



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های وزن شاهد (WofE) و دمپستر-شیفر (DSH) در آبخیز ایلام

شمس‌اله عسگری^{۱*}، کوروش شیرانی^۲، فریدون سلیمانی^۳

۱ و ۳ - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران
۲ - دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

فرآیند مدل‌سازی برای هر پدیده یا متغیر وابسته با استفاده از عامل‌های مؤثر محیطی (متغیرهای مستقل) می‌تواند افزون بر تعیین وضعیت شرایط حال، قابل تعمیم به آینده نیز باشد. از این رو، فرض اولیه در تمام مدل‌سازی‌های محیطی، مبتنی بر اصل یکنواختی است که برای هدف این پژوهش نیز قابل تعمیم است و سنجش‌های پستی‌بلندی از عامل‌های اصلی در ایجاد و گسترش فرسایش آبکندی هستند. این پژوهش با هدف تعیین اندازه صحت نقشه‌های حساسیت به فرسایش آبکندی بر اساس مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی یا گیرنده (AUC و ROC) انجام شد. همچنین، آستانه‌های عامل‌های مؤثر (شامل شاخص‌های پستی‌بلندی و عامل‌های محیطی مدنظر) بر رخداد فرسایش آبکندی در آبخیز ایلام تعیین شد.

مواد و روش‌ها

آبخیز ایلام در استان ایلام و در جنوب غربی ایران است. در این پژوهش برای تعیین آستانه‌ها و پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری فرسایش آبکندی از مدل‌های پیشینه‌وزن شاهد و دمپستر-شیفر استفاده شد. این پژوهش، در

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shamsagari@yahoo.com

استناد: عسگری، ش.، شیروانی، ک.، سلیمانی، ف. ۱۴۰۳. ارزیابی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های وزن شاهد (WofE) و دمپستر-شیفر (DSH) در آبخیز ایلام. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۷۱-۹۸.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2024.364768.1571

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۷۱ تا ۹۸.

©نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



هفت گام اصلی انجام شد. در گام اول منطقه پژوهشی انتخاب شد و نقشه پراکنش رخداد آبکندها (متغیر وابسته) تهیه شد و داده‌ها به شکل تصادفی به دو دسته آموزشی یا واسنجی (۷۰٪) و دسته آزمایشی یا پیش‌بینی (۳۰٪) تقسیم شدند. در گام دوم نقشه‌های ۲۲ عامل مؤثر (متغیرهای مستقل) تهیه و آماده‌سازی شد. در گام سوم عامل‌های مؤثر با استفاده از آزمون هم‌راستایی میان عامل‌های مؤثر و رخداد آبکندها انتخاب شدند. در گام چهارم مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر اجرا شد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شد. در گام پنجم اعتبارسنجی، ارزیابی، مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به‌دست آمده از مدل‌های نامبرده در دو مرحله واسنجی و پیش‌بینی انجام شد. در گام ششم آستانه‌ها و اهمیت عامل‌های مؤثر بر اساس بهترین مدل تعیین شد. در گام هفتم نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به رخداد فرسایش آبکنند تهیه شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، پس از بازدیدهای میدانی، تفسیر تصویرهای هوایی و پردازش تصویر ماهواره‌ای، ۳۳۱ آبکنند شناسایی و بررسی شد. نقشه پراکنش فرسایش آبکنند برای ۳۳۱ آبکنند تهیه و رقومی شد که از این تعداد آبکنند ۷۰٪ (۲۳۲ آبکنند) برای آموزش و از ۳۰٪ باقی‌مانده (۹۹ آبکنند) برای اعتبارسنجی مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل‌ها از منحنی مشخصه عملکرد ساختار ROC و مساحت سطح زیر منحنی AUC استفاده شد. ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش آبکنندی با استفاده از هر دو مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر به شکل جداگانه با نقاط ۹۹ آبکنند و ۲۳۲ آبکنند برازش داده شد. سپس، داده‌ها به فایل اکسل انتقال داده شدند و با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل و بررسی شدند. بر اساس نتایج نقاط واسنجی (۳۰٪)، در هر دو مدل درصد سطح زیر منحنی قابل قبول بود که این موضوع نشان‌دهنده عملکرد زیاد هر دو مدل در منطقه پژوهشی بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شناسایی میدانی دقیق نقاط فرسایش آبکنندی با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس، یکی از نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بود. در نتیجه، نقشه پراکنش فرسایش آبکنندی ۳۳۱ آبکنند تهیه شد و برای اولین بار در آبخیز پژوهش شده بررسی و ثبت شد. یکی از مزیت‌ها و نوآوری‌های این پژوهش استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای آلوِس و نرم‌افزارهای جی‌آی‌اس و ساگا جی‌آی‌اس بود. نتایج بیانگر بیشترین استخراج متغیرهای مستقل مؤثر بر متغیر وابسته فرسایش آبکنندی در سامانه آبخیز بود و ۲۲ لایه رستری تهیه شد. سرانجام، نتایج تحلیل آماری جدول رتبه‌بندی مهم‌ترین شاخص‌های ایجاد فرسایش آبکنندی در منطقه نشان داد که شاخص کاربری زمین (۳۷/۱٪)، تراکم آبراهه (۱۷/۷٪)، سنگ شناسی (۱۳/۲٪)، اقلیم (۹/۴٪)، بارش (۵/۵٪) و NDVI (۳/۵٪) و دیگر شاخص‌ها به ترتیب بر فرسایش تأثیرگذار بودند. نتایج این پژوهش قابل ترویج و آموزش است و دستگاه‌های اجرایی برای مهار فرسایش آبکنندی می‌توانند با استفاده از نتایج این پژوهش اقدام‌های لازم را انجام دهند.

واژگان کلیدی: آبخیز ایلام، آستانه فرسایش آبکنندی، مدل دمپستر-شیفر، مدل وزن شاهد

مقدمه

استفاده از مدل‌های احتمالاتی و کمی برای ارزیابی فرسایش روی آورده‌اند (یانگ و همکاران ۲۰۱۹؛ گاین و همکاران ۲۰۱۹). در حقیقت، فرایند ارزیابی گسترش فرسایش آبکنندی افزون بر بررسی‌های میدانی نیاز به تحلیل و به‌کارگیری مدل‌های کمی دارد تا صحت و دقت نتایج پهنه‌بندی را در حد زیادی ارتقاء دهد، بنابراین، مدل‌های گوناگونی در زمینه پهنه‌بندی پیشنهاد شده است (لیو و همکاران ۲۰۱۸؛ روی و سها ۲۰۱۹). داب و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از مدل وزن شاهد، خطر رخداد آبکنند در کشور زیمبابوه را مدل‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد که رخداد آبکندهای پیشین

شکل‌گیری و تکامل آبکندها نشان‌دهنده فرآیند بسیار شدید فرسایش خاک است که اغلب در سیاست‌ها، راهبردها و مدیریت آبخیزها نادیده گرفته می‌شود. به‌رغم گسترش جهانی این پدیده، توانایی ما برای ارزیابی و شبیه‌سازی فرسایش آبکنندی و اثرات آن محدود است (سیسکولینیا و همکاران ۲۰۲۴). در حقیقت، ضرورت توسعه مدل‌های مناسب و کاربردی برای شناسایی مناطق مستعد به انواع فرسایش خاک به‌ویژه فرسایش آبکنندی اهمیت خاصی دارد. چنان‌که با صرف هزینه کم می‌توان از گسترش و نابودی مناطق حساس به فرسایش آبکنندی جلوگیری کرد. در چند سال گذشته، پژوهش‌گران به

با استفاده از مدل عامل قطعیت (CF) اندازه حساسیت به فرسایش آبکندی بخش‌های گوناگون منطقه سیمره و نقش هر یک از عامل‌های محیطی را ارزیابی کردند. در این پژوهش چشم‌اندازهای آبکندی منطقه مطالعه‌شده بر اساس بازدیدهای میدانی ثبت شد و برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به دو گروه تقسیم شد. نتایج نشان داد که دقت مدل عامل قطعیت در پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش آبکندی $6/88\%$ بود. همچنین، نتایج تجزیه و تحلیل اهمیت متغیرها در این پژوهش نشان داد که عامل‌های خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی و شیب زمین مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بودند. شهریور و همکاران (۲۰۱۶)، کارایی روش‌های گوناگون پهنه‌بندی فرسایش آبکندی در استان کهگیلویه و بویراحمد را تعیین کردند. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که روش گامای فازی (۰/۸) مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی فرسایش آبکندی بود. صوفی و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از رابطه میان مساحت و شیب آبخیز در بالادست نقطه ایجاد و یا پیشانی آبکندها، نوع فرآیند غالب آب‌شناخت مؤثر در ایجاد و گسترش آبکندها را تعیین کردند. در این پژوهش، ۳۰۰ آبکند از ۴ استان فارس، مرکزی، زنجان و گلستان انتخاب شد. نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه توانی مساحت - شیب در هر دو حالت گسترش و ایجاد آبکند در ۳۰۰ آبکند بررسی‌شده از ۴ استان در سطح 1% معنی‌دار بود. در پژوهشی شیرانی (۲۰۲۰)، با استفاده از داده‌های آماری دومتغیره دمپستر-شیفر و چندمتغیره، فرسایش آبکندی در آبخیز سمیرم در جنوب استان اصفهان ارزیابی کرد. در این پژوهش، با استفاده از نسبت ۷۰ و 30% به ترتیب مدل‌سازی و اعتبارسنجی آبکندهای شناسایی‌شده انجام شد. نقشه‌های حساسیت تهیه‌شده به ۵ طبقه حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد تقسیم شدند. به منظور تعیین آستانه طبقه‌ها و اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به ترتیب از شاخص سطح سلول هسته (SCAI) و سطح زیر منحنی ویژگی عملگر گیرنده (AUC-ROC) استفاده شد. در پژوهش نامبرده، نتایج روش وایازی چندمتغیره نشان داد که سنجه‌های کاربری زمین‌ها، شیب و فاصله از آبراهه بیشترین تأثیر را در رخداد آبکند داشتند. دقت مدل تلفیقی (AUC-ROC) برابر $0/942$ بود که در مقایسه با مدل‌های نظریه شاهد دمپستر-شیفر (۰/۹۲۴) و وایازی چندمتغیره (۰/۸۶۴) بیشتر بود. همچنین، اندازه (SCAI) در مدل تلفیقی، روند رده‌های حساسیت خیلی کم به خیلی زیاد کاهش یافته بود که بیانگر تفکیک مناسب رده‌بندی حساسیت در این مدل بود. ذاکری‌نژاد و الوندی (۲۰۲۳)، با بازدید میدانی از منطقه مطالعه‌شده و نمونه‌برداری خاک و انجام

بیش‌تر تحت تأثیر سنجه‌های زمین‌سنجی (ژئومتری) و گیتاشناسی (شامل پوشش زمین، نوع خاک، فاصله از رود، فاصله از جاده، شاخص حمل رسوب، شاخص توان آبراهه و شاخص رطوبت پستی‌بلندی) بوده است و دقت مدل بر اساس روش منحنی مشخصه عملکرد نسبی قابل قبول بود. در آبخیز دریاچه ماکوینیا در تانزانیای، مرکز و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی ۱۰ متر و ۳۰ متر، تصویرهای گوگل ارث و برداشت مختصات آبکندهای معرف منطقه با استفاده از GPS در یک بازدید میدانی، آبکندها را ارزیابی و تحلیل کردند. این پژوهشگران نقشه پهنه‌بندی گسترش فرسایش آبکندی در آبخیز نامبرده را تهیه کردند. انگلری و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از یک مدل آماری چندمتغیره پیش‌بینی فرسایش آبکندی و شیاری در آبخیز رود سیسیل در ایتالیا به شکل کمی تحلیل و بررسی کردند. این پژوهشگران پس اعتبارسنجی داده‌ها با استفاده از منحنی (ROC) فرسایش آبکندی و شیاری را با دقت زیادی پیش‌بینی کردند. رحمتی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور و با روش تحلیل (GEOBIA) و مدل شرطی احتمال (CP) میان فرسایش آبکندی و عامل‌های زمین‌ریخت‌شناسی در آبخیز کشکان - پلدختر، رابطه فضایی ایجاد کردند. ایشان پس از تجزیه و تحلیل و بازدید میدانی، عامل‌هایی چون بافت خاک، تراکم زه‌کشی و سنگ‌شناسی را مهم‌ترین عامل‌ها در ایجاد فرسایش آبکندی معرفی کردند. صابرچناری و همکاران (۲۰۱۶) پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی را با استفاده از مدل دمپستر شیفر در آبخیز قرناوه استان گلستان بررسی کردند. این پژوهشگران با جمع جبری نقشه‌های وزنی به دست آمده، نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی را تهیه کردند. نتایج طبقه‌بندی مدل در این پژوهش نشان داد از کل پهنه‌های آبکندی در نظر گرفته‌شده برای مرحله اعتبارسنجی مدل در آبخیز قرناوه $6/68\%$ در طبقه خطر زیاد و بسیار زیاد بودند. همچنین، اعتبارسنجی مدل بر اساس منحنی مشخصه عملکرد نسبی و سطح زیر آن انجام شد و نتایج به دست آمده نشان‌دهنده دقت مناسب مدل دمپستر شیفر (دقت $1/96$) و انحراف معیار $3/0$ در پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی منطقه مطالعه‌شده بود. انتظاری و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از شاخص قدرت آبراهه (SPI) و داده‌های پستی‌بلندی و مدل رقومی آن، مناطق مستعد به فرسایش آبکندی در آبخیز رود دیره را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ۵ عامل شیب، انحنای شیب، کاربری زمین‌ها، فاصله از جاده و سنگ‌شناسی از عامل‌های مؤثر در ایجاد آبکند بودند. طهماسبی‌پور و همکاران (۲۰۱۵)،

بود. همچنین، مساحت زیر منحنی (ROC - AUC) در حالت واسنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۶۱ بود و در حالت اعتبارسنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۳۷ به دست آمد. بنابراین، عملکرد مدل بیشینه آنتروپی برای پیش‌بینی مناطق مستعد به فرسایش آبکندی مناسب بود.

ارزیابی فرسایش آبکندی اهمیت بسیار زیادی دارد، اما، این ارزیابی به دلیل نبود و یا دسترسی نداشتن به داده‌ها و کیفیت نامناسب آن‌ها با محدودیت روبه‌رو است. بنابراین، انجام پژوهش‌های کامل در مناطقی با ظرفیت فرسایش‌پذیری و رسوب‌گذاری، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از مسائل بسیار مهم در آبخیز ایلام نابودی زمین‌های کشاورزی بر اثر فرسایش آبکندی و فرسایش خاک و انباشت رسوب در سد ساخته شده در این آبخیز است که در درازمدت فرسایش آبکندی برای ساکنان این آبخیز مشکلات زیادی به وجود خواهد آورد. از این رو، ارزیابی فرسایش آبکندی آبخیز ایلام اهمیت زیادی دارد. فرض بر این است که براساس رخدادهای آبکندی گذشته می‌توان رخدادهای فرسایش آبکندی زمان حال و آینده را مدل‌سازی کرد. به‌طور کلی فرآیند مدل‌سازی برای هر پدیده یا متغیر وابسته با استفاده از عامل‌های مؤثر محیطی (متغیرهای مستقل) می‌تواند افزون بر تعیین وضعیت شرایط حال، قابل تعمیم به آینده نیز باشد. بنابراین، فرض اولیه در تمام مدل‌سازی‌های محیطی، مبتنی بر اصل یکنواختی است که برای هدف این پژوهش نیز قابل تعمیم است و سنجه‌های پستی‌بلندی از عامل‌های اصلی در ایجاد و گسترش فرسایش آبکندی هستند. این پژوهش با هدف تعیین اندازه صحت نقشه‌های حساسیت به فرسایش آبکندی بر اساس مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر با استفاده از منحنی ویژگی عملکرد نسبی یا گیرنده (ROC و AUC) انجام شد. همچنین، آستانه‌های عامل‌های مؤثر (شامل شاخص‌های پستی‌بلندی و عامل‌های محیطی مدنظر) بر رخداد فرسایش آبکندی در آبخیز ایلام تعیین شد.

