

تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبراهه‌ای با استفاده از مدل داده‌کاوی تلفیقی آنتروپی - ارزش اطلاعاتی (IOE - IV) (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن)

دانیال صیاد - دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری - آب، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.
هدی قاسمیه* - دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.
زهرا ناصریان اصل - دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز - حفاظت آب و خاک، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

چکیده

فرسایش آبی، مهم‌ترین مسئله تخریب زمین در مقیاس جهان است. بنابراین، هدف پژوهش حاضر ارزیابی اهمیت معیارها و زیرمعیارهای مؤثر هر معیار در حساسیت فرسایش آبراهه‌ای با استفاده از مدل تلفیقی آنتروپی - ارزش اطلاعاتی در حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن است. برای این منظور، ابتدا ۲۵۲ نقطه فرسایشی با استفاده از تصاویر Google Earth شناسایی شد که از این تعداد به صورت تصادفی، ۱۷۶ نقطه (۷۰ درصد) برای آموزش مدل و ۷۶ نقطه (۳۰ درصد) برای اعتبارسنجی مدل طبقه‌بندی شدند. آنگاه ۷ معیار مؤثر بر وقوع فرسایش (شامل ارتفاع، جهت شیب، فاصله تا آبراهه، کاربری اراضی، فرساینده‌گی باران، خاک و شاخص TWI) شناسایی و هر یک به زیرمعیارهایی طبقه‌بندی شدند. سپس به منظور ارزیابی تأثیر هر معیار و زیرمعیار بر حساسیت فرسایش حوضه مورد مطالعه از مدل تلفیقی داده‌کاوی آنتروپی - ارزش اطلاعاتی استفاده شد. نتایج حاصل از تأثیر هر معیار و زیرمعیار بر حساسیت فرسایش حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل تلفیقی آنتروپی - ارزش اطلاعاتی نشان داد که معیارهای کاربری اراضی و ارتفاع به ترتیب با W_j برابر با ۲/۰۷ و ۰/۹ و همچنین زیر معیار اراضی بایر و طبقه ارتفاعی ۳۷۲۴-۲۷۴۵ متر به ترتیب با IV برابر با ۲/۷۴ و ۱/۶۵ بیش‌ترین تأثیر را در فرسایش منطقه دارند. نرخ موفقیت و پیش‌بینی مدل تلفیقی شاخص آنتروپی - ارزش اطلاعاتی، با توجه به منحنی (ROC-AUC) به ترتیب برابر با ۰/۸۳۱ و ۰/۸۳۷ به دست آمد که از عملکرد خوب مدل برای دوره‌های آموزش و اعتبارسنجی حکایت دارد. همچنین نقشه حساسیت به فرسایش نشان داد که بیش‌ترین مناطق با حساسیت‌پذیری به فرسایش آبراهه‌ای زیاد تا خیلی زیاد منطبق بر امتداد شمال شرقی، جنوب شرقی تا جنوب غربی حوضه است.

واژگان کلیدی: چشمه گسلی، فرسایش بادی، گسل بافق - پشت بادام، چاله درآنجیر.

مقدمه

خاک از حیاتی‌ترین مسائل برای پایداری محیط‌زیست است که نیاز انسانی و معیشت را در سطح زمین تأمین می‌کند. بنابراین کاهش پدیده تخریب زمین یکی از چالش‌های پیشرو برای توسعه پایدار محیط‌زیست و فعالیت‌های اقتصادی است که از این جهت برنامه‌ریزی و مدیریت همه‌جانبه و حفاظت در برابر فرسایش امری ضروری است (عرب‌عامری و همکاران^۱، ۲۰۲۱، ۴۶۹-۴۹۸). فرسایش خاک یک فرآیند طبیعی ژئومورفیک است که مشکلاتی از قبیل: از دست رفتن خاک سطحی حاصلخیز برای کشاورزی، گل‌آلود شده آب‌ها و دریاچه‌ها و از دست رفتن تنوع زیستی آبزیان را به همراه دارد (گاین و ساها^۲، ۲۰۱۷، ۱۱۲۳-۱۱۳۹). فرسایش خاک به‌وسیله آب مهم‌ترین مسئله تخریب زمین در مقیاس جهانی است (پوئته و همکاران^۳، ۲۰۱۹، ۱۵۶). به‌طور جهانی، کل زمین آسیب‌دیده ناشی از فرسایش حدود ۱/۱ میلیارد هکتار تخمین زده شده است که منجر به حمل‌ونقل سالانه تقریباً $10^{10} \times 2-2.5$ mg خاک می‌شود (اوما و همکاران^۴، ۲۰۲۲، ۳۴۸). میزان فرسایش خاک تحت تأثیر عواملی از جمله قدرت فرساینده‌ی باران^۵، فرسایش‌پذیری خاک^۶، پستی‌وبلندی، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی خاک قرار دارد (داس و همکاران^۷، ۲۰۱۸، ۳۷۳-۳۸۱). فرسایش خاک، بهره‌وری ضعیف خاک، از بین رفتن کیفیت آب، رسوب‌گذاری در کف رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و افزایش خطر سیل را به همراه دارد (داس و همکاران، ۲۰۱۸). امروزه روش‌های متعددی برای پیش‌بینی و تهیه نقشه فرسایش خاک توسعه یافته است که از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از روش‌های تجربی ^۸USLE، ^۹MUSLE و ^{۱۰}RUSLE اشاره کرد؛ که این روش‌ها، وزن‌های مساوی برای تمامی پارامترها در محاسبه میانگین فرسایش لحاظ می‌کند؛ درحالی‌که هر معیار دارای ارزش نقطه‌ای است که متأثر از عوامل محیطی، ژئومورفولوژیکی و فیزیکی در ارتباط با فرسایش خاک است (حیدرا و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۹، ۱۱۳۸۵۳). از روش‌های دیگر می‌توان به یادگیری ماشین^{۱۲} اشاره کرد که یادگیری ماشین، روش پیشرفته‌ای است که نیاز به سامانه‌های محاسباتی با کارایی بالا دارند. بنابراین، روش یادگیری ماشین را برای طیف وسیعی از کاربران کمتر قابل استفاده می‌سازد؛ اما استفاده از روش‌های آماری برای مدل‌سازی، سریع و قابل درک و دقیق ضروری است و الزامی به سامانه‌های با کارایی بالا در این روش‌ها وجود ندارد و از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های شاخص آنتروپی^{۱۳} (IOE)، نسبت فراوانی^{۱۴} (FR)، ارزش اطلاعات^{۱۵} (IV)، عامل قطعیت^{۱۶} (CF)، وزن شاهد^{۱۷} (WOE) و... اشاره کرد (ووبالم و همکاران^{۱۸}، ۲۰۲۲، ۵۲۴۹-۵۲۷۸). بنابراین در پژوهش حاضر برای تأثیر هر معیار و زیرمعیار در حساسیت فرسایش خاک از ترکیب مدل‌های آماری دومتغیره آنتروپی - ارزش اطلاعاتی استفاده شده است. در ارتباط با تهیه نقشه حساسیت فرسایش خاک در حوضه آبخیز می‌توان به مطالعات ذیل اشاره کرد: (صابر چناری و همکاران، ۱۳۹۵، ۲۱۹-۲۳۱)، در پژوهشی در حوضه آبخیز

