و نقشهٔ رستری حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل تراکم سطح تهیه شد (شکل ۸). نتایج به دست آمده از تهیـهٔ نقشهٔ نهایی مدل تراکم سطح، حاکی از آن است که ۱۱/۶۱ درصد از مساحت حوضه در طبقه حساسیت خیلی کم، ۲۳/۸۸ درصد در طبقه حساسیت کم، ۲۳/۰۳ درصد در طبقه حساسیت متوسط، ۲۵/۴ درصد در طبقه حساسیت زیاد و ۱۶/۱ درصد از مساحت حوضه در طبقه حساسیت خیلی زیاد قرار دارد.

جدول ۲: درصد آبکندها در طبقات مختلف جهت دامنه، زمین‌شناسی، و پوشش و کاربری اراضی

عوامل مؤثر	طبقه‌های عوامل مؤثر	تعداد پیکسل طبقه	تعداد پیکسل آبکند	وزن تراکم سطح
جهت دامنه	شمال	۲۱۳۳۸	۲۶۳	-۰/۲۰
	شرق	۱۳۲۱۱	۱۰۱	-۰/۶۷
	جنوب	۲۵۲۸۶	۳۲۲	-۰/۱۶
	غرب	۳۰۶۹۲	۶۱۵	۰/۵۷
زمین‌شناسی	پادگانه قدیمی	۱۶۶	۰	-۱/۴۴
	رسوبات لس	۸۲۶۷۲	۱۰۰۹	-۰/۲۲
	شیل و مارن	۷۶۹۲	۲۹۲	۲/۳۶
پوشش گیاهی و کاربری اراضی	جنگل طبیعی	۵۷۳۳	۰	-۱/۴۳۷
	جنگل کاری	۴۱۷۸	۲۷	-۰/۷۹۱
	زراعت	۵۵۶۴۶	۶۲۴	-۰/۳۱۶
	مراتع	۲۴۰۰۸	۶۵۰	۱/۲۷۰
	مناطق مسکونی	۹۶۴	۰	-۱/۴۳۷

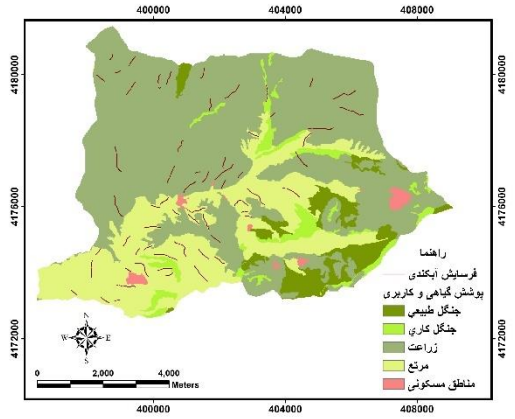


شکل ۵: نقشهٔ پراکنش آبکندها در طبقات جهت دامنه

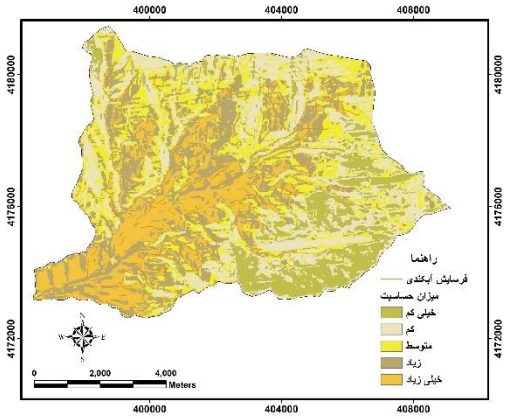


شکل ۶: نقشهٔ پراکنش آبکندها در طبقات زمین‌شناسی

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]



شکل ۷: نقشهٔ پراکنش آبکندها در انواع پوشش گیاهی و کاربری



شکل ۸: نقشهٔ حساسیت فرسایش آبکندی با مدل تراکم سطح

برای اولویت‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی در سطح زیرحوضه‌های منطقه، از مدل تاپسیس استفاده شد که برای این منظور، ابتدا حوضهٔ مورد مطالعه به ده زیر حوضه تقسیم شد، سپس امتیاز متغیرهای مؤثر ــ که همان متغیرهای مورد بحث در مدل تراکم سطح است ــ در هر یک از آنها به‌صورت جداگانه تعیین شد. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میانگین ارتفاع تمام زیر حوضه‌ها از ۱۰۰۰ متر کمتر است. زیر حوضه‌های ۷ و ۶ به ترتیب با میانگین ارتفاع ۹۳۲/۶ و ۸۹۹/۵ متر، بیشترین ارتفاع را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل، زیر حوضه ۱ که خروجی کل حوضه نیز محسوب می‌شود، با میانگین ارتفاع ۶۰۱/۹ متر کمترین ارتفاع را دارد. بررسی شیب نشان داد که میانگین شیب تمام زیر حوضه‌ها از ۲۵ درصد کمتر است. زیرحوضهٔ ۶ با میانگین ۲۴/۱ درصد، بیشترین شیب را به خود اختصاص داده‌است. در مقابل، زیر حوضهٔ ۲ با میانگین شیب ۱۱/۸۸ درصد کمترین شیب را دارد. اما همان‌طور که در روش تحقیق گفته شد، متغیرهای جهت دامنه، جنس سنگ و کاربری اراضی که به‌صورت کیفی است، با توجه به پراکنش آبکندها و استفاده از مقیاس دوقطبی فاصله‌ای به شاخص کمی تبدیل شدند. بر این اساس، امتیازدهی به جهت دامنه از ۴ تا ۷ بود که زیر حوضهٔ ۸ با میانگین ۶/۲ ، بالاترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌است. همچنین جنس سنگ در زیر حوضهٔ ۴ با میانگین امتیاز ۵/۹۶۷، سست‌ترین و در زیر حوضهٔ ۲ با امتیاز ۶/۴۷، مقاوم‌ترین جنس سنگ به شمار می‌رود. میانگین کاربری اراضی از ۵ تا ۸ بود که زیر حوضهٔ ۴ با میانگین امتیاز ۸/۳۳ بالاترین مقدار را داشت. در جدول ۳، دو نوع معیار با مطلوبیت منفی (ارتفاع و شیب) و معیارهای با مطلوبیت مثبت (جنس سنگ، جهت دامنه و کاربری اراضی) مشخص شد. همچنین وزن هرکدام از متغیرها به روش AHP و مقایسهٔ زوجی به کمک نرم‌افزار expert choice محاسبه شد. بر این اساس جنس سنگ با وزن ۰/۳۶۵، بیشترین تأثیر و عامل ارتفاع با وزن ۰/۰۷۸، کمترین تأثیر را در فرسایش آبکندی منطقه داشت.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

جدول ۳: مشخصات متغیرهای مؤثر در زیرحوضه‌های چنارلی

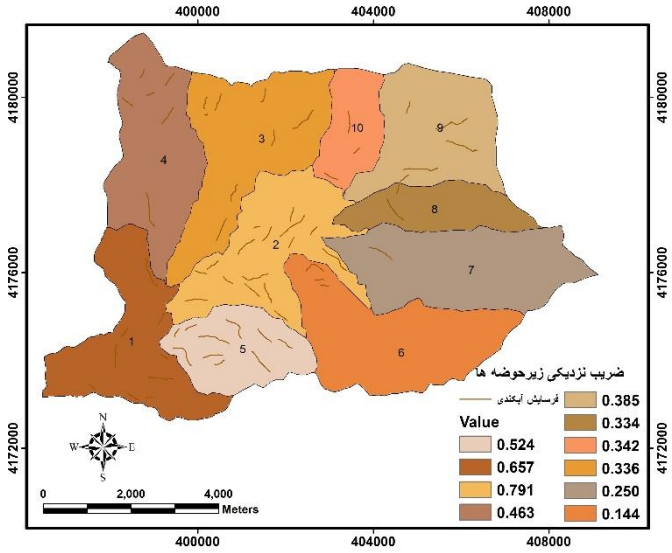
زیر حوضه	میانگین ارتفاع (متر)	میانگین شیب (درصد)	میانگین امتیاز جهت	میانگین امتیاز جنس سنگ	میانگین امتیاز کاربری اراضی
۱	۶۰۱/۹۳	۱۳/۴	۵/۵۱۹	۶/۲۶۸	۸/۱۶۲
۲	۶۶۷/۰۸	۱۱/۸۸	۵/۸۸۴	۶/۴۷۱	۷/۵۱۱
۳	۷۲۵/۰۶	۱۳/۷۶	۵/۷۸۲	۶	۶/۸۴۴
۴	۷۰۹/۰۲	۱۴/۲۴	۵/۷۰۴	۵/۹۶۷	۸/۳۳۲
۵	۷۲۶/۰۹	۲۱/۰۵	۶/۰۰۴	۶/۲۵۷	۷/۰۰۱
۶	۸۹۹/۴۸	۲۴/۱۱	۵/۶۷۴	۶/۰۱۲	۵/۶۰۴
۷	۹۳۲/۶۲	۲۱/۲۶	۵/۹۵۳	۶/۰۰۵	۶/۳۷۲
۸	۸۵۷/۳۷	۲۱/۳۲	۶/۲۰۰	۶	۶/۹۶۹
۹	۸۰۸/۰۱	۱۴/۲۸	۵/۸۹۵	۶	۶/۹۷۵
۱۰	۷۸۹/۹۸	۱۳/۹۷	۵/۷۰۹	۶	۶/۹۰۶
نوع معیار	منفی	منفی	مثبت	مثبت	مثبت
وزن معیار	۰/۰۷۸	۰/۱۵۵	۰/۱۰۴	۰/۳۶۵	۰/۲۹۸

بعد از محاسبهٔ ماتریس بی‌مقیاس وزین، نقاط ایده‌آل مثبت و منفی استخراج شد. با توجه به اینکه در مرحلهٔ نرمال‌سازی از دو روش فازی با مطلوبیت منفی و مثبت استفاده شد؛ بنابراین، ماتریس وزنی نرمال شده به‌طور یکنواخت افزایشی خواهد بود؛ بدین معنی که هر چقدر مقدار V (ماتریس بی‌مقیاس وزین) بیشتر باشد، فرسایش آبکندی نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین ایده‌ال مثبت، بیشترین مقدار و ایده‌آل منفی کمترین مقدار V را خواهد داشت. پس از محاسبهٔ ضریب نزدیکی حوضه‌ها با استفاده از مدل تاپسیس (جدول ۴)، زیرحوضهٔ ۲ با ضریب ۰/۷۹۱ دارای بیشترین حساسیت فرسایش آبکندی و زیرحوضهٔ ۶ با ضریب ۰/۱۴۴ دارای کمترین حساسیت فرسایش آبکندی است (شکل ۹).

جدول ۴: محاسبهٔ ضریب نزدیکی به راه حل ایده‌آل مثبت و منفی همچنین رتبه‌بندی گزینه‌ها

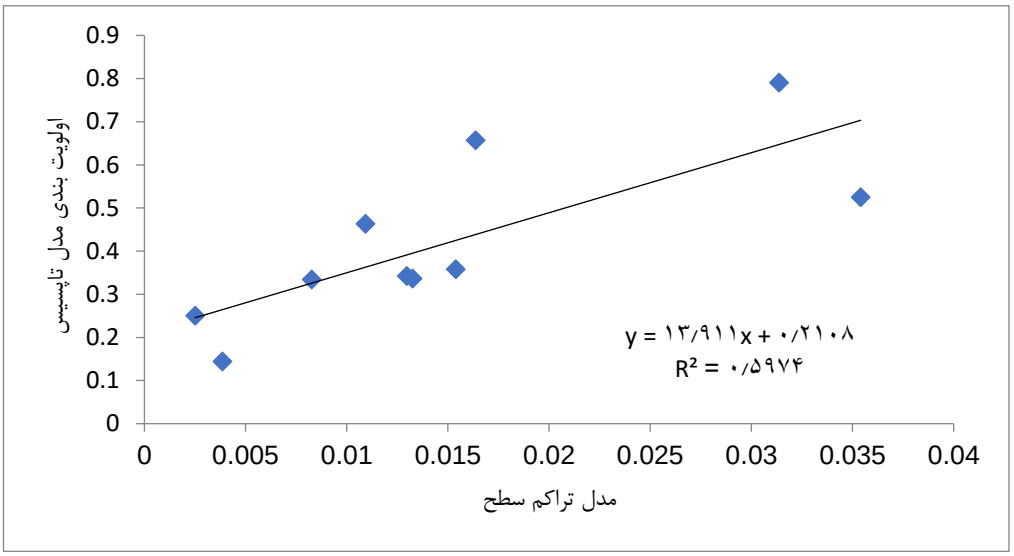
زیر حوضه	رتبه	Cli+
۱	۲	۰/۶۵۷
۲	۱	۰/۷۹۱
۳	۷	۰/۳۳۶
۴	۴	۰/۴۶۳
۵	۳	۰/۵۲۴
۶	۱۰	۰/۱۴۴
۷	۹	۰/۲۵۰
۸	۸	۰/۳۳۴
۹	۵	۰/۳۵۸
۱۰	۶	۰/۳۴۲

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]



شکل ۹: ضریب نزدیکی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با مدل تاپسیس

برای ارزیابی اعتبار نتایج حاصل از مدل تاپسیس، ضریب تبیین (R^2) محاسبه شد. این ضریب نشان می‌دهد که نتایج حاصل از تاپسیس چقدر بر داده‌های واقعی منطبق است. با توجه به نمودار (شکل ۱۰) مشخص می‌شود که بین نتایج حاصل از مدل تاپسیس و مدل تراکم سطح ارتباط مستقیم و قوی وجود دارد (R^2 =۰/۵۹۷۴).



شکل ۱۰: مقایسهٔ میزان تطابق نقشهٔ اولویت‌بندی مدل تاپسیس با مدل تراکم سطح

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش آبکندی از اشکال پیشرفتهٔ فرسایش آبی است که به دلیل حجم گستردهٔ تخریب خاک و اثرات ناشی از آن، نیاز است پژوهش‌های بیشتری دربارهٔ آن صورت گیرد. اولویت‌بندی دقیق حوضه‌ها بر اساس شدت فرسایش آبکندی می‌تواند به عملیات حفاظتی و آبخیزداری مناسب در زیرحوضه‌های حساس منجر شود. در این پژوهش ابتدا با استفاده از مدل تراکم سطح، حساسیت فرسایش آبکندی در سطح واحدها و طبقات هر عامل شناسایی شد. سپس به