مواد و روش‌ها

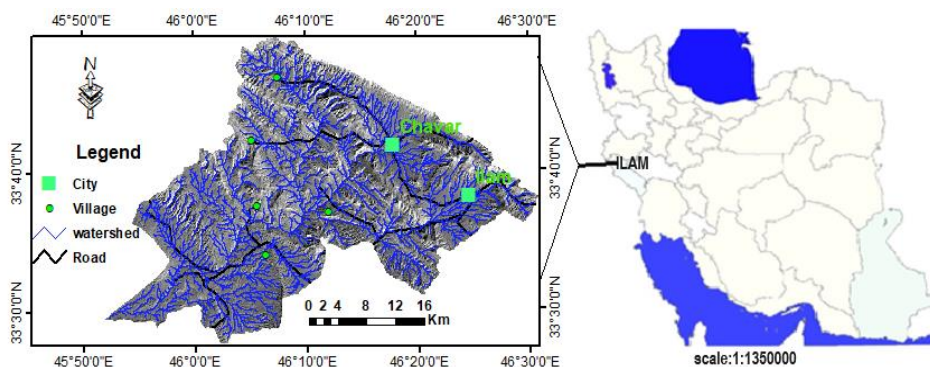
منطقه مطالعه شده

آبخیز ایلام با کد تماب ۲۱۱۹ در شمال غرب استان ایلام در موقعیت جغرافیائی ۳۳°۲۷' تا ۳۳°۴۹' عرض شمالی و ۴۵°۵۲' تا ۴۶°۳۰' درجه طول شرقی با مساحت ۱۱۹۱ کیلومتر مربع است. کمترین و بیشترین بلندی آبخیز به ترتیب ۲۰۰ و ۲۶۰۰ متر از سطح دریا است. میانگین بارندگی سالانه آبخیز ۶۳۰ میلی‌متر و میانگین بیشترین و کمترین دمای سالانه منطقه به ترتیب ۲۲/۱ و ۱۰/۲ °C

آزمایش، نقشه بافت خاک در نرم‌افزار GIS را تهیه کردند. همچنین، نقشه کاربری زمین‌ها و تراکم پوشش گیاهی با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای سنیتیل و لندست تهیه کردند. سپس، هر یک از شاخص‌ها به آبکندها در محیط GIS افزوده شد. برای اجرای مدل بیشینه آنتروپی از ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰٪ برای آزمون مدل استفاده شد. در پژوهش نامبرده، با استفاده از آزمون جک نایف اندازه تأثیر هر یک از شاخص‌ها بر دیگر شاخص‌ها مشخص شد و سرانجام تأثیرگذارترین شاخص‌ها معرفی شد. اعتبارسنجی مدل و پهنه‌بندی فرسایش آبکندی منطقه مطالعه شده با استفاده از منحنی (ROC) و مساحت زیر منحنی (AUC) ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص بلندی و کاربری زمین‌ها و ژرفای آبراهه تأثیرگذارترین شاخص‌ها در ایجاد فرسایش آبکندی بودند و اندازه مساحت زیر منحنی (AUC=0.947) عالی بود. سلیمانی و همکاران (۲۰۲۳)، براساس بازدیدهای پی‌درپی از مناطق آبکندی استان خوزستان و نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نتیجه گرفتند که چند دلیل مهم برای ایجاد آبکندهای این منطقه وجود دارد. این پژوهشگران مهمترین عامل را ویژگی‌های ذاتی خاک گزارش کردند. بافت خاک در بیشتر آبکندها شنی لومی، سیلتی لوم و یا لوم بود که پایداری این نوع خاک هم در حالت خشک و هم در حالت تر، بسیار کم است. یوسفی مبرهن و شیرانی (۲۰۲۳) کارایی مدل بیشینه آنتروپی در شناسایی عامل‌های مؤثر بر فرسایش آبکندی و تعیین پهنه‌های حساس در آبخیز علاء سمنان را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که پهنه‌بندی به دست آمده از اجرای مدل بیشینه آنتروپی بیانگر آن است که مناطق مستعد به فرسایش آبکندی در مناطق بلند با واحدهای سنگی حساس (پهنه‌های رسی و مارنی کواترنری)، میانگین سالانه بارش زیاد، نوع خاک اریدسویل، اقلیم فراخشک، طبقه‌های تراکم زهکشی زیاد، شیب کم، زمین‌های پست، شاخص زیاد رطوبت پستی‌بلندی، کاربری مرتعی و سطح زمین با بافت ضعیف، شکل می‌گیرند. سعیدیان و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد مدل بیشینه آنتروپی در تعیین اهمیت عامل‌های مؤثر محیطی در ایجاد فرسایش آبکندی در مناطق نیمه‌خشک را بررسی کردند. در پژوهش نامبرده، نقشه تهیه شده از مناطق مستعد به فرسایش آبکندی بر اثر عامل‌های محیطی نشان داد که عامل‌های محیطی در شرق، جنوب و جنوب شرقی اثرات بیشتری در کاهش فرسایش آبکندی داشتند و به سمت مرکز آبخیز و شمال و غرب آن فرسایش آبکندی افزایش یافت و اثرات عامل‌های محیطی در افزایش فرسایش آبکندی بیشتر

است و بیشتر مساحت آبخیز از زمین‌های تپه‌ماهوری، تیغ‌های فرسایشی و گیاهان پراکنده تشکیل شده است و فقط در نزدیکی مرز، قسمت‌هایی از دشت شیب ملایمی دارد. موقعیت آبخیز در نقشه ایران و استان ایلام در شکل ۱ نشان داده شده است.

است. از شمال به جنوب، اقلیم از نیمه مرطوب سرد و معتدل مدیترانه‌ای به اقلیم خشک بیابانی معتدل تغییر می‌کند. بیشترین گستردگی سازندهای زمین‌شناسی شامل آسماری، ایلام، پابده، گورپی، آغاچاری و گچساران با سنگ‌شناسی آهک، شیل، مارن، ماسه‌سنگ، انیدریت



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده.

Figure 1- Geographical location of the studied area.

چوار و ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه با دوره آماری ۳۰ ساله با روش درون‌یابی استفاده شد. همچنین، با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سنیتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۰ و میانگین رویشی چهار ماه خرداد، تیر، مرداد و شهریور نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجار شده^۱ با دقت مکانی ۱۰ متر تهیه شد. داده‌های رقومی ارتفاع^۲ به‌دست آمده از سنجنده راداری ماهواره آئوس ژاپن با دقت مکانی ۱۲/۵ متر برای تهیه نقشه‌های آب‌زمین‌ریخت‌شناختی با ۱۷ متغیر مستقل ریخت‌سنجی شامل شاخص‌های انحنای کلی^۳، انحنای دامنه یا طولی^۴، شاخص انحنای نیم‌رخ^۵، شاخص تحدب^۶، شاخص طبقه‌بندی انحنای^۷، شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه^۸، مساحت آبخیز^۹، شاخص توان آبراهه^{۱۰}، فاکتور طول - شیب آبراهه^{۱۱}، شاخص رطوبت

به منظور تهیه و آماده‌سازی نقشه‌های عامل‌های مؤثر و نقشه پراکنش رخداد فرسایش آب‌کندی از نقشه‌های موضوعی پایه و تصویرهای ماهواره‌ای منطقه مطالعه شده به این ترتیب استفاده شد. از نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) سازمان زمین‌شناسی کشور برای تهیه نقشه عامل مؤثر واحدهای سنگی یا سنگ‌شناسی، از نقشه کاربری زمین‌ها (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) طرح سیمای فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای تهیه نقشه کاربری زمین‌ها (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰)، از نقشه خاک‌شناسی مؤسسه خاک و آب کشور برای تهیه نقشه نوع خاک، از نقشه اقلیمی دومارتن برای تهیه نقشه نوع اقلیم و از نقشه خطوط هم‌باران به‌دست آمده از تحلیل آماری داده‌های درازمدت بارش ایستگاه‌های هواشناسی شهر ایلام، ایوان و

- 1 -normalized difference vegetation index-(NDVI)
- 2 -Digital Elevation Model-(DEM)
- 3 -General curvature
- 4 -Plan curvature
- 5 -Profile curvature
- 6 -Convergence index
- 7 -Curvature classification index
- 8 -Vertical distance to channel network index
- 9 -catchment area
- 10 -Stream power Index
- 11 -Slope-Length

بیزین (محتشمی برزادران ۲۰۱۹) را می‌توان به شکل رابطه ۱ در نظر گرفت.

$$P(A|B) = (P(B|A) \times P(A)) / P(B) \quad (1)$$

$P(A)$: احتمال رخداد پیشامد $P(B)$ ، A : احتمال رخداد پیشامد B ، $P(B|A)$: احتمال رخداد پیشامد B به شرطی که پیشامد A رخ داده باشد و $P(A|B)$: احتمال رخداد پیشامد A به شرطی که پیشامد B رخ داده باشد.

از این روش زمانی که داده‌های کافی به منظور برآورد اهمیت نسبی موضوعات مستدل با روش میانگین‌های آماری مد نظر باشد، استفاده می‌شود.

روش وزن شاهد، روابط مکانی میان عوارض و نقشه‌های موضوعی مؤثر در رخداد آبکنند را ترکیب می‌کند. برای هر نقشه موضوعی، وزن برای هر رده (واحد) محاسبه می‌شود و بر این اساس نقشه وزنی و سپس با جمع جبری همه نقشه‌های وزنی، نقشه حساسیت رخداد آبکنند تهیه می‌شود. ترکیب احتمالات شرطی به وسیله $+W_i$ و $-W_i$ به شکل رابطه‌های ۲ و ۳ تعریف می‌شود.

$$W_i^+ = \text{Log}_e [P(B_i | S) / P(B_i | \bar{S})] \quad (2)$$

$$W_i^- = \text{Log}_e [P(\bar{B}_i | S) / P(\bar{B}_i | \bar{S})] \quad (3)$$

$+W_i$ و $-W_i$ به ترتیب وزن مثبت و منفی، S : احتمال ثانویه رخداد آبکنند، B_i : بود یا نبود رخداد آبکنند در یک پیکسل از نقشه عامل است. به طور کلی $[P(B_i | S) / P(B_i | \bar{S})]$ را نرخ کیفیت (LS) و $[P(\bar{B}_i | S) / P(\bar{B}_i | \bar{S})]$ را نرخ ضرورت (LN) می‌نامند. در این پژوهش، به منظور درک هر چه بهتر رابطه‌های نامبرده و آسانی کار، به ویژه در محیط GIS، مدل بر پایه جدول ۲ و با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ ارائه شد.

$$W_i^+ = \text{Log}_e [(N_{pix1} / (N_{pix1} + N_{pix2})) / (N_{pix3} / (N_{pix3} + N_{pix4}))] \quad (4)$$

$$W_i^- = \text{Log}_e [(N_{pix2} / (N_{pix1} + N_{pix2})) / (N_{pix4} / (N_{pix3} + N_{pix4}))] \quad (5)$$

پستی‌بلندی^{۱۲}، بافت سطحی زمین^{۱۳}، ارتفاع^{۱۴}، درجه شیب^{۱۵} (t)، جهت شیب^{۱۶} و شاخص تحلیل سایه و روشن^{۱۷}، تراکم زه‌کشی^{۱۸} و فاصله از شبکه زه‌کشی^{۱۹} استفاده شد. باید توجه داشت که نقشه‌های نامبرده موجود در مقیاس‌های گوناگون به‌عنوان مبنای اطلاعات اولیه برای شناخت منطقه، استفاده شدند. سپس بر اساس داده‌های تصویرهای ماهواره‌ای سنتینل ۲ با دقت مکانی ۱۰ متر مقیاس داده‌ها در حد مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تدقیق و یکسان شد. به بیان دیگر داده‌های مکانی که در مقیاس مبنای کوچکتر (مثلاً ۱:۲۵۰۰۰۰۰) کاربری زمین‌ها بودند با داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ تا مقیاس بزرگتر (۱:۱۰۰۰۰۰۰) تدقیق شدند. به‌منظور تدقیق نقشه‌های عامل‌های مؤثر، شناسایی، تکمیل و تعیین محدوده‌های رخداد فرسایش آبکندی از تصویرهای گوگل ارث استفاده شد. سپس، برای آماده‌سازی و ورود داده‌های مکانی برای اجرای مدل‌ها، کلیه نقشه‌های لازم شامل نقشه‌های عامل مؤثر در محیط ArcGIS 0.8 به شکل رستری با اندازه سلولی مشابه و یکسان ۲۵ متر، دوباره نمونه‌برداری شد. برای ایجاد و مدیریت پایگاه داده‌های مکانی عامل‌های مؤثر، تحلیل و اجرای مدل‌ها و نقشه‌های خروجی، تهیه لایه‌های داده‌های آب‌زمین ریخت‌شناختی از نرم‌افزار SAGAGIS4.9 استفاده شد. همچنین، برای پردازش تصویرهای ماهواره‌ای سنتینل ۲، از ENVI5.3 و برای مدیریت و محاسبات مدل‌های وزن شاهد^{۲۰}، دمپستر-شایفر^{۲۱} و پایگاه توصیفی لایه‌های داده‌های از EXCEL2019 استفاده شد. سپس، برای ویژگی عملگر گیرنده (ROC) از نرم‌افزار SPSS26 استفاده شد.

مدل وزن شاهد

در سال‌های گذشته، بسیاری از پژوهش‌گران از روش‌های تجربی که کم و بیش بر پایه نظریه احتمال وابسته است؛ برای تهیه نقشه حساسیت رخداد آبکنند استفاده کرده‌اند. در این چارچوب، احتمال وابسته، اندازه‌گیری درست یا اشتباه بودن یک فرضیه با توجه به شاهد‌های موجود است. شبکه‌های بیزین به نام شبکه‌های تصمیم، شبکه‌های تصادفی و منحنی‌های تأثیر نیز شناخته می‌شوند. نظریه

12 -Topographic wetness Index

13 -Surface texture

14 -Altitude

15 -Slope gradien

16 -Slope aspect

17 - Analytical hillshading

18 -Drainage density

19 -Distance to drainage

20 -Weight of Evidence

21 -Dempster Shaffer

کل یک نقشه) - (مساحت کل رخداد آبکند یک نقشه) - (مساحت یک رده) + (مساحت رخداد آبکند در یک رده) است. حالت‌های گوناگون ظرفیت ایجاد رخداد آبکند در جدول ۱ آورده شده است.

Npix1: مساحت رخداد آبکند در یک رده، Npix2: مساحت کل رخداد آبکند در یک نقشه) - (مساحت رخداد آبکند در یک رده)، Npix3: (مساحت یک رده) - (مساحت رخداد آبکند در یک رده)، Npix4: مساحت

جدول ۱- حالت‌های مختلف ظرفیت ایجاد رخداد آبکند.

Table 1- Different gully event capacity states.

Gully incident	Factors causing a gully event	
	attendance	Absence
attendance	N_{pix1}	N_{pix2}
Absence	N_{pix3}	N_{pix4}

احتمال $\lambda(T_p)E_{ij}$ گزاره هدف مثبت را پشتیبانی می‌کند و به‌شکل رابطه ۸ تعریف می‌شود.

(۸)

$$((\lambda(T_p)E_{ij} = ((N(L \cap E_{ij})) / (N(L))) / ((N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})) / (N(A) - N(L)))$$

$N(L \cap E_{ij})$: تعداد پیکسل‌های رخداد آبکند در هر رده E_{ij} ، $N(L)$: تعداد کل پیکسل‌های آبکند رخ داده در منطقه مطالعه شده، $N(E_{ij})$: تعداد پیکسل‌ها در هر رده E_{ij} و $N(A)$: تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه مطالعه شده است.

صورت و مخرج کسر رابطه ۸ به ترتیب نسبت به رخداد آبکند رخ داده و نسبت مناطق بدون رخداد آبکند در طبقه معین E_{ij} است. در مدل دمپستر-شیفر، وزن مثبت، معمولاً با لگاریتم طبیعی نسبت احتمال به‌شکل رابطه ۹ تعریف می‌شود.

$$((T_p^-)E_{ij} = ((N(L) - N(L \cap E_{ij})) / (N(L))) /$$

(۹)

$$((N(A) - N(L) - N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})) / (N(A) - N(L)))$$

نسبت احتمال برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف به‌شکل رابطه ۱۰ تعریف می‌شود.

(۱۰)

$$m(T_p)E_{ij} = (\lambda(T_p)E_{ij} / \sum (\lambda(T_p)E_{ij}))$$

صورت کسر مبین نسبت رخداد آبکندهایی است که در طبقه معین E_{ij} رخ نداده‌اند. مخرج کسر، بیانگر نسبت مناطق بدون رخداد آبکند در خارج طبقه‌های دیگر E_{ij} است. وزن منفی در مدل دمپستر-شیفر با لگاریتم طبیعی نسبت احتمال و به‌شکل رابطه ۱۱ محاسبه شد.

$$m(T_p^-)E_{ij} = (\lambda(T_p^-)E_{ij} /$$

(۱۱)

$$\sum (\lambda(T_p^-)E_{ij}))$$

به‌طور کلی اندازه دامنه نسبت احتمال از صفر تا بی‌نهایت متغیر است. بنابراین، گام استانداردسازی به توابع جرم از دو تابع نسبت احتمال نیازمند است. نسبت‌های احتمال بر مجموع اندازه‌ها نسبت احتمال ویژگی‌های تمام رده‌ها در شاهد معین E_i تقسیم می‌شود. با توجه به چهارچوب

سرانجام وزن نهایی بر پایه رابطه‌های ۶ و ۷ برای هر عامل به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت رخداد آبکند استفاده شد.

(۶)

$$W_{final} = C / S_C$$

(۷)

$$C = [(W^+) + (W^-)]$$

C: برآیند وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} : وزن نهایی استاندارد شده و S_C : انحراف معیار برآیند وزن‌های شاهد مثبت و منفی است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است.

مدل دمپستر-شیفر

با مدل دمپستر-شیفر می‌توان نبودن قطعیت اندازه احتمال پیشامدها را مدل‌سازی کرد و پس از آن به‌عنوان نظریه شاهدها به‌عنوان ساختاری برای نمایش اطلاعات ناکامل و استدلال نبودن قطعیت، فرمول‌بندی کرد. مدل دمپستر-شیفر به‌عنوان نظریه تابع باور شناخته شده است که تعمیمی از نظریه بیزین است که مبتنی بر احتمالات می‌باشد. در این پژوهش از مدل دمپستر-شیفر در تحلیل حساسیت رخداد فرسایش آبکندهی استفاده شد که ساختار آن به‌شکل رابطه ۷ تعریف است.

$$m: 2 \Theta = \{\theta, T_p, \bar{T}_p, \Theta\} \quad \text{با} \quad \Theta = \{T_p, \bar{T}_p\} \quad (7)$$

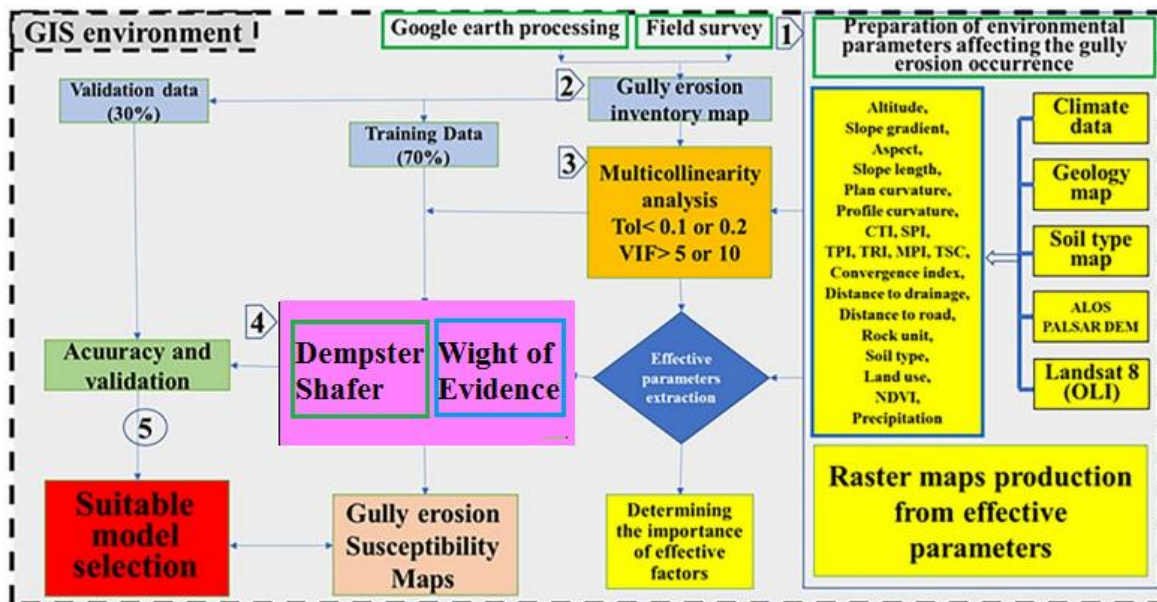
T_p : گزاره هدف و مبین پیکسل‌ها یا سلول‌های متأثر از رخداد آبکند محتمل، متضاد گزاره هدف مبین پیکسل‌ها یا سلول‌هایی است که تحت تأثیر رخداد آبکند محتمل نیستند، می‌باشد. اگر لایه‌های داده‌های مکانی چندگانه (L) در یک منطقه که حساسیت رخداد آبکند آن قابل بررسی است، موجود باشد، هر لایه داده مکانی به‌عنوان شاهد E_i ($i=1, 2, \dots, L$) برای گزاره هدف T_p در نظر گرفته می‌شود. داده معلوم E_{ij} ، که ویژگی رده زام شاهد E_i و توابع توزیع فراوانی گزاره‌های مثبت و مخالف می‌باشند، نسبت

تصادفی به دو دسته آموزشی یا واسنجی (۷۰٪) و دسته آزمایشی یا پیش‌بینی (۳۰٪) تقسیم شدند. در گام دوم نقشه‌های ۲۲ عامل مؤثر (متغیرهای مستقل) تهیه و آماده‌سازی شد. در گام سوم عامل‌های مؤثر با استفاده از آزمون هم‌راستایی میان عامل‌های مؤثر و رخداد آبکندها انتخاب شدند. در گام چهارم مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر اجرا شد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شد. در گام پنجم اعتبارسنجی، ارزیابی، مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به‌دست آمده از مدل‌های نامبرده در دو مرحله واسنجی و پیش‌بینی انجام شد. در گام ششم آستانه‌ها و اهمیت عامل‌های مؤثر بر اساس بهترین مدل تعیین شد. در گام هفتم نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به رخداد فرسایش آبکندها تهیه شد. کارنامی روش پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

تشخیص تحلیل‌های حساسیت رخداد آبکندها، تابع باور $m(T_P)_{Eij}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مثبت $(T_P)_{Eij}$ به‌طور مستقیم از تابع جرم بازیابی می‌شود. همچنین، تابع نابوری $m(\bar{T}_P)_{Eij}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف $(\bar{T}_P)_{Eij}$ از تابع جرم بازیابی می‌شود. تابع مقبولیت $m(\theta)$ به‌دست آمده از تفاضل توابع باور و نابوری از اندازه یک، به‌وسیله رابطه ۱۲ محاسبه شد.

$$m(\theta) = 1 - m(T_P)_{Eij} - m(\bar{T}_P)_{Eij} \quad (12)$$

در این مدل طبقه‌هایی که وزن تابع باور بیشتر و نابوری کمتری دارند، حساسیت بیشتری نسبت به رخداد آبکندها دارند. این پژوهش، در هفت گام اصلی انجام شد. در گام اول منطقه پژوهشی انتخاب شد و نقشه پراکنش رخداد آبکندها (متغیر وابسته) تهیه شد و داده‌ها به‌شکل



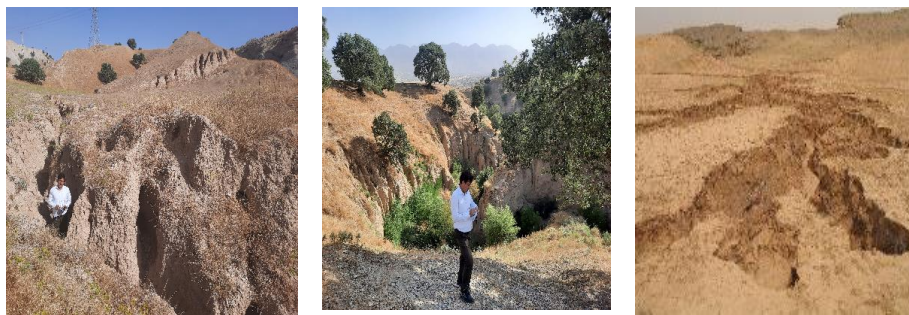
شکل ۲- کارنامی روش پژوهش.

Figure 2- The methodology flowchart.

بودند و نقشه پراکنش آبکندها نسبت به مرز آبخیز در شکل ۳ نشان داده شده است. طول بلندترین آبکندها ۱۷۴۲ متر و از نوع پنجه‌ای بود، و طول کوتاه‌ترین آبکندها ۲۸ متر بود. تصویرهایی از آبکندهای طبیعی منطقه در شکل ۳ نشان داده شده است. پراکنش آبکندها و لایه آبراهه روی لایه سایه روشن در شکل ۴ نشان داده شده است. آبکندهای پیرامون شهر چوار روی تصویر گوگل‌ارث که در آبخیز مطالعه شده بود، در شکل ۵ نشان داده شده است.

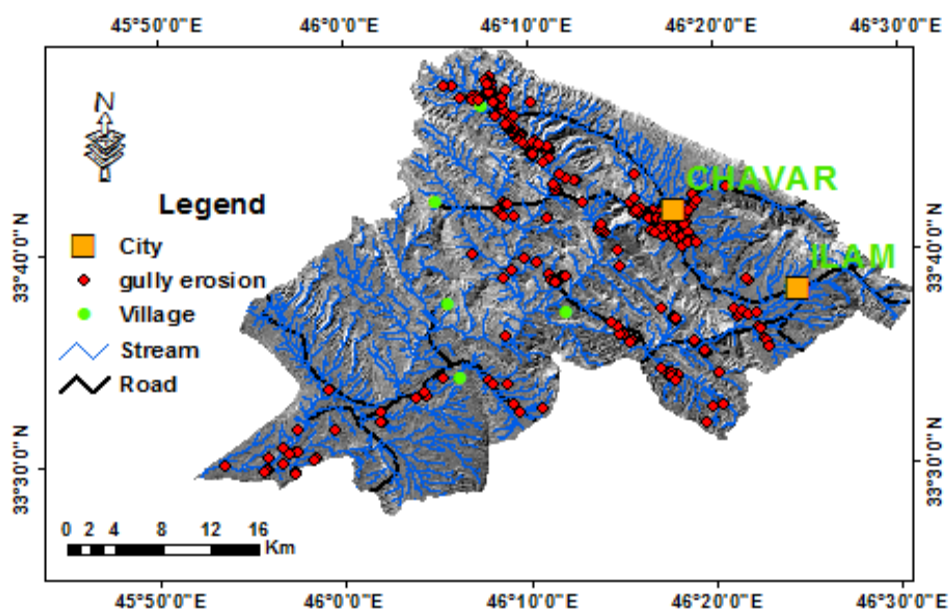
نتایج و بحث

در این پژوهش با تدقیق گوگل‌ارث پس از بررسی‌های میدانی منطقه، ۳۳۱ آبکندها شناسایی و بررسی شد. انواع آبکندهای مشاهده‌شده در این منطقه شامل فرم‌های پنجه‌ای، پیازی، خطی و جبهه‌ای بودند که به ترتیب تعداد آبکندهای پنجه‌ای (۵۰/۱۵٪)، تعداد آبکندهای خطی (۲۳/۵۶٪)، تعداد آبکندهای پیازی (۱۶/۰۱٪) و تعداد آبکندهای جبهه‌ای (۱۰/۲۷٪) انتخاب شد. بیشتر آبکندهای منطقه مطالعه‌شده از نوع آبکندهای پنجه‌ای



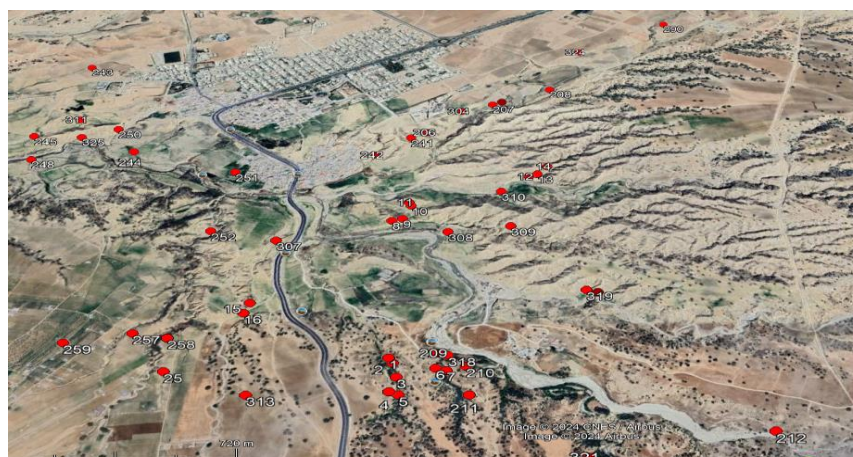
شکل ۳- نمونه‌های از اشکال فرسایش آبکندی آبخیز ایلام.

Figure 3- Examples of forms of gully erosion in the Ilam Watershed.



شکل ۴- نقشه پراکنش فرسایش آبکندی آبخیز ایلام.

Figure 4- Distribution map of gully erosion in Ilam Watershed.



شکل ۵- آبکند پیرامون شهر چوار استان ایلام در تصویر گوگل ارث.

Figure 5- The gully around the city of Chavar, Ilam Province, in the Google Earth image.

اندازه VIF و TOL در تحلیل و برآورد چندراستایی عامل‌های تأثیرگذار بر رخداد فرسایش آبکندی وجود نداشته است، اما بر پایه نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، اگر اندازه VIF کم‌تر از ۵ (محتاطانه) یا ۱۰ (سهل‌انگارانه) باشد و TOL بزرگ‌تر از ۰/۱ (سهل‌انگارانه) یا ۰/۲ (محتاطانه) باشد در آن شرایط مشکل هم‌خطی یا هم پوشانی داده‌ها وجود نخواهد داشت. به بیان دیگر میان داده‌ها یا متغیرهای مستقل هیچ همبستگی یا هم‌خطی وجود ندارد.

نتایج تحلیل هم‌خطی میان متغیرها در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل هم‌خطی، ضریب تحمل سنج‌ها بیشتر از ۰/۱ بود و عامل تورم پراکنش آن‌ها به جز دو شاخص توان آبراهه و رطوبت پستی‌بلندی، کمتر از ۱۰ بود. از این‌رو، با ۲۱ شاخص مدل‌سازی انجام شد.

نتایج بررسی هم‌خطی میان عامل‌های مؤثر (متغیرهای مستقل) بر فرسایش آبکندی

هم‌پوشانی داده‌ها یا چندراستایی عامل‌های مؤثر (متغیرهای مستقل) موجب ایجاد خطای بسیار زیاد در نتایج نهایی داده‌کاوی، مدل‌سازی، پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت رخداد فرسایش آبکندی می‌شود. در این پژوهش، به منظور بررسی و تحلیل هم‌پوشانی عامل‌های مستقل از تحلیل استقلال داده‌ها استفاده شد. در این راستا، با تحلیل چندراستایی^{۲۲} می‌توان همبستگی میان متغیرهای مستقل را برآورد کرد و از دو شاخص مهم به نام‌های ضریب تحمل^{۲۳} (TOL) و عامل انباشتگی پراکنده^{۲۴} (VIF) برای تحلیل چندراستایی استفاده کرد. رابطه میان دو اندازه VIF و TOL عکس بود. تاکنون، هیچ قانون مشخصی برای تعیین آستانه این دو

جدول ۲ - تحلیل هم‌خطی عامل‌های مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی.

Table 2 - Collinear analysis of factors affecting the occurrence of gully erosion.

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error				Beta	Tolerance
Constant	-0.309	0.268		-1.157	0.248		
hillshad	0.036	0.021	0.058	1.741	0.082	0.862	1.16
Slope aspect	0.016	0.007	0.092	2.312	0.021	0.592	1.69
convergence	0.134	0.051	0.141	2.601	0.01	0.318	3.141
curvature	-0.075	0.028	-0.101	-2.659	0.008	0.654	1.528
Curvature classification	-0.317	0.009	0	-0.001	0.999	0.38	2.63
Distance to drainage	0.105	0.039	0.121	2.701	0.007	0.466	2.144
Climatology	-0.029	0.019	-0.058	-1.488	0.137	0.619	1.615
Drainage density	0.158	0.021	0.315	7.659	0	0.557	1.794
Altitude	-0.085	0.041	-0.1	-2.068	0.039	0.399	2.508
Landuse	-0.07	0.024	-0.115	-2.878	0.004	0.59	1.694
Litology	-0.029	0.014	-0.083	-2.009	0.045	0.547	1.827
Slope-Length	-0.033	0.032	-0.059	-1.036	0.301	0.292	3.428
NDVI	0.139	0.031	0.186	4.572	0	0.57	1.755
Plan Crvature	-0.037	0.041	-0.039	-0.892	0.372	0.487	2.053
Profile Crvature	0.061	0.036	0.068	1.692	0.091	0.586	1.708
Rian	0.046	0.024	0.099	1.924	0.055	0.358	2.795
Slope gradient	-0.024	0.034	-0.045	-0.707	0.48	0.229	4.36
Soil type	0.004	0.015	0.01	0.265	0.791	0.636	1.572
Stream power	-0.024	0.036	-0.057	-0.677	0.498	0.131	7.606
Surface texture	-0.052	0.021	-0.1	-2.509	0.012	0.592	1.689
catchment area	0.02	0.036	0.02	0.553	0.58	0.742	1.348
Topographic wetness	0.057	0.042	0.116	1.371	0.171	0.131	7.644
Vertical distance to channel network	0.019	0.023	0.035	0.811	0.418	0.505	1.981

a Dependent Variable: Gully

مناسب‌ترین شاخص برای مقایسه و بررسی طبقه‌های هر یک از عامل‌های مؤثر در رخداد فرسایش آبکندی است. فرسایش‌های آبکندی منطقه مطالعه شده اکثراً در مناطق پست مشاهده شدند. دلیل این یافته می‌تواند تجمع جریان در مناطق پست پایین دست یک آبخیز باشد (انتظاری و

نتایج بررسی عامل‌های مؤثر بر فرسایش آبکندی نتایج بررسی عامل‌های مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی آبخیز نسبت به فراوانی رخداد فرسایش آبکندی که در جدول ۴ نشان داده شده است. نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی در هر پهنه یا طبقه عامل، ساده‌ترین و

22 - Multicollinearity

23 - Tolerance (TOL)

24 - Variance Inflation Factor (VIF)

عامل طول شیب (متر) در ۵ طبقه (صفر تا ۲۳۵ متر) نشان داد که رابطه‌ی میان اندازه‌ی طول شیب با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی رابطه‌ی عکس بود. با افزایش طول شیب نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت. این یافته می‌تواند به دلیل دیگر سنج‌های ریخت‌سنجی در دامنه‌های گسترده مانند استقرار پوشش گیاهی، جنس سازند و ... باشد. در پژوهشی، صوفی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که جهت شیب نقش به‌سزایی در نرخ فرسایش خاک و تحولات زمین‌ریخت‌شناسی سطح زمین دارد. عامل جهت شیب در پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش آبکندی نقش مهمی دارد و در پژوهش‌های پیشین استفاده‌شده است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴، سان و همکاران ۲۰۲۲). بر اساس نتایج این پژوهش، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و نقشه‌ی جهت یا درجه شیب در ۹ طبقه صاف، شمالی، شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوبی، جنوب غربی، غرب و شمال غربی ارائه شد. بیشترین اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی به ترتیب در جهت‌های شیب شمال، شمال غرب و شمال شرق مشاهده شد. دلیل این یافته می‌تواند رطوبت و ژرفای بیشتر خاک در دامنه‌های شمالی باشد. همچنین، کمترین اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی در جهت‌های شیب جنوب، صاف و جنوب شرق بود.

برای سطح زمین پنج نوع انحنای شامل انحنای کلی، انحنای مقطع و انحنای دامنه یا سطح، هم‌گرایی سطح زمین و طبقه‌بندی انحناء در نظر گرفته شد. هر یک از این متغیرها حاوی داده‌های متمایزی از وضعیت هم‌گرایی عمودی و افقی دامنه‌ها بودند و تأثیر زیادی بر شرایط آبی جریان سطحی، زیرسطحی و در نتیجه بر نرخ فرسایش خاک داشتند. عامل‌های انحناء در پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی غالباً استفاده شده اند (شهریور و همکاران ۲۰۱۶، روی و همکاران ۲۰۱۹). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص انحناء در سه طبقه هم‌گرا یا مقعر^{۲۵} (۱۸/۲۴- تا ۰/۱-)، صاف یا مسطح^{۲۶} (۰/۱- تا ۰/۱)، و اگر یا محدب^{۲۷} (۰/۱ تا ۲۰/۶۴) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص انحناء کلی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکندی افزایش یافت (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش یافت (صاف به واگرا). به‌طور کلی نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی طبقه هم‌گرا در مقایسه با طبقه واگرا بیش تر بود.

نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص انحناء دامنه یا طولی در سه طبقه هم‌گرا یا مقعر

همکاران (۲۰۱۴). نتایج بررسی نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های بلندی نشان داد که در پنج طبقه بلندی (>۵۰۰، ۱۵۰۰-۵۰۰، ۲۵۰۰-۱۵۰۰، ۳۰۰۰-۲۵۰۰ متر) با افزایش بلندی تا ۲۵۰۰ متر اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی افزایش یافت و این رابطه مستقیم بود، اما از بلندی ۲۵۰۰ متر نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت و این رابطه عکس بود. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و نقشه شاخص سایه روشن در ۴ طبقه نشان داد که اندازه شاخص سایه روشن (۰/۰۵ تا ۱/۹۱) به اثر ترکیب بلندی با ریخت‌سنجی سطح زمین بستگی دارد و با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی رابطه عکس داشت. نتایج نشان داد که رابطه میان بلندی و مناطق مستعد به فرسایش آبکندی (از نظر کمی) عکس بود. این یافته‌ها با نتایج دیگر پژوهش‌ها (مرکر و همکاران ۲۰۱۵؛ رنگزن و همکاران ۲۰۲۲) هم‌راستا است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و نقشه درجه شیب (درصد) در ۵ طبقه کم‌تر از ۵٪ (دشت‌ها)، ۵ تا ۱۲٪ (دشت‌سرها)، ۱۲ تا ۲۵٪ (تپه‌ها)، ۲۵ تا ۴۰٪ (کوهستانی کم شیب) و بیش‌تر از ۴۰٪ (کوهستانی با شیب زیاد) نشان داد که رابطه میان نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی با افزایش شیب عکس بود. به بیان دیگر با افزایش شیب، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت.

درجه شیب یکی از اصلی‌ترین عامل‌های محیطی در فرایند شکل‌گیری فرسایش آبکندی است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴؛ رحمتی و همکاران ۲۰۱۷). در پژوهشی لانا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که عامل شیب تأثیر زیادی بر خصوصیات آبی جریان داشت و به دنبال آن، اندازه فرسایش خاک نیز تغییر یافت و فرسایش آبکندی رخ داد. در این پژوهش بر اساس نتایج نسبت فراوانی و وزن‌های به‌دست آمده از هر دو مدل (وزن شاهد، دمپستر-شیفر) مشخص شد که در رخساره زمین‌ریخت‌شناختی دشت‌سر تا قبل از رخساره کوهستان با افزایش شیب (تا ۱۵٪) اندازه رخداد فرسایش آبکندی افزایش یافت. از آنجایی که شکل‌گیری فرسایش آبکندی وابستگی زیادی به شرایط بالادست دارد، هنگامی که طول دامنه زیاد باشد، ظرفیت رخداد فرسایش آبکندی به واسطه تجمع جریان‌های سطحی، افزایش خواهد یافت. از این‌رو، عامل طول دامنه در برخی از پیش‌بینی‌های استعداد فرسایش خاک به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده استفاده‌شده است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴؛ روی و همکاران ۲۰۱۹). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و

25- Concave

26- Flat

27- Convex

هیئتوری و همکاران ۲۰۲۲). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص فاصله عمودی تا شبکه آبراهه در ۴ طبقه (۰-۸۵ متر) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص فاصله عمودی تا شبکه آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکنند افزایش یافت (۱۵-۰ متر) و سپس کاهش یافت (<۱۵ متر). بر اساس این نتایج در آبخیز مطالعه‌شده با افزایش فاصله افقی و عمودی از آبراهه‌ها نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز کاهش یافت. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های فاصله از آبراهه بر حسب متر در ۴ طبقه (۰ تا بیشتر از ۵۰۰ متر) ارائه شد. رابطه میان اندازه فاصله از آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی عکس بود. به بیان دیگر با افزایش فاصله از آبراهه، اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت.

سطح زهکشی آبخیز هرچه بیشتر باشد تمرکز جریان در قسمت‌های پایین‌دست نیز افزایش خواهد یافت و رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش خواهد یافت (شیرانی ۲۰۱۸). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص سطح زهکشی آبخیز در ۴ طبقه (۵۵-۰/۲۱ کیلومتر) ارائه شد. به‌طور کلی رابطه میان نسبت فراوانی و طبقه‌های شاخص سطح زهکشی آبخیز مطالعه‌شده مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص سطح زهکشی آبخیز، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت. این یافته با نتایج پژوهش سعیدیان و همکاران (۲۰۲۳) هم‌خوانی دارد.

بافت سطحی زمین بیانگر زبری سطح زمین است. بافت سطحی زبر بیانگر وجود رسوب‌گذاری متناوب یا سازندهای سست است و در نتیجه در سطح زمین اندازه فرسایش زیاد خواهد بود. بنابراین، در سطوح با زبری زیاد امکان رخداد فرسایش آبکندی بیشتر خواهد بود. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص بافت سطحی زمین در ۴ طبقه (۲۳/۵-۱۲/۲۵) ارائه شد. رابطه میان اندازه شاخص بافت سطحی زمین با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش بافت سطحی زمین، اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت.

شاخص توان جریان که نشان‌دهنده اندازه انرژی جریان است در پژوهش‌های گوناگون فرسایش و سیل استفاده‌شده است (لیوزو و همکاران ۲۰۱۹؛ آزادبو و همکاران ۲۰۲۱). انرژی جریان نقش مهمی در شروع فرایند فرسایش آبکندی دارد (شای و همکاران ۲۰۲۰). از این رو، شاخص توان جریان در پژوهش‌های پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی کاربرد فراوانی داشته است

(۹/۷۴- تا ۰/۱-)، صاف یا مسطح (۰/۱- تا ۰/۱)، واگرا یا محدب (۰/۱ تا ۱۰/۲۳) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص انحنا دامنه یا طولی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکنند افزایش یافت (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش یافت (صاف به واگرا). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و شاخص طبقه‌بندی انحنا در هشت طبقه از ۱ تا ۸ ارائه شد. به‌طور کلی رابطه میان نسبت فراوانی و طبقه‌های شاخص طبقه‌بندی انحنا عکس بود. به بیان دیگر با افزایش شاخص طبقه‌بندی انحنا، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت.

نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص هم‌گرایی در ۴ طبقه (۱۷- تا ۱۷/۵) ارائه شد. به‌طور کلی رابطه میان نسبت فراوانی و طبقه‌های شاخص هم‌گرایی عکس بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص هم‌گرایی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص انحنا نیم‌رخ یا عرضی مناطق مطالعه‌شده در سه طبقه هم‌گرا یا مقعر (۱۱/۸۶ تا ۰/۱)، صاف یا مسطح (۰/۱ تا ۰/۱-)، واگرا یا محدب (۰/۱- تا ۱۹/۳-) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص انحنا نیم‌رخ یا عرضی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکنند افزایش یافت (واگرا به صاف) و سپس کاهش یافت (صاف به هم‌گرا). در آبخیز ایلام نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی طبقه هم‌گرا در مقایسه با طبقه واگرا بیش‌تر بود. به‌طور کلی اندازه‌های منفی انحنا که بیانگر هم‌گرایی سطح است به دلیل تمرکز جریان و تأثیر بیشتر بر فرسایش در مقایسه با اندازه‌های مثبت انحنا یا سطوح صاف، اندازه‌های بیشتری از نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی را کسب کردند. بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به نقشه شاخص هم‌گرایی و منحنی پاسخ این شاخص، بیش‌تر آبکنندها در مناطق مقعر تشکیل شده‌اند. مناطق پست که حالت مقعر دارند، نقش چاله‌هایی را دارند که باعث به دام افتادگی رواناب می‌شوند و شرایط لازم برای انحلال را فراهم می‌آورد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های انگلیسری و همکاران ۲۰۱۶، رحمتی و همکاران ۲۰۱۷ هم‌راستا است. پیرامون آبراهه‌ها و رودها به دلیل تمرکز جریان و جریان آب‌های سطحی عموماً شرایط مناسبی برای شکل‌گیری فرسایش آبکندی است (تادسل و همکاران ۲۰۲۳). از این رو، فاصله افقی و عمودی از جریان به‌عنوان یکی از متغیرهای محیطی در پیش‌بینی و تحلیل مکانی استعداد فرسایش آبکندی به کار گرفته شده است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴، رحمتی و همکاران ۲۰۱۶).