1. Arabameri et al

2. Geyen and Saha

3. Puente et al

4. Ouma et al

5. Rainfall Erosivity

6. Soil Erodibility

7. Das et al

8. Universal Soil Loss Equation

9. Modified Revised Universal Soil Loss Equation

10. Revised Universal Soil Loss Equation

11. Haidara et al

12. Machine Learning

13. Entropy Index

14. Frequency Ratio

15. Information Value

16. Certainty Factor

17. Evidence Weight

18. Wubalem et al

قراوه استان گلستان باهدف پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از مدل دمپستر-شیفر^۱ بیان داشتند که مدل دمپستر-شیفر با دقت ۹۶/۱ درصد برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه مناسب است. (قربانی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶، ۶۹-۸۹)، طی پژوهشی در منطقه سیمره با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و شاخص آماری به مدل‌سازی پتانسیل رخداد فرسایش‌های آب‌کندی پرداختند و بیان داشتند که مدل‌های آنتروپی شانون و شاخص آماری از قابلیت بالایی برای شناسایی مناطق حساس به فرسایش آب‌کندی برخوردارند. (یمانی و عرب عامری، ۱۳۹۷، ۱-۲۲)، در حوضه منج به کارایی آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریکی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خاک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پارامترهای ژئومورفومتریکی، کارایی بالایی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش دارند و روش VIKOR از دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش فاکتور ترکیب برخوردار است. (ملیهو و همکاران^۲، ۲۰۱۸، ۱-۱۴)، طی پژوهشی در مراکش به مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی با روش‌های آماری دومتغیره نسبت فراوانی و ارزش اطلاعات پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اراضی بایر و کم پوشش گیاهی و شیب بالای ۵۰ درصد نسبت به فرسایش خندقی بسیار حساس است. (سها و همکاران^۳، ۲۰۱۹، ۱-۱۸)، به شناسایی مناطق مستعد فرسایش خاک با استفاده از منطق فازی^۴ و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۵ در کشور هند پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مدل منطق فازی از دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برخوردار است. همچنین این محققین بیان داشتند که نتایج هر دو مدل حاکی از آن است که منطقه مورد مطالعه شامل مناطقی با حساسیت بالا تا شدید به فرسایش خاک است. (سینشو و همکاران^۶، ۲۰۲۱، ۱۰-۲۴)، طی پژوهشی در اتیوپی به اولویت‌بندی منطقه حساس به فرسایش خاک با استفاده از منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی پرداختند. این محققان بیان داشتند که مناطق حساس به فرسایش خاک با استفاده از منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به ترتیب ۱۱/۵ و ۱۵/۷۵ درصد را پوشش می‌دهد و مناطق با حساسیت به فرسایش زیاد و خیلی زیاد در اولویت قرار دارند تا مشکلات رسوب‌گذاری در مخزن و سدها کنترل شود. از آنجایی که فرسایش خاک مشکلاتی همچون از دست رفتن خاک سطحی حاصلخیز و تنوع زیستی، گل آلود شدن آب دریاچه‌ها و... را به همراه دارد، تهیه نقشه حساسیت فرسایش می‌تواند به برنامه‌ریزان و مدیران در جهت کاهش مشکلات ذکر شده کمک کند. از سوی دیگر درارتباط با فرسایش خاک مطالعات متعددی انجام شده است که در کمتر مطالعه‌ای به تلفیق دو مدل آماری آنتروپی شانون و ارزش اطلاعاتی پرداخته شده است. بنابراین هدف پژوهش حاضر به شناسایی مهم‌ترین معیار و زیرمعیارهای مؤثر بر تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبراهه‌ای حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن با استفاده از تلفیق دو مدل داده‌کاوی آنتروپی- ارزش اطلاعاتی است؛ که از نوآوری‌های پژوهش حاضر می‌باشد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن با مساحت ۶۹۳/۲۳ کیلومتر مربع در استان مازندران قرار گرفته است. گستره این حوضه آبخیز بین طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه و ۴۲ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۴۲ دقیقه و ۱۹ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۶ دقیقه و ۲ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه و ۲۵ ثانیه شمالی واقع شده است (شکل ۱). حداکثر ارتفاع حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن واقع در قسمت جنوب غرب منطقه مطالعاتی با ارتفاع ۳۷۲۴ و حداقل ارتفاع واقع در قسمت

1. Dempster-Shafer Model

2. Meliho et al

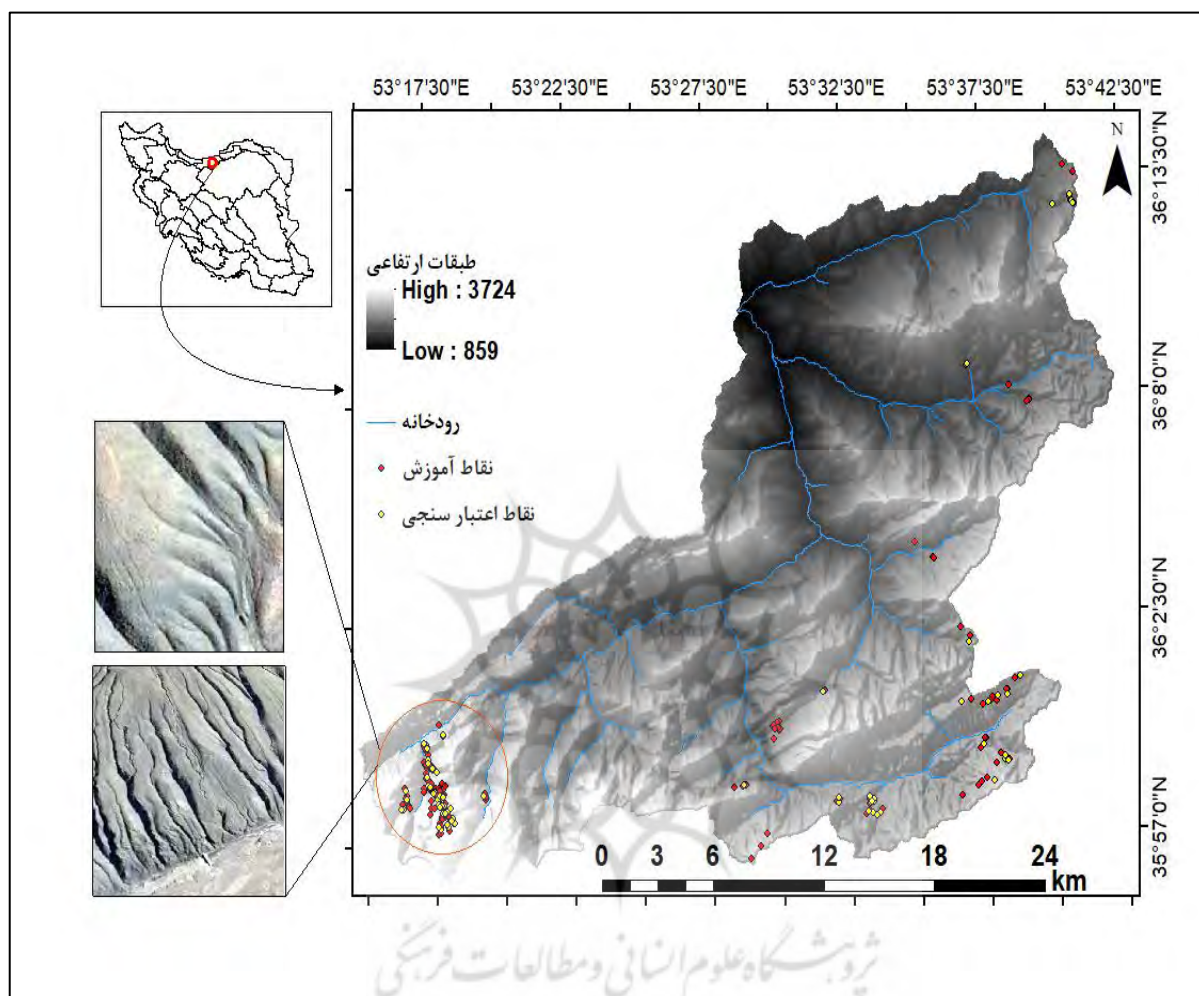
3. Saha et al

4. Fuzzy Logic

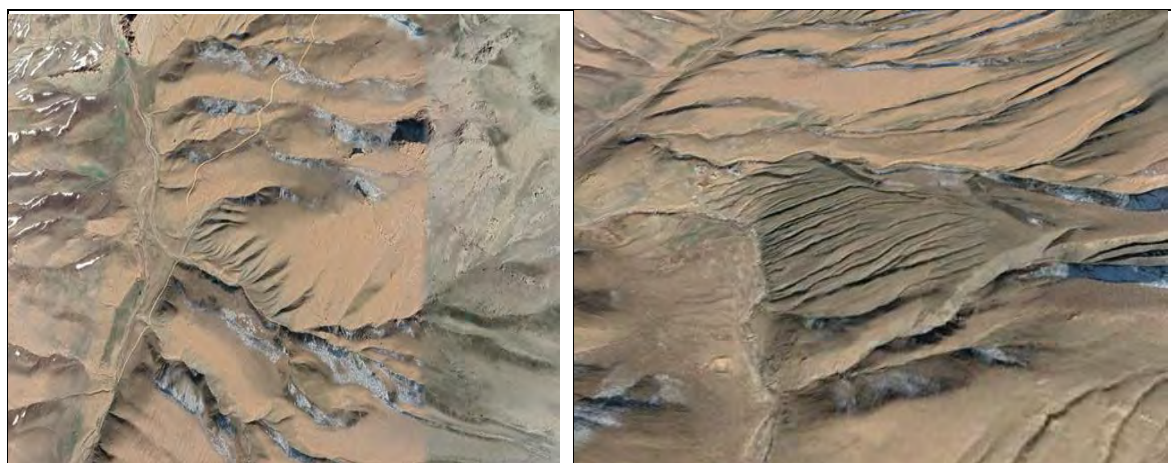
5. Analytical Hierarchy Process

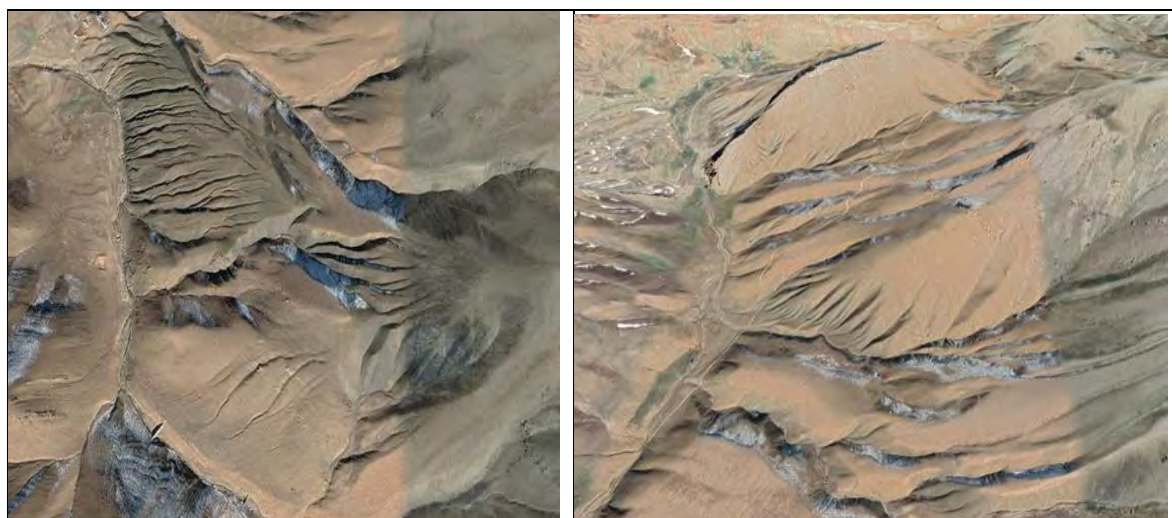
6. Sinshaw et al

شمال حوضه آبخیز با ارتفاع ۸۵۹ متر از سطح دریا است. در شکل ۲ نمونه‌هایی از فرسایش آبراهه‌ای در منطقه مورد مطالعه آورده شده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه





شکل ۲: نمونه‌هایی از فرسایش آبراهه‌ای در منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

نقشه موجودی فرسایش خاک

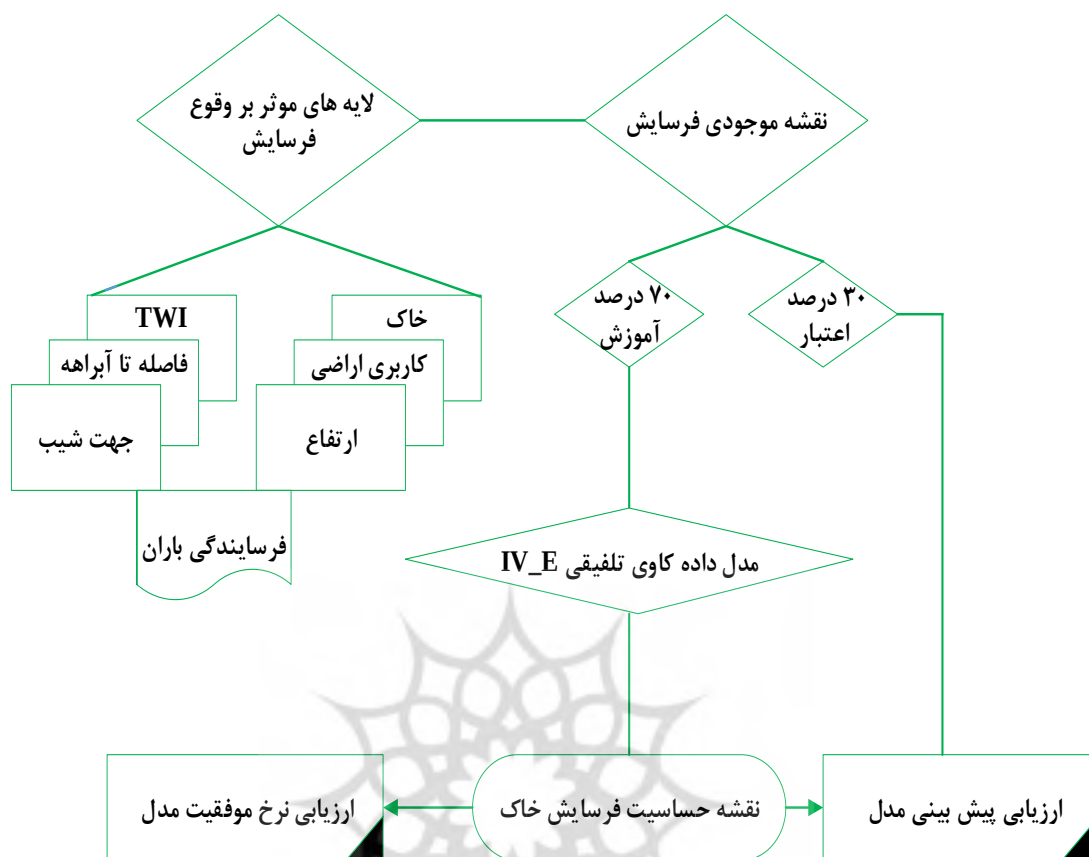
نقشه موجودی فرسایش (آبراهه‌ای) با ۲۵۲ نقطه فرسایشی برای حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن با استفاده از تصاویر Google Earth شناسایی شد که از این مجموع نقاط فرسایشی، ۷۰ درصد نقاط (۱۷۶ نقاط) و ۳۰ درصد (۷۶ نقاط) به‌طور تصادفی با ابزار Geostatistical Analyst و با روش Subset Features در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 به‌ترتیب برای آموزش و اعتبارسنجی مدل طبقه‌بندی شدند. بعضی محققان (همبرام و همکاران^۱، ۲۰۱۹، ۸۸۳-۹۱۳؛ چاکرابورتی و همکاران^۲، ۲۰۲۰، ۱۲۹۴-۱۲۵۹؛ گوش و مایتی^۳، ۲۰۲۱، ۱۶-۱) نیز در تحقیقات و پژوهش‌های خود از دو مجموعه داده تصادفی آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) استفاده کردند. مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۳ ارائه شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

¹. Hembram et al

². Chakraborty et al

³. Ghosh and Maiti



شکل ۳: نمودار جریان‌ی مراحل انجام پژوهش

عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش

تعریف و در نظر گرفتن برخی از عوامل محرک (توپوگرافی، سنگ‌شناسی، پوشش زمین، آب‌وهوا و شیوه‌های کشاورزی)، نقطه شروع در ارزیابی و تحلیل حساسیت مخاطرات با استفاده از روش‌های آماری است؛ بنابراین شناسایی عوامل محرک یکی از شکاف‌های موجود در زمینه فرسایش خاک است که در یک حوضه آبخیز، حساسیت فرسایش خاک با توزیع مکانی عوامل فرسایش‌پذیری (تمایل خاک یا سنگ به فرسایش) و فرساینده گی (قدرت فرسایش آب جاری) مرتبط است (شولاگبرو و همکاران^۱، ۲۰۱۷، ۲۸۸۰-۲۸۹۵). تحقیق حاضر با بررسی در سایر پژوهش‌ها برای ارزیابی حساسیت فرسایش و همچنین شناسایی مهم‌ترین عوامل محرک در وقوع فرسایش از معیارهای ارتفاع، جهت شیب، نوع خاک، کاربری اراضی، عامل فرساینده گی باران (R)، فاصله از آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی^۲ (TWI) استفاده شده (ساحا و همکاران، ۲۰۱۹، ۱-۱۸؛ گوش و مایتنی، ۲۰۲۱، ۱-۱۶)؛ که در ادامه به نقش هر عامل محرک در ارتباط با وقوع فرسایش پرداخته شده است.

کاربری اراضی

کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین عوامل در ارزیابی ریسک فرسایش آبی است (میپه و همکاران^۳، ۲۰۱۸، ۱۷۹-۱۹۱). در این پژوهش، نقشه کاربری اراضی برای سال ۲۰۲۱ با اندازه سلولی ۱۰×۱۰ تصاویر سنتینل^۲، از سایت Esri 2020 Land

^۱. Sholagberu et al

^۲. Topographic Wetness Index

^۳. Mihi et al

Cover تهیه و کاربری‌های منطقه مورد مطالعه در ۷ طبقه (شامل پهنه‌های آبی، جنگل، زراعت، مسکونی، اراضی بایر، مناطق پوشیده شده از برف و مرتع) طبقه‌بندی شدند که در شکل ۴-الف ارائه شده است.

جهت شیب

جهت شیب به واسطه تأثیری که بر میزان تابش آفتاب، میزان بارش دریافتی و بادهای خشک‌کننده دارد، بر فرسایش خاک اثر می‌گذارد (تهرانی و همکاران، ۲۰۱۷، ۱۶۹۵-۱۷۱۴). نقشه جهت شیب به ۹ طبقه (شامل مسطح، شمال، شمال شرق، شرق، جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب، غرب و شمال غرب) طبقه‌بندی شدند که در شکل ۴-ب قابل مشاهده است.

ارتفاع

مناطق مرتفع بیشتر به فرسایش خاک کمک می‌کند (اسلم و همکاران^۱، ۲۰۲۱، ۱۶۳۷-۱۶۴۹). در پژوهش حاضر نقشه طبقات ارتفاعی^۲ (DEM) با اندازه سلولی $12/5 \times 12/5$ از سایت <https://search.asf.alaska.edu> تهیه شد. بر اساس نقشه تهیه شده، بیش‌ترین و کم‌ترین ارتفاع منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۳۷۲۴ و ۸۵۹ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۴-پ).

نوع خاک

بافت خاک، ویژگی مهمی در فرسایش‌پذیری خاک‌ها محسوب می‌شود (هالفوم و تشوم^۳، ۲۰۱۹، ۸۱۹-۸۳۱). خاک‌های منطقه مورد مطالعه به ۴ دسته خاک شامل ۱- mollisols -۲ Roc outcrop/Entisols -۳ Alfisols -۴ Inceptisols طبقه‌بندی شدند که در شکل ۴-ت قابل مشاهده است.

فاصله از رودخانه

فاصله از رودخانه، معیار مهمی است که پایداری یک شیب و میزان اشباع مواد موجود در شیب را کنترل می‌کند (گاین و ساها، ۲۰۱۷، ۱۱۲۳-۱۱۳۹). در این تحقیق برای تهیه نقشه فاصله از رودخانه از ابزار Euclidean Distance در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استفاده شد (شکل ۴-ث).

فرساینده‌گی باران (R)

فرساینده‌گی باران، نیروی فرسایشی یک باران خاص است (الکساکیس و همکاران^۴، ۲۰۱۳، ۱۰۸-۱۲۴). در پژوهش حاضر نقشه فرساینده‌گی باران با استفاده از رابطه ۱ (کاشیوار و همکاران^۵، ۲۰۲۲، ۹۳۷-۹۵۹) و با استفاده از میانگین بارندگی سالانه ایستگاه هواشناسی (شامل فینسک، فریم صحرا، تلارم، ولیک چال و سنگده) تهیه شده از منابع آب و با روش معکوس فاصله (IDW)^۶ تهیه شد (شکل ۴-ج). همچنین محققانی در پژوهش‌های خود از معادلات تجربی (داس و همکاران^۷، ۲۰۲۰، ۱-۱۸؛ مقصوم و همکاران^۸، ۲۰۲۰، ۳۵۶) برای تهیه نقشه عامل فرسایش‌دهندگی باران و روش معکوس

1. Aslam et al

2. Digital Elevation Model

3. Halefom and Teshome

4. Alexakis et al

5. Kashiwar et al

6. Inverse Distance Weighting

7. Das et al

8. Maqsoom et al

فاصله (IDW) (گوش و مایتی، ۲۰۲۱، ۱۶-۱؛ کاشیوار و همکاران، ۲۰۲۲، ۹۳۷-۹۵۹؛ اندوالم و همکاران^۱، ۲۰۲۰، ۱۴۰۷-۱۴۱۸؛ گنت و مولو^۲، ۲۰۲۱، ۱۰۰۱۷۴) استفاده کردند.

$$R = 81.5 + 0.38P_a \quad \text{رابطه ۱}$$

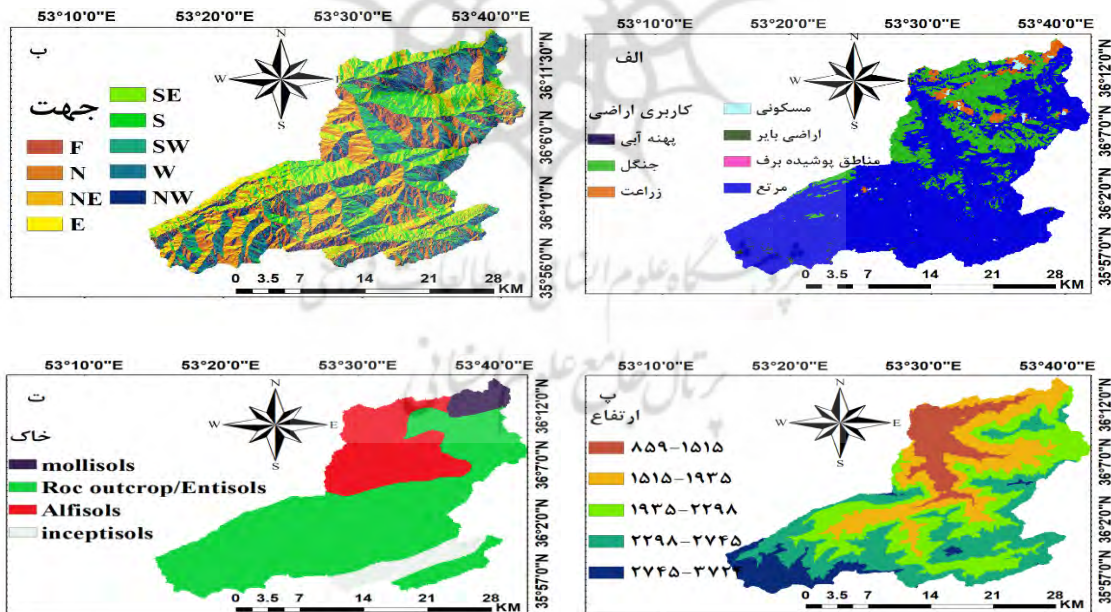
در رابطه ۱؛ R شاخص فرساینده‌ی بارندگی سالانه برحسب $(MJmm^{-1}ha^{-1}h^{-1}yr^{-1})$ و P_a میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر است.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

شاخص رطوبت توپوگرافی یک جنبه مهم هیدرولوژیکی است که توزیع محتوای آب در خاک را کمی می‌کند و به بیان دیگر میزان تجمع آب را در یک مکان اندازه‌گیری می‌کند (گوش و مایتی، ۲۰۲۱، ۱۶-۱). نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (شکل ۴-چ) با استفاده از رابطه ۲ (لیو و همکاران^۳، ۲۰۲۰، ۱۹-۱) در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد.

$$TWI = \ln(AS / \tan \beta) \quad \text{رابطه ۲}$$

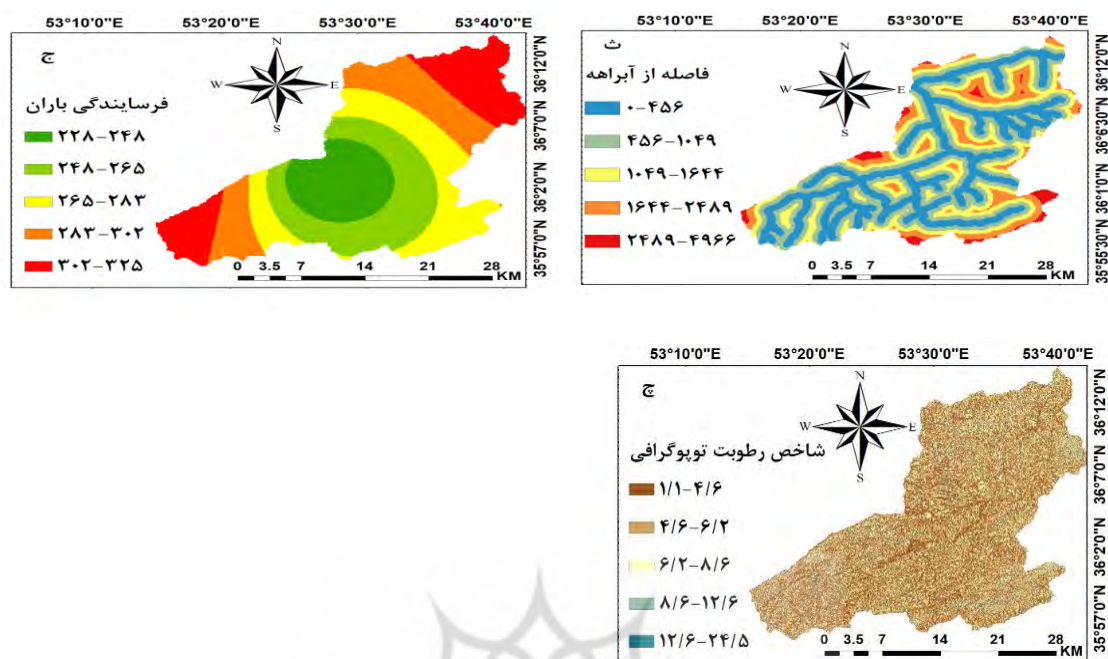
AS در رابطه ۲؛ مساحت حوضه آبخیز و β شیب برحسب درجه است.



¹ Andualem et al

² Getnet and Mulu

³ Liu et al



شکل ۴: نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش

تأثیرگذاری معیارها و زیر معیارها بر حساسیت فرسایش

در پژوهش حاضر برای تأثیرگذاری معیارها و زیر معیارهای مؤثر هر معیار بر حساسیت فرسایش منطقه به ترتیب از مدل ارزش اطلاعات و شاخص آنتروپی استفاده شد؛ همچنین نقشه حساسیت فرسایش منطقه مورد مطالعه از مدل تلفیقی آنتروپی- ارزش اطلاعاتی به دست آمد که در ادامه در ارتباط با این مدل‌ها توضیحاتی به همراه معادلات آن‌ها ارائه شده است.

مدل ارزش اطلاعات (IV)

مدل ارزش اطلاعاتی (رابطه ۳)، یک روش آماری دومتغیره بسیار محبوب و با عملیات ساده است که ارزیابی کمی خطرات زمین‌شناسی با عوامل متعدد را، حل می‌کند؛ همچنین این مدل کمی، میزان مشارکت طبقات مختلف عوامل مؤثر بر وقوع مخاطرات زمین‌شناسی را منعکس می‌کند (ما و همکاران^۱، ۲۰۲۳، ۱۷).

$$I_{ij} = \ln \frac{N_{ij}/N}{S_{ij}/S}$$

رابطه ۳

که در رابطه ۳، I_{ij} بیانگر میزان ارزش اطلاعات وقوع مخاطرات زمین‌شناسی تحت کلاس z از عامل i ، N_{ij} بیانگر تعداد وقوع مخاطرات زمین‌شناسی کلاس z از عامل i ، N کل مخاطرات شناخته شده زمین‌شناسی در منطقه و همچنین S_{ij} مساحت عامل ارزیابی i در کلاس z و S مساحت کل منطقه است.

¹. Ma et al

مدل شاخص آنتروپی (IOE)

آنتروپی بیانگر ناپایداری، عدم تعادل، بی‌نظمی و عدم قطعیت یک سامانه است که آنتروپی یک سامانه با درجه بی‌نظمی آن رابطه یک‌به‌یک دارد که می‌توان از آن طبق اصل بولتزمن^۱ برای توصیف ترمودینامیک وضعیت یک سامانه استفاده کرد که در نهایت شانون با بهبود بخشیدن اصل بولتزمن، مدل آنتروپی را برای نظریه اطلاعات توسعه داد؛ بنابراین در یک هدف، مدل شاخص آنتروپی مهم‌ترین عوامل را از عوامل مؤثر کم‌اهمیت متمایز می‌کند و متغیرهایی را که بیش‌ترین تأثیر را در به وقوع پیوستن یک هدف دارد، شناسایی می‌کند (عرب‌عامری و همکاران^۲، ۲۰۱۹، ۱۱۲۹). معادلات مدل شاخص آنتروپی در رابطه‌های ۴ تا ۸ ارائه شده است.

$$P_{ij} = \frac{b}{a} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$(p_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} P_{ij}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$H_j = - \sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۶}$$

$$I_j = \frac{H_{j\max} - H_j}{H_{j\max}}, I = (0, 1), j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۷}$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در رابطه‌های ۴ تا ۸، P_{ij} و (P_{ij}) نسبت فراوانی و چگالی احتمال هر طبقه، S_j تعداد طبقه هر معیار، H_j و $H_{j\max}$ به‌ترتیب بیانگر مقدار آنتروپی و حداکثر آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات، W_j وزن نهایی هر پارامتر است (وانگ و همکاران^۳، ۲۰۱۶، ۱-۱۶؛ موندال و ماندال^۴، ۲۰۱۸، ۱۲۹-۱۴۶). همچنین تمامی مراحل محاسبات و فرمول نویسی فوق، با استفاده از نرم‌افزار Excel 2016 محاسبه شد.

تهیه نقشه حساسیت فرسایش خاک

در پژوهش حاضر برای تهیه نقشه حساسیت فرسایش حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن از مدل تلفیقی داده‌کاوی^۵ آنتروپی - ارزش اطلاعاتی استفاده شد که برای این منظور طبقات معیارها (عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش) بر اساس ارزش اطلاعاتی به‌دست آمده باز طبقه‌بندی شدند و نقشه باز طبقه‌بندی شده حاصل از مدل ارزش اطلاعاتی هر معیار در مقادیر W_j به‌دست آمده حاصل از مدل شاخص آنتروپی در یکدیگر ضرب شدند و نقشه‌های وزنی حاصل شد و در نهایت با جمع نقشه‌های وزنی در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 (Raster Calculator) نقشه نهایی حساسیت فرسایش آبراهه‌ای حوضه آبخیز

¹. Boltzmann

². Arabameri et al

³. Wang et al

⁴. Mondal and Mandal

⁵. Data Mining

بالادست رودخانه تجن به‌دست آمد (رابطه ۹). در نهایت نقشه نهایی حساسیت فرسایش آبراهه‌ای به‌دست آمده حاصل از تلفیق دو مدل داده‌کاوی آنتروپی- ارزش اطلاعاتی بر اساس شکست طبیعی^۱ (ساراناثان و همکاران^۲، ۲۰۲۱، ۲۷۵-۲۹۱) به ۵ گروه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد.

$$\begin{aligned} \text{SESM} = & IV_{\text{Elavation}} \times Wj_{\text{Elavation}} + IV_{\text{Aspect}} \times Wj_{\text{Aspect}} \\ & + IV_{\text{Distance from river}} \times Wj_{\text{Distance from river}} + IV_{\text{Landuse}} \times Wj_{\text{Landuse}} \\ & + IV_R \times Wj_R + IV_{\text{Soil}} \times Wj_{\text{soil}} + IV_{\text{TWI}} \times Wj_{\text{TWI}} \end{aligned} \quad \text{رابطه ۹}$$

ارزیابی دقت و اعتبار مدل

ارزیابی دقت و اعتبار مدل‌ها برای تحلیل حساسیت و پیش‌بینی مدل‌ها امری ضروری است (رحمان و همکاران^۳، ۲۰۲۲، ۵۵۴). در پژوهش، حاضر ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی مدل به‌ترتیب برای آموزش و اعتبار مدل از مشخصه عملکرد (ROC-AUC) (شیرزادی و همکاران^۴، ۲۰۱۷، ۱-۱۸)، با استفاده از ابزار ArcSDM (میترا و همکاران^۵، ۲۰۲۲، ۲۱۸۳-۲۲۲۶) در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 به‌دست آمد. در سایر پژوهش‌های مرتبط با مخاطرات محیطی از جمله: سیل (کاستاش^۶، ۲۰۱۹، ۳۲۳۹-۳۲۵۶)، زمین‌لغزش (چن و چن^۷، ۲۰۲۱، ۴۸۳۳-۱۰)، فرسایش (سها و همکاران^۸، ۲۰۱۹، ۱-۱۸) برای ارزیابی دقت مدل‌ها از منحنی مشخصه عملکرد (ROC-AUC) استفاده شده است. منحنی مشخصه عملکرد^۹ (ROC) یک نمودار گرافیکی است که اثربخشی و قدرت پیش‌بینی مدل را در سلسله‌مراتب کیفی با سطح زیر منحنی^۹ (AUC) منعکس می‌کند، در این منحنی درصد بالاتر و پایین‌تر سطح زیر منحنی به‌ترتیب بیانگر دقت بالاتر و کمتر مدل برای پیش‌بینی وقوع پدیده در آینده است و از سوی دیگر منحنی ROC با توجه به مقادیر AUC، دقت مدل را به‌صورت کمی ارزیابی می‌کند (رحمان و همکاران^۳، ۲۰۲۲، ۵۵۴). طبقه‌بندی ارزیابی کمی با توجه به مقادیر AUC به‌ترتیب به‌صورت ۱-۰/۹ (عالی)، ۰/۸-۰/۹ (خوب)، ۰/۷-۰/۸ (نسبتاً خوب)، ۰/۶-۰/۷ (ضعیف) و ۰/۵-۰/۶ (مردود) گزارش شده است (جنیفر و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۱، ۷۷۳-۷۸۷).

بحث و یافته‌ها

به‌منظور کاهش اثرات ناشی از فرسایش آبراهه‌ای نیاز است تا مناطق مستعد این نوع فرسایش شناسایی شده و اقداماتی جهت کنترل این نوع فرسایش انجام گردد. بدین منظور در پژوهش حاضر از مدل داده‌کاوی تلفیقی آنتروپی- ارزش اطلاعاتی اقدام به پهنه‌بندی نقشه فرسایش آبراهه‌ای در حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن گردید. در جدول ۱، نتایج حاصل از تأثیرگذاری طبقات هر معیار (مدل ارزش اطلاعات) و وزن‌های هر لایه (شاخص آنتروپی) در ارتباط با حساسیت به فرسایش آبی منطقه مورد مطالعه آمده است.

¹. Natural Break

². Saranaathan et al

³. Rehman et al

^۴. Shirzadi et al

⁵. Mitra et al

⁶. Costache

⁷. Chen and Chen

⁸. Receiver Operating Characteristics

⁹. Area Under the Curve

¹⁰. Jennifer et al

ارتفاع به واسطه تأثیری که بر مواد آلی خاک، تعادل آب در خاک، تولید گونه‌های مختلف، که می‌گذارد، می‌تواند بر فرسایش خاک اثر بگذارد (هالفوم و تشوم، ۲۰۱۹، ۸۱۹-۸۳۱). طبق جدول ۱، تأثیر ارتفاع بر فرسایش خاک افزایشی بوده که با نتایج (فلاح و همکاران^۱، ۲۰۱۶، ۱۷-۱) مطابقت دارد؛ به‌طوری‌که این تأثیر در طبقه ارتفاعی ۳۷۴۲-۲۷۴۵ متری (بالاترین طبقه ارتفاعی) با ارزش اطلاعاتی $IV=1/65$ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین (ویجیت و دوج وان^۲، ۲۰۱۹، ۱۸-۱) در پژوهش خود بیان داشتند که اراضی با ارتفاع نسبی بالاتر از رواناب بیش‌تر و نفوذ کم‌تری برخوردارند که این اراضی، حساسیت به فرسایش خاک بیش‌تری دارند.

تأثیر جهات شیب بر فرسایش خاک با توجه به مقادیر ارزش اطلاعات هر طبقه نشان داد که جهت شیب جنوب غربی با مقدار ارزش اطلاعاتی $IV=1/04$ بیش‌ترین تأثیر را بر فرسایش منطقه دارد که دلیل این امر طبق یافته‌های (یتمن و همکاران^۳، ۲۰۱۵، ۹۸۶۱-۹۸۴۳) در ارتباط با رابطه بین جهت و پوشش گیاهی نهفته است؛ به‌طوری‌که در نیم‌کره شمالی، شیب‌های جنوبی نسبت به شیب‌های شمالی تابش بیش‌تری دریافت می‌کنند که باعث خشک و کم ضخامت شدن خاک شده و در پی آن پوشش گیاهی کم می‌شود که با کم شدن پوشش گیاهی، فرسایش خاک زیاد می‌شود. نتایج پژوهش حاضر از لحاظ تأثیر جهات شیب جنوبی بر فرسایش با پژوهش (قربانی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۷، ۱۰۰-۱۱۴) تا حدودی مطابقت دارد.

نتایج حاصل از هم‌پوشانی لایه فاصله از آبراهه با نقشه فرسایش منطقه حاکی از آن است که طبقه فاصله ۰-۴۵۶ متر (کم‌ترین فاصله از آبراهه)، بالاترین ارزش اطلاعاتی $IV=0/63$ را به خود اختصاص داده است که حاکی از آن است که مناطق نزدیک به آبراهه، میزان پتانسیل فرسایشی بیش‌تری نسبت به سایر طبقات دارد که با نتایج (گاین و ساها، ۲۰۱۷، ۱۱۳۹-۱۱۲۳) مطابقت دارد.

طبقه کاربری اراضی بایر با ارزش اطلاعاتی $IV=2/74$ بیش‌ترین تأثیر را بر پتانسیل فرسایش منطقه دارد که با نتایج (کنفورتی و همکاران^۴، ۲۰۱۱، ۸۸۱-۸۹۸؛ اسلم و همکاران، ۲۰۲۱، ۱۶۳۷-۱۶۴۹) مطابقت دارد. هرچند (اندوالم و همکاران، ۲۰۲۰، ۱۴۱۸-۱۴۰۷) بیان داشتند مناطق کشاورزی و ساخت‌وساز شده به دلیل اختلال در ساختار خاک و فعالیت‌های ساختمانی از مناطق بسیار آسیب‌پذیر در برابر فرسایش هستند؛ اما به‌طور کلی پوشش گیاهی از طریق محافظت از خاک در برابر ضربه قطرات باران، افزایش نفوذ آب به خاک و کاهش سرعت رواناب سطحی باعث کاهش فرسایش خاک می‌شود (سئوتلوالی و همکاران^۵، ۲۰۱۷، ۳۰۴-۲۹۶). در ارتباط با تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش فرسایش خاک می‌توان به پژوهش‌های (ژو و همکاران^۶، ۲۰۰۸، ۳۲۵-۳۱۹؛ عرار و چنچونی^۷، ۲۰۱۴، ۱۲-۱؛ داس و همکاران، ۲۰۲۰، ۱-۱۸) اشاره کرد.

ضریب فرساینده‌گی باران (R)، تأثیر شدت بارندگی را بر فرسایش خاک منعکس می‌کند. مقادیر فرساینده‌گی باران برای منطقه مورد مطالعه بین $2/228$ و $7/325$ $MJmm^{-1}ha^{-1}h^{-1}yr^{-1}$ است که با افزایش ارتفاع در حوضه، مقدار فرساینده‌گی باران زیاد می‌شود که این مناطق منطبق بر بخش‌های جنوب غربی حوضه است. نتایج حاصل از هم‌پوشانی بین نقشه فرساینده‌گی باران با نقشه فرسایش منطقه نشان داد که طبقه ۳۰۲-۳۲۵ از فرساینده‌گی باران (بالاترین طبقه)، بالاترین ارزش اطلاعاتی $IV=1/28$ را دارد که بیانگر آن است که بیش‌ترین میزان پتانسیل فرسایش در منطقه بر بالاترین طبقه

^۱. Fallah et al

^۲. Vijith and Dodge-Wan

^۳. Yetemen et al

^۴. Conforti et al

^۵. Seutloali et al

^۶. Zhou et al

^۷. Arar and Chenchouni

از فرساینده‌گی باران منطبق است که با نتایج (اندوالم و همکاران، ۲۰۲۰، ۱۴۰۷-۱۴۱۸) مطابقت دارد. همچنین (هالفوم و همکاران^۱، ۲۰۲۲، ۴۳۲-۴۲۱) بیان داشتند مناطق با کم‌ترین ضریب فرساینده‌گی باران از کم‌ترین میزان هدر رفت خاک برخوردار هستند و از سوی دیگر، بالاترین مقادیر ضریب فرساینده‌گی باران بر فرسایش در شیب‌های تند اثر می‌گذارد. بررسی ارتباط بین انواع گروه خاکی با فرسایش منطقه نشان داد که گروه خاک Alfisols با ارزش اطلاعات $IV=0$ تأثیری در فرسایش خاک منطقه ندارد، اما گروه خاکی Inceptisols با ارزش اطلاعات $IV=0/66$ بیش‌ترین تأثیر را بر فرسایش خاک منطقه دارد که دلیل این امر، طبق پژوهش‌های (عابدینی و یعقوب‌نژاد اصل، ۱۳۹۷، ۱۳۷-۱۵۵) می‌تواند ناشی از منفصل و نارس بودن این نوع خاک‌ها باشد که در مقابل فرسایش حساس هستند.

شاخص رطوبت توپوگرافی بیانگر شرایط رطوبتی و میزان تجمع آب در خاک حوضه است (هالفوم و تشوم، ۲۰۱۹، ۸۱۹-۸۳۱). نتایج بررسی هم‌پوشانی بین لایه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) با فرسایش خاک منطقه بیانگر آن بود که طبقه $8/6 - 6/2$ از شاخص رطوبت توپوگرافی با ارزش اطلاعاتی $IV=0/25$ نسبت به سایر طبقات، بیش‌ترین پتانسیل فرسایش را دارد. در پژوهش (پورنادر و همکاران^۲، ۲۰۱۸، ۴۰۱-۳۸۹)، نواحی با مقادیر TWI بین ۱۳-۸ به‌عنوان مناطقی با بیش‌ترین وقوع فرسایش شبیاری گزارش شده است. همچنین با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی برای بالاترین طبقه ($6/5 - 12/24$)، ارزش اطلاعات آن کم ($IV=0/1$) می‌شود که دلیل آن طبق گزارش (پی و همکاران^۳، ۲۰۱۰، ۶۱۹-۶۱۰) این است که TWI بالا، با پوشش گیاهی بالاتر همراه است. نتایج پژوهش حاضر از منظر تأثیر شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بر فرسایش خاک با نتایج (سئوتلوالی و همکاران، ۲۰۱۷، ۲۹۶-۳۰۴) که بیان داشتند مناطق با سطح فرسایش بالا با TWI کم‌تر مرتبط است، همخوانی دارد.

نتایج حاصل از وزن هر یک از عوامل مؤثر (لایه‌ها) بر وقوع فرسایش با استفاده از مدل شاخص آنتروپی نشان داد که عوامل کاربری اراضی و ارتفاع با W برابر با $2/07$ و $0/9$ بیش‌ترین تأثیر را در وقوع فرسایش منطقه دارد (شکل ۵). در ارتباط با مقایسه پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته می‌توان بیان داشت که با توجه به مکان و موقعیت جغرافیایی هر منطقه میزان و نوع عوامل مؤثر بر فرسایش خاک متفاوت است، به‌طوری که برخی از محققین عامل شیب را معیار مهم در فرسایش حوضه مورد مطالعه خود بیان کرده‌اند و گروهی از محققین عامل تغییرات کاربری اراضی را معیار اصلی دانسته‌اند؛ به‌طور کلی هر منطقه با توجه به مشخصات جغرافیایی خود، تحت تأثیر عوامل مختلف قرار دارد و شدت این عوامل و ویژگی‌های منطقه تعیین‌کننده میزان حساسیت فرسایش در آن منطقه است (محمد خان و همکاران، ۱۳۹۸، ۹۸-۸۵).

نتایج ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی با توجه به منحنی ROC و سطح زیرمنحنی آن (AUC) به‌ترتیب برابر با $0/831$ و $0/837$ به دست آمد که حاکی از آن است که مدل آنتروپی- ارزش اطلاعاتی در ارتباط با مدل‌سازی پتانسیل حساسیت فرسایش آبراهه‌ای حوضه آبخیز بالادست رودخانه تجن، از عملکرد خوب برخوردار است (شکل ۶).

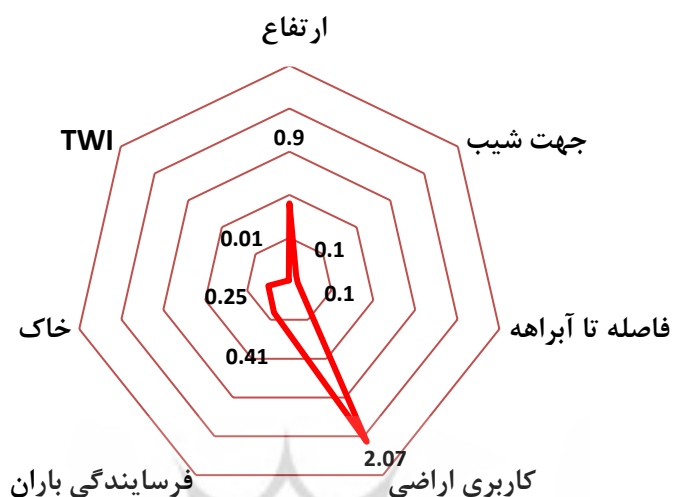
نتایج مربوط به نقشه حساسیت فرسایش آبراهه‌ای (شکل ۷) به‌دست آمده با استفاده از مدل تلفیقی شاخص آنتروپی- ارزش اطلاعاتی نشان داد که بیش‌ترین مناطق حساس به فرسایش خاک (زیاد تا خیلی زیاد) منطبق بر امتداد شمال شرقی، جنوب شرقی تا جنوب غربی حوضه است؛ که از کل مساحت $693/23$ کیلومتر مربع حوضه آبخیز مورد مطالعه، $97/27$ (۱۴ درصد)، $153/24$ (۲۲/۱ درصد)، $191/26$ (۲۷/۶ درصد)، $156/75$ (۲۲/۶ درصد) و $94/71$ (۱۳/۷ درصد) کیلومتر مربع از حوضه آبخیز به‌ترتیب در طبقه حساسیت به فرسایش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارند (جدول ۲). نقشه‌های

^۱. Halefom et al

^۲. Pournader et al

^۳. Pei et al

خطر فرسایش خاک به نمایش احتمالاتی مناطقی که تحت تأثیر خطر فرسایش قرار دارد، می‌پردازد؛ از این جهت از ابزار اساسی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش‌اند (رحمان^۱ و همکاران، ۲۰۰۹، ۱۷۲۴-۱۷۳۴).



شکل ۵: اهمیت معیارهای مورد استفاده در نقشه حساسیت فرسایش بر اساس مدل شاخص آنتروپی

جدول ۱: مقادیر محاسبه‌شده وزن هر یک از معیار و زیر معیارهای مؤثر با استفاده از مدل آنتروپی - ارزش اطلاعات

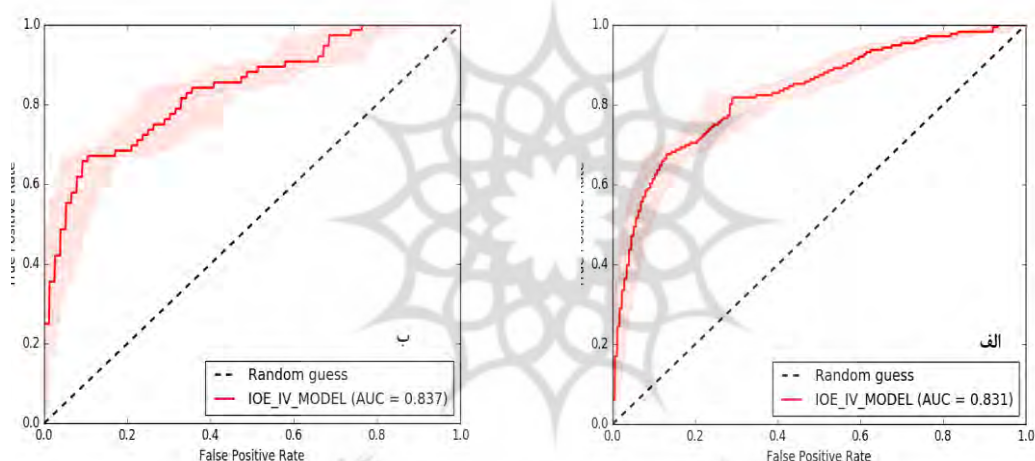
طبقه	تعداد فرسایش	تعداد پیکسل	pi_j	(pi_j)	Hj	HJ _{MAX}	IJ	WJ	IV
۸۵۹-۱۵۱۵	۰	۵۱۷۱۵۶	۰	۰					۰
۱۵۱۵-۱۹۳۵	۶	۹۴۴۷۲۳	۰/۱۹	۰/۰۳					-۱/۶۶
۱۹۳۵-۲۲۹۸	۳۰	۱۳۱۰۹۰۱	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۸۷	۲/۳۲	۰/۶۳	۰/۹	-۰/۵۱
۲۲۹۸-۲۷۴۵	۶۰	۱۳۲۴۲۵۲	۱/۱۷	۰/۱۶					۰/۱۶
۲۷۴۵-۳۷۲۴	۸۰	۳۷۷۸۷۷	۵/۲	۰/۷۳					۱/۶۵
F	۱۲	۴۸۹۲۵۳	۰/۶۳	۰/۰۷					-۰/۴۶
N	۱۷	۴۲۷۷۵۸	۱/۰۲	۰/۱۱					۰/۰۲
NE	۱۱	۴۱۸۹۲۳	۰/۶۷	۰/۰۷					-۰/۴
E	۷	۵۱۶۹۸۷	۰/۳۵	۰/۰۴					-۱/۰۵
SE	۱۰	۴۹۹۳۳۷	۰/۵۱	۰/۰۵	۲/۸۷	۳/۱۷	۰/۱	۰/۱	-۰/۶۷

۰/۵	۰/۱۷	۱/۶۵	۴۱۷۳۳۱	۲۷	S					
۱/۰۴	۰/۳	۲/۸۳	۴۳۰۹۵۶	۴۸	SW					
۰/۱۹	۰/۱۳	۱/۲۱	۶۱۱۸۱۳	۲۹	W					
-۰/۵۴	۰/۰۶	۰/۵۸	۶۶۲۶۵۱	۱۵	NW					
۰/۶۳	۰/۴۴	۱/۸۸	۱۵۷۳۷۵۲	۱۱۶	۴۵۶-۰	فاصله از آبراهه				
-۰/۴	۰/۱۶	۰/۶۷	۱۴۰۴۸۴۴	۳۷	۴۵۶-۱۰۴۹					
-۱/۴۳	۰/۱	۰/۱۲	۲/۳۲	۲/۰۳	۰/۰۶		۰/۲۴	۸۸۲۲۸۷	۸	۱۰۴۹-۱۶۴۴
-۰/۵۶					۰/۱۳		۰/۵۷	۴۹۶۱۵۲	۱۱	۱۶۴۴-۲۴۸۹
-۰/۱۴					۰/۲۱	۰/۸۷	۱۱۷۷۹۲	۴	۲۴۸۹-۴۹۶۶	

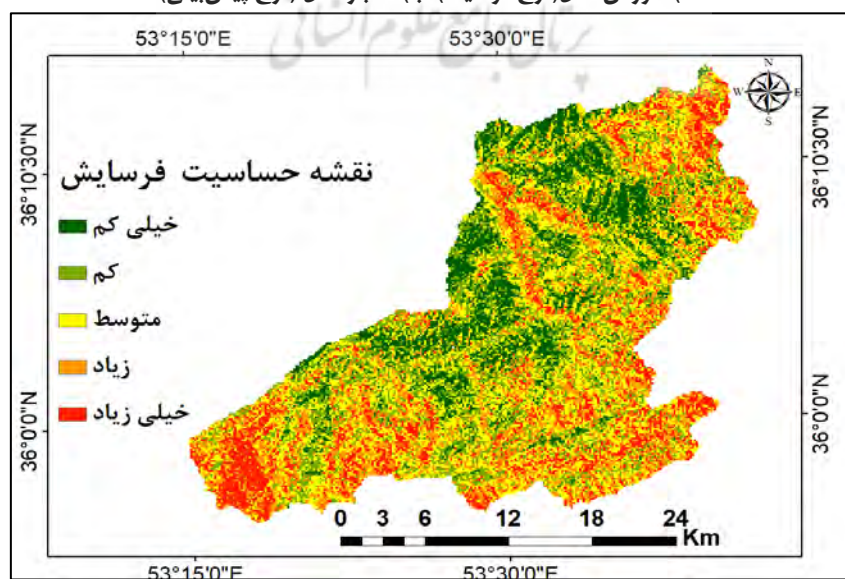
ادامه جدول ۱: مقادیر محاسبه شده وزن هر یک از معیار و زیر معیارهای مؤثر با استفاده از مدل آنتروپی-ارزش اطلاعات

IV	WJ	IJ	HJ _{MAX}	Hj	(pij)	pij	تعداد پیکسل	تعداد فرسایش	طبقه	
.					.	.	۳۷	.	پهنه آبی	کاربری اراضی
.					.	.	۱۳۱۱۶۷۹	.	جنگل	
.					.	.	۱۸۹۴۷۴	.	زراعت	
.	۲/۰۷	۰/۸۷	۲/۸۱	۰/۳۷	.	.	۳۴۹۸۳	.	مسکونی	
۲/۷۴					۰/۹۳	۱۵/۵	۳۰۶۰۴	۱۲	اراضی بایر	
.					.	.	۱۷۶	.	مناطق پوشیده برف	
۰/۱۹					۰/۰۷	۱/۲۱	۵۴۱۶۳۴۷	۱۶۴	مرتع	
-۱/۲۷					۰/۰۵	۰/۲۸	۷۳۰۲۹۲	۸	۲۲۸-۲۴۸	R
-۰/۸۷					۰/۰۸	۰/۴۲	۱۰۴۹۸۵۰	۱۷	۲۴۸-۲۶۵	
-۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۴	۲/۳۲	۱/۴	۰/۱۴	۰/۷	۹۹۱۰۰۱	۲۷	۲۶۵-۲۸۳	
-۲/۱۲					۰/۰۲	۰/۱۲	۸۶۰۰۹۷	۴	۲۸۳-۳۰۲	
۱/۲۸					۰/۷	۳/۶۱	۸۴۶۵۱۲	۱۲۰	۳۰۲-۳۲۵	
۰/۲۲					۰/۲۸	۱/۲۵	۱۳۰۲	۸	mollisols	

۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۳	۲	۱/۵۵	۰/۲۸	۱/۲۲	۲۴۳۵۹	۱۴۶	Roc outcrop/Entisols	خاک
.					.	.	۷۶۹۳	.	Alfisols	
۰/۶۶					۰/۴۴	۱/۹۴	۲۳۰۲	۲۲	inceptisols	
-۰/۱۱					۰/۱۷	۰/۹	۱۳۶۹۷۷۸	۴۸	۱/۱ - ۴/۶	TWI
-۰/۰۵					۰/۱۸	۰/۹۵	۱۹۳۱۴۱۲	۷۲	۴/۶ - ۶/۲	
۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۲/۳۲	۲/۳۱	۰/۲۵	۱/۲۸	۹۱۷۲۳۳	۴۶	۶/۲ - ۸/۶	
-۰/۰۳					۰/۱۹	۰/۹۷	۲۱۰۴۶۱	۸	۸/۶ - ۱۲/۶	
۰/۱					۰/۲۱	۱/۱۱	۴۶۰۲۵	۲	۱۲/۶ - ۲۴/۵	



شکل ۶: منحنی مشخصه عملکرد و سطح زیر منحنی AUC برای مدل تلفیقی آنترابی - ارزش اطلاعاتی
الف) آموزش مدل (نرخ موفقیت) ب) اعتبار مدل (نرخ پیش‌بینی)



شکل ۷: نقشه حساسیت فرسایش آبراهه‌ای با استفاده از مدل تلفیقی آنترابی - ارزش اطلاعاتی

جدول ۲: مساحت و درصد مساحت حساسیت فرسایش حوزه در هر طبقه

طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
خیلی کم	۹۷/۲۷	۱۴
کم	۱۵۳/۲۴	۲۲/۱
متوسط	۱۹۱/۲۶	۲۷/۶
زیاد	۱۵۶/۷۵	۲۲/۶
خیلی زیاد	۹۴/۷۱	۱۳/۷

نتیجه‌گیری

فرسایش خاک از مهم‌ترین مسئله تخریب زمین در مقیاس جهانی است که گل‌آلود شدن آب‌ها و دریاچه‌ها، از بین رفتن خاک سطحی حاصلخیز کشاورزی و تنوع زیستی را به همراه دارد؛ بنابراین ارزیابی حساسیت فرسایش خاک امری ضروری است. پژوهش حاضر باهدف شناسایی مهم‌ترین معیار و زیر معیارهای مؤثر در فرسایش خاک با مدل تلفیقی آنتروپی - ارزش اطلاعاتی در حوزه آبخیز بالادست رودخانه تجن انجام شد. از جمله مزایای این مدل‌ها در مقایسه با مدل‌هایی نظیر روش تحلیل سلسله مراتبی، عدم دخالت کارشناس است. در این پژوهش بر اساس بررسی در سایر پژوهش‌ها، ۷ معیار مؤثر بر وقوع (شامل ارتفاع، جهت شیب، فاصله تا آبراهه، کاربری اراضی، فرساینده‌گی باران، خاک و شاخص TWI) شناسایی شد. نتایج مربوط به وزن عوامل مؤثر (لایه‌ها) بر وقوع حساسیت فرسایش با توجه به مقادیر W_j مدل شاخص آنتروپی بیانگر آن بود که عوامل کاربری اراضی و ارتفاع در بین سایر معیارها به‌ترتیب با W_j برابر با ۲/۰۷ و ۰/۹ بیش‌ترین تأثیر را در وقوع فرسایش منطقه دارند. همچنین معیار شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) با W_j برابر با ۰/۰۱ در بین سایر معیارها کم‌ترین تأثیر را در حساسیت فرسایش منطقه دارد. از دیگر نتایج به‌دست آمده پژوهش حاضر می‌توان بیان داشت که زیر معیار اراضی بایر و طبقه ارتفاعی ۳۷۲۴-۲۷۴۵ متر (بالا‌ترین طبقه) به‌ترتیب با IV برابر با ۲/۷۴ و ۱/۶۵ بیش‌ترین تأثیر را در فرسایش منطقه دارند. از نتایج ارزیابی دقت مدل تلفیقی شاخص آنتروپی - ارزش اطلاعاتی برای ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی به ترتیب برای مجموعه داده‌های آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) می‌توان چنین نتیجه گرفت که مدل شاخص آنتروپی ۸۳/۱ درصد توانست با موفقیت مناطق حساس به وقوع فرسایش را ارزیابی کند، این درحالی است که مدل توانست با داده‌های اعتبارسنجی (۳۰ درصد)، ۸۳/۷ درصد مناطق حساس به فرسایش را پیش‌بینی کند که می‌توان نتیجه گرفت مدل شاخص آنتروپی برای تهیه نقشه حساسیت منطقه از عملکرد خوب برخوردار است. از نقشه حساسیت فرسایش آبراهه‌ای به‌دست آمده حوزه مورد مطالعه با استفاده از مدل تلفیقی شاخص آنتروپی - ارزش اطلاعاتی می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که از کل مساحت ۶۹۳/۲۳ کیلومترمربع حوزه آبخیز، ۱۵۶/۷۵ (۲۲/۶ درصد) و ۹۴/۷۱ (۱۳/۷ درصد) کیلومترمربع به‌ترتیب در طبقه زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مناطقی که دارای ارتفاع بیش‌تر، جهت شیب جنوب غربی، کم‌ترین فاصله تا آبراهه، اراضی بایر، فرساینده‌گی باران بیش‌تر، وجود خاک Inceptisols و شاخص رطوبت توپوگرافی کم‌تر، فرسایش بسیار شدیدی دارد که این نوع از فرسایش منطبق بر امتداد شمال شرقی، جنوب شرقی تا جنوب غربی حوزه است. در قسمت شمال غربی و مرکز حوزه به‌دلیل وجود پوشش گیاهی، خاک مناسب و ارتفاع کم‌تر باعث شده که فرسایش در این مناطق ضعیف باشد؛ زیرا پوشش گیاهی و ارتفاع کم فعالیت عوامل مؤثر در فرسایش آبراهه‌ای را محدود می‌کند. نقشه تهیه‌شده حساسیت فرسایش خاک حوزه آبخیز بالادست رودخانه تجن با استفاده از مدل شاخص آنتروپی می‌تواند ابزاری مفید برای مدیریت و برنامه‌ریزی در راستای اقدامات حفاظتی خاک و در پی آن کاهش تخریب سرزمین را به همراه داشته باشد.

منابع

- صابر چناری، ک، بهره‌مند، ع. ر، شیخ، و. ب، و کمکی، چ. ب، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از مدل دمپستر- شفر در حوضه آبخیز قرناوه، استان گلستان، اکوهیدرولوژی، دوره ۳، شماره ۲، ص ۲۱۹-۲۳۱.
- عابدینی، م، و یعقوب‌نژاد اصل، ن، ۱۳۹۷. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز رودخانه بالیخو (سدیامچی) با استفاده از مدل فازی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، شماره ۱، ص ۱۳۷-۱۵۵.
- قربانی‌نژاد، س، رحمتی، ا، و نورمحمدی، ف، ۱۳۹۶. مدل‌سازی پتانسیل رخداد فرسایش‌های آبکندی در منطقه‌ی سیمره با استفاده از مدل‌های آنتروپی‌شانون و شاخص آماری، پژوهش‌های فرسایش محیطی، دوره ۷، شماره ۱، ص ۶۹-۸۹.
- قربانی‌نژاد، س، زینی‌وند، ح، حق‌زاده، ع، و طهماسبی، ن، ۱۳۹۷. بررسی کارایی مدل دمپستر-شافر در پتانسیل‌یابی مناطق مستعد فرسایش خاک حوضه آبخیز کاکارضا در استان لرستان، سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۹، شماره ۳، ص ۱۰۰-۱۱۴.
- محمد خان، ش، پیرانی، پ، ریاهی، س، و گراوند، ف، ۱۳۹۸. ارزیابی کارایی مدل آنتروپی در پهنه‌بندی میزان فرسایش با رویکرد ژئومورفولوژیکی. مطالعه موردی: حوضه آبخیز کند در بالادست سد لتیان، آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۹، شماره ۳۴، ص ۸۵-۹۸.
- یمانی، م، و عرب‌عامری، ع. ر، ۱۳۹۷. کارایی آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریکی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه منج)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۷، شماره ۲، ص ۱-۲۲.
- AbdulKadir, T. S., Muhammad, R. M., Khamruruzaman, W. Y., & Ahmad, M. H. (2017). Geo-statistical based susceptibility mapping of soil erosion and optimization of its causative factors: A conceptual framework. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(11), 2880-2895.
- Alexakis, D. D., Hadjimitsis, D. G., & Agapiou, A. (2013). Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus. *Atmospheric Research*, 131, 108-124.
- Andualem, T. G., Hagos, Y. G., Kefale, A., & Zelalem, B. (2020). Soil erosion-prone area identification using multi-criteria decision analysis in Ethiopian highlands. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1407-1418.
- Arabameri, A., Cerda, A., & Tiefenbacher, J. P. (2019). Spatial pattern analysis and prediction of gully erosion using novel hybrid model of entropy-weight of evidence. *Water*, 11(6), 1129.
- Arabameri, A., Chandra Pal, S., Costache, R., Saha, A., Rezaie, F., Seyed Danesh, A., ... & Hoang, N. D. (2021). Prediction of gully erosion susceptibility mapping using novel ensemble machine learning algorithms. *Geomatics: Natural Hazards and Risk*, 12(1), 469-498.
- Arar, A., & Chenchouni, H. (2014). A "simple" geomatics-based approach for assessing water erosion hazard at montane areas. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), 1-12.
- Aslam, B., Maqsoom, A., Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Jabbar, T., & Zafar, A. (2021). Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1637-1649.
- Chakraborty, R., Pal, S. C., Sahana, M., Mondal, A., Dou, J., Pham, B. T., & Yunus, A. P. (2020). Soil erosion potential hotspot zone identification using machine learning and statistical approaches in eastern India. *Natural Hazards*, 104, 1259-1294.
- Chen, X., & Chen, W. (2021). GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods. *Catena*, 196, 104833.

- Conforti, M., Aucelli, P. P., Robustelli, G., & Scarciglia, F. (2011). *Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy)*. *Natural hazards*, 56, 881-898.
- Costache, R. (2019). *Flood susceptibility assessment by using bivariate statistics and machine learning models-a useful tool for flood risk management*. *Water Resources Management*, 33(9), 3239-3256.
- Das, B., Bordoloi, R., Thungon, L. T., Paul, A., Pandey, P. K., Mishra, M., & Tripathi, O. P., (2020). *An integrated approach of GIS, RUSLE and AHP to model soil erosion in West Kameng watershