



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان

نشریه فنی

**ارزیابی کاربرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان
و بیشینه بی‌نظمی به منظور تهیه نقشه ایجاد
فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار
استان کردستان**

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان

نشریه فنی:

ارزیابی کاربرد مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی به منظور تهیه نقشه
ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نویسندگان:

امید رحمتی، سید مسعود سلیمان‌پور، صمد شادفر، صلاح‌الدین زاهدی

شماره فروست:

۶۶۸۹۱

۱۴۰۳

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان

عنوان اثر: ارزیابی کاربرد مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی به‌منظور تهیه نقشه

ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نویسندگان: امید رحمتی، سید مسعود سلیمان‌پور، صمد شادفر، صلاح‌الدین زاهدی

ویراستار: سعید نبی‌پی‌لشکریان

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳

این اثر در مورخه ۱۴۰۳/۱۲/۵ با شماره ۶۶۸۹۱ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به

ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصویرها، جدول‌ها، منحنی‌ها و نمودارها با

ذکر ماخذ، بلامانع است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده.....	۴
۱- مقدمه.....	۵
۲- بیان مسأله.....	۷
۳- اهمیت و ضرورت پژوهش.....	۸
۴- پیشینه پژوهش.....	۹
۵- معرفی منطقه مورد مطالعه.....	۱۳
۶- روش پژوهش.....	۱۵
۷- نتایج.....	۱۹
۷-۱- ثبت موقعیت جغرافیایی خندق‌ها و تهیه نقشه پراکنش آنها.....	۱۹
۷-۲- تهیه نقشه‌های پایه.....	۲۰
۷-۳-۱- مدل ماشین بردار پشتیبان.....	۳۶
۷-۳-۲- مدل پیشینه بینظمی.....	۳۷
۷-۴- ارزیابی دقت پیش‌بینی مکانی استعداد ایجاد فرسایش خندقی.....	۳۸
۸- نتیجه‌گیری.....	۳۹
۹- پیشنهادها.....	۴۰
سپاسگزاری.....	۴۱
منابع.....	۴۱
Abstract.....	۴۵

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه	۱۴
شکل ۲- ثبت موقعیت جغرافیایی خندق‌ها در حوزه آبخیز تلوار کردستان	۱۹
شکل ۳- نقشه پراکنش خندق‌ها در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۰
شکل ۴- نقشه ارتفاع حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۱
شکل ۵- نقشه درجه شیب حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۲
شکل ۶- نقشه جهت شیب حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۳
شکل ۷- نقشه سنگ‌شناسی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۴
شکل ۸- نقشه فاصله از آبراهه حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۶
شکل ۹- نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۷
شکل ۱۰- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۸
شکل ۱۱- نقشه انحنای سطح حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۲۹
شکل ۱۲- نقشه انحنای مقطع حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۳۰
شکل ۱۳- نقشه میانگین بارندگی سالانه حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۳۱
شکل ۱۴- نقشه موقعیت شیب نسبی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۳۲
شکل ۱۵- نقشه شاخص توان جریان حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۳۳
شکل ۱۶- نقشه فاصله از جاده حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۳۴
شکل ۱۷- نقشه بافت خاک حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۳۵
شکل ۱۸- نقشه شاخص پیوستگی رسوب حوزه آبخیز تلوار استان کردستان	۳۶
شکل ۱۹- نقشه استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار	۳۷
با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان	۳۷
شکل ۲۰- نقشه استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار با استفاده از مدل بیشینه	
بی‌نظمی	۳۸

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۴	جدول ۱- خصوصیات واحدهای سنگ‌شناسی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان
۳۹	جدول ۲- دقت پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی مدل‌های مورد استفاده در حوزه آبخیز تلوار

چکیده

فرسایش خندقی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید رسوب و تخریب سرزمین است که پیش‌بینی مکانی استعداد ایجاد آن یکی از راهکارهای عملی جلوگیری از وقوع این نوع فرسایش است. برخی از حوزه‌های آبخیز، فاقد اطلاعات کافی از موقعیت ایجاد فرسایش خندقی هستند و این مورد یک چالش برای مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف ارزیابی کاربرد مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی به منظور تهیه نقشه رخداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان انجام شده است. به این منظور، در بازدیدهای میدانی، ۹۹ خندق شناسایی شدند و موقعیت پیشانی خندق‌ها ثبت و نقشه پراکنش مکانی خندق‌ها تهیه شد. خندق‌های ثبت شده، به صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی به نسبت ۷۰:۳۰ تقسیم شدند. همچنین نقشه ۱۵ عامل مؤثر بر فرسایش خندقی شامل: ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، انحناى سطح، انحناى مقطع، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی، شاخص توان جریان، فاصله از جاده، بافت خاک و شاخص پیوستگی رسوب در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. از دو مدل ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی برای ارزیابی استعداد ایجاد فرسایش خندقی استفاده شد. میزان دقت پیش‌بینی مدل‌ها براساس روش مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) ارزیابی شدند. براساس اعتبارسنجی انجام شده مقدار AUC در مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی، به ترتیب ۰/۹۶۵ و ۰/۹۲۰ به دست آمد. براساس طبقه‌بندی میزان معیار AUC، این دو مدل در گروه عالی ($AUC > 0/9$) قرار گرفتند که نشان‌دهنده دقت بالای این دو مدل در پیش‌بینی مکانی استعداد ایجاد خندق در این حوزه آبخیز است. استفاده از این مدل‌ها به منظور استفاده در مدیریت سرزمین و برنامه‌های حفاظت خاک در حوزه‌های آبخیز مستعد فرسایش خندقی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، تلوار، خندق، فرسایش، مدل‌سازی

۱- مقدمه

در طی قرن گذشته، به دلیل تشدید پدیده فرسایش توسط بشر و اثرات درون و برون منطقه‌ای حاصل از آن، توجه محققان و دولتمردان به این پدیده بیشتر شده است. هرساله میلیون‌ها هکتار از اراضی در کشورهای مختلف (بیشتر در کشورهای در حال توسعه) در اثر پدیده فرسایش و عوارض آن از چرخه‌ی تولید خارج می‌شوند (جعفری و همکاران، ۱۳۸۸).

فرسایش خاک، نه تنها بر عمق خاک سطحی، میزان انتقال رسوب و رسوب‌گرفتگی مخازن سدها اثر می‌گذارد؛ بلکه به هدررفت آب، کربن‌آلی و عناصر غذایی خاک تأثیر شایان‌توجهی دارد. بنابراین مدیریت نادرست و بی‌توجهی و بهره‌برداری بی‌رویه، می‌تواند این منبع آسیب‌پذیر (خاک) را به سوی نابودی سوق دهد و در نتیجه حیات بشر مورد تهدید جدی قرار گیرد (جعفری و همکاران، ۱۳۸۸).

با توجه به مطالب فوق، می‌توان بیان داشت: به دلیل گستره و تنوع خسارت‌ها، "فرسایش خاک"، یکی از بحرانی‌ترین خطرات زیست‌محیطی دنیای امروز است (عرب‌خدری، ۱۳۹۳). بنابراین باید در نظر داشت که فرسایش، نه تنها خود خاک را از بین برده و یا حاصلخیزی آن را کاهش می‌دهد، بلکه با ایجاد رسوب مواد در آبراهه‌ها سبب انسداد آن‌ها می‌شود. همچنین با پر کردن مخازن سدها ظرفیت ذخیره آن‌ها را کاهش می‌دهد و در نتیجه عمر آن‌ها را کم می‌کند (رفاهی، ۱۳۹۶؛ عرب‌خدری، ۱۳۹۳).

اگر چه با اطمینان نمی‌توان رقمی قطعی برای کل فرسایش سالانه کشور گفت؛ اما با در نظر گرفتن برآوردهای مختلف از یک‌سو و قیاس کیفی وضعیت ایران در نقشه‌های جهانی فرسایش و تولید رسوب (عرب‌خدری، ۱۴۰۰)، مقدار فرسایش سالانه کشور، ۸۹۵ میلیون تن (معادل ۵/۵ تن در هکتار در سال) برآورد شده است (عرب‌خدری و همکاران، ۱۳۹۷).

در بین انواع فرسایش‌های آبی و بادی و به‌طور ویژه فرسایش آبی، فرسایش خندقی یکی از بارزترین انواع فرسایش‌ها است. این نوع فرسایش به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کره زمین و در مواردی که بهره‌برداری از منابع آب و خاک، مبتنی بر اصول صحیح و متناسب با توان طبیعی و شرایط محیطی نباشد؛ موجب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در اراضی می‌شود (Deluna و همکاران، ۲۰۰۰). در ایران نیز این نوع فرسایش، باعث تخریب اراضی بسیاری شده و با جاری‌شدن رواناب و سیل، حجم شایان‌توجهی از رسوبات را تولید می‌کند که این امر باعث غیر قابل استفاده شدن اراضی می‌شود (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۳۹۷).

فرسایش خندقی دارای بیش‌ترین توان تولید رسوب در اکثر حوزه‌های آبخیز کشور است که توجه به آن از ارکان اصلی حفاظت خاک و مدیریت پایدار منابع طبیعی محسوب می‌شود. این پدیده که در اثر تخریب افق‌های سطحی و زیرین خاک به‌وجود می‌آید، دارای فرآیند بسیار پیچیده‌ای بوده که تعداد زیادی از عوامل محیطی کنترل‌شده و موجب تولید رسوب زیادی در حوزه های آبخیز می‌شود (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲).

فرسایش خندقی پدیده‌ای با تأثیرات متقابل میان عوامل مؤثر در وقوع آن (مانند حجم و سرعت رواناب، نوع و حساسیت خاک به فرسایش)، عوامل حفاظت‌کننده سطح خاک (مانند پوشش‌های گیاهی و یا پوشش‌های غیر بیولوژیک) و اقدامات و فعالیت‌های انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی و جاده‌سازی) در مناطق مختلف است. با توجه به توسعه فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز کشور و خسارات ناشی از آن ازجمله تخریب اراضی کشاورزی، تخریب جاده‌ها، کاهش کیفیت آب‌های سطحی و انباشته شدن رسوبات در پشت سدهای مخزنی، پیش‌بینی مناطق مستعد ایجاد فرسایش خندقی امری ضروری در مدیریت حوزه‌های آبخیز تلقی می‌شود. زیرا ایجاد و گسترش فرسایش خندقی، وضعیت و شرایط محیطی را ناپایدار می‌کند و بسیاری از اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی روستایی و جاده‌های احداث‌شده در معرض خطر فرسایش خندقی هستند (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲).

۲- بیان مسأله

وقوع و گسترش فرسایش خندقی موجب افزایش ناپایداری و تخریب سرزمین می‌شود (Soleimanpour و همکاران، ۲۰۱۴). در حال حاضر بسیاری از اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی روستایی، تأسیسات و جاده‌های احداث شده در استان های مختلف کشور در معرض خطر وقوع فرسایش خندقی هستند. هرساله خسارت‌های زیادی در اثر وقوع فرسایش خندقی به بار می‌آید. علاوه بر اثرات در محل فرسایش خندقی، خندق‌ها رسوبات زیادی را برای مناطق پایین دست تولید می‌کنند که اکوسیستم‌های آبی مناطق پایین دست اعم از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، تأسیسات پرورش ماهی و مخازن سدها را با مشکل مواجه می‌کند (رفاهی، ۱۳۹۶). از آنجایی که تشکیل خاک فرآیندی بسیار زمان‌بر است، احیاء اراضی فرسایش یافته بسیار دشوار است که این مسأله به طور مستقیم بر اقتصاد منطقه که غالباً مبتنی بر تولیدات کشاورزی، مرتعی و دامی است، آسیب جدی وارد می‌نماید. اراضی کشاورزی و مرتعی که فرسایش خندقی در آن‌ها اتفاق افتاده است، بعد از مدتی به طور کامل رها شده و کاربری اراضی منطقه به طور غیرمعمولی تغییر می‌یابد.

از آنجایی که وقوع فرسایش خندقی ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی و فعالیت‌های انسانی دارد، می‌توان با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و داده کاوی، مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی را شناسایی کرد. مدل سازی کمک می‌نماید تا در زمان و هزینه اندازه گیری مشخصات خندق‌ها صرفه جویی شود. همچنین به دلیل این که مدل‌های یادگیری ماشینی و داده-کاوی قابلیت بالایی در تجزیه و تحلیل اطلاعات محیطی دارند و قادرند روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرها را شناسایی کنند؛ در این پژوهش از دو مدل ماشین بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی برای مدل سازی استفاده شده است.

شایان ذکر است یکی از مشکلات موجود در زمینه استفاده از این مدل‌ها، عدم وجود اطلاعات ثبت شده مربوط به ایجاد (وقوع) فرسایش‌های خندقی در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور است. از طرف دیگر، ممکن است منطقه‌ای مستعد وقوع فرسایش خندقی باشد اما تاکنون شرایط به حد

آستانه نرسیده و فرسایش خندقی در بدو وقوع باشد که براساس اصول حفاظت خاک بایستی این مناطق قبل از وقوع فرسایش خندقی مدیریت شوند. به این سبب پژوهش حاضر اقدام به ارزیابی کاربرد مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه‌بی‌نظمی و تعیین مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان کرده است.

۳- اهمیت و ضرورت پژوهش

حوزه آبخیز تلوار استان کردستان یکی از مناطق مستعد فرسایش خندقی در کشور است که از چهل سال گذشته وقوع خندق‌ها در این منطقه رو به افزایش بوده است. فرسایش‌های خندقی این حوضه موجب تخریب سرزمین و تولید رسوب زیاد برای مناطق پایین‌دست شده است (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲). با توجه به اهمیت حفاظت از منابع خاک و نقش فرسایش خندقی در هدررفت خاک و تولید رسوب، ضروری است تا با استفاده از مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشینی و داده-کاوی، به پیش‌بینی مکانی استعداد وقوع خندق در این حوزه آبخیز اقدام شود. زیرا شناسایی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی و متمرکز کردن اقدامات حفاظت خاک و اصول مدیریتی آبخیزداری موجب کاهش احتمال وقوع فرسایش‌های خندقی شده که به نوبه خود کاهش تولید رسوب و تخریب سرزمین و همچنین افزایش پایداری اقتصادی و اجتماعی منطقه را به دنبال خواهد داشت. با توجه به این‌که اطلاعات و داده‌های دقیق مربوط به وضعیت فرسایش خندقی در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور موجود نیست و تهیه و جمع‌آوری این اطلاعات نیازمند هزینه و زمان زیاد است. بنابراین در این شرایط، امکان بکارگیری مدل‌ها به‌منظور پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی وجود ندارد و بسیاری از حوضه‌ها در اثر نبود این امکان، نقشه پایه مناسبی برای اولویت‌بندی مکانی اقدامات حفاظت خاک و مدیریت سرزمین ندارند. از این‌رو، بهره‌گیری از مدل‌های مبتنی بر دانش یادگیری ماشینی و داده‌کاوی، علاوه بر افزایش کارایی اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری در مناطق فاقد داده و اطلاعات فرسایش خندقی، میزان هزینه و زمان موردنیاز برای ثبت و پایش فرسایش‌های خندقی به‌منظور فرآیند مدل‌سازی را کاهش می‌دهد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند

موجب کاهش ریسک تخریب سرزمین و افت حاصلخیزی اراضی، بهبود مدیریت و پایداری حوضه-های فاقد آمار فرسایش، بهبود وضعیت مخازن سدها در اثر کاهش رسوب مناطق بالادست، ارتقاء اثرگذاری اقدامات حفاظت خاک و کاهش هزینه و زمان موردنیاز برای اجرای پروژه‌های پایش و کنترل فرسایش خندقی شود.

۴- پیشینه پژوهش

Pourghasemi و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل‌های انفرادی و ترکیبی مختلف از جمله شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌بردار پشتیبان و پیشینه بی‌نظمی به ارزیابی وضعیت استعداد رخداد فرسایش خندقی حوزه آبخیز آق‌امام پرداختند. براساس نتایج به‌دست آمده مدل وزنی ترکیبی ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی، بالاترین دقت پیش‌بینی را در سه تکرار مختلف نشان دادند.

Rahmati و همکاران (۲۰۱۷) کارایی مدل‌های یادگیری ماشینی مختلف از جمله شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌بردار پشتیبان با چهار نوع کرنل متفاوت، درخت رگرسیونی تقویت‌شده و جنگل تصادفی در زمینه شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در منطقه پلدختر مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش دوازده عامل محیطی مختلف به‌منظور مدل‌سازی ایجاد فرسایش خندقی انتخاب شد. براساس یافته‌های به‌دست آمده، مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین‌بردار پشتیبان (با کرنل تابع پایه شعاعی)، بهترین عملکرد را از نظر دقت پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی داشتند و این مدل‌ها حساسیت کمتری نسبت به اندازه نمونه آموزشی داشتند.

مهربان و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل پیشینه بی‌نظمی در منطقه شورلوق استان خراسان رضوی اقدام کردند. به این منظور با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای صحرایی، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز شامل نقشه پراکنش خندق‌ها و نقشه‌های ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت

شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک (بافت)، شاخص پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم آبراهه، تراکم جاده، شاخص قدرت جریان، شاخص انتقال رسوب و شاخص رطوبت توپوگرافی تهیه شد. سپس به بررسی رابطه متقابل بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل اقدام گردید. نتایج نشان داد که $66/17$ درصد از خندق‌های منطقه در کلاس پرخطر و بسیار پرخطر واقع شده‌اند. میزان AUC نهایی مدل بیشینه بی‌نظمی برای داده‌های آموزش $0/84$ و داده‌های آزمون $0/79$ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل بود.

Meliho و همکاران (۲۰۱۸) دو مدل آماری دومتغیره شامل: ارزش اطلاعات و نسبت فراوانی را برای تولید نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز اوریکا کشور مراکش استفاده کردند. عوامل محیطی مختلفی به عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در نظر گرفته شده و موقعیت خندق‌ها با استفاده از سامانه گوگل ارث ثبت شد. پس از تهیه نقشه موردنظر، اعتبارسنجی دقت این مدل‌ها نشان داد که مدل‌های ارزش اطلاعات و نسبت فراوانی به ترتیب دارای $52/07$ و $80/61$ درصد اطمینان بودند.

Azareh و همکاران (۲۰۱۹) از دو مدل مختلف فاکتور قطعیت و بیشینه بی‌نظمی برای تهیه نقشه پهنه‌بندی استعداد رخداد فرسایش خندقی استفاده کردند. اعتبارسنجی نقشه‌های تولیدی براساس داده‌های موقعیت مکانی خندق‌های گروه ارزیابی و همچنین روش مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده انجام شد. براساس یافته‌های این پژوهش، دقت پیش‌بینی مدل‌های فاکتور قطعیت و بیشینه بی‌نظمی به ترتیب $88/6$ و $81/8$ درصد به دست آمد.

Gayen و همکاران (۲۰۱۹) به منظور شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی، عملکرد مدل‌های تجزیه و تحلیل تفکیک انعطاف‌پذیر، خطوط رگرسیون افزودنی چند متغیره، جنگل تصادفی و ماشین‌بردار پشتیبان را باهم مقایسه کردند. در این پژوهش، دوازده عامل محیطی مختلف و اثرگذار بر شکل‌گیری فرسایش خندقی در نظر گرفته شد. یافته‌های این تحقیق نشان داد

که مدل‌های جنگل تصادفی، خطوط رگرسیون افزودنی چند متغیره و ماشین‌بردار پشتیبان، بیشترین دقت پیش‌بینی را به خود اختصاص داده‌اند.

Garosi و همکاران (۲۰۱۹) استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی حوزه آبخیز سد اکباتان را با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی مورد بررسی قرار دادند. با در نظر گرفتن موقعیت رخدادهای فرسایش خندقی و لایه‌های رقومی و عوامل محیطی متعدد، نقشه‌های پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی تولید شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و ترکیب مدل افزودنی تعمیم‌یافته و مدل بیزین ساده (GAM-NB)، بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی داشته‌اند.

Tran و Prakash (۲۰۲) در پژوهشی اقدام به پیش‌بینی هدررفت خاک با استفاده از مدل ماشین‌بردار پشتیبان کردند. ایشان اعلام کردند فرسایش خاک باعث از بین رفتن خاک در حوزه آبخیز می‌شود و به شدت بر فعالیت کشاورزی و رسوب در مخازن سدها تأثیر می‌گذارد و فعالیت‌های توسعه‌ای را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین، اندازه‌گیری دقیق تلفات خاک در اثر فرسایش برای توسعه و مدیریت یک منطقه، ضروری و مطلوب است. با این هدف، ایشان هشت متغیر محیطی مؤثر بر فرسایش خاک را در نظر گرفتند و در نهایت نتیجه گرفتند که مدل ماشین‌بردار پشتیبان، عملکرد خوبی در پیش‌بینی میزان تلفات و هدررفت خاک دارد.

والی‌پور و همکاران (۱۴۰۰) اقدام به مدل‌سازی مکانی پیش‌بینی وقوع فرسایش خندقی با در نظر گرفتن روابط متقابل بین متغیرهای محیطی مؤثر با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در حوزه آبریز گرگان‌رود واقع در استان گلستان کردند. ۱۲ متغیر محیطی به منظور مدل‌سازی استفاده شد. نتایج مدل با استفاده از مساحت زیر منحنی AUC مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج، مدل ماشین‌بردار پشتیبان با تابع کرنل شعاعی، با مقدار پیش‌بینی ۰/۹۶، دارای دقت عالی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی بودند.

تیموریان و همکاران (۱۴۰۱) اقدام به نقشه احتمال ایجاد فرسایش خندقی با مدل یادگیری ماشینی بیشینه بی‌نظمی در استان فارس کردند. سطح زیر منحنی ویژگی عامل گیرنده بیش از ۹۰ درصد به دست آمد که نشان داد مدل به خوبی توانسته است فرسایش خندقی را با داده‌های موجود ارزیابی کند.

ذاکری‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) اقدام به پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی در حوزه آبخیز خسویه استان فارس کردند. اعتبارسنجی مدل با استفاده از مساحت زیر منحنی AUC مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مقدار AUC که برابر با ۰/۹۴۷ بود؛ در نتیجه مدل بیشینه بی‌نظمی، در این حوزه آبخیز دارای دقت عالی در پیش‌بینی فرسایش خندقی بود.

یوسفی‌مهرن و شیرانی (۱۴۰۲) اقدام به کارایی مدل بیشینه بی‌نظمی در شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تعیین پهنه‌های حساس در حوزه آبخیز علاء سمنان کردند. نقشه حساسیت فرسایش خندقی نشان داد بخش‌های خروجی و جنوبی حوزه آبخیز سمنان، مستعد وقوع فرسایش خندقی است. همچنین نتایج مدل بیشینه بی‌نظمی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب دارای دقت ۹۱ و ۸۹ درصد بود که از نظر کارایی در رده خیلی خوب برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی قرار گرفت و استفاده از آن به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تعیین پهنه‌های حساس، توصیه شد.

خزائی و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تهیه نقشه پهنه‌بندی با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی در حوزه آبخیز تخت‌دراز استان کهگیلویه و بویراحمد اقدام کردند. نتایج نشان داد مدل بیشینه بی‌نظمی با سطح زیر منحنی ۰/۸۸، دارای دقت پیش‌بینی مناسبی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی است.

Liu و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین اقدام به پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی در حوضه سد گلستان ایران کردند. از چهار مدل یادگیری ماشین بیشینه بی‌نظمی، جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. نتایج

نشان داد به ترتیب مدل‌های جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و پیشینه بی‌نظمی، به عنوان دقیق‌ترین مدل‌ها به منظور پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی در این منطقه معرفی شدند.

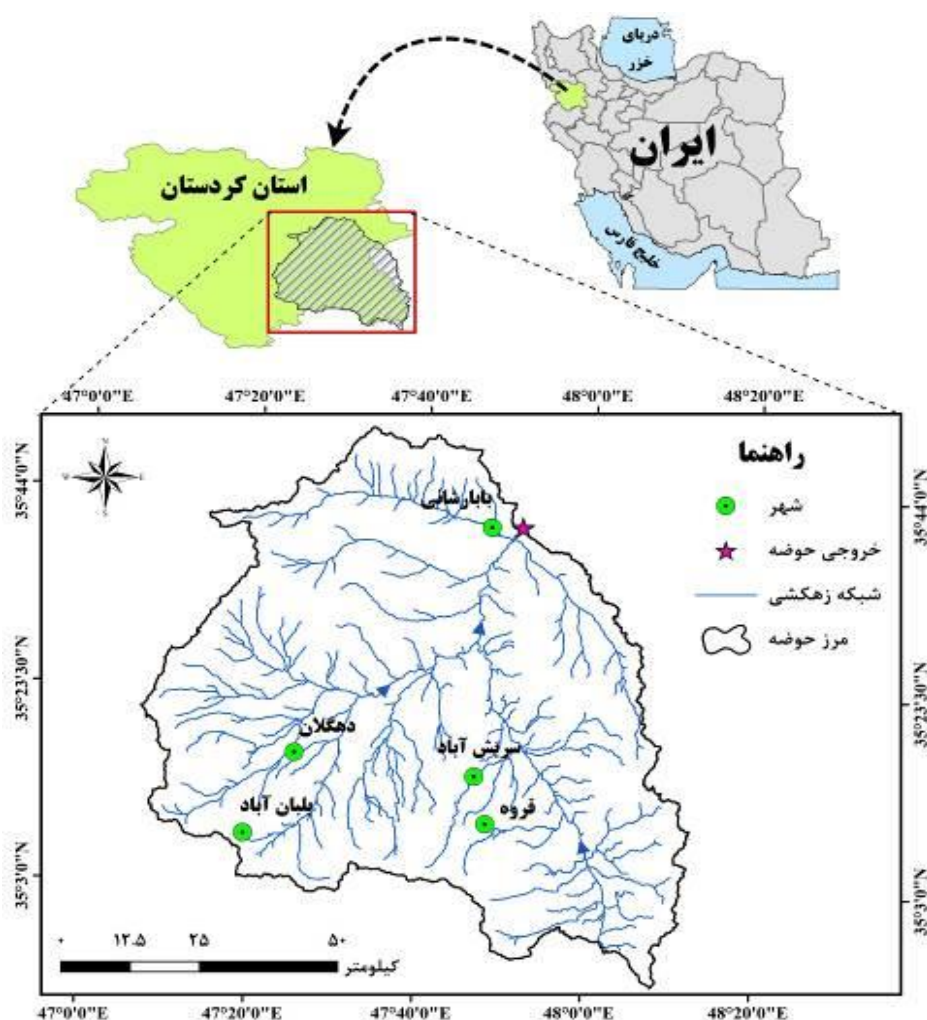
Bammou و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین اقدام به ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبریز تنسیفت دشت هاوز واقع در کشور مراکش کردند. ۱۸ عامل مؤثر محیطی، شامل عوامل توپوگرافی، ژئومورفولوژی، محیطی و هیدرولوژیکی، پس از تحلیل‌های چند خطی انتخاب شدند. یافته‌های این پژوهش نشان داد مدل‌های XGBoost و KNN، به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها به منظور ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز هستند و پس از آن‌ها مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در رده‌های بعدی قرار دارند.

پیشینه پژوهش نشان داد عوامل محیطی مختلفی بسته به موجودیت داده و شرایط جغرافیایی منطقه به منظور پیش‌بینی رخداد (ایجاد) فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین یافته‌ها نشان داد امروزه مدل‌های مبتنی بر داده‌کاوی و هوش مصنوعی، عملکرد بسیار مناسب و دقیقی در پیش‌بینی مقادیر انواع فرسایش خاک و به‌ویژه فرسایش خندقی در اقصی‌نقاط دنیا داشته‌اند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان علاوه بر سهولت در پژوهش، اقدامات مهار و پیشگیری از فرسایش را نیز با اطمینان بیشتری، انجام داد.

۵- معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تلوار، در محدوده‌ی مشترک بین استان‌های کردستان و همدان واقع شده است (۴۵ کیلومتری شهرستان بیجار)؛ یکی از نمونه‌های بارز ایجاد و گسترش فرسایش خندقی در کشور است (شکل ۱). حوزه آبخیز تلوار یکی از زیرحوضه‌های سفیدرود به‌شمار می‌رود و ۶۴۶۸/۳ کیلومتر مربع وسعت آن است. این آبخیز، حالت نسبتاً گرد داشته و شبکه زهکشی آن شاخه‌درختی است. یکی از

دلایل ضروری بودن توجه به مسأله فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز، آن است که سد تلوار در خروجی آن قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه ۲۵۶ میلی‌متر و متوسط ضریب رواناب آن ۰/۲۳ برآورد شده است. براساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم این آبخیز، نیمه‌خشک سرد است. کاربری غالب منطقه، کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، باغات و مراتع است. از نظر سنگ‌شناسی، سازند کواترنری (نهشته‌های آبرفتی، رودخانه‌ای، رسوبات ریزدانه و مارن‌ها) بخش اعظم سنگ‌شناسی منطقه را تشکیل داده است. مارن میوسن یکی از حساس‌ترین واحدهای سنگی است که خندق‌های منطقه در آن گسترش چشمگیری داشته‌اند (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۶- روش پژوهش

در ابتدا اقدام به ثبت موقعیت مکانی خندق‌های موجود در حوزه آبخیز تلوار شد. به این منظور، تعداد ۹۹ خندق در بازدیدهای میدانی تشخیص داده شد و موقعیت پیشانی آن‌ها با استفاده از دستگاه GPS و تصاویر گوگل‌ارث، ثبت و برای این آبخیز، یک پایگاه داده اطلاعات مکانی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (نرم‌افزار ArcGIS 3.1) تهیه شد. سپس نقشه پراکنش مکانی خندق‌ها تهیه شد. این نقشه اولین ابزار و اطلاعات معتبر به‌منظور مدیریت فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز شد. از آنجایی که ایجاد خندق‌ها تحت تأثیر دیگر عوامل محیطی نیز است، در مدل‌سازی مکانی استعداد وقوع خندق‌ها، موقعیت مکانی پیشانی خندق‌ها (به‌صورت نقطه‌ای) به‌عنوان متغیر وابسته و در قالب یک پایگاه داده در نظر گرفته شد. این پایگاه داده، به‌صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم گردید؛ به‌گونه‌ای که گروه آموزش شامل ۷۰ درصد داده‌ها و گروه اعتبارسنجی شامل ۳۰ درصد داده‌ها هستند. شایان‌ذکر است داده‌های گروه آموزش در مراحل ساخت، کالیبراسیون و بهینه‌سازی مدل‌ها استفاده شد و داده‌های گروه اعتبارسنجی در مرحله نهایی و پس از ارائه پیش‌بینی‌ها، به‌منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی مورداستفاده قرار گرفت.

در ادامه، براساس مرور منابع انجام شده در زمینه شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی و تعیین عوامل مؤثر بر ایجاد آن، ۱۵ متغیر محیطی شامل: ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI)، کاربری اراضی، انحنا^۲ سطح، انحنا^۳ مقطع، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی^۴ (RSP)، شاخص توان جریان^۵ (SPI)، فاصله از جاده، بافت خاک و شاخص پیوستگی رسوب^۶، به‌عنوان متغیرهای اثرگذار در ایجاد (وقوع) فرسایش خندقی انتخاب شدند. این متغیرها در مدل‌سازی نقش پیش‌بینی‌کننده استعداد

¹- Topographic wetness index

²- Plan curvature

³- Profile curvature

⁴- Relative slope position

⁵- Stream power index

⁶- Sediment connectivity

وقوع فرسایش خندقی را خواهند داشت. لایه رستری تمام متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در محیط ArcGIS و SAGA با اندازه پیکسل ۳۰ متر و مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. لایه سنگ‌شناسی این آبخیز نیز با استفاده از زمین‌مرجع‌سازی و رقومی‌سازی نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه تهیه شد. نقشه بافت خاک با استفاده از داده‌های خاک (پایگاه داده جهانی خاک) سامانه گوگل‌ارث‌انجین تهیه شد. اندازه پیکسل نقشه بافت خاک سامانه گوگل‌ارث‌انجین ۲۵۰ متر است که با استفاده از ابزار Resample در نرم‌افزار ArcGIS به اندازه پیکسل ۳۰ متر تبدیل شد تا امکان پردازش داده‌ها توسط مدل فراهم گردد. لایه رستری متوسط بارندگی سالیانه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و اطراف منطقه (بیجار، حسین‌آباد و همدان) و روش‌های درون‌یابی مختلف تهیه شد. در این مرحله، دقت روش‌های مختلف درون‌یابی (مانند روش وزنی عکس فاصله و کریجینگ) برای تهیه لایه رستری میانگین بارندگی سالانه مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت روشی که دارای کمترین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بود، به‌عنوان روش مناسب استفاده شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث تهیه شد. نقشه فاصله از جریان‌های سطحی نیز در همین نرم‌افزار با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی^۱ تهیه شد. شاخص رطوبت توپوگرافی با استفاده از دو لایه رستری مساحت بالادست (مساحت مشارکت‌کننده در تولید رواناب) و شیب، در نرم‌افزار SAGA-GIS ساخته شد. شاخص پیوستگی رسوب نیز براساس لایه‌های رستری ناهمواری و شیب زمین محاسبه شد؛ به‌گونه‌ای که موقعیت خروجی حوضه به‌عنوان نقطه خروجی شاخص پیوستگی در نظر گرفته شد. نقشه رستری ارتفاع منطقه نیز از لایه مدل رقومی ارتفاع (قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) تهیه شد. لایه‌های شیب زمین، جهت شیب و انحنای سطح نیز با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع ساخته شد. پس از استخراج موقعیت مکانی جاده‌های منطقه از تصاویر گوگل‌ارث، نقشه فاصله از جاده نیز با ابزار فاصله اقلیدسی تهیه گردید. تمامی لایه‌های مربوط به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، استانداردسازی شدند تا دامنه تغییرات متغیرها یکسان باشد.

¹ Euclidean distance

به منظور پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی و تهیه نقشه ایجاد آن، اقدام به فرآیند مدل‌سازی شد. به این منظور، ۱۵ عامل محیطی فوق‌الذکر، به عنوان متغیرهای مستقل و موقعیت مکانی پیشانی خندق‌ها به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. در مرحله نخست مدل‌سازی، لایه موقعیت خندق‌های گروه آموزش و لایه‌های رستری مربوط به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده روی هم‌گذاری شدند. سپس ارزش پیکسل‌های عوامل محیطی متناظر با وقوع هر یک از فرسایش‌های خندقی تعیین شد و براین اساس روابط میان متغیرهای مستقل و وابسته برآورد و استعداد وقوع فرسایش خندقی پیش‌بینی شد. اندازه پیکسل نقشه استعداد وقوع خندق نیز برابر با لایه‌های رستری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (۳۰ متر)، در نظر گرفته شد. در این پژوهش، از دو مدل یادگیری ماشینی مختلف، شامل: ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) و بیشینه بی‌نظمی (ME)، به منظور ارزیابی استعداد وقوع فرسایش خندقی استفاده شد.

مدل ماشین‌بردار پشتیبان^۱ که به اختصار SVM گفته می‌شود برای حل مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل در رسم خطوط مرزی و دسته‌بندی، عملکرد بهتری در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد. یکی از کاربردهای مفید مدل ماشین‌بردار پشتیبان، کاهش و تعدیل اثر نقاط ناهنجاری^۲ است. این مدل برای داده‌هایی با بعد بالا، بسیار مناسب است. از دیگر محاسن این مدل، نیز می‌توان به سرعت بالاتر و عملکرد بهتر با تعداد محدودی از نمونه، در مقایسه با سایر مدل‌هایی با مبنای طبقه‌بندی اشاره کرد (Tran و Prakash، ۲۰۲۰).

مدل بیشینه بی‌نظمی یکی از فناوری‌های ماشین یادگیری است که قابلیت پیش‌بینی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶). یکی از مزیت‌های استفاده از این مدل، بالابردن قطعیت در پیش‌بینی‌ها است. برخلاف مدل‌های آماری که قبل از مدل‌سازی تعدادی فرضیات آماری تعریف می‌کنند؛ مدل بیشینه بی‌نظمی از ابتدا سعی در یافتن روابط بین

^۱- Support Vector Machine

^۲- Anomaly

متغیرهای مستقل و وابسته دارد تا براساس آن، پیش‌بینی مکانی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد (Park, ۲۰۱۵).

شایان‌ذکر است در این دو مدل، لایه‌های رستری مربوط به عوامل محیطی مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی به‌عنوان متغیرهای مستقل، به مدل معرفی شدند. همچنین لایه نقاط پیشانی خندق‌ها نیز به‌عنوان متغیر وابسته به مدل معرفی شدند. فرآیند اجرای مدل‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام گرفت. پس از فرآیند پردازش مدل‌ها، رابطه میان متغیرها توسط مدل‌های فوق‌الذکر شناسایی شد. این مدل‌ها قادر هستند که احتمال وقوع فرسایش خندقی را برای هر پیکسل از منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی کنند.

صحت‌سنجی پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی نیز براساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده‌های موقعیت خندق‌ها) و روش مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) ارزیابی شد. از آنجایی که داده‌های گروه اعتبارسنجی در مرحله مدل‌سازی به‌کارگرفته نشدند، لذا بررسی میزان صحت پیش‌بینی استعداد وقوع خندق براساس آن‌ها (گروه اعتبارسنجی) به‌طور علمی و منطقی فراهم شد. پس از تعیین میزان صحت مدل‌های مختلف، شرایط به‌منظور مقایسه کمی مدل‌ها و تعیین مدل برتر امکان‌پذیر گردید. به‌طوری‌که اگر صحت مدل بالاتر از هفتاد درصد باشد، صحت مدل به‌عنوان قابل قبول شناخته می‌شود. مقادیر صحت بیش از هفتاد درصد نیز قابل گروه‌بندی است: صحت بین هفتاد تا هشتاد درصد در گروه خوب، صحت بین ۸۰ تا ۹۰ درصد در رده خیلی خوب و صحت بیش از ۹۰ درصد در گروه عالی قرار می‌گیرند.

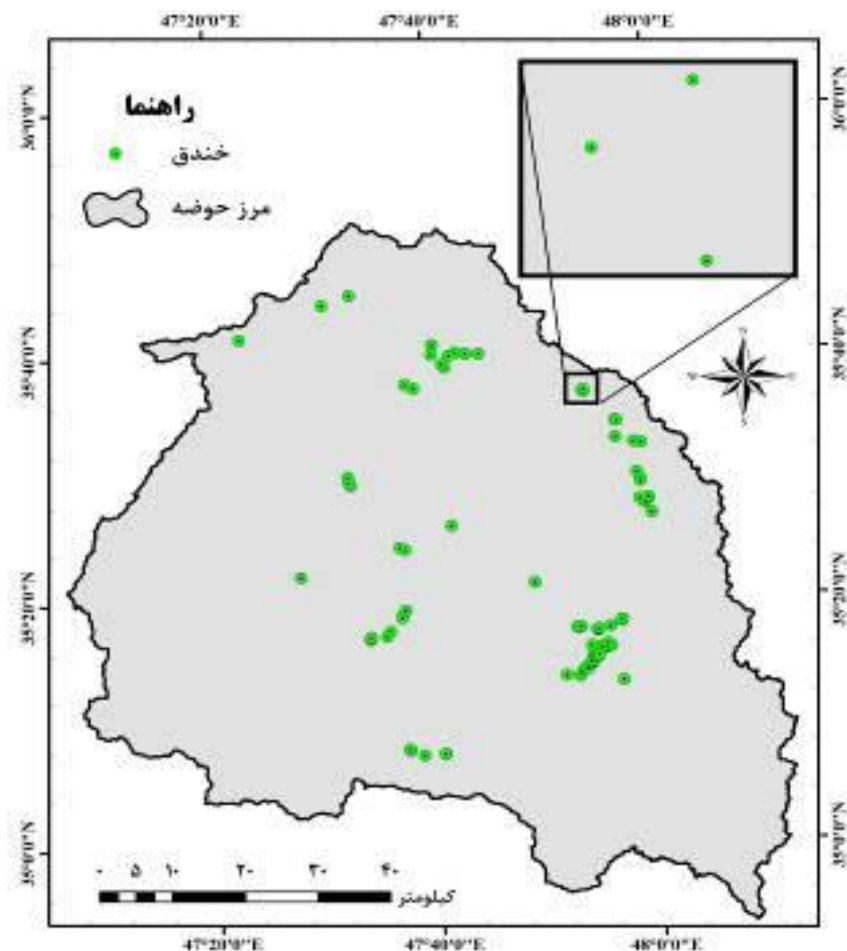
۷- نتایج

۷-۱- ثبت موقعیت جغرافیایی خندق‌ها و تهیه نقشه پراکنش آن‌ها

در بازدیدهای میدانی، ۹۹ خندق شناسایی و موقعیت تمامی آن‌ها با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد (شکل ۲). نقشه پراکنش خندق‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. اغلب فرسایش‌های خندقی در بخش مرکزی، شمالی و شرقی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود.



شکل ۲- ثبت موقعیت جغرافیایی خندق‌ها در حوزه آبخیز تلوار کردستان



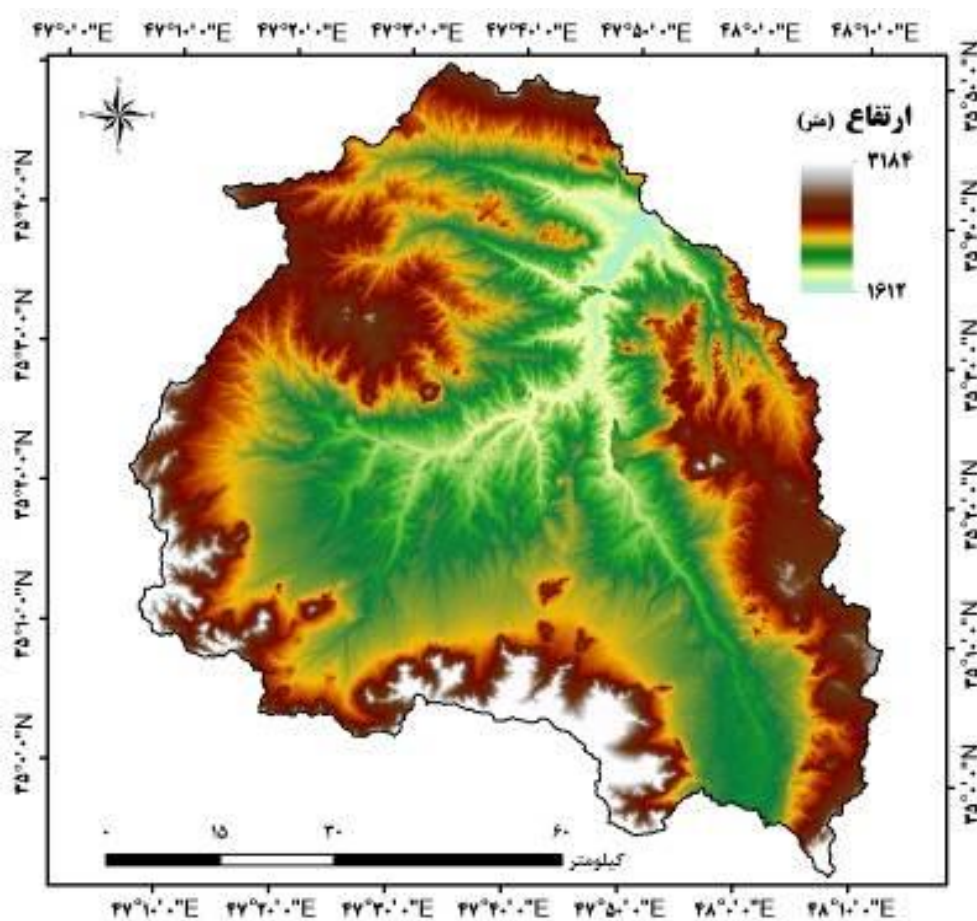
شکل ۳- نقشه پراکنش خندق‌ها در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

۷-۲- تهیه نقشه‌های پایه

به منظور انجام دقیق‌تر این پژوهش، اقدام به تهیه و ترسیم نقشه‌های پایه و مورد نیاز در محیط ArcGIS شد. ۱۵ عامل محیطی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی استعداد ایجاد خندق‌ها عبارت بود از: ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، انحنا سطح، انحنا مقطع، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی، شاخص توان جریان، فاصله از جاده، بافت خاک و شاخص پیوستگی رسوب.

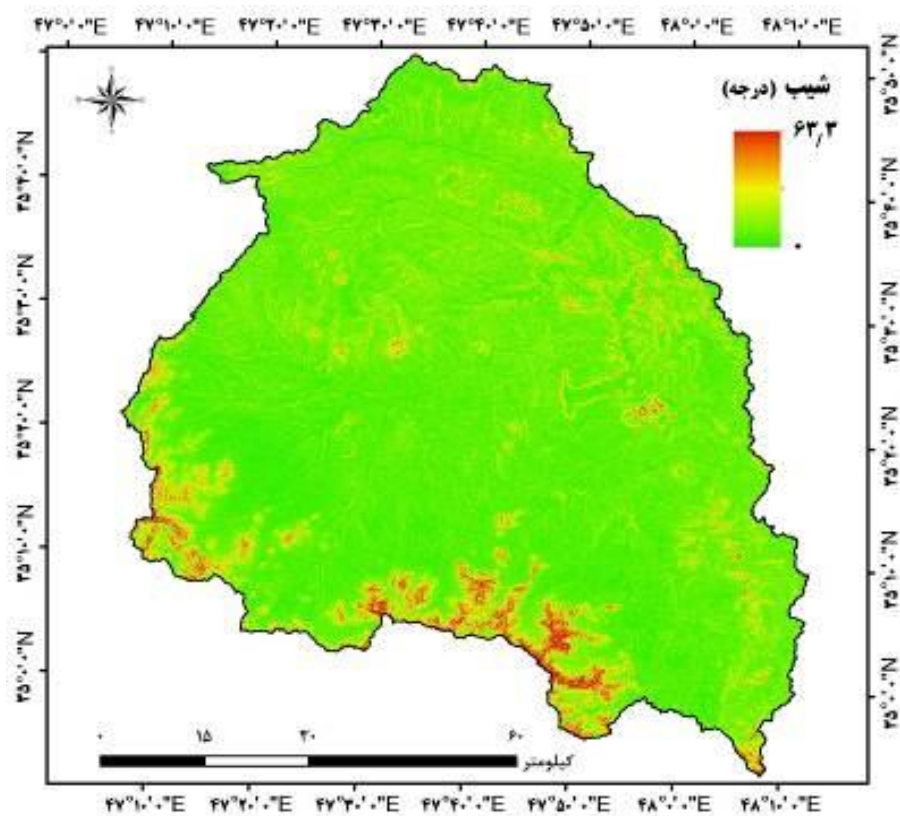
نقشه ارتفاع حوضه که با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شد که در شکل ۴ ارائه شده است. مرتفع‌ترین قسمت حوضه با ارتفاع ۳۱۸۴ متر در

قسمت جنوبی و جنوب غربی قرار گرفته و کمترین ارتفاع (۱۶۱۲ متر)، در بخش‌های شمالی واقع شده است.



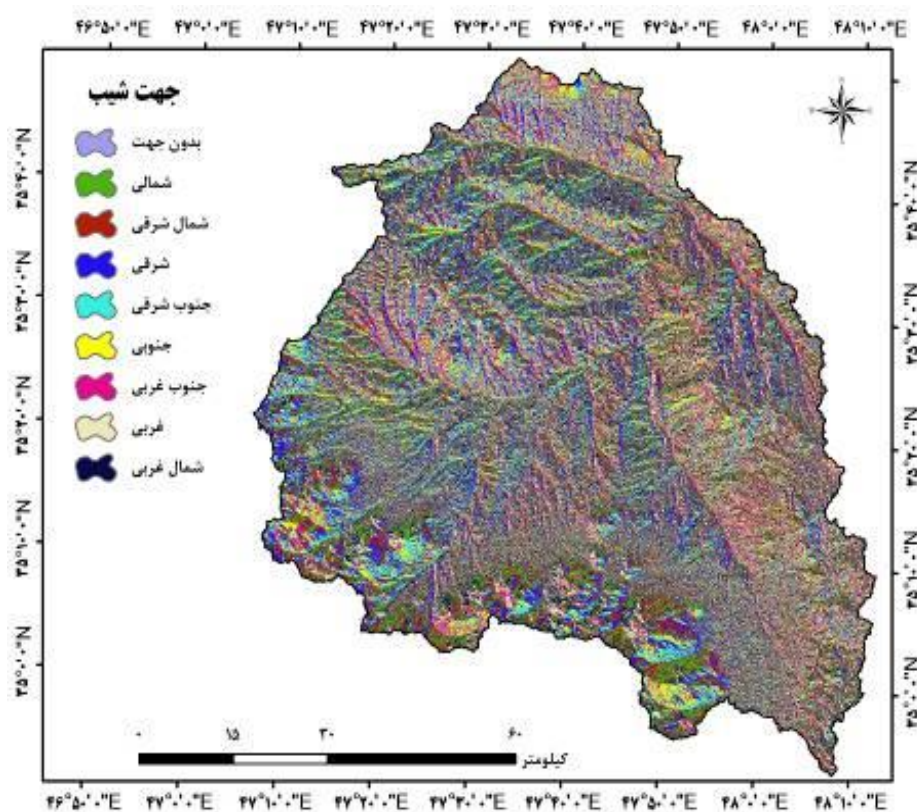
شکل ۴- نقشه ارتفاع حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه درجه شیب حوزه آبخیز تلوار در شکل ۵ نشان داده شده است. مناطق پرشیب در قسمت-های جنوبی با شیب ۶۳/۳ درجه واقع شده‌اند. بخش‌هایی از جنوب غربی و لکه‌های قسمت‌های میانی حوضه نیز دارای شیب زیادی است. کمترین شیب (صفر درجه)، نیز در قسمت‌های میانی و جنوبی حوضه مشاهده شد.



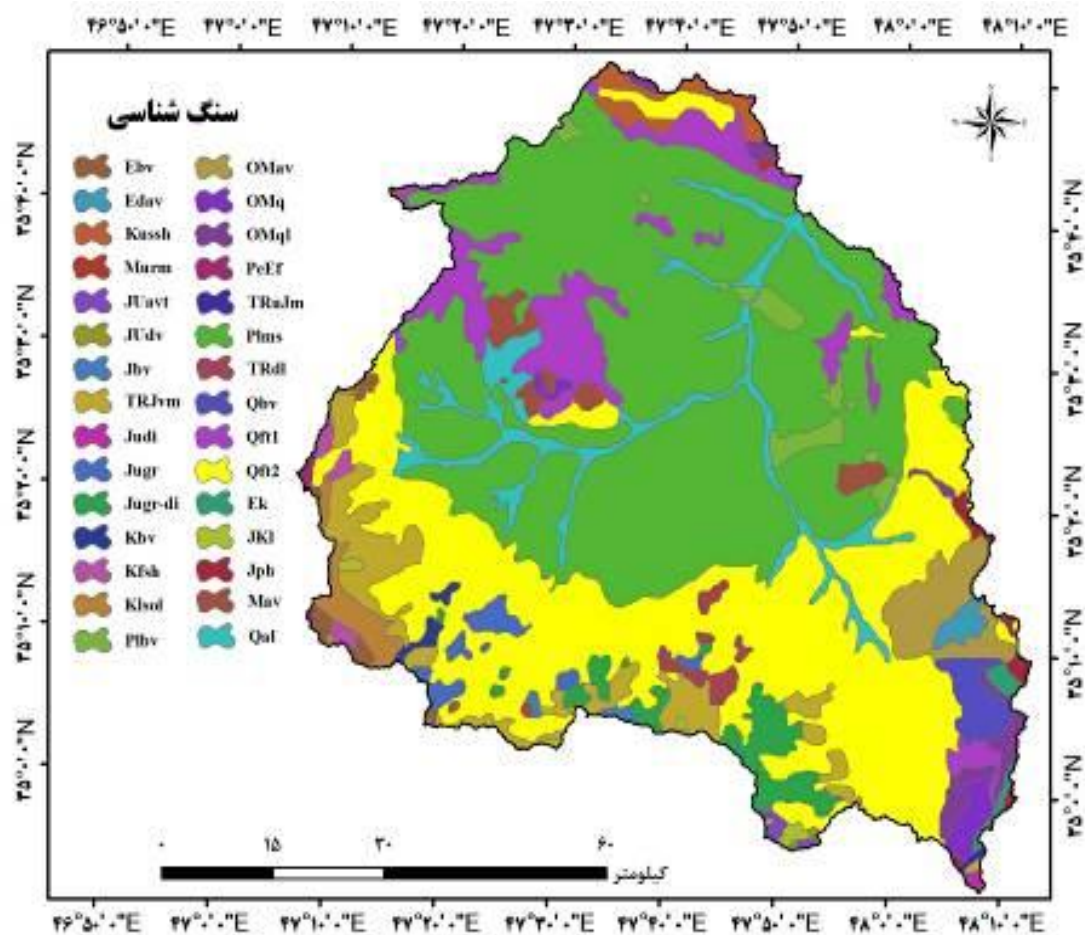
شکل ۵- نقشه درجه شیب حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه جهت شیب حوزه آبخیز تلوار در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به گستردگی منطقه و ناهمواری قابل ملاحظه آن، کلاس‌های مختلف جهت شیب مشاهده شد. دامنه‌های رو به شمال، رو به جنوب و بدون جهت، بیشترین مساحت‌ها را به خود اختصاص دادند.



شکل ۶- نقشه جهت شیب حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه سنگ‌شناسی حوزه آبخیز تلوار نشان‌دهنده آن است که این آبخیز دارای تنوع سنگ‌شناسی زیادی است و واحدهای سنگ‌شناسی مختلفی قابل‌مشاهده است (شکل ۷). واحدهای سنگ‌شناسی Plms (کنگومرای سخت نشده، ماسه‌سنگ، شیل و مارن)، Qft2 (رسوبات دره‌ای و مخروط افکنه‌ای کم ارتفاع)، Qft1 (رسوبات دره‌ای و مخروط افکنه‌ای مرتفع) و Qal (رسوبات آبرفتی و دشت سیلابی) بیشترین مساحت را به‌خود اختصاص داده‌اند. واحدهای سنگ‌شناسی آذرین (Judv و TruJm) نیز دارای کمترین مساحت بودند. خصوصیات و مساحت سایر واحدهای سنگ‌شناسی نیز در جدول ۱ ارائه شده است.



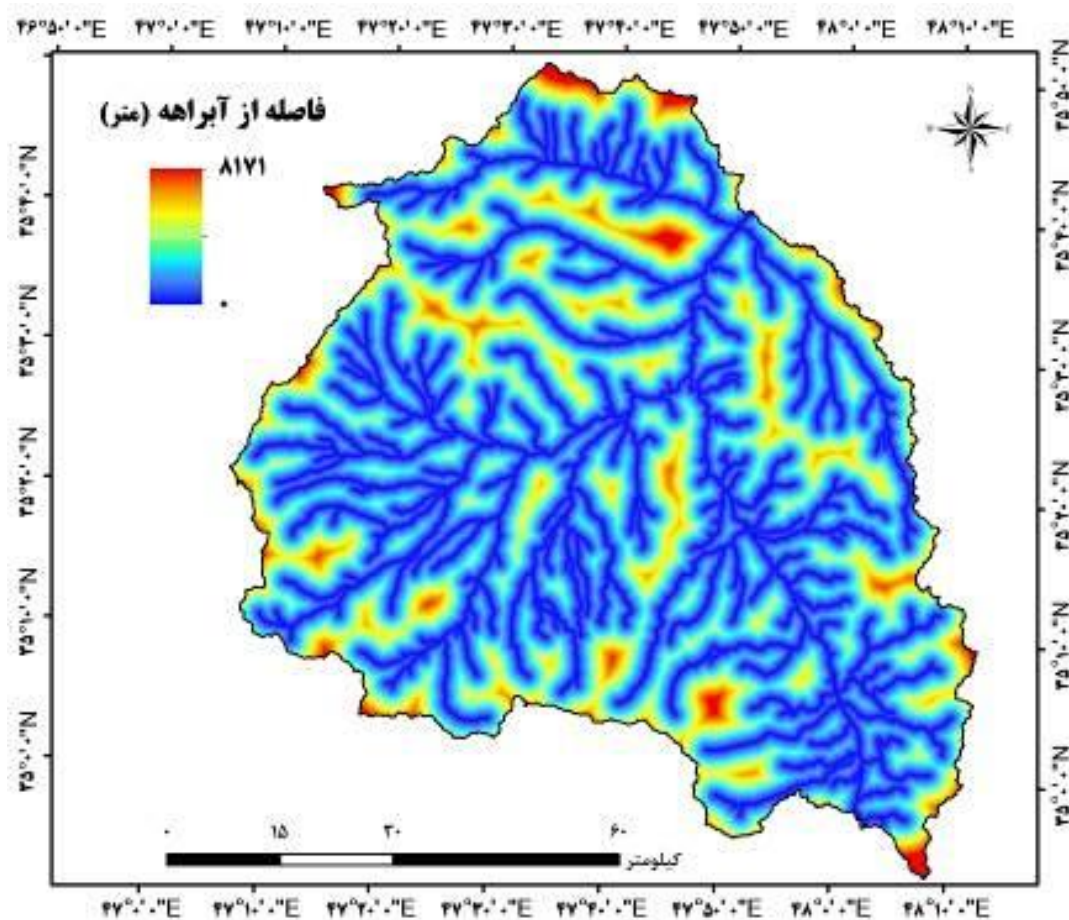
شکل ۷- نقشه سنگ‌شناسی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

جدول ۱- خصوصیات واحدهای سنگ‌شناسی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

واحد سنگ‌شناسی	توضیحات	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
Ebv	سنگ‌های آتشفشانی بازالتی	۲۷۸۲/۱۲	۰/۴۳
Edav	سنگ‌های آتشفشانی داسیتی تا آندزیتی	۲۶۰۵	۰/۴
Ek	توف سبز و شیل توفی بستر (سازند کرج)	۲۱۶۷/۶۸	۰/۳۴
Jbv	گدازه‌های آتشفشانی بازالتی	۱۱۲۸/۸۹	۰/۱۷
JKl	سنگ آهک و آهک متبلور	۱۸۷۶/۱۱	۰/۲۹
Jph	فیلیت، تخته‌سنگ و ماسه‌سنگ دگرگونی (فیلیت همدان)	۲۶۷۶/۴۶	۰/۴۱
JUavt	توف آتشفشانی آندزیتی	۱۱۶۲/۲۱	۰/۱۸
Judi	دیوریت ژوراسیک فوقانی	۴۹۶	۰/۰۸
JUdv	سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی تا ریوداسیتی	۳۳۹/۵۷	۰/۰۵
Jugr	گرانیت ژوراسیک فوقانی شامل گرانیت شیرکوه و گرانیت شاه‌کوه	۶۱۳۷/۵۴	۰/۹۵
Jugr-di	گرانیت ژوراسیک بالایی تا دیوریت نفوذی	۱۴۸۸۷/۶۸	۲/۳

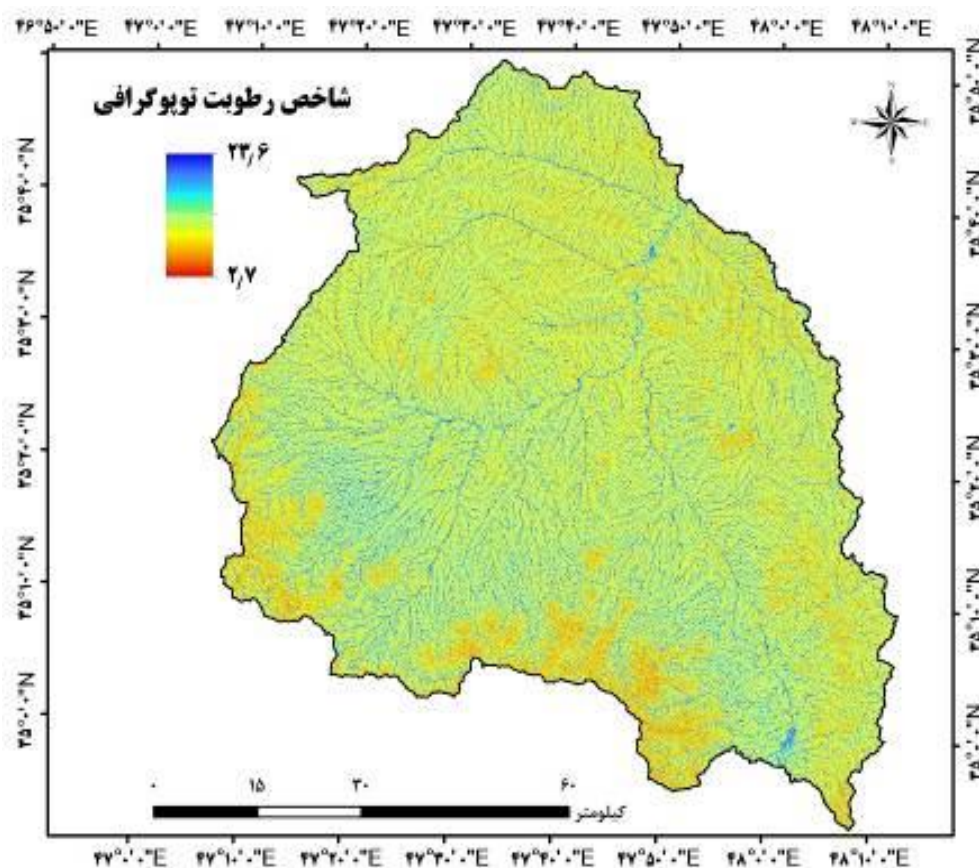
واحد سنگ‌شناسی	توضیحات	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
Kbv	واحدهای آتش‌فشانی بازالتی	۱۷۸۴/۱۲	۰/۲۸
Kfsh	شیل آرژیلوس خاکستری تیره	۲۶۰۱/۱۲	۰/۴
Klsol	سنگ آهک خاکستری اوریتولینا با بستر ضخیم	۶۹۸۱/۸۴	۱/۰۸
Kussh	شیل خاکستری تیره (شیل سنندج) (شیست و فیلیت)	۶۵۳۷/۷۱	۱/۰۱
Mav	گدازه آندزیتی میوسن به صورت محلی همراه با بازالت	۷۸۵۱	۱/۲۱
Murm	مارن قرمز روشن تا قهوه‌ای و مارن گچی با ماسه‌سنگ درهم‌آمیزی	۴۰۹/۹	۰/۰۶
OMav	واحدهای آتش‌فشانی آندزیتی	۱۴۵۵۲/۸	۲/۲۵
OMq	سنگ آهک، مارن، مارن گچی، مارن شنی و ماسه‌سنگ (سازند قم)	۴۹۲۶/۲۱	۰/۷۶
OMql	سنگ آهک ریفال (متشکل از بقایای مرجان‌ها و اسفنج‌ها)	۶۸۶۷/۹۳	۱/۰۶
PeEf	فلش توریدیتی، ماسه‌سنگ و گل سنگ آهکی	۷۹۳/۴۳	۰/۱۲
Plbv	جریان‌های گدازه‌ای بازالتی	۹۲۷۰	۱/۴۳
Plms	مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا	۲۵۳۴۸۰	۳۹/۱۹
Qal	رسوبات دشت‌های سیلابی و بستر رودخانه‌ها	۳۱۵۳۶	۴/۸۸
Qbv	بازالت الیوین و بازالت مربوط به آتشفشان بزمان و تا حدودی مربوط به آتشفشان تفتان	۶۵۱۲/۷۵	۱/۰۱
Qft1	نهشته‌های پادگانه‌ای و مخروط افکنه‌های مرتفع	۳۹۵۳۳/۶۱	۶/۱۱
Qft2	نهشته‌های پادگانه‌ای و مخروط افکنه‌های کم‌ارتفاع	۱۸۳۴۵۵/۶	۲۸/۳۶
TRdl	سنگ آهک و دولومیت متبلور	۴۶۲۷/۵۸	۰/۷۲
TRJvm	آهک دگرگونی، فیلیت و سنگ‌های آتش‌فشانی دگرگونی	۲۸۴۶۰/۲۸	۴/۴
TRuJm	منطقه انتقالی متشکل از فیلیت با ادغام سنگ آهک متبلور و افق‌های آتشفشانی اسیدی	۳۹۱/۳۶	۰/۰۶

نقشه فاصله از آبراهه حوزه آبخیز تلوار در شکل ۸ نشان داده شده است. براساس نتایج تجزیه و تحلیل مکانی فاصله پیکسل‌ها از نزدیک‌ترین آبراهه‌ها، عامل فاصله از آبراهه در این حوضه از صفر تا ۸۱۷۱ متر متغیر است. شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه به گونه‌ای است که بیشتر بخش‌های این حوزه آبخیز دارای آبراهه بوده و تقریباً دارای الگوی متراکم است.



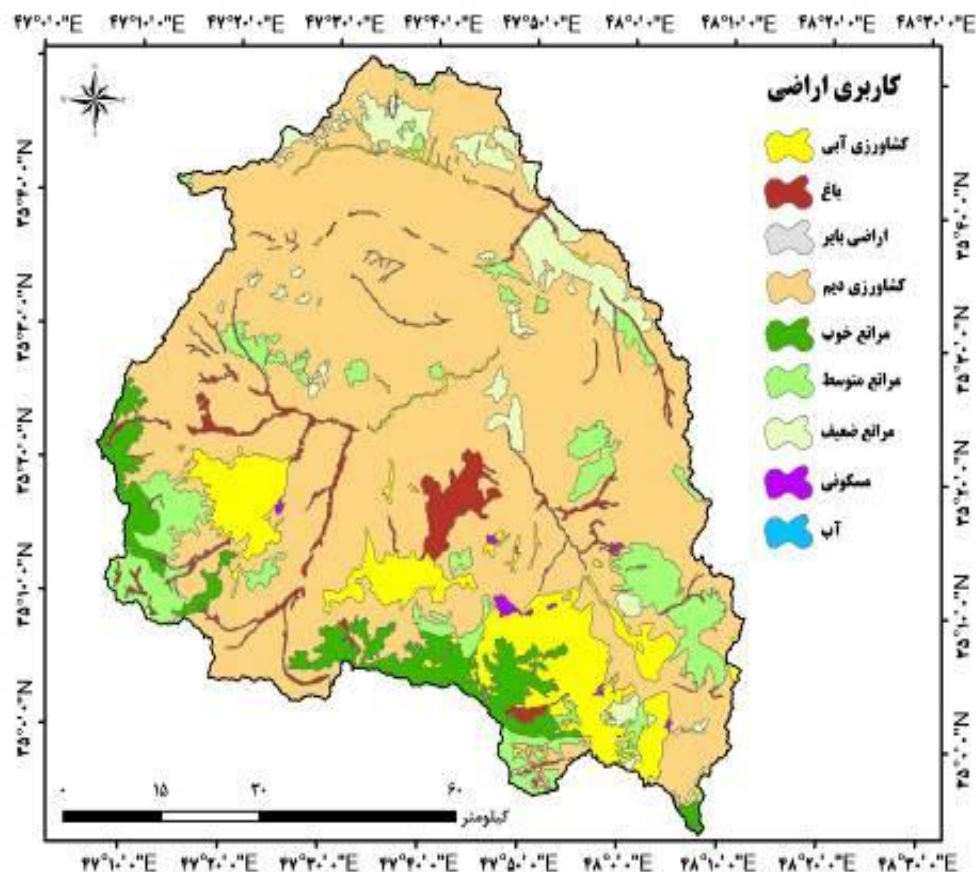
شکل ۸- نقشه فاصله از آبراهه حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه رطوبت توپوگرافی حوزه آبخیز تلوار در شکل ۹ بیان‌کننده آن است که مقدار شاخص TWI بین ۲/۷ تا ۲۳/۶ متغیر است. بخش‌های جنوب‌شرقی، شمال‌شرقی و لکه‌هایی در قسمت‌های میانی و غربی، دارای بیشترین مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی هستند. بخش‌هایی از مرکز و جنوب منطقه نیز دارای کمترین شاخص رطوبت توپوگرافی هستند.



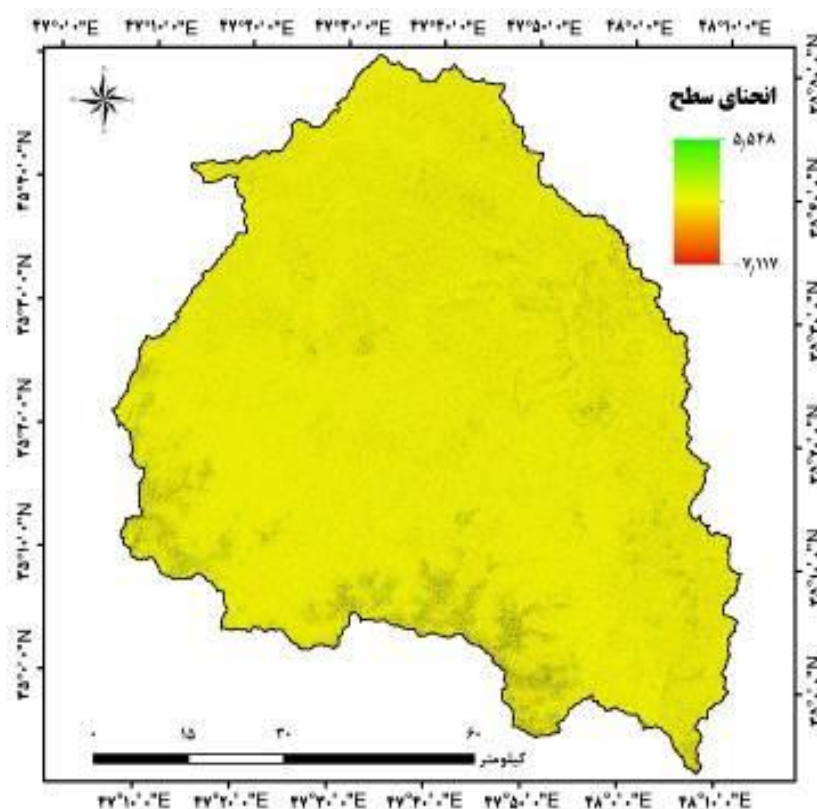
شکل ۹- نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

حوزه آبخیز تلوار دارای کاربری‌های مختلفی است که از آن جمله می‌توان به کشاورزی آبی، باغ، اراضی بایر، کشاورزی دیم، مرتع خوب، مرتع متوسط، مرتع ضعیف، مسکونی و پهنه‌های آبی اشاره کرد (شکل ۱۰). بیشترین مساحت به کلاس کاربری کشاورزی دیم و کشاورزی آبی اختصاص یافته است. کاربری‌های مسکونی و اراضی بایر نیز دارای کمترین مساحت هستند.