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

منظور اولویت‌بندی میزان حساسیت به فرسایش در سطح زیرحوضه‌ها ــ که برای اجرای فعالیت‌های آبخیزداری اهمیت زیادی دارد ــ از مدل تاپسیس استفاده شد. در این راستا، با توجه به پراکنش آبکندها در منطقه و متغیرهای مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت دامنه، جنس سنگ، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، تراکم سطح در هر طبقه محاسبه و رابطهٔ آنها با وقوع فرسایش آبکندی بررسی شد. ارتباط بین عوامل توپوگرافی با فرسایش آبکندی در منطقه نشان می‌دهد که طبقات ارتفاع پایین‌تر، شیب‌های کمتر و جهت دامنه‌های غربی و جنوبی، حساسیت بیشتری دارند که با نتایج پژوهش‌های Maghsoudi و همکاران (۲۰۱۲) و Nikpour و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. محاسبهٔ تراکم سطح آبکندها در سنگ‌های مختلف نشان داد که شیل و لس به ترتیب حساسیت بیشتری به فرسایش آبکندی دارند و از نظر کاربری اراضی، بیشترین میزان فرسایش آبکندی در زمین‌های زراعی و مراتع مشاهده شد که با نتایج تحقیقات Shadfar (۲۰۱۶) همخوانی داشت. نتایج اولویت‌بندی عوامل مؤثر نشان می‌دهد که سازندهای زمین‌شناسی با وزن ۰/۳۶۵ در فرسایش آبکندی منطقه بیشترین تأثیر را دارد. تهیهٔ نقشه حساسیت فرسایش آبکندی حوضهٔ چنارلی با همپوشانی نقشه‌های وزنی عوامل مؤثر و به کمک مدل تراکم سطح نشان می‌دهد که ۲۵/۴ درصد از مساحت حوضه دارای حساسیت زیاد فرسایش آبکندی و ۱۶/۱ درصد دارای حساسیت خیلی زیاد است. برای ارزیابی اعتبار مدل تراکم سطح، از روش احتمال تجربی استفاده شد؛ برای این منظور، ۲۹ آبکندی را که در تهیهٔ نقشهٔ مذکور از آن استفاده نشد، با این نقشه تلاقی داده و پراکنش آبکندها در طبقه‌های مختلف حساسیت فرسایش به دست آمد. با استفاده از رابطهٔ ۲، میزان احتمال تجربی برای مدل تراکم سطح محاسبه شد (KS=۰/۹۱۳) که بیانگر دقت بالای مدل تراکم سطح در تهیهٔ نقشهٔ حساسیت فرسایش آبکندی منطقه است؛ زیرا بیش از ۹۱ درصد از آبکندهای مشاهده شده در نقشهٔ پهنه‌بندی به درستی پیش‌بینی شد. نتایج اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از مدل تاپسیس نشان می‌دهد که زیر حوضه‌های شمارهٔ ۲ و ۱ به ترتیب با ضریب نزدیکی ۰/۷۹۱ و ۰/۶۵۷، بالاترین حساسیت فرسایش آبکندی را در منطقه دارد.

برای مقایسه و ارزیابی دقت مدل تاپسیس، از مدل اعتبارسنجی شدهٔ تراکم سطح به عنوان نقشهٔ واقعیت زمینی استفاده و ضریب تبیین (R^2) بین آنها محاسبه شد. ضریب تبیین در این پژوهش، میزان هماهنگی و روابط بین نتایج حاصل از مدل تاپسیس و داده‌های واقعی (خروجی مدل تراکم سطح فرسایش آبکندی در منطقه) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ مشخص می‌شود که بین نتایج حاصل از مدل تاپسیس با مدل تراکم سطح در منطقه ارتباط معنی‌دار و مناسبی وجود دارد؛ زیرا این مدل با ضریب تبیین برابر (R^2 =۰/۵۹۷) توانست حساسیت به فرسایش آبکندی را در سطح زیرحوضه‌ها پیش‌بینی کند که این امر بیانگر توانایی آن در اولویت‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی زیرحوضه‌ها است. آگاهی از میزان حساسیت فرسایش آبکندی در طبقات هر یک از عوامل مؤثر با مدل تراکم سطح و معرفی اولویت‌های فرسایشی زیرحوضه‌ها با مدل تاپسیس، می‌تواند انتخاب روش‌های کنترل آبکندها و حفاظت خاک را بهبود بخشد و به تمرکز عملیاتی مورد نیاز در روی زمین کمک کند.

منابع

1. Asgharpour, M. J., 2013. Multi-criteria decisions. University of Tehran Publications, 398 p. (In Persian).

2. Cebecauer, T., & j. Hofierka., (2007). The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. Geomorphology. 98, 187-189.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