رخداد فرسایش آبکندی اندکی کاهش‌ی بود و سپس از اندازه ۱/۸ و بیشتر شاخص نامبرده، این روند افزایشی بود. تراکم زهکشی یکی از معیارهای مهم توصیف رفتار و پاسخ آب‌شناختی آبخیز است. هرچه اندازه تراکم زهکشی در آبخیز بیشتر باشد، ظرفیت تخلیه جریان از آبخیز سریع‌تر خواهد بود. در پژوهشی گایدن و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان دادند که در قسمت‌هایی از آبخیز که تراکم زهکشی بیشتر باشد، احتمال فرسایش آبکندی و تولید رسوب نیز بیشتر است. بر اساس نتایج پژوهش رحمتی و همکاران (۲۰۱۶)، تراکم زهکشی موجب تجمع بیشتر جریان در یک محدوده از آبخیز است که به‌نوبه خود افزایش احتمال شکل‌گیری فرسایش آبکندی در این محدوده‌ها را نیز به‌دنبال خواهد داشت. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های تراکم آبراهه در ۵ طبقه (۰-۳۴) برحسب کیلومتر در کیلومتر مربع ارائه شد. رابطه میان نسبت فراوانی آبکند و شاخص تراکم آبراهه مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه تراکم آبراهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت (سلیمانپور و همکاران ۲۰۲۱، تادسل و همکاران ۲۰۲۳، زاگری‌نژاد و همکاران ۲۰۲۳).

سازند زمین‌شناسی یکی از مهم‌ترین سنجه‌های مؤثر در رخداد فرسایش آبکندی است. زیرا مقاومت واحدهای سنگی گوناگون و اندازه حساسیت آن‌ها نسبت به انواع فرسایش به‌ویژه فرسایش آبی نیز متفاوت است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و نوع واحد سنگی در ۵ گروه بر حسب ویژگی‌های سنگی ارائه شد. بیشترین رخداد فرسایش آبکندی به‌ترتیب در گروه‌های دو، چهار، سه، یک و پنج مشاهده شد. گروه‌های سنگی در جدول ۳ نشان داده شده است.

داب و همکاران ۲۰۱۴؛ کنسکنتی و روتگینو ۲۰۲۰). در پژوهشی شیت و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل وزن شاهد نشان دادند که رابطه میان شاخص توان جریان و رخداد فرسایش آبکندی معنی‌دار بود. تأثیر مستقیم این شاخص در کنش سطح زمین و شکل‌گیری فرسایش آبکندی نیز در نتایج پژوهش ملیو و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص توان آبراهه در ۵ طبقه (۱۳/۵-۷/۶۹) ارائه شد. رابطه میان اندازه نسبت فراوانی و شاخص توان آبراهه مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص توان آبراهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت.

در شاخص رطوبت پستی‌بلندی، با در نظر گرفتن مساحت بالادست هر نقطه، ظرفیت تولید رواناب و جریان به‌شکل غیرمستقیم نشان داده می‌شود. جانسویزیک و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که با استفاده از شاخص رطوبت پستی‌بلندی می‌توان بسیاری از فرایندهای سطحی و زیرسطحی را در مقیاس چشم‌انداز تفسیر کرد. از شاخص رطوبت پستی‌بلندی می‌توان در پژوهش‌های پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی در مدل‌های داده‌کاوی، آماری و احتمالاتی استفاده کرد (گاین و همکاران ۲۰۱۹؛ ایگو و همکاران ۲۰۲۰). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص رطوبت پستی‌بلندی در ۵ طبقه (۷/۵۲-۱۴/۱۴) ارائه شد. رابطه میان نسبت فراوانی آبکند و شاخص رطوبت پستی‌بلندی مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص رطوبت پستی‌بلندی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت. در آبخیز ایلام نتایج بررسی شاخص رطوبت پستی‌بلندی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا از اندازه ۷/۵۲ تا ۱/۸ شاخص نامبرده، روند فراوانی

جدول ۳- گروه سنگی سازندهای زمین‌شناسی بر اساس ویژگی‌های سنگی.

Table 3- rock group of geological formations based on rock characteristics.

group code	percent age of formati	area in hectares	lithology	the type of geological formation
1	7.21	137116	Alternation of marl and sandstone	Aghajari
1	10.84	205891	Marl, eniedrite, gypsum, salt and bitumen streaks	Gach-saran
2	12.63	240751	Shale, sandstone, marl and thin gray interbedded limestone	Gurpi
3	12.02	229065	Alternation of thin-layered limestone and marl	Ilam
1	1.18	22360	Thick layered conglomerate with interlayer of sandstone and marl	Bakhtiari Conglomerate
4	18.41	350767	Green to blue shale and marl	Pabde
1	2.46	46880	Bulk lime with thin lime interlayers	Lehbri
1	13.25	247112	River deposits and new alluviums	Quaternary
5	22.00	419292	Limestone masses	Asmari

پژوهش با افزایش بارش به‌ویژه در مناطق اقلیمی فراه خشک، خشک و نیمه‌خشک اندازه‌ی رخدادهای فرسایش آبکندی بیشتر بود. نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و طبقه‌های بارش در ۴ طبقه (کم‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر، ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر، ۳۵۰ تا ۳۷۰ میلی‌متر و بیشتر از ۳۷۰ میلی‌متر) ارائه شد. رابطه‌ی اندازه‌ی بارش با نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش بارش نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت. نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و نوع اقلیم در ۳ اقلیم (نیمه‌خشک از جنوب و جنوب‌غرب به نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای به طرف شمال آبخیز) ارائه شد. بیشترین اندازه‌ی نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی به ترتیب در اقلیم مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب مشاهده شد.

نتایج تطبیقی عامل‌ها و آستانه فرسایش آبکندی

بیشترین رخدادهای آبکندی در طبقه بلندی کمتر از ۵۰۰ متر تا بلندی ۱۵۰۰ متر با اندازه‌ی بارش ۱۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر، سنگ‌شناسی رسوبات منفصل، شیل و مارن، تراکم آبراهه ۰/۷-۳/۲ کیلومتر در کیلومتر مربع، نوع خاک اینسپتی‌سویل یا لیتیک‌کلسی‌زرپیت، درجه‌ی شیب ۰ تا ۱۲/۵٪، با کاربری زمین کشاورزی و باغ، مرتعی و زمین بایر، شاخص بهنجارشده تفاوت پوشش گیاهی ۰/۷۵-۰/۵۰، تحلیل سایه روشن ۰/۷۷-۰/۵۵، شاخص رطوبت پستی‌بلندی ۳/۵-۸/۱۴، شاخص هم‌گرایی ۰/۱- تا ۰/۱، انحناى دامنه ۰/۱- تا ۰/۱، وجه شیب ۶۷/۵ و ۲۹۲/۵ درجه، فاصله از آبراهه ۲۵-۲۰۰ متر، فاصله عمودی از شبکه آبراهه ۰-۴۰۰ متر، انحنای ۰/۱- تا ۰/۱، اقلیم فراه خشک و نیمه‌خشک، سطح زه‌کشی آبخیز ۰/۱ کیلومتر مربع، انحنای مقطع ۰/۱- تا ۰/۱، طول شیب ۲۰-۲۰۰ متر و بافت سطح زمین ۵/۵-۸/۵ مشاهده شد. خروجی لایه‌ها نشان داد که بیشترین رخداد آبکندی از دیدگاه زمین‌شناسی در گروه‌های سنگی ۱ و ۲ مارن‌های فرسایش‌پذیر سازندهای گورپی، پابده، گچساران و آغاچاری بودند و از دیدگاه کاربری در کاربری زمین‌های مرتعی، بایر، کشاورزی و باغی بودند که بر روند شکل‌گیری مراکز جمعیتی شهر ایلام، شهرک صنعتی، شهر چوار، کارخانه پتروشیمی، پالایشگاه گاز، سازه‌های حفاری و استخراج نفت، سازه‌های سد و روستاهای توابع دو شهرستان منطبق بود. از این‌رو، می‌توان گفت که تغییرات کاربری یکی از مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار در تشدید فرسایش آبکندی در آبخیز ایلام است.

تغییر کاربری زمین‌ها از جنگلی یا مرتعی به کاربری کشاورزی و باغ به دلیل تأثیر فعالیت انسانی و جریان‌های مصنوعی آب در سطح زمین و یا جابه‌جایی خاک (شخم زدن)، نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی افزایش یافت. از سوی دیگر، در مناطق با پوشش متراکم جنگلی و مرتعی به دلیل استقرار گیاه و نبودن جریان‌های سطحی، گستردگی رخدادهای فرسایش آبکندی کم بود. تأثیر نوع کاربری زمین‌ها در ایجاد آبکندهای خطی معنی‌دار بود و تأثیر کاربری مرتع در ایجاد این آبکندها بیشتر بود. این یافته به‌وسیله‌ی پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (جعفری‌گرزین و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و کاربری زمین در ۶ گروه ارائه شد. اندازه‌ی نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی در انواع کاربری زمین به ترتیب از بیشترین تا کم‌ترین که در جدول ۴ نشان داده شده است. در آبخیز ایلام، رخدادهای فرسایش آبکندی به ترتیب در کاربری کشاورزی و باغ، زمین بایر، جنگل و مرتع فقیر مشاهده شد. نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و انواع خاک در ۵ گروه ارائه شد. اندازه‌ی فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی در خاک‌هایی با رخنمون سنگی اینسپتی‌سویل کمترین بود و در بدلندها یا هزارده‌ها بیش‌ترین بود.

پوشش گیاهی همواره یک نقش محافظتی در مقابل بارندگی و جریان‌های سطحی داشته و موجب کاهش فرسایش خاک می‌شود. نقشه‌ی تراکم پوشش گیاهی داده‌های مفیدی در زمینه‌ی آسیب‌پذیری و حساسیت زمین‌ها نسبت به فرسایش خاک ارائه داد. یکی از شاخص‌های رایج برای محاسبه تراکم پوشش گیاهی، شاخص بهنجارشده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) است که در پژوهش‌های مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش آبکندی استفاده شده است (آزادپو و همکاران، ۲۰۲۱؛ سان و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص NDVI در ۳ طبقه ($>0/11$ و $0/06-0/11$ و $<0/06$) ارائه شد. رابطه‌ی اندازه‌ی شاخص NDVI با نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی عکس بود. به بیان دیگر با افزایش شاخص NDVI، اندازه‌ی نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی کاهش یافت.

اندازه‌ی بارندگی

عامل بارندگی، یکی از متغیرهای مهم پیش‌بینی‌کننده در زمینه‌ی ظرفیت‌یابی فرسایش آبکندی است (گاین و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیلی و همکاران، ۲۰۲۰؛ و همکاران، ۲۰۲۲). در این

جدول ۴- نتایج رابطه میان هر عامل مؤثر بر رخداد فرسایش آب‌کندی و معادله‌های مدل وزن شاهد و مدل دمپستر- شیفر.

Table 4- The results of the relationship between each factor affecting the occurrence of gully erosion and the Wight of Evidence model and the Dempster-Schiffer model.

Parameter	Class	Class area in pixel	Gully erosion area in pixel	FreqR	W=C/S (C)	Belief factor	Belief function	uncertainty
Hillshad	0.005-0.65	252043	14	0.46	-3.118	0.458	0.139	0.584
	0.65-0.82	806210	133	1.36	4.626	1.361	0.414	0.398
	0.82-1	623944	69	0.91	-0.929	0.912	0.278	0.456
	1-1.91	223585	15	0.55	-2.431	0.553	0.168	0.561
Slope aspect	Flat	599189	20	0.28	-6.739	0.275	0.025	0.829
	North	135471	5	0.3	-2.745	0.304	0.027	0.857
	Northeast	184001	6	0.27	-3.356	0.269	0.024	0.857
	East	122902	37	2.48	5.674	2.484	0.221	0.68
	Southeast	125029	35	2.31	5.088	2.31	0.206	0.694
	South	182534	54	2.44	6.806	2.441	0.218	0.689
	Southwest	278469	44	1.3	1.901	1.304	0.116	0.779
	West	167726	16	0.79	-1.003	0.787	0.07	0.817
	Northwest	110461	14	1.05	0.172	1.046	0.093	0.797
	Climoatology	SemiArid	944038	35	0.28	-9.288	0.306	0.131
Mediterian		818558	195	1.83	10.879	1.966	0.844	0.066
SemiHumid		143186	1	0.05	-3.288	0.058	0.025	0.62
Convergence	<-17.23	85342	15	1.45	1.472	1.45	0.389	0.367
	-17.23 to -0.20	710248	98	1.14	1.618	1.138	0.306	0.466
	-17.7	1031636	116	0.93	-1.193	0.928	0.249	0.481
Convergence	>17.5	78556	2	0.21	-2.244	0.21	0.056	0.686
	concave(-18.24 to -0.1)	424926.1	47	0.91	-0.712	0.913	0.356	0.286
Curvature	flat(-0.1-0.1)	1178027	166	1.16	3.117	1.163	0.453	0.289
	Convex(0.1-20.64)	302829.1	18	0.49	-3.278	0.49	0.191	0.425
Curvature classification	1	594568	88	1.22	2.254	1.221	0.152	0.735
	2	162462	16	0.81	-0.868	0.812	0.101	0.772
	3	144082	16	0.92	-0.364	0.916	0.114	0.76
	4	80724	13	1.33	1.047	1.329	0.165	0.711
	5	110171	16	1.2	0.745	1.198	0.149	0.727
	6	225073	21	0.77	-1.276	0.77	0.096	0.775
	7	143161	17	0.98	-0.088	0.98	0.122	0.753
	8	445541	44	0.81	-1.551	0.815	0.101	0.766
Distance drainage	to 0-100	684723	138	1.66	7.254	1.663	0.523	0.348
	100-150	569668	70	1.01	0.137	1.014	0.319	0.478
	150-250	379298	23	0.5	-3.685	0.5	0.157	0.613
	250-500	207625	0	0	-1.753	0	0	0.771
	>500	64468	0	0	-0.523	0	0	0.789
Drainage density	0-1.2	382219	1	0.02	-4.047	0.022	0.005	0.688
	1.2-1.7	583825	12	0.17	-7.039	0.17	0.038	0.625
	1.7-27	569841	74	1.07	0.708	1.071	0.239	0.521
	2.7-3.34	369897	144	3.21	14.198	3.213	0.718	0.167
Altitude	<1000	956067	122	1.05	0.804	1.053	0.466	0.342
	1000-1500	746702	109	1.2	2.482	1.204	0.534	0.29

جدول ۴- نتایج رابطه میان هر عامل مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی و معادله های مدل وزن شاهد و مدل دمپستر - شیفر.

Table 4- The results of the relationship between each factor affecting the occurrence of gully erosion and the Wight of Evidence model and the Dempster-Schiffer model.