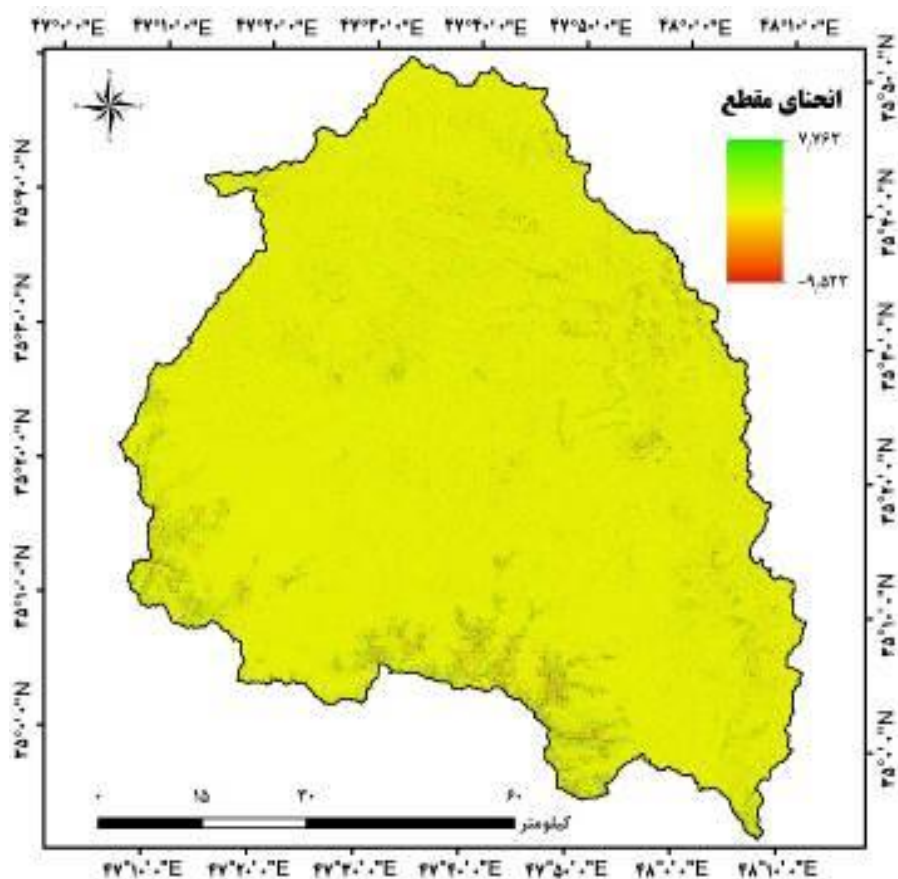
شکل ۱۰- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه انحنای سطح حوزه آبخیز تلوار در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نقشه، توزیع مکانی انحنای دامنه‌ها را نشان می‌دهد. اعداد منفی نشان‌دهنده دامنه‌های مقعر، اعداد مثبت نشان‌دهنده دامنه‌های محدب و اعداد نزدیک صفر بیانگر دامنه‌های تحت و بدون انحنا است. شکل دامنه‌ها، اثر زیادی بر رفتار هیدرولوژیکی و فرآیندهای ژئومورفولوژیکی دارد. براساس نقشه انحنای سطح، بخش وسیعی از حوزه آبخیز تلوار را دامنه‌های بدون انحنا تشکیل داده‌اند.



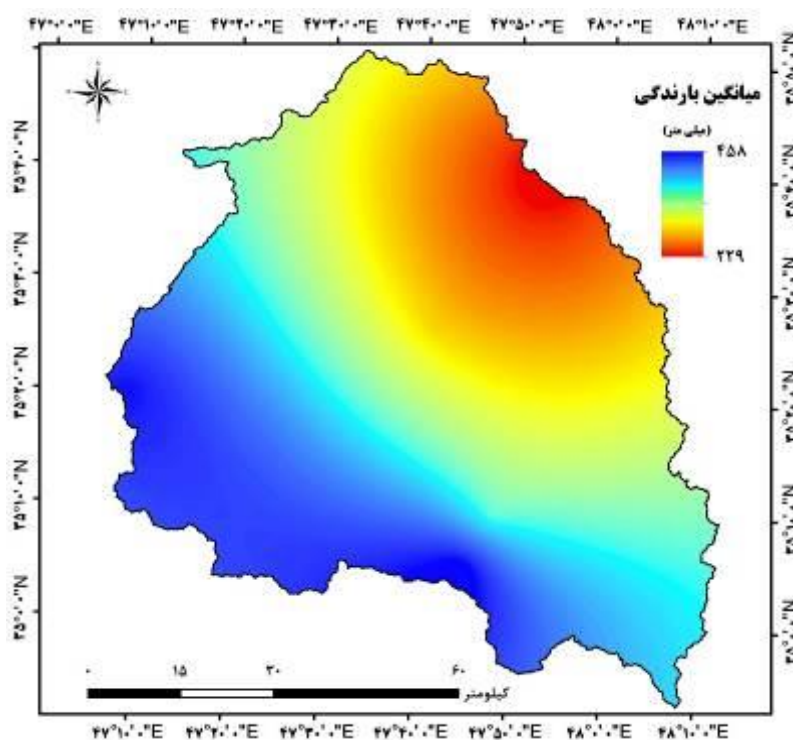
شکل ۱۱- نقشه انحنای سطح حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه انحنای مقطع دامنه‌های حوزه آبخیز تلوار در شکل ۱۲ ارائه شده است. این نقشه انحنای پروفیل (مقطع طولی دامنه) را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که اعداد منفی نشان‌دهنده دامنه با نیمرخ مقعر، اعداد مثبت نشان‌دهنده دامنه با نیمرخ محدب و اعداد نزدیک صفر نشان‌دهنده وضعیت تخت و بدون انحنای نیمرخ دامنه هستند. همانگونه که در نقشه انحنای مقطع دامنه‌ها مشاهده می‌شود، بخش وسیعی از منطقه را دامنه‌های بدون انحنا تشکیل داده‌اند. انحناهای مقعر و محدب غالباً در بخش‌های جنوبی و غربی این آبخیز مشاهده می‌شوند.



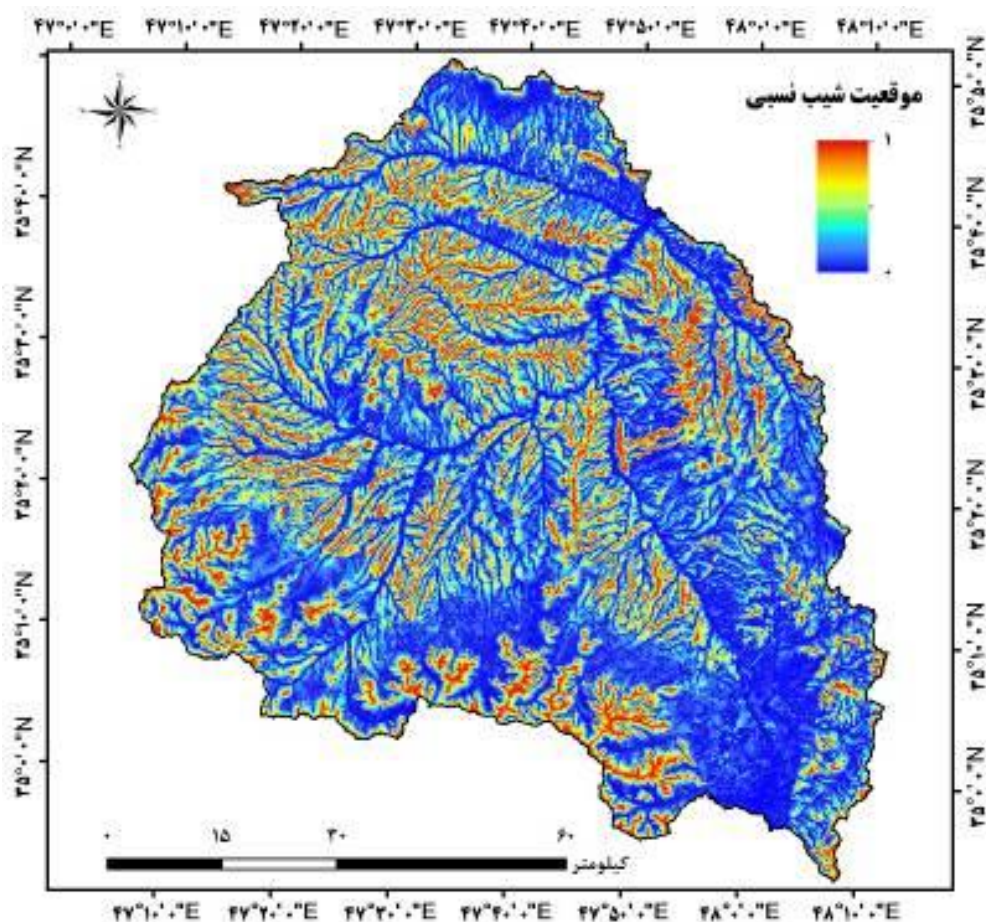
شکل ۱۲- نقشه انحنای مقطع حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه میانگین بارندگی سالانه حوزه آبخیز تلوار در شکل ۱۳ بیان‌کننده آن است که میانگین بارندگی سالانه این حوزه از ۲۲۹ میلی‌متر تا ۴۵۸ میلی‌متر متغیر است. بخش‌های شمال‌شرقی، دارای کمترین بارندگی و قسمت‌های جنوبی و جنوب‌غربی، بیشترین بارندگی را ثبت کرده‌اند. بارندگی میانه حوزه نیز در بخش‌های مرکزی آن مشاهده می‌شود.



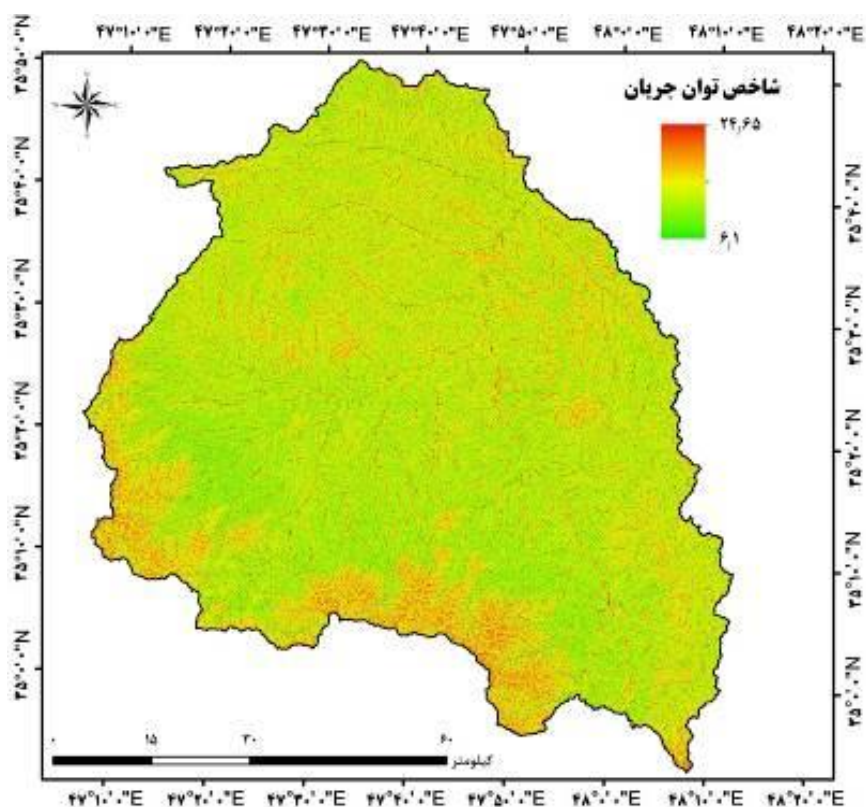
شکل ۱۳- نقشه میانگین بارندگی سالانه حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه موقعیت شیب نسبی حوزه آبخیز تلوار نیز در شکل ۱۴ ارائه شده است. براساس وضعیت توپوگرافی، موقعیت شیب نسبی حوزه آبخیز تلوار از صفر تا یک متغیر است. مناطق دره‌ای دارای کمترین مقدار موقعیت شیب نسبی و خط‌الرأس‌ها دارای بیشترین مقدار موقعیت شیب نسبی هستند.



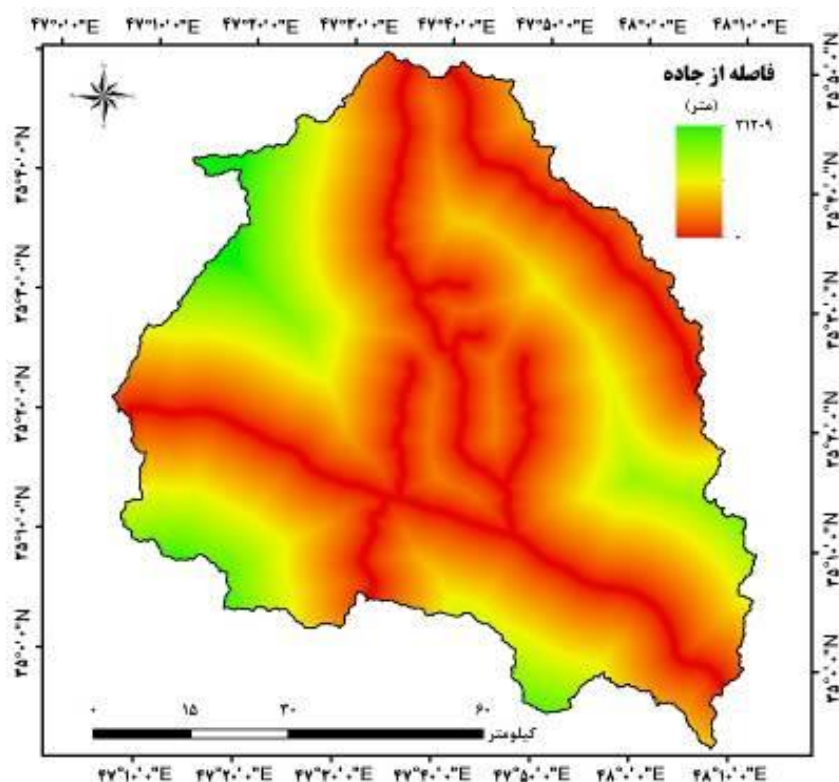
شکل ۱۴- نقشه موقعیت شیب نسبی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه شاخص توان جریان حوزه آبخیز تلوار که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. براساس این نقشه، مناطق قرمز رنگ دارای انرژی جریان بیشتر و مناطق سبز رنگ دارای انرژی جریان کمتری هستند. مقدار این شاخص در این آبخیز از ۶/۱ تا ۲۴/۶۵ متغیر است. بنابراین حوزه آبخیز تلوار از نظر این شاخص مهم، دارای تغییرات مکانی چشمگیری است.