3. Daggupati, P.; Sheshukov, A. Y.; & K. R. Douglas-Mankin, 2014. Evaluating Ephemeral Gullies with A Process-Based Topographic Index Model, Catena, 113, 177- 186.
4. Entezari Najaf- Abadi, M., & M. Gholami., (2013). Evaluation of soil erosion by TOPSIS and SLEMSA method (Case study: Romeshgan, Iran). Quarterly On Environmental Erosion Researches. 2(3), 85-96. (In Persian).
5. Ghobadi, M. H.; Jalali, S. H.; Saedi, B.; & N. Pirouzinajad, 2017. Comparative Study of Information Value, Density Area, LNRF, Frequency Ratio Mmethods in Landslide Zoning at Poshtdarband Region, Kermanshah Province, Journal of Engineering Geology, 11(1), 91-114. (In Persian).
6. Ilanloo, M., & L. Ebrahimi., (2016). Risk Zoning of Mass Movements Using Information Value, Surface Density and LNRF Models in Zohreh Watershed. Environmental Hazards Manage. 3(2), 141-153. (In Persian).
7. Jozi, S. A., & N. Moradi majd., (2015). Evaluation of main factors affecting soil erosion in FAO method using TOPSIS technique. Conservation and Utilization of Natural Resources. 4(1), 79-99. (In Persian).
8. Jun, K. S.; Chung, E. S.; kim, Y. G.; & Y. kim, 2013. A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in south Korea by considering climate change impacts, Expert systems with applications, 40, 1003-1013.
9. Kardel, F., & A. Tajari., (2015). Influence of gully erosion on soil moisture of abandoned farming dry land and rangeland in loess land (Case study: Kale-Shour watershed, Golestan Province). Journal of Soil Management and Sustainable Production. 5(2), 181-195. (In Persian).
10. Kavyani, M. R., & B. Alijani., (1997). The Foundations of Climatology, SAMT. 592 p. (In Persian)
11. Khojeh, N.; Ghoddosi, J.; & R. Esmaili, 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 Ghozi, Kalaleh, Golestan Province), Watershed Management Research, 15, 202-212. (In Persian).
12. Knapen, A., & J. Poesen., (2010). Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. Earth Surface Processes and Landforms. The Journal of the British Geomorphological Research Group. 35(2), 217-228.
13. Maghsoudi, M.; Shadfar, p.; & M. Abbasi, 2012. Landslide sensitivity zoning to gully erosion in Zavaryan basin of Qom province, Quantitative Geomorphology Researches, 1(2), 35-52. (In Persian).
14. Mansur, A., 2014. An Assessment of Gully Erosion in Dutse Sahelian Zone of Jigawa State, Nigeria, and its Adverse Consequences on the Socio-Economic development of the State, Journal of Agriculture and Environmental Sciences, 3, 17-25.
15. Mararakanye, N., & P. D. Sumner., (2017). Gully erosion: A comparison of contributing factors in two catchments in South Africa. Geomorphology. 288, 99-110.
16. Maugnard, A.; Van Dyck, S.; & C. L. Bielders, 2013. Assessing the Regional and Temporal Variability of the Topographic Threshold for Ephemeral Gully Initiation Using Quantile Regression in Wallonia (Belgium), Geomorphology, 93, 482-492.
17. Mohamadi, S., 2018. Prioritization of Sub-Catchments for Operation of Watershed Management Projects Via Multi-Criteria Decision-Making Techniques (Case Study: Asyabjofeth Watershed), Journal of Watershed Management Research, 9(18), 36-46. (In Persian).
18. Momm, H.; Bingner, R.; Wells, R.; & S. Dabney, 2011. Analysis of Topographic Attributes for Identification of Ephemeral Gully Channel Initiation in Agricultural Watersheds, Annual Meeting Louisville, Kentucky, ASABE.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