Parameter	Class	Class area in pixel	Gully erosion area in pixel	FreqR	W=C/S (C)	Belief factor	Belief function	uncertainty
Landuse	1500-2000	175577	0	0	-1.469	0	0	0.777
	2000-2500	27323	0	0	-0.22	0	0	0.794
	2500-2612	113	0	0	-0.001	0	0	0.797
	Orchard	1913	0	0	-0.015	0	0	0.84
	Forest	804167	60	0.62	-4.883	0.616	0.101	0.694
	Agriculture	286101	147	4.24	16.77	4.241	0.697	0.235
	PoorRange	766343	21	0.23	-8.328	0.226	0.037	0.719
	Rock	24682	3	1	0.005	1.003	0.165	0.675
Litology	DensForest	22576	0	0	-0.181	0	0	0.838
	Group1	665907	29	0.36	-6.645	0.359	0.055	0.682
	Group2	240751	124	4.25	15.777	4.251	0.652	0.244
	Group3	229065	11	0.4	-1.176	0.396	0.061	0.727
	Group4	350767	50	1.18	1.269	1.176	0.18	0.631
Slope-Length	Group5	419292	17	0.33	-5.029	0.334	0.051	0.716
	0-2.5	829901	132	1.31	4.117	1.312	0.409	0.436
	2.5-5	476742	76	1.32	2.75	1.315	0.41	0.407
	5-8.5	368528	20	0.45	-3.966	0.448	0.14	0.629
	8.5-13	189692	3	0.13	-3.663	0.13	0.041	0.736
NDVI	13-56.7	40919	0	0	-0.33	0	0	0.792
	<0.15	472136	14	0.24	-5.912	0.245	0.063	0.539
	0.15-0.25	1144150	120	0.87	-2.499	0.865	0.223	0.393
Plan Cruvature	>0.25	289496	97	2.76	10.478	2.765	0.714	0.068
	concavepl(-9.74 to -0.1)	206173	17	0.68	-1.68	0.68	0.266	0.368
	flatpl(-0.1-0.1)	1181404	171	1.19	3.72	1.194	0.467	0.293
Profile Cruvature	convexpl(0.1-10.23)	518205	43	0.68	-2.901	0.685	0.268	0.339
	convexprf(-19.30 to -0.1)	92573	1	0.09	-2.458	0.089	0.041	0.605
	flatprf(-0.1-0.1)	944431	126	1.1	1.514	1.101	0.506	0.19
Rian	concaveprf(0.1-11.86)	868778	104	0.99	-0.172	0.988	0.454	0.205
	<400	359678	14	0.32	-4.652	0.321	0.08	0.632
	400-500	585724	37	0.52	-4.707	0.521	0.13	0.568
	500-550	521374	68	1.08	0.709	1.076	0.267	0.49
Slope gradient	>550	439006	112	2.1	8.704	2.105	0.523	0.31
	<5	635711	95	1.23	2.493	1.233	0.357	0.464
	5-12	558519	107	1.58	5.557	1.581	0.457	0.389
	12-25	384693	27	0.58	-3.162	0.579	0.167	0.608
	25-40	254915	2	0.06	-4.045	0.065	0.019	0.749
Soil type	>40	71943	0	0	-0.585	0	0	0.789
	Rock-Inceptisol	521186	101	1.6	5.464	1.599	0.34	0.505
	XBL BadLands	468052	5	0.09	-5.947	0.088	0.019	0.72
	Rock-Entisol	640686	96	1.24	2.543	1.236	0.263	0.56
	Inceptisol-Vertisol	100699	12	0.98	-0.061	0.983	0.209	0.59
Stream power	Inceptisol	175159	17	0.8	-0.292	0.801	0.17	0.625
	-13.5_-10	170192	16	0.78	-1.065	0.776	0.163	0.631
	-10_-5.5	273052	31	0.94	-0.394	0.937	0.197	0.6
	-5.5_-0.8	461288	61	1.09	0.781	1.091	0.23	0.575
	-0.8_3.5	634992	87	1.13	1.398	1.13	0.238	0.574
Surface texture	3.5_7.69	366259	36	0.81	-0.615	0.811	0.171	0.619
	<12.25	461783	91	1.63	5.268	1.626	0.417	0.384

جدول ۴- نتایج رابطه میان هر عامل مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی و معادله‌های مدل وزن شاهد و مدل دمپستر-شیفر.

Table 4- The results of the relationship between each factor affecting the occurrence of gully erosion and the Wight of Evidence model and the Dempster-Schiffer model.

Parameter	Class	Class area in pixel	Gully erosion area in pixel	FreqR	W=C/S (C)	Belief factor	Belief function	uncertainty
Catchment area	12.25-17.7	569929	89	1.29	2.845	1.288	0.33	0.451
	17.7-23.5	594460	33	0.46	-5.322	0.458	0.117	0.571
	>23.5	279610	18	0.53	-2.894	0.531	0.136	0.594
	<0.1	1750392	192	0.9	-1.384	0.905	0.071	0.513
	0.1-5	137417	28	1.68	0	1.681	0.131	0.679
	5-10	4733	3	5.23	0.16	5.232	0.409	0.393
Topographic wetness	>10	13240	8	4.98	0.422	4.987	0.389	0.415
	1.8_3	551715	52	0.78	-2.148	0.875	0.199	0.543
	3.3_4.85	682319	84	1.02	0.178	0.778	0.177	0.552
	4.85_14.14	228672	48	1.73	4.035	1.016	0.231	0.523
Vertical distance to channel network	<0	667954	94	1.16	1.064	1.732	0.394	0.382
	0-2	471315	72	1.26	1.128	1.161	0.335	0.435
	2-10	582839	61	0.86	-1.375	1.26	0.364	0.406
	>10	183674	4	0.18	-3.57	0.863	0.249	0.484

و نیمه‌خشک به ترتیب ۲/۷۸- و ۰/۶۶ به دست آمد. رابطه میان عامل هم‌گرایی و اندازه‌های وزن شاهد عکس بود. به بیان دیگر، با افزایش اندازه هم‌گرایی (از اندازه منفی به سوی اندازه مثبت)، اندازه‌های وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای عامل هم‌گرایی در آبخیز ایلام به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۳۹ به دست آمد. رابطه میان اندازه عامل انحنا کلی سطح زمین (هم‌گرا، صاف و واگرا) با اندازه‌های وزن شاهد عکس بود. به بیان دیگر، با افزایش اندازه انحنا کلی (از اندازه منفی به سوی اندازه مثبت)، اندازه‌های وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای عامل انحنا کلی سطح زمین (انحنای واگرا و هم‌گرا) به ترتیب ۰/۶۲- و ۰/۰۷- به دست آمد. نتایج نشان داد که رابطه میان طبقه‌های انحنا سطح زمین با اندازه‌های وزن شاهد عکس بود. به بیان دیگر با افزایش طبقه انحنا سطح زمین اندازه وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای عامل طبقه‌بندی انحنا سطح زمین به ترتیب ۰/۲۳۱- و ۰/۲۷۰ به دست آمد. نتایج اندازه‌های وزن شاهد برای عامل فاصله از آبراهه نشان داد که با افزایش فاصله از آبراهه اندازه وزن شاهد کاهش یافت. دو طبقه فاصله از آبراهه بیشتر از ۵۰۰ متر و کمتر از ۱۰۰ متر منطبق با اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد به ترتیب ۰/۵۸- و ۰/۱۲ به دست آمد. نتایج اندازه‌های وزن شاهد و تابع باور برای عامل تراکم آبراهه نشان داد با افزایش تراکم آبراهه اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. دو طبقه تراکم آبراهه کمتر از ۱/۲ کیلومتر در کیلومتر مربع و بیشتر از ۲/۷ کیلومتر در کیلومتر مربع منطبق با اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد به ترتیب ۳/۶۲- و ۰/۴۱ به دست آمد. اندازه عامل بلندی با اندازه‌های وزن شاهد

نتایج اجرای مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر و پهنه‌بندی فرسایش آبکندی

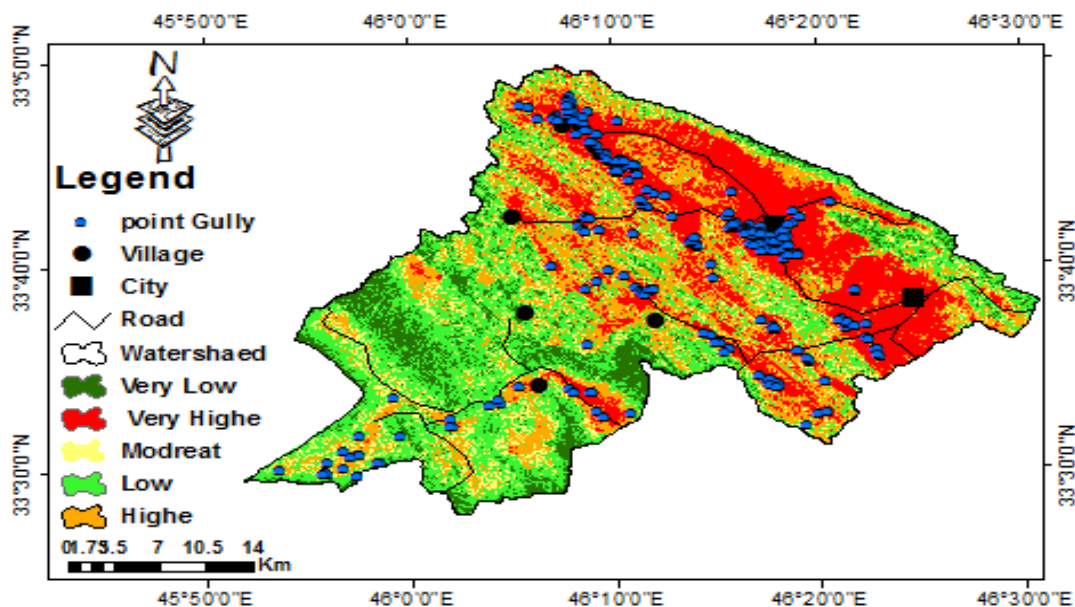
از آنجایی که روند افزایش یا کاهش اندازه‌های وزنی در این دو مدل مشابه یکدیگر بود، فقط نتایج وزنی مربوط به مدل وزن شاهد بررسی شد. همچنین در این پژوهش، در روش وزن شاهد اندازه وزن‌ها، منفی بود و در تابع باور دمپستر-شیفر داده‌ها میان صفر و یک بودند. نتایج وزن‌های محاسبه شده از رابطه میان عامل تحلیل سایه روشن با رخداد فرسایش آبکندی از اجرای مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر نشان داد که با افزایش اندازه سایه روشن، اندازه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت و از اندازه مثبت به اندازه منفی تغییر یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر ۰/۷۰- تا ۰/۰۱ و ۰/۱۴ تا ۰/۴۱ بود. نتایج بررسی عامل جهت شیب نشان داد که جهت شیب شمالی بیشترین و جهت شیب صاف و جنوبی کمترین اندازه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر را کسب کرد. اندازه‌های کمینه وزن شاهد در جهت شیب جنوب‌شرق و جنوب به ترتیب ۱/۱۴- و ۱- به دست آمد و اندازه تابع باور دمپستر-شیفر در جهت شیب صاف و جنوبی ۰/۰۲ بود و در شمال، شمال شرق و شمال غرب ۰/۲۲ محاسبه شد در جهت شیب شمال و شمال شرق ۰/۲۱ بود. همچنین، اندازه‌های بیشینه وزن شاهد به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۴ به دست آمد که این نتایج نشان داد که اندازه‌های کمینه و بیشینه تابع باور دمپستر-شیفر برای جهت شیب مناسب‌تر بود. به طور کلی اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب کمترین و اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشترین اندازه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر را کسب کردند. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای اقلیم‌های نیمه‌مرطوب

وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع برای عامل سطح زهکشی نشان داد با افزایش اندازه سطح زهکشی اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل رطوبت زهکشی نشان داد با افزایش اندازه رطوبت زهکشی اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل فاصله عمودی از شبکه آبراهه نشان داد با افزایش اندازه فاصله عمودی از شبکه آبراهه اندازه وزن شاهد و تابع باور کاهش یافت.

نتایج نقشه طبقه‌بندی حساسیت زمین‌ها نسبت به فرسایش آبکندی در مدل وزن شاهد

نتایج نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل وزن شاهد (WOE) در جدول ۵ نشان داده شده است. درصد مساحت طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۲۷/۹، ۲۱/۹۲، ۷/۹، ۲۸/۱۵ و ۱۴/۱۳ بود. همچنین، درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۸۷/۲۳، ۶/۳۸، ۲/۷۴، ۳/۰۴ و ۰/۶۱ محاسبه شد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد و زیاد روی هم بیش از ۴۹٪ بود و در آبخیز ایلام این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۹۳٪ از رخدادهای فرسایش آبکندی را در بر گرفتند.

از طبقه ۱ تا ۳ وزن شاهد افزایش و سپس در طبقه‌های ۴ و ۵ کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه نتایج وزن شاهد در کاربری زمین‌های مرتع فقیر و ترکیب زراعت و مرتع به ترتیب ۱/۰۷- و ۰/۶۰ محاسبه شد. اندازه‌های کمینه و بیشینه نتایج وزن شاهد برای عامل سنگ‌شناسی گروه‌های ۱ و ۴ به ترتیب ۰/۹۲- و ۰/۸۴ محاسبه شد. اندازه‌های کمینه و بیشینه نتایج وزن شاهد عامل طول شیب برای طبقه ۲۷/۶ تا ۲۳۵ متر و ۱۳/۳۵ تا ۱۴/۲ متر به ترتیب ۱/۹۴- و ۰/۱۶ محاسبه شد. رابطه میان اندازه‌های نتایج وزن شاهد برای عامل NDVI عکس بود. یعنی با افزایش NDVI اندازه وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل انحنای عرضی نشان داد که اندازه وزن شاهد طبقه هم‌گرا در مقایسه با طبقه واگرا بیشتر بود. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل بارش نشان داد که با افزایش بارش اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل درجه شیب نشان داد که با افزایش اندازه شیب اندازه وزن شاهد و تابع باور کاهش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل نوع خاک نشان داد که بیشترین رخداد فرسایش آبکندی در خاک اینسپتی‌سویل مشاهده شد. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل توان آبراهه نشان داد که با افزایش اندازه توان آبراهه اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل بافت سطحی نشان داد با افزایش اندازه بافت، اندازه



شکل ۶- نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل وزن شاهد (WOE).

Figure 6- Map of zoning classes of gully erosion susceptibility using weight of witness model (WOE).

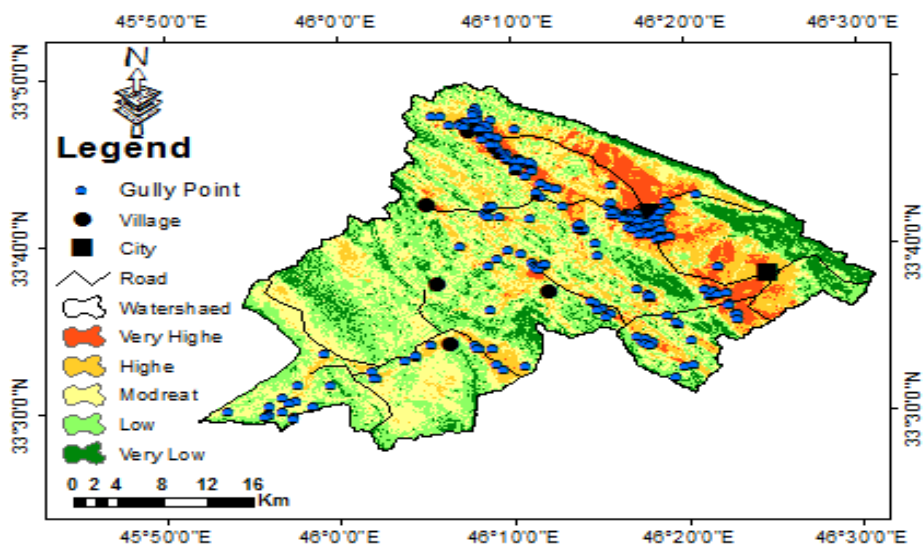
جدول ۵- اندازه‌های شاخص نسبت فراوانی در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی در مدل وزن شاهد.

Table 5- Values of the abundance ratio index in each floor of the zoning map of susceptibility to gully erosion in the Wight of Evidence Model.

Number	Class	Gully erosion pixel	Gully%	Class pixel	Class pixel%	FR	SCAI
1	Low very	2	0.61	269265	14.13	0.04	23.25
2	Low	10	3.04	536408	28.15	0.11	9.26
3	Modreat	9	2.74	150439	7.9	0.35	2.89
4	High	21	6.38	417556	21.92	0.29	3.43
5	High very	287	87.23	531587	27.9	3.13	0.32

همچنین، درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۶۵/۶۵، ۲۱/۲۸، ۹/۴۲، ۳/۳۴ و ۰/۳۰ به دست آمد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد و زیاد روی هم بیش از ۲۷٪ سطح آبخیز را کسب کرد. همچنین، این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۸۶٪ از رخدادهای فرسایش آبکندی را در بر گرفتند.