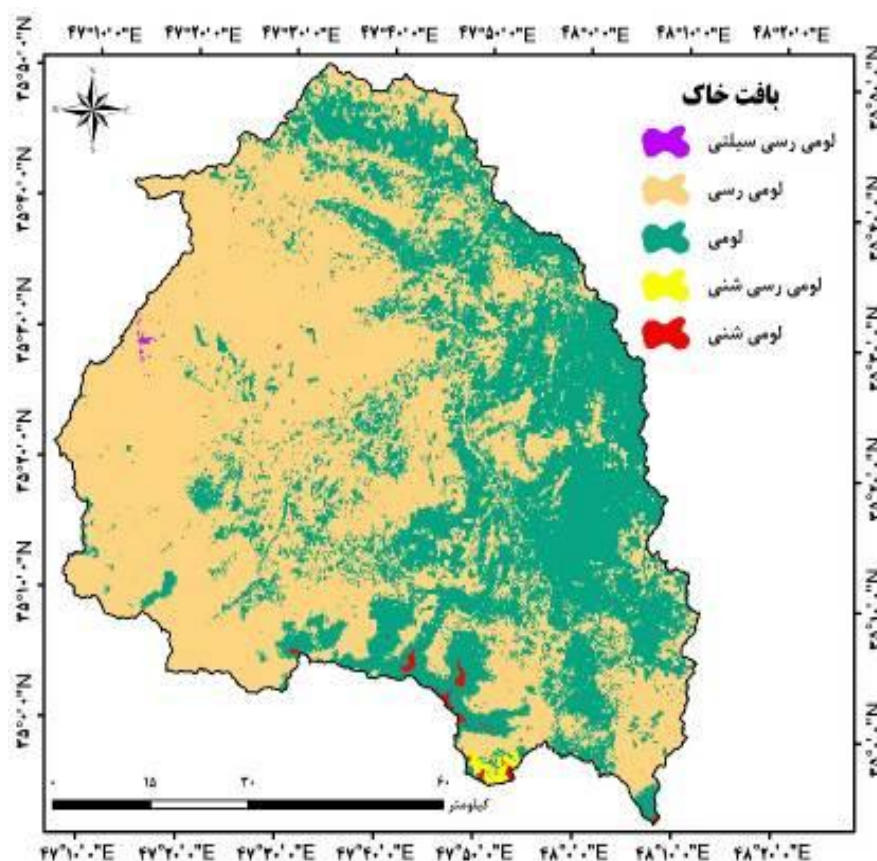
شکل ۱۵- نقشه شاخص توان جریان حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

در شکل ۱۶ نقشه فاصله از جاده حوزه آبخیز تلوار ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، چند جاده اصلی از این آبخیز عبور می کنند و میزان فاصله از جاده از صفر تا ۳۱۲۰۹ متر متغیر است. جاده ها غالباً موجب تجمع جریان در بالادست و حاشیه جاده شده و شرایط را برای وقوع فرسایش خندقی فراهم کرده است.



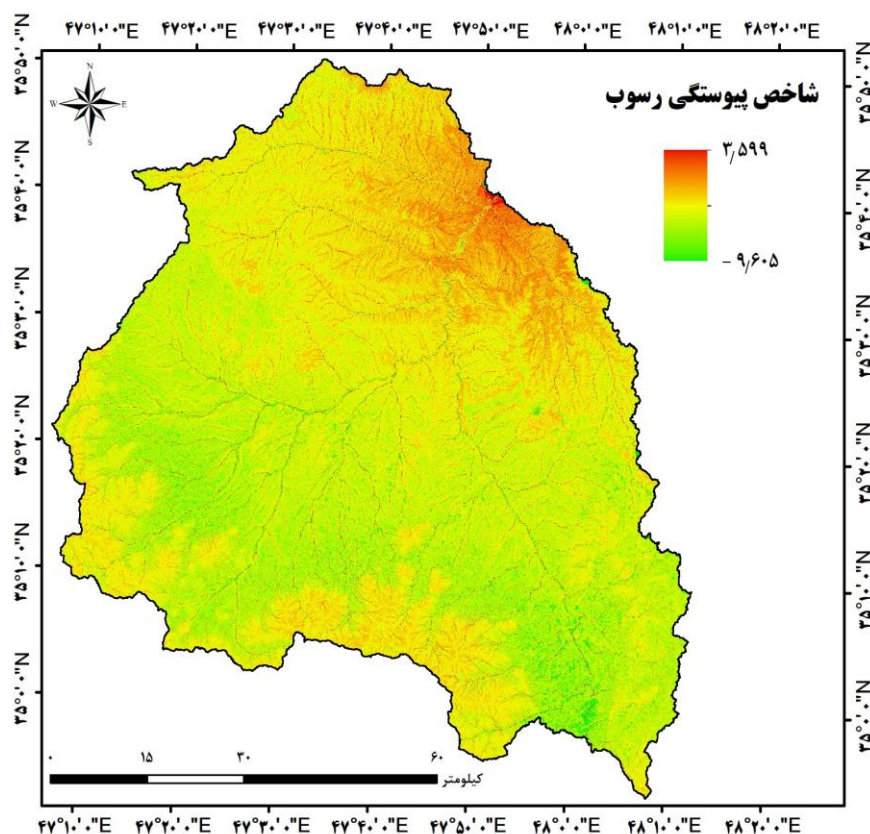
شکل ۱۶- نقشه فاصله از جاده حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

براساس نقشه بافت خاک (شکل ۱۷)، می‌توان اظهار کرد که کلاس‌های بافت خاک بسیار متنوعی در حوزه آبخیز تلوار ثبت شده است. از جمله مهم‌ترین بافت‌های که مساحت زیادی را به خود اختصاص داده‌اند می‌توان به بافت‌های لومی‌رسی‌سیلتی، لومی‌رسی، لومی، لومی‌رسی‌شنی و لومی‌شنی اشاره کرد.



شکل ۱۷- نقشه بافت خاک حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

نقشه شاخص پیوستگی رسوب حوزه آبخیز تلوار استان کردستان در شکل ۱۸ نشان داده شده است. براساس این نقشه، کمترین و بیشترین مقادیر این شاخص به ترتیب ۹/۶۰۵- و ۳/۵۹۹ به دست آمده است. مقدار میانگین این شاخص در این آبخیز، ۶/۵۸- و انحراف معیار آن ۰/۴۹۶ گزارش شد. بیشترین مقدار این شاخص در شمال حوضه و نزدیک به خروجی مشاهده شد در حالی که کمترین مقدار در قسمت‌های جنوب شرقی واقع شده که فاصله زیادی تا خروجی دارند. از طرف دیگر، این مناطق از شیب کمی برخوردارند. همچنین بخش‌های پرتپ جنوب حوضه نیز دارای شاخص پیوستگی رسوب نسبتاً شایان توجهی هستند.

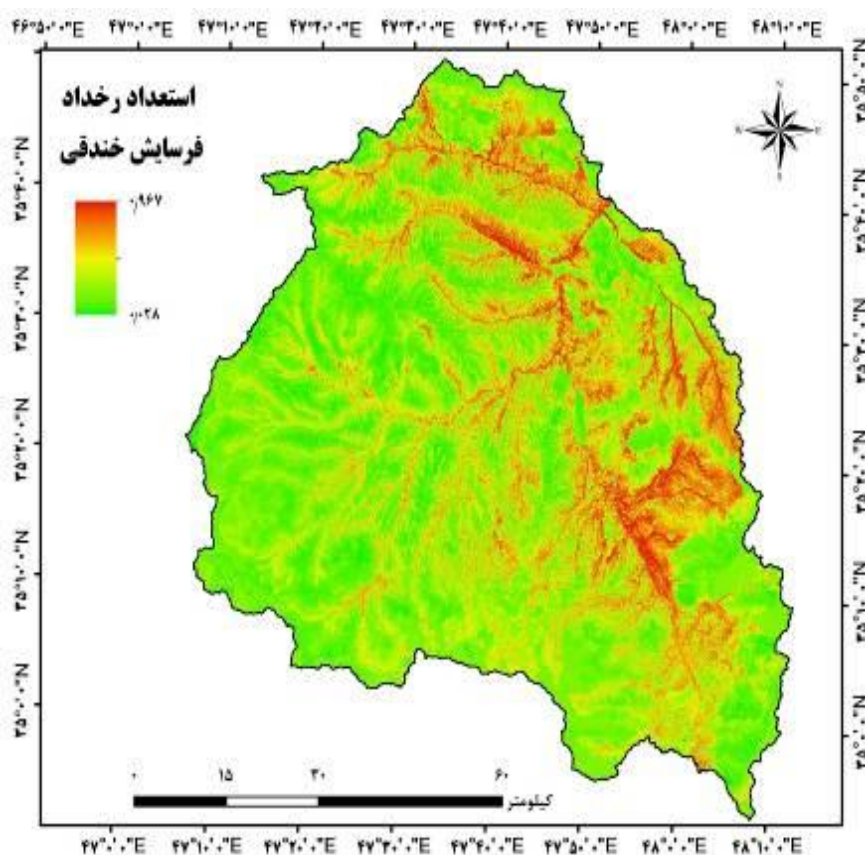


شکل ۱۸- نقشه شاخص پیوستگی رسوب حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

۷-۳- تعیین استعداد ایجاد فرسایش خندقی

۷-۳-۱- مدل ماشین بردار پشتیبان

شکل ۱۹ نقشه استعداد ایجاد (شکل‌گیری) فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار که با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان تولید شده است را نشان می‌دهد. مقدار کمینه و بیشینه استعداد ایجاد فرسایش خندقی در این آبخیز، براساس پیش‌بینی مدل ماشین بردار پشتیبان به ترتیب $0/028$ و $0/967$ به دست آمده است. عموماً بیشترین مقدار استعداد ایجاد فرسایش خندقی در قسمت‌های شرقی و شمال شرقی حوضه مشاهده شد در حالی که مناطق جنوبی، جنوب غربی و غربی کمترین استعداد ایجاد فرسایش خندقی را داشته‌اند. براساس داده‌های استعداد ایجاد فرسایش خندقی حاصل از مدل ماشین بردار پشتیبان، مقدار میانه $0/339$ به دست آمد که نشان‌دهنده توزیع مکانی مقادیر استعداد ایجاد خندق در این حوزه آبخیز است.

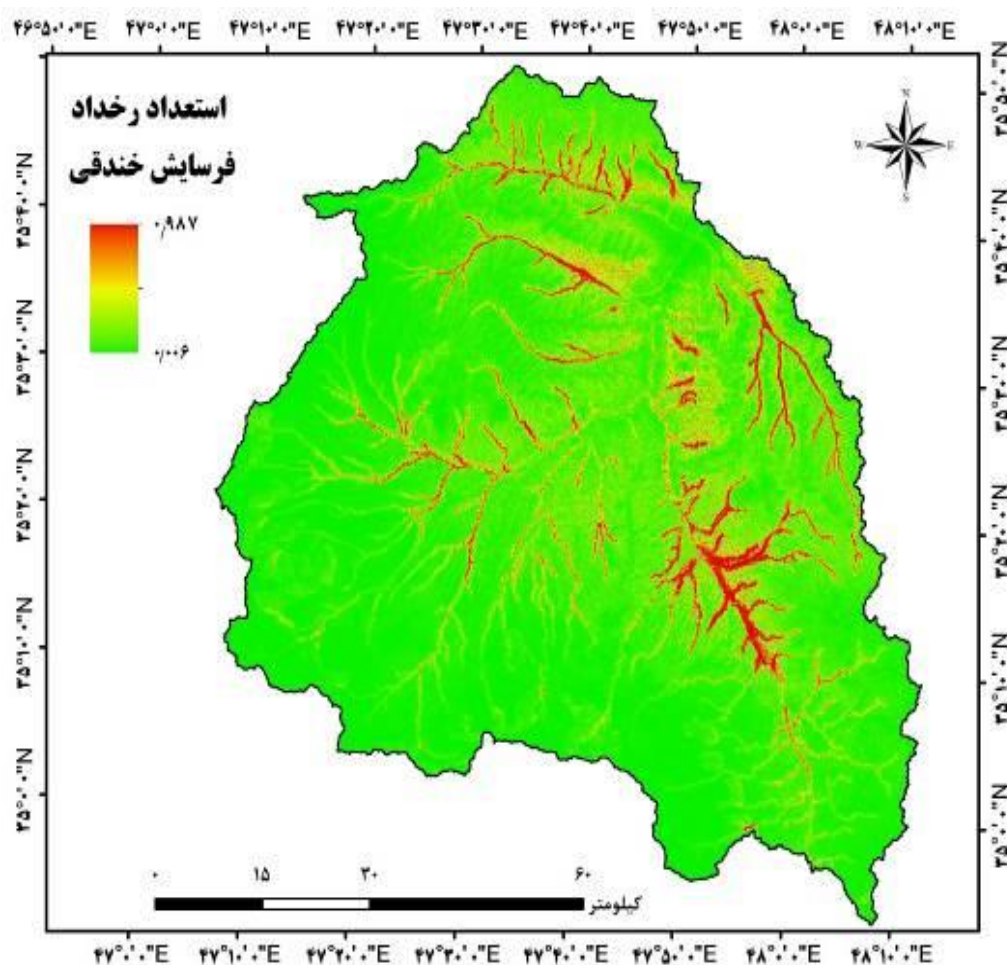


شکل ۱۹- نقشه استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار

با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان

۲-۳-۷- مدل پیشینه بی‌نظمی

نقشه استعداد ایجاد فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار که با استفاده از مدل پیشینه بی‌نظمی تولید شده است، در شکل ۲۰ ارائه شده است. مقادیر کمینه و بیشینه استعداد ایجاد فرسایش خندقی به ترتیب ۰/۰۰۶ و ۰/۹۸۷ به دست آمد. این مدل بخش‌های شرقی و شمالی را به عنوان مساعدترین اراضی برای ایجاد فرسایش خندقی معرفی کرده است. مقدار میانه پیش‌بینی‌های انجام گرفته با استفاده از این مدل ۰/۰۲۶ به دست آمد. بنابراین، مقایسه الگوی توزیعی پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی نشان می‌دهد که مدل پیشینه بی‌نظمی استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار را مقداری کمتر از مدل ماشین بردار پشتیبان برآورد کرده است.



شکل ۲۰- نقشه استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی

۴-۷- ارزیابی دقت پیش‌بینی مکانی استعداد ایجاد فرسایش خندقی

دقت پیش‌بینی مدل‌های مختلف براساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد خندق‌های ثبت‌شده) و معیار ارزیابی مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC)، در جدول ۲ نشان داده شده است. از آنجایی که معیار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، یک روش مستقل از آستانه است؛ همواره به‌عنوان روش اصلی در ارزیابی دقت پیش‌بینی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

براساس اعتبارسنجی انجام‌شده در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان، مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، در مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی، به‌ترتیب ۰/۹۶۵ و

۰/۹۲۰ به دست آمد. بنابراین، مدل ماشین بردار پشتیبان، دارای دقت بیشتری در پیش‌بینی مکانی استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان است. شایان ذکر است براساس طبقه‌بندی میزان معیار AUC، مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی در گروه عالی ($AUC > 0/9$) قرار گرفتند که نشان‌دهنده دقت بالای این دو مدل در پیش‌بینی مکانی استعداد ایجاد خندق در این حوزه آبخیز دارد.

جدول ۲- دقت پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی مدل‌های مورد استفاده در حوزه آبخیز تلوار

مدل	مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC)
ماشین بردار پشتیبان	۰/۹۶۵
بیشینه بی‌نظمی	۰/۹۲۰

۸- نتیجه‌گیری

مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی که بر مبنای هوش مصنوعی عمل می‌کنند، توانستند با دقت عالی ($AUC > 0/9$)، استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان را پیش‌بینی کنند. به‌طوری‌که براساس نتایج اعتبارسنجی، مدل ماشین بردار پشتیبان با بیشترین مقدار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (۰/۹۶۵)، به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار شناخته شد. شایان ذکر است که دقت پیش‌بینی مدل بیشینه بی‌نظمی با مقدار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (۰/۹۲۰)، و اندکی تفاوت (۰/۰۴۵)، در رتبه دوم قرار گرفت. با توجه به یافته‌های این پژوهش، می‌توان مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی را به‌عنوان مدل‌های مناسب به‌منظور پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان و همچنین سایر حوزه‌های آبخیز مشابه (با شرایط طبیعی و محیطی) با این حوزه آبخیز، معرفی کرد. همچنین با توجه به این‌که مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی، قابلیت بالایی در پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی دارند؛ به این سبب، قابلیت تعمیم آموزش‌ها و تحلیل‌های آن‌ها به دیگر حوزه‌های

آبخیز مشابه نیز وجود دارد. بنابراین، در صورتی که اطلاعات مناسبی از ایجاد فرسایش‌های خندقی در یک حوضه موجود نیست، با استفاده از این مدل‌ها و با در نظر گرفتن یک حوضه نسبتاً مشابه و دارای آمار رخداد فرسایش‌های خندقی، امکان پیش‌بینی ایجاد و شکل‌گیری فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز بدون آمار وجود دارد.

یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مهربان و همکاران (۱۳۹۷)، والی‌پور و همکاران (۱۴۰۰)، تیموریان و همکاران (۱۴۰۱)، ذاکری‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲)، یوسفی‌مهرن و شیرانی (۱۴۰۲)، خزائی و همکاران (۱۴۰۳)، Pourghasemi و همکاران (۲۰۱۷)، Rahmati و همکاران (۲۰۱۷)، Azareh و همکاران (۲۰۱۹)، Gayen و همکاران (۲۰۱۹)، Garosi و همکاران (۲۰۱۹)، Tran و Prakash (۲۰۲)، Liu و همکاران (۲۰۲۳) و Bammou و همکاران (۲۰۲۴) مبنی بر کارایی مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی، به‌منظور پیش‌بینی استعداد ایجاد فرسایش خندقی مطابقت و هم‌خوانی دارد.

۹- پیشنهادها

با توجه به یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود دستگاه‌های اجرایی به‌منظور تهیه نقشه استعداد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز، از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده کنند. زیرا انجام این مورد، باعث ارتقاء عملکرد اجرایی در ارگان‌های اجرایی می‌شود.

با توجه به این که بانک اطلاعات مکانی خندق‌ها و همچنین لایه‌های عوامل محیطی حوزه‌های آبخیز، از جمله پیش‌نیازهای ضروری برای پیش‌بینی استعداد ایجاد و شکل‌گیری فرسایش خندقی قلمداد می‌شوند؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود دستگاه‌های اجرایی متولی، نسبت به افزایش دقت لایه‌های محیطی مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی، اهتمام نمایند تا در هنگام استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، میزان کارایی و عملکرد این مدل‌ها ارتقاء یابد.

یکی از محدودیت‌های موجود در این پژوهش و اکثر مطالعات پیشین در ایران و اغلب نقاط جهان، مشخص نبودن زمان ایجاد فرسایش خندقی است که در صورت وجود، می‌توان از داده‌های

عوامل محیطی متناظر با زمان ایجاد فرسایش خندقی (مانند: بارندگی، کاربری اراضی و غیره) در مدل سازی استفاده کرد و احتمالاً در صورت فراهم شدن این مورد، دقت پیش بینی مدل (ها) نیز بیشتر خواهد شد.

سپاسگزاری

این اثر، برگرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی مستقل، با عنوان "مدل سازی استعداد وقوع خندق در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان و ارزیابی قابلیت تعمیم آن به حوزه باباعرب استان فارس" با کد مصوب ۰۰۰۳۰۱-۰۱۳-۲۹-۵۳-۲، در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. نویسندگان از حمایت های مادی و معنوی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، نهایت تشکر و سپاس خود را اعلام می دارند.

منابع

- تیموریان، ت.، نظری سامانی، ع.ا.، فیض نیا، س.، احمد آلی، خ.، سلیمان پور، س.م. ۱۴۰۱. شناخت توزیع مکانی احتمال رخداد فرسایش خندقی با مدل بیشینه ی آنتروپی. نشریه پژوهش های آبخیزداری، دوره ۳۵، شماره ۲، صفحات ۲ تا ۱۵.
- جعفری، م.، طهمورث. م.، ملکیان، آ. ۱۳۸۸. مدیریت خاک. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۵۱۶ صفحه.
- خزائی، م.، شیرانی، ک.، صالح، ا. ۱۴۰۳. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تهیه نقشه پهنه بندی در حوزه آبخیز تخت دراز. مجله پژوهش های فرسایش محیطی. جلد ۱۴، شماره ۳، صفحات ۱۲۳ تا ۱۴۱.

- ذاکری‌نژاد، ر.، الوندی، پ. ۱۴۰۲. پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های TanDEM-X و مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز خسویه). نشریه پژوهش‌های فرسایش محیطی، دوره ۱۳، شماره ۱، صفحات ۹۶ تا ۱۱۳.
- رحمتی، ا.، سلیمان‌پور، س.م.، شادفر، ص.، زاهدی، ص. ۱۴۰۲. مدل‌سازی استعداد وقوع خندق در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان و ارزیابی قابلیت تعمیم آن به حوزه بابا‌عرب استان فارس. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۷۶ صفحه.
- رفاهی، ح. ۱۳۹۶. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هفتم، ۶۷۲ صفحه.
- سلیمان‌پور، س.م.، صوفی، م.، روستا، م.ج.، شادفر، ص.، جوکار، ل.، کشاورزی، ح. ۱۳۹۷. بررسی میزان تأثیر عوامل مؤثر بر گسترش فرسایش آب‌کندی. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۵۹ صفحه.
- عرب‌خداری، م. ۱۳۹۳. مروری بر نرخ فرسایش آبی و تولید رسوب در ایران. نشریه توسعه و ترویج آبخیزداری، شماره ۴، جلد ۲، صفحات ۲۳ تا ۳۰.
- عرب‌خداری، م. ۱۴۰۰. وضعیت فرسایش آبی و رسوب‌دهی ایران، واکاوی آماری و مقایسه‌ای. مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، سال ششم، شماره ۲، صفحات ۱۳۹ تا ۱۵۶.
- عرب‌خداری، م.، شادفر، ص.، جعفری‌اردکانی، ع.، بیات، ر.، خواجوی، ا.، مهدیان، م.ح. ۱۳۹۷. تدقیق برآورد فرسایش آبی در ایران. نشریه پژوهش‌های آبخیزداری، دوره ۳۱، شماره ۳، صفحات ۱۳ تا ۲۷.

- مهربان، م.، گلکاریان، ع.، خسروی، خ. ۱۳۹۷. ارزیابی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل ماکزیمم آنترופی (مطالعه موردی: منطقه شورلوق استان خراسان رضوی). مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی حفاظت خاک و آبخیزداری، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.
- والی پور، م.، محسنی، ن.، حسین زاده، س. ر. ۱۴۰۰. مدل سازی وقوع فرسایش گالی در حوزه آبریز گرگان رود. مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- یوسفی مبرهن، ا.، شیرانی، ک. ۱۴۰۲. ارزیابی کارایی مدل بیشینه بی نظمی در شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تعیین پهنه های حساس در حوزه آبخیز علاء سمنان. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۱۴، شماره ۲۸، صفحات ۳۷ تا ۵۴.
- Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardooi, E., Sankey, J.B., Lee, S., Shahabi, H. and Ahmad, B.B., 2019. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Science of the Total Environment*, 655, 684-696.
- Bammou, Y., Benzougagh, B., Abdessalam, O., Brahim, I., Kader, Sh., Spalevic, V., Sestras, P. and Ercişli, S. 2024. Machine learning models for gully erosion susceptibility assessment in the Tensift catchment, Haouz Plain, Morocco for sustainable development. *Journal of African Earth Sciences*, 213, 105229.
- De Luna, E., Vanderlinden, K., De haro, J.M., Laguna, A., Poesen, J. and Giraldez, J.V. 2000. Monitoring of long term gully head advance in south-east Spain using GIS. *International Symposium on Gully Erosion under Global Change*, 53.
- Garosi, Y., Sheklabadi, M., Conoscenti, C., Pourghasemi, H.R. and Van Oost, K., 2019. Assessing the performance of GIS-based machine learning models

- with different accuracy measures for determining susceptibility to gully erosion. *Science of the Total Environment*, 664, 1117-1132.
- Gayen, A., Pourghasemi, H.R., Saha, S., Keesstra, S. and 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, 124-138.
 - Liu, G., Arabameri, A., Santosh, M. and Asadi Nalivan, O. 2023. Optimizing machine learning algorithms for spatial prediction of gully erosion susceptibility with four training scenarios. *Environ Sci Pollut Res*, 30: 46979-46996.
 - Meliho, M., Khattabi, A. and Mhammdi, N., 2018. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling using bivariate statistics methods in the Ourika watershed, Morocco. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-14.
 - Park, N.W., 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, 73, 937-949.
 - Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190, 231-259.
 - Pourghasemi, H.R., Yousefi, S., Kornejady, A. and Cerdà, A., 2017. Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*, 609, 764-775.
 - Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Feizizadeh, B., 2017. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, 298, 118-137.
 - Soleimanpour, S.M., Soufi, M., Zolfaghari, M. and Ahmadi, H., 2014. Investigation of Topographic Threshold Relations of Gully Creation in Various Land use in Fars province, I.R.Iran. *Indian Journal of Scientific Research*, 3(1), 362-371.
 - Tran, V.Q. and Prakash, I., 2020. Prediction of soil loss due to erosion using support vector machine model. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 42(3), 247-254.

Abstract

Gully erosion is one of the most important factors affecting sediment production and land degradation, and spatial prediction of its potential is one of the practical solutions to prevent this type of erosion. Some watersheds lack sufficient information about the location of gully erosion, and this is a challenge for spatial modeling and prediction of gully erosion potential. This study aimed to evaluate the application of support vector machine and maximum entropy models to prepare gully erosion creation map in Talwar watershed of Kurdistan province. For this purpose, 99 gullies were identified during field visits, and the position of the gullies headcut was recorded and a spatial distribution map of the gullies was prepared. The recorded gullies were randomly divided into two training and validation groups in a ratio of 70:30. Also, a map of 15 factors affecting gully erosion including: elevation, slope degree, slope direction, lithology, distance from streams, topographic wetness index, land use, surface curvature, cross-section curvature, average annual precipitation, relative slope position, flow power index, distance from the road, soil texture, and sediment connectivity index were prepared in the geographic information system. Two support vector machine and maximum entropy models were used to evaluate the susceptibility to gully erosion. The prediction accuracy of the models was evaluated based on the area under the receiver operating characteristic (AUC) curve method. Based on the validation, the AUC values in the support vector machine and maximum entropy models were 0.965 and 0.920, respectively. Based on the classification of the AUC criterion, these two models were placed in the excellent group ($AUC > 0.9$), which indicates the high accuracy of these two models in spatial prediction of gully creation susceptibility in this watershed. The use of these models is suggested

for use in land management and soil conservation programs in watersheds prone to gully erosion.

Keywords: Creation, Talwar, Gully, Erosion, Modeling

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and
Education Center

Title: Evaluation of the application of support vector machine and maximum entropy models to prepare gully erosion creation map in Talwar watershed, Kurdistan province

Authors: Omid Rahmati, Seyed Masoud Soleimanpour, Samad Shadfar, Salahudin Zahedi

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Document Formatting: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Circulation: 10 copies

Date of Publication: Winter 2025

This scientific work has been registered with the series number of **66891** at the date of **2025-02-24** the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference.

**Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and
Education Center**

Technical Report:

Evaluation of the application of support vector machine and maximum entropy models to prepare gully erosion creation map in Talwar watershed, Kurdistan province

Authors:

Omid Rahmati, Seyed Masoud Soleimanpour, Samad Shadfar, Salahudin Zahedi

Series Number:

66891

2025



Minstry of Agriculture - Jihad

Agriculture Research, Education and Extention Organization

Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



Agricultural and natural resources research and training center of Kordestan province

Technical Report

**Evaluation of the application of support
vector machine and maximum entropy
models to prepare gully erosion creation
map in Talwar watershed, Kurdistan**

Series Number: 66891

2025