19. Nikpour, N.; fotohi, S.; negaresh, H.; & M. Sistani, 2017. Morphometric of gully erosion (ditch) and factors affecting the development of the basin plains on southern west Ilam Cham Fazel, Spatial analysis of environmental hazards, 4 (1), 97-112. (In Persian).
20. Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; & C. Valentin, 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs, Catena, 50, 91-133.
21. Rahmati, O.; Tahmasebipour, N.; Haghizadeh, A.; Pourghasemi, H. R.; & B. Feizizadeh, 2019. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework, Science of the Total Environment, 10(4), 913- 927. (In Persian).
22. Rezaei Moghaddam, M.; Hejazi, A.; & A. Behbodi, 2019. Estimation of erosion caused by ephemeral gullies with EGEM model in Lanbaran basin, Ahar Chay, Quantitative Geomorphological Research, 8(1), 147-159. (In Persian).
23. Rowshanzamir, S., 2020. Zoning of gully erosion susceptibility in Maragheh catchment by using Fuzzy Multi- Attribute Decision Making, Quantitative Geomorphological Research, 9(2), 175-194. (In Persian).
24. Rostamizad, G.; tavakoli, M.; & A. A. Nazari samani, 2015. Determine the location of Gully erosion occurred based on the Geomorphology threshold and factors affecting it (case study: Cham-e- Zhab of Darrehshahr, Ilam), Quarterly On Environmental Erosion Researches, 5(1), 44-57. (In Persian).
25. Sarai, H., 2019. Multivariate regression in behavioral research. Carlinger, F.N., Pedhazur, A., 10st edition. SAMT. 532 p. (In Persian).
26. Sarvati, M. R.; Ghoddousi, J.; & M. Dadkhah, 2009. Factors effecting initiation and advancement of gully erosion in loesses, Pajouhesh & Sazandegi, 78, 20-33. (In Persian).
27. Selkimaki, M., & J. R. Gonzalez- Olabarria, 2017. Assessing gully erosion occurrence in forest lands in catalonia(spain). Land degradation &development. 28(2), 616-625.
28. Shadfar, S., 2016. Identifying the gully erosion potential by using artificial neural network (ANN), case study: Troud Watershed, Watershed Engineering and Management, 8(3), 256-263. (In Persian).
29. Van Westen, C. J.; Rengers, N.; Terline, M. T. J.; & R. Soaters, 1997. Predication of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-Based hazard zonation, Geologische Rundschau, 86,404-414.
30. Vulevic, T.; Dragovic, N.; Kostadinov, S.; Simic, S. B.; & I. Milovanvic, 2015. Prioritization of Soil Erosion Vulnerable Areas Using Multi-Criteria Analysis Methods, Polish Journal of Environmental Studies, 24(1),317-323.
31. Yasrebi, B.; Soufi, M.; Mirnia, S.; & j. Mohamadi, 2013. Assessment the impact of topographic and soil characteristics on bank gullies advancement in croplands, case study: Ilam province, Watershed Engineering and Management, 5(1), 31-40. (In Persian).

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

Evaluation and Prioritization of Gully Erosion Susceptibility Using Density Area and TOPSIS Models (Case Study: Chenarli Watershed, Golestan Province)

Eisa Jokar Sarhangi[1]: *Associate professor of Geomorphology, Geography Department, Faculty of human, University of Mazandaran, Babolsar*
Taher Safarrad: *Assistant Professor of Climatology, Geography Department, Faculty of human, University of Mazandaran, Babolsar*
Maryam Shotatzadeh: *MS.c in Hydrogeomorphology, Faculty of human, University of Mazandaran, Babolsar*

Article History (Received: 2021/07/25 Accepted: 2020/11/22)

Extended abstract

1- Introduction

Gully erosion is an advanced form of water erosion that needs more research, given the vast mass of soil degradation and its subsequent impacts. An accurate evaluation of gully erosion susceptibility based on the density area model can help identify and predict the areas with advanced gully erosion in the units and classes of each factor. Also, the TOPSIS model and proper prioritization of erosion susceptibility at sub-watershed can be critical for conservation activities. Researchers thus far have used the TOPSIS model to estimate soil erosion in a watershed or evaluate the factors affecting soil erosion intensity, disregarding its potential to prepare efficient gully erosion susceptibility maps. However, the study area, located in the northeast of Golestan, a province in northern Iran, is susceptible to gully erosion due to the horrific deforestation for agricultural and animal husbandry purposes and the expansion of loess soil. Watershed operations are imperative to prevent the spread of this type of erosion, although since the credits are limited, further preventative measures should be prioritized.