نتایج نقشه‌های طبقه‌بندی حساسیت زمین‌ها نسبت به فرسایش آبکندی در مدل دمپستر-شیفر
نتایج نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل دمپستر-شیفر در جدول ۶ نشان داده شده است. درصد مساحت طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۹/۳۶، ۱۸/۴۸، ۲۶/۲۶، ۳۰ و ۱۵/۸۹ محاسبه شد.



شکل ۷- نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل دمپستر-شیفر.

Figure 7- Map of zoning classes of gully erosion susceptibility using the Dempster-Shafer Model

جدول ۶- اندازه‌های شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی در مدل دمپستر-شیفر.

Table 6- Index values of abundance ratio and nucleus cell area in each floor of the zoning map of gully erosion susceptibility in the Dempster-Shafer Model.

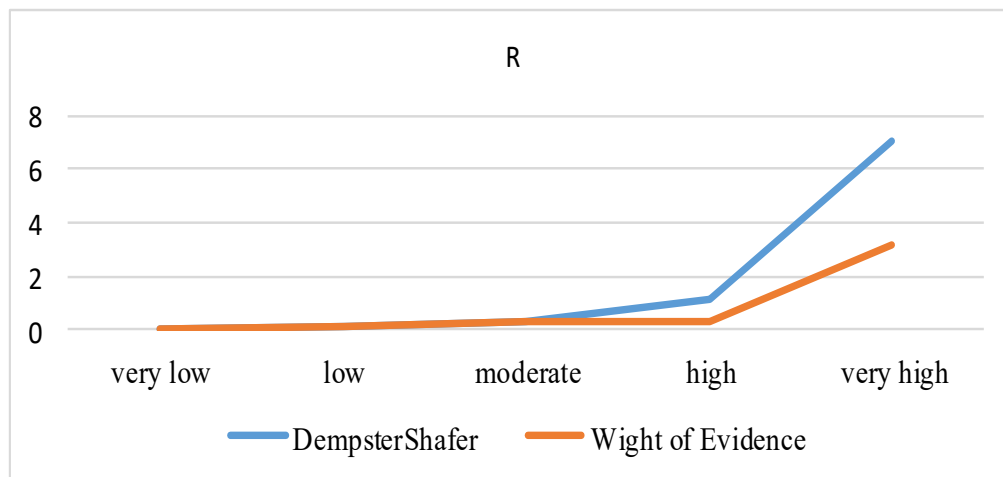
Number	Class	Gully erosion pixel	Gully (%)	Class pixel	Class pixel (%)	FR	SCAI
1	Low very	1	0.3	302829	15.89	0.02	52.29
2	Low	11	3.34	571507	30	0.11	8.97
3	Modreat	31	9.42	500385	26.26	0.36	2.79
4	High	70	21.28	352149	18.48	1.15	0.87
5	High very	216	65.65	178385	9.36	7.01	0.14

هسته تقریباً در هر دو مدل، عکس بود یعنی با افزایش حساسیت زمین‌ها نسبت به رخداد فرسایش آبکندی، شاخص نسبت فراوانی یافت ولی شاخص سطح سلول هسته کاهش یافت. اندازه شاخص نسبت فراوانی در

مقایسه نتایج مدل‌ها
شاخص‌های نسبت فراوانی و سطح سلول هسته مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. رابطه میان دو شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول

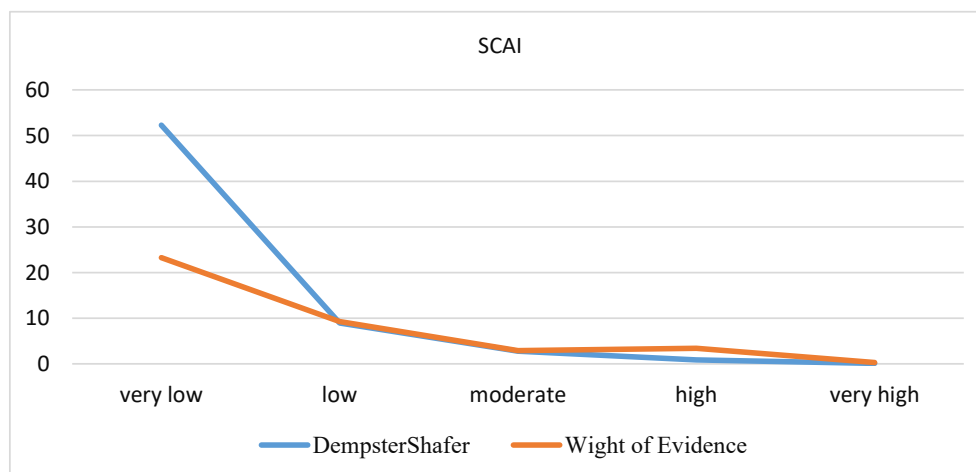
فراوانی مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد افزایشی بود. باید توجه داشت که روند شاخص سطح سلول هسته در هر دو مدل کاهش می‌یابد.

هر دو مدل برای رده‌های خیلی کم تا متوسط حساسیت زمین‌ها نسبت به رخداد فرسایش آبکندی با شیب نسبتاً ملایم افزایش یافت و برای رده‌های زیاد تا خیلی زیاد به شکل قابل توجهی افزایش یافت. روند تغییرات شاخص نسبت



شکل ۸- مقایسه منحنی شاخص نسبت فراوانی طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی در دو مدل.

Figure 8- Comparison of the index diagram of frequency ratio of gully erosion susceptibility classes in two models.



شکل ۹- مقایسه منحنی شاخص سطح سلول هسته طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی در دو مدل.

Figure 9- Comparison of the graph of the core cell surface index of gully erosion susceptibility classes in two models.

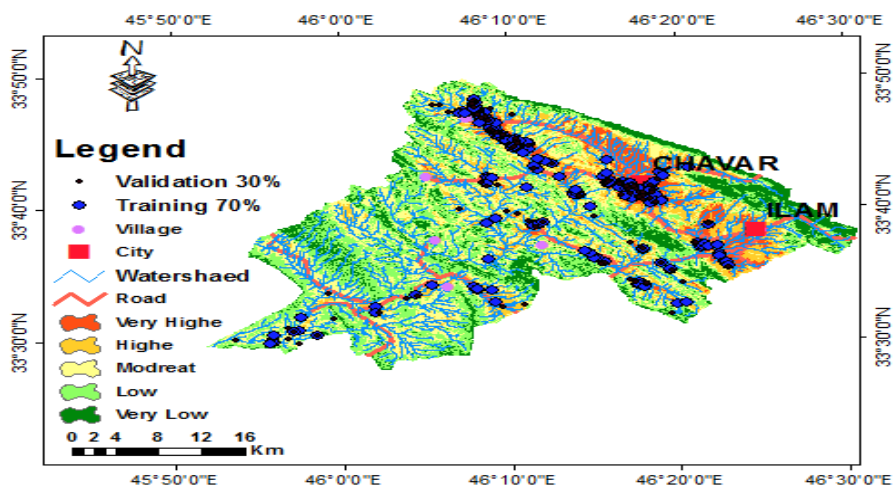
شدند. سپس داده‌ها به فایل اکسل انتقال داده شدند و با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل و بررسی شدند. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دو مدل دمپستر-شیفر و وزن شاهد با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) و مشخصه عملکرد دریافت کننده (ROC) در جدول ۷ و ۸ آورده شده است. اندازه‌های AUC مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۰ محاسبه شد. به بیان دیگر، در مرحله واسنجی اندازه‌های کمینه و بیشینه سطح زیر منحنی شاخص مشخصه عملکرد دریافت کننده از ۰/۸۹ تا ۰/۹۷ متغیر بود. این

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها

در این پژوهش، نقشه پراکنش فرسایش آبکندی برای ۳۳۱ آبکنده تهیه و رقومی شد که از این تعداد آبکنده ۷۰٪ (۲۳۲ آبکنده) برای آموزش و از ۳۰٪ (۹۹ آبکنده) برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد و در این راستا از منحنی مشخصه عملکرد ساختار ROC و مساحت سطح زیر منحنی AUC استفاده شد (شکل ۱۱). ابتدا داده‌های به دست آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش آبکندی با استفاده از هر دو مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر به نقاط مربوط به ۹۹ آبکنده و ۲۳۲ آبکنده به شکل مجزا برازش داده

خوب، خیلی خوب و عالی از طبقه‌بندی سطح زیر منحنی منطبق بود. اندازه‌های سطح زیرمنحنی مدل‌ها در مرحله پیش‌بینی اندکی کمتر از مرحله واسنجی بود. به‌طور کلی، نتایج سطح زیرمنحنی در مرحله واسنجی و هم در مرحله پیش‌بینی نشان داد که بیشترین و کمترین دقت مربوط به مدل وزن شاهد بود. از این‌رو، مدل دمستر-شیفر و وزن شاهد به‌ترتیب کارآمد بودند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش صابرچناری و همکاران (۲۰۱۶) هم‌راستا است.

اندازه‌ها با طبقه‌های کارآمدی یا دقت خوب، خیلی خوب و عالی از طبقه‌بندی سطح زیر منحنی منطبق بود (شکل ۱۲). همچنین، اندازه‌های ROC مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد در مرحله اعتبارسنجی یا پیش‌بینی در آبخیز ایلام به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۱ محاسبه شد. به بیان دیگر، در مرحله پیش‌بینی رخداد فرسایش آبکندی اندازه‌های کمینه و بیشینه سطح زیر شاخص مشخصه عملکرد دریافت‌کننده از ۰/۸۰ تا ۰/۹۶ متغیر بود (شکل ۱۲). این اندازه‌ها با طبقه‌های کارآمدی یا دقت



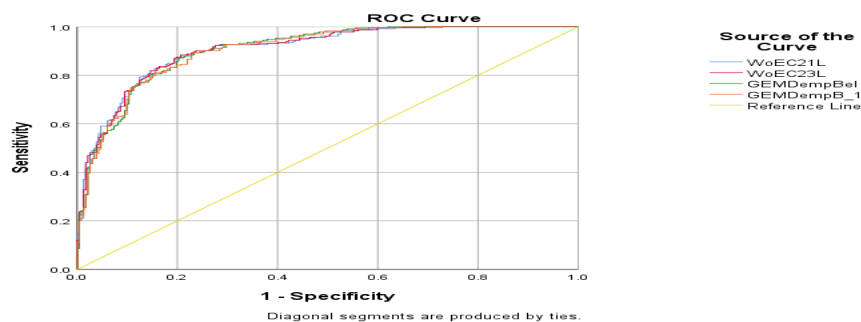
شکل ۱۰- تلفیق داده آموزشی و آزمایشی با خروجی مدل.

Figure 10- Combination of training and test data with model output.

جدول ۷- نتایج تحلیل ROC در مرحله واسنجی مدل‌ها بر اساس ۷۰٪ داده‌های پراکنش رخداد فرسایش آبکندی.

Table 7- The results of ROC analysis in the model calibration stage based on 70% of the distribution data of gully erosion events.

Test Result Variable(s)	Area	Std. Error	Asymptotic Sig.b	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
DempsterShafer	0.908	0.013	0	0.881	0.934
Wight of Evidence	0.905	0.014	0	0.879	0.932



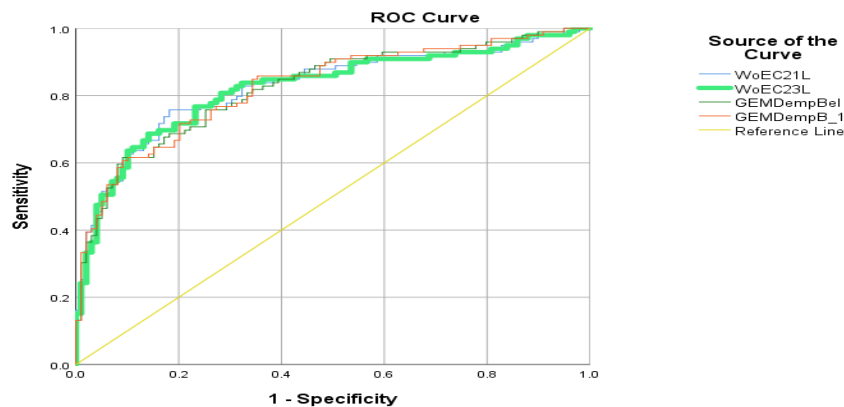
شکل ۱۱- منحنی مشخصه عملکرد وزن شاهد و دمپستر-شیفر در مرحله واسنجی با استفاده از ۷۰٪ پراکنش رخداد آبکندی.

Figure 11- The characteristic curve diagram of Wight of Evidence and Dempster-Shafer performance in the calibration phase using 70% distribution of the occurrence of gully.

جدول ۸- نتایج تحلیل سطح زیرمنحنی ROC در مرحله پیش‌بینی بر اساس ۳۰٪ داده‌های پراکنش رخداد فرسایش آبکندی.

Table 8- The results of the analysis of the level under the ROC curve in the prediction stage based on 30% of the distribution data of the gully erosion event.

Test Result Variable(s)	Area	Std. Error ^a	Asymptotic Sig. ^b	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
DempsterShafer	0.908	0.013	0	0.881	0.934
Wight of Evidence	0.905	0.014	0	0.879	0.932



شکل ۱۲- منحنی مشخصه عملکرد دمپستر-شیفر و وزن شاهد در مرحله پیش‌بینی با استفاده از ۳۰٪ پراکنش رخداد آبکندها

Figure 12 - Dempster-Shafer performance curve diagram and witness weight in the prediction stage using 30% distribution of the occurrence of gullies.

خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۶۵/۶۵، ۲۱/۲۸، ۹/۴۲، ۳/۳۴ و ۰/۳۰ به دست آمد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد و زیاد روی هم بیش از ۲۷٪ سطح آبخیز بود. همچنین، این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۸۶٪ از رخداد‌های فرسایش آبکندی را در بر گرفتند که با نتایج پژوهش صابرچناری و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

نتایج اعتبارسنجی و کارآمدی مدل‌ها بر اساس نقشه پراکنش آبکندها (۷۰٪ آموزشی و ۳۰٪ آزمایشی) با استفاده از سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد ساختار ROC و مساحت سطح زیر منحنی AUC نشان داد که در منطقه پژوهشی، عملکرد مدل دمپستر-شیفر با ضریب تبیین ۰/۹۳۴ و مدل وزن شاهد با ضریب تبیین ۰/۹۳۲ خوب بود. این یافته با نتایج پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۱۹)، هیتوری و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد. همچنین، آستانه‌های عامل‌های مؤثر شامل بارش ۱۰۰-۷۵ میلی‌متر، سنگ‌شناسی رسوبات منفصل، شیل و مارن، بلندی ۰ تا ۱۵۰۰ متر، تراکم آبراهه ۰/۷-۳/۲ کیلومتر در کیلومتر مربع، نوع خاک اینسپتی‌سویل یا لیتیک‌کلسی‌زریپت، درجه شیب ۱۲/۵٪، کاربری زمین‌های کشاورزی و باغ و زمین بایر، شاخص

نتیجه‌گیری

نتایج خروجی لایه‌ها، وزن‌دهی، طبقه‌بندی و تلفیق در دو مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر سبب تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش پذیری آبکندها شد که در مدل وزن شاهد درصد مساحت طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۲۷/۹، ۲۱/۹۲، ۷/۹، ۲۸/۱۵ و ۱۴/۱۳ به دست آمد. همچنین، با استفاده از مدل وزن شاهد درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۸۷/۲۳، ۶/۳۸، ۲/۷۴، ۳/۰۴ و ۰/۶۱ محاسبه شد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد و زیاد روی هم بیش از ۴۹٪ بود. در آبخیز ایلام این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۹۳٪ از رخداد‌های فرسایش آبکندی را در بر گرفتند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های داب و همکاران (۲۰۱۴) و شیت و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. در مدل دمپستر-شیفر بر پایه داده‌های نقشه خروجی، درصد مساحت طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۹/۳۶، ۱۸/۴۸، ۲۶/۲۶، ۳۰ و ۱۵/۸۹ محاسبه شد. همچنین با استفاده از دمپستر-شیفر درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت

خروجی با دقت‌های متفاوت سنج‌های پستی‌بلندی (تهیه نقشه DEM با دقت‌های ۲ متر با روش تصویرسنجی و...) ارزیابی شود. همچنین، از دیگر شاخص‌ها و سنج‌های تأثیرگذار بر اساس نوع منطقه (خط گسل و نقشه زمین‌ساخت) برای اجرای مدل استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود تا مدیران حفاظت خاک و برنامه‌ریزان از نقشه‌های پهنه‌بندی در عملیات حفاظت خاک استفاده کنند. همچنین از دیگر روش‌ها و مدل‌های آماری در پهنه‌بندی فرسایش آبی و مقایسه نتایج آن‌ها استفاده شود. پیشنهاد می‌شود پایش روند توسعه و گسترش آبکندها در منطقه مطالعه‌شده قبل و بعد از اقدام‌های اصلاحی و احیایی پوشش گیاهی و عملیات مکانیکی مهار آبکندها انجام شود.

به‌نچاریشده تفاوت پوشش گیاهی ۰/۰۷۵ - ۰/۵۰، تحلیل سایه روشن ۰/۷۷ - ۰/۵۵، شاخص رطوبت پستی‌بلندی ۸/۱۴-۳/۵، شاخص هم‌گرایی ۰/۱ - ۰/۱ تا ۰/۱، انحنای دامنه ۰/۱ - ۰/۱ تا ۰/۱، وجه شیب ۶۷/۵ و ۲۹۲/۵ درجه، فاصله از آبراهه ۲۵-۲۰۰ متر، فاصله عمودی از شبکه آبراهه ۰-۴۰۰ متر، انحناء ۰/۱ - ۰/۱ تا ۰/۱، اقلیم فراخشک و نیمه‌خشک، سطح زهکشی آبخیز ۰/۱ کیلومتر مربع، انحناء مقطع ۰/۱ - ۰/۱ تا ۰/۱، طول شیب ۲۰-۲۰۰ متر و بافت سطح زمین ۵/۵-۸/۵ بود.

پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود با استفاده از DEM با قدرت تفکیک مکانی بیشتر و مقایسه نتایج

فهرست منابع

- Angileri SE, Conoscenti C, Hochschild V, Märker M, Rotigliano E, Agnesi V. 2016. Water erosion susceptibility mapping by applying Stochastic Gradient Treeboost to the Imera Meridionale River Basin (Sicily, Italy).-*Geomorphology*,262(73): 61-76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03018>.
- Azedou A, Lahssini S, Khattabi A, Meliho M, Rifai N. 2021. A methodological comparison of three models for gully erosion susceptibility mapping in the rural municipality of El Faïd (Morocco). *Sustainability*, 13(2):658-682. <https://doi.org/10.3390/su13020682>.
- Ciccolini Ugo, Margherita Bufalini, Marco Materazzi, Francesco Dramis. 2024. Gully erosion development in drainage basins: A new morphometric approach. *Land*, 13, no. 6(32): 792. <https://doi.org/10.3390/land13060792>
- Conoscenti C, Rotigliano E. 2020. Predicting gully occurrence at watershed scale: Comparing topographic indices and multivariate statistical models. *Geomorphology*, pp. 335- 359. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107123>
- Conoscenti C, Angileri S, Cappadonia C, Rotigliano E, Agnesi V, Märker M. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204(1): 399-411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>.
- Dube F, Nhapi I, Murwira A, Gumindoga W, Goldin J, Mashauri DA. 2014. Potential of weight of evidence modeling for gully erosion hazard assessment in Mbire District- Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 67(69):145-152. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2014.02002>.
- Entezari M, Maleki A, Moradi Kh, Elfati S. 2014. Investigation of gully erosion in Deira catchment using weighted integration method and waterway capacity index. *Geographical Research Quarterly*, 3 (118): 297-312. (In Persian). <http://doi.org/10.1016/GRQ.2014.02.532>.
- Gayen A, Pourghasemi HR, Saha S, Keesstra S, Bai S. 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms, *Science of the Total Environment*, 668(45):124-138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436>.
- Gideon D, Mustafa FB, Victor I. 2021. The application of an expert knowledge-driven approach for assessing gully erosion susceptibility in the subtropical Nigerian savannah. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 42(1): 107-131. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12348>.
- Hitouri S, Varasano A, Mohajane M, Ijlil S, Essahlaoui N, Ali SA, Essahlaoui A, Pham QB, Waleed M, Palateerdham SK, Teodoro AC. 2022. Hybrid machine learning approach for gully erosion mapping susceptibility at a watershed scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7): 384-40. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070401>
- Igwe O, John UI, Solomon O, Obinna O. 2020. GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. *Geoenvironmental Disasters*, 7(12): 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00166-8>
- Jafari Gorzin B, Kavian A, Solaimani K. (2023). Investigation of Land use Changes and Its Role in the Hydrology of the Upstream Areas of Siahroud Watershed. *J Watershed Manage Res*.14(27): 26-37. <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.27.26>

- Jancewicz K, Migoń P, Kasprzak M. 2019. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index. *Science of the Total Environment*, 656(243): 1046-1062. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12348>
- Lana JC, Castro PDTA, Lana CE. 2022. Assessing gully erosion susceptibility and its conditioning factors in southeastern Brazil using machine learning algorithms and bivariate statistical methods: A regional approach. *Geomorphology*, 324(48):378-402. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108159>
- Lei X, Chen W, Avand M, Janizadeh S, Kariminejad N, Shahabi H, Coştache R, Shahabi H, Shirzadi A, Mosavi A. 2020. GIS-based machine learning algorithms for gully erosion susceptibility mapping in a semi-arid region of Iran. *Remote Sensing*, 12(15):147-172. <https://doi.org/10.3390/rs.12152478>
- Liuzzo L, Sammartano V, Freni G. 2019. Comparison between different distributed methods for flood susceptibility mapping. *Water Resources Management*, 33(4):3155-3173. <https://doi.org/10.5194/nhess.2020-332>
- Maerker M, Que'ne'herve G, Bachofer F, Mori S. 2015. A simple dem assessment procedure for gully system analysis in the lake Manyara Area, northern Tanzania. *79(24):235-253*. <https://doi.org/10.3390/su151512056>
- Mohtashami Borzadaran, G R. 2021. Bayesian perspective over time. *Statistical Thinking*, 25 (2):1-11. <https://doi.org/10.2048/StT.2020-332>
- Rahmati O, Tahmasebipour N, Haghizadeh A, Pourghasemi HR, Feizizadeh B. 2017. 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*, 579(78): 913-927. (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.176>
- Rangzan K, zaheri Abdehvand Z, Mokarram M. 2022. Determining areas prone to gully erosion using fuzzy membership function (Case study: Mohr City in the south of Fars Province), *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4): 56-74. <https://doi.org/20.1001.1.22519424.1401.10.4.4.9>
- Roy J, Saha S. 2019. GIS-based gully erosion susceptibility evaluation using frequency ratio, cosine amplitude and logistic regression ensembled with Fuzzy logic in Hinglo River Basin, India, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100247>
- Saber chenari K, Bahremand A, Sheikh VB, Komaki CB. 2016. Gully erosion hazard zoning using of Dempster-Shafer Model in the Gharnaveh Watershed, Golestan Province, Iranian Journal of Ecohydrology, 3(2): 219-231. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.59663>
- Saediyan H, shirani K, salajegheh A, ahmadi R. 2023. Investigating the performance of the entropy maximum model in determining the importance of effective environmental factors in creating gully erosion in semi-arid areas. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1): 129-144. <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.407297.1047>
- Shadfar S. 2015. Determination of gully erosion potential using artificial neural network, case study: Turud watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(3): 256-263. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.106809>
- Shahrivar A, Shadfar S, Khazaei M, Adeli B. 2016. Evaluation of trench erosion zoning methods (Case study: Abgandi Watershed). *Ecohydrology*, 4(1): 119-132. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJE.2017.60893>
- Shi Q, Wang W, Guo M, Chen Z, Feng L, Zhao M, Xiao H. 2020. The impact of flow discharge on the hydraulic characteristics of headcut erosion processes in the gully region of the Loess Plateau. *Hydrological Processes*, 34(3): 718-729. <https://doi.org/10.1002/hyp.13620>

- Shit PK, Bhunia GS, Pourghasemi HR. 2020. Gully erosion susceptibility mapping based on bayesian weight of evidence. *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions*, 94(35):133-146. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-68>
- Shirani K. 2020. Gully erosion mapping and susceptibility assessment using statistical and probabilistic methods. *Journal of Water and Soil Sciences*, 25 (2):151-174. <https://doi.org/10.47176/jwss.25.2.147215>
- Soleimani F, Kalehhouei M, Lotfollazadeh D. 2023. Study of the morphological characteristics of gullies in Khuzeestan Province. *Watershed Management Research Journal*, 36(3): 23-41. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/wmrj.2023.360375.1497>
- Soleimanpour SM, Pourghasemi HR, Zare M. 2021. A comparative assessment of gully erosion spatial predictive modeling using statistical and machine learning models. *Catena*, 207(43): 342-361. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105679>
- Sufi M, Issai H, Davoudi Rad AA, Zanjani Jam M, Shadfar S, Niknam M. and Nowrozi Kh. 2017. Investigation of the threshold of watershed erosion slope in Iran, phase 1: Fars, Golestan, Markazi and Zanjan Provinces, Research Project, Soil Conservation and Watershed Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organizations, 83 p. (In Persian).
- Sun L, Liu YF, Wang X, Liu Y, Wu GL. 2022. Soil nutrient loss by gully erosion on sloping Alpine steppe in the Northern Qin-ghai- Tibetan Plateau. *Catena*, 218(26):184-208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105763>
- Tadesual A, Setargie M, Ebabu K, Nzioki B, Meshesha TM. 2023. Random Forest-based gully erosion susceptibility assessment across different agro-ecologies of the Upper Blue Nile Bbasin, Ethiopia. *Geomorphology*, 431(14):241-263
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108671>.
- Tahmasabipour N, Rahmati A, Qurbani Nejad S. 2015. Prediction of susceptibility to gully erosion in Simera region based on the certainty factor model and determination of the importance of factors affecting it, *Ecology and Hydrology*, 1(3): 83-93. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJE.2016.59192>
- Yang S, Guan Y, Zhao C, Zhang C, Bai J, Chen K. 2019. Determining the influence of catchment area on intensity of gully erosion using high-resolution aerial imagery: A 40-year case study from the Loess Plateau, northern China, *Geoderma*, 347(83):90-102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.042>
- Yousefi Mobarhan E, Shirani K. 2023. Assessment of maximum entropy (ME) to identify effective factors on gully erosion and determination of sensitive Areas in Alaa Semnan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*.-14(28): 37-54. <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.28.37>
- Zakerinejad R, Alvandi P. 2023. Spatial prediction of gully erosion using TanDEM-X data and Maximum Entropy Model (A case study: Khasoyeh Watershed, in Southeast of Fars Province). *Environmental Erosion Research Journal*, 3(1):96-113. <https://doi.org/20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6>



Evaluation of gully erosion using weight of evidence (WofE) and Dempster-Schiffer (DSH) models in Ilam watershed

Shamsolah Asgari^{*1}, Kourosh Shirani², Faridoon Slimani³

1 and 3- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran
2- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

In general, the modeling process for any phenomenon or dependent variable using effective environmental factors as independent variables can be generalized to the future in addition to determining the status of current conditions. Therefore, the basic assumption in all environmental modeling is based on the principle of uniformity or uniformitarianism, which can be generalized for the subject of this research, and topographic metrics are one of the main factors in the creation and expansion of gully erosion. This research was conducted with the aim of determining the accuracy of water erosion susceptibility maps based on Weight of Evidence and Dempster-Schiffer weight models using relative operator or receiver characteristic curve (AUC and ROC). Also, the thresholds of effective factors (including low-elevation indices and considered environmental factors) on the occurrence of gully erosion in Ilam watershed were determined.

Materials and Methods

The Ilam watershed is in Ilam province in the southwest of Iran. In this research, Dempster-Schiffer and maximum weight models were used to determine the thresholds and zoning of gully erosion sensitivity. This research was done in seven main steps. In the first step, the research area was selected and the flood event distribution map (dependent variable) was prepared, and the data were randomly

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: shamsasgari@yahoo.com

Citation: Asgari, SH., Shirani, K., Slimani, F. 2025. Evaluation of gully erosion using weight of evidence (WofE) and Dempster-Schiffer (DSH) models in Ilam watershed. *Watershed Management Research*. 37 (4):71-98.

DOI: 10.22092/wmrj.2024.364768.1571

Received: 23 January 2024, **Received in revised form:** 20 July 2024, **Accepted:** 19 September 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL.37, No.4, Ser. No: 145, Winter 2025, pp.71-98.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



divided into two training or calibration groups (70%) and experimental or prediction groups (30%). In the second step, maps of 22 effective factors (independent variables) were prepared. In the third step, the effective factors were selected using the alignment test between the effective factors and the occurrence of floods. In the fourth step, Weight of Evidence and Dempster-Schiffer weight models were implemented and zoning maps were prepared. In the fifth step of validation, evaluation, comparison of zoning maps and prediction of sensitivity obtained from the mentioned models were done in two stages of recalibration and prediction. In the sixth step, thresholds and importance of effective factors were determined based on the best model. In the seventh step, the zoning map and prediction of sensitivity to the erosion event of gully was prepared.

Results and Discussion

In this research, after field surveys, interpretation of aerial photographs and processing of satellite images, 331 gullies were identified and investigated. The distribution map of gully erosion has been prepared and digitized for 331 gullies, of which 70% of the gullies were used to train Weight of Evidence and Dempstershafer models, which includes 232 gullies. The remaining 30%, which includes 99 gullies, was used to validate the models from the characteristic curve of the ROC system and the surface area under the AUC diagram. First, the data obtained from the gully erosion zoning maps were fitted separately to the points of 99 gullies and 232 gullies using both Weight of Evidence and Dempster Shaffer models, and after transferring the data to the data excel file were analyzed in SPSS software. According to obtained from calibration points (30%), both models had an acceptable percentage of the area under the curve, which indicates the high performance of both models in the region.

Conclusion and Suggestions

Accurate field identification of gully erosion points using GPS device was one of the results obtained from this research. As a result, the erosion distribution map of 331 gullies was prepared and it was checked and recorded for the first time in the researched watershed. One of the advantages and innovations of this research was the use of Alus satellite images and GIS and Saga GIS software. The results showed that the most effective independent variables were extracted on the dependent variable of watershed erosion in the watershed system and 22 grid layers were prepared. Finally, the results of the statistical analysis provide a ranking table of the most important indicators in creating gully erosion in the region, which is the land use index of 37.1%, waterway density with 17.7%, lithology with 13.2%, climate with 9.4%, precipitation 35.5% and NDVI with 3.5% and other indicators respectively affect the erosion, respectively of the gully. The results of this research can be promoted and taught, and executive bodies can use the results of this research to take necessary measures to control the gully erosion.

Key Words: Ilam watershed, Gully erosion threshold, Dempster Shaffer model, Weight of Evidence model