2- Methodology

This study aimed to prepare a gully erosion susceptibility map of the region using the density area model as well as prioritizing sub-watershed based on the TOPSIS model. It has also been attempted to evaluate their efficiency to prevent time and capital resources waste by identifying erosion-susceptive watersheds and implementing conservation programs as required. The Chenarli watershed is located northeast of Kalaleh in Golestan, Iran. The average elevation of the area is about 628 meters. The elevation, slope, aspect, lithology, vegetation, and land use have been used in this study to prepare gully erosion susceptibility maps. The layer of the area's lithology units was obtained from the 1:100,000 map of the geological survey of Iran, and the raster layers of elevation, slope, aspect of the digital elevation model (DEM) were obtained from an area of 30 m^2 of the region. Landsat images were used to prepare a vegetation map and land use area. The Gully erosion distribution map of the region was created using Google Earth images, including 93 gullies, out of which 64 gullies were used for susceptibility map preparation and 29 gullies were used for map validation. The density area model was used to determine the weight of the effective factors. In this study, the layers of independent variables overlayed with gully erosion distribution in ArcGIS. The gully density was calculated in each class of factors. Technically the TOPSIS model, one of the most famous multi-attribute decision models, prioritizes gully erosion susceptibility at the sub-watershed level. In this research, sub-watersheds have been regarded as the criteria affecting gully erosion. The T output of the measured density area model was used as a reference map to evaluate the validity of the model results. Also, the coefficient of determination (R2) was calculated.

3- Results

In this study, the frequency of gully erosion in the region was identified by overlaying the factor maps, including elevation, slope, aspect, lithology, vegetation, and land use, by gully distribution map in ArcGIS, and the weight values of the classes of each factor were calculated using the density area model. The relationship between topography factors and gully erosion in the region indicated the higher sensitivity of lower elevation

[1] **Corresponding Author: e.jokar@umz.ac.ir**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]

classes, lower slopes, and western and southern slopes. Calculation of gully surface density in different rocks showed that shale and loess were more susceptible to gully erosion, respectively. Furthermore, and in terms of land use, the highest amount of gully erosion was observed in farmlands and rangelands, but in areas with natural forests, gully erosion susceptibility was negligible. After calculating the weight of each class of factors affecting the occurrence of the gully in the region, the weight maps were overlayed, and the raster map of gully erosion susceptibility was prepared using the study model. The results of the final map of the density area model indicate that 11.61% of the area has a significantly low susceptibility, and 23.88% are in the low class, 23.03% in the middle class, 25.4% in the high class, and 16.1% of the area is in the very high susceptibility class. The TOPSIS model was used to prioritize gully erosion susceptibility at the sub-watersheds of the region. For this purpose, the study watershed was divided into ten sub-watersheds. Then, the score of the effective variables, the same variables in the density area model, was determined separately. The calculation of the proximity coefficient based on the TOPSIS model showed that sub-watershed no. 2, with a coefficient of 0.791, had the highest gully erosion susceptibility, and sub-watershed no. 6, with a coefficient of 0.144, had the lowest gully erosion susceptibility.

4- Discussion & Conclusions

Gully erosion susceptibility map of Chenarli watershed was prepared by overlaying weighted maps of effective factors using the density area model. The empirical probability was calculated for the model (KS=0.913), indicating the high accuracy of this model in preparing the gully erosion susceptibility map of the region. The density area validation model was used as a field reality map, and the coefficient of signification (R2) was calculated to compare and assess the TOPSIS model's accuracy. The coefficient of determination in this study shows the level of coordination and relationship between the results of the TOPSIS model and real data (the output of the gully erosion density area model). The results displayed a significant and appropriate relationship between the results of the TOPSIS model and density area model in the region since this model with the coefficient of determination equal to (R2= 0.597) could predict the susceptibility to gully erosion at the sub-basin level, indicating its ability to prioritize the susceptibility of gully erosion of sub- watersheds. It can be concluded that recognizing gully erosion susceptibility in classes of the effective factors using the density area model and introducing erosion priorities of sub-watersheds with the TOPSIS model can help improve the selection of gully control and soil conservation methods and contribute to the required operational focus on the field.

Key Words: Coefficient of Determination, Gully, Modeling, Soil Erosion, Zoning.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.3.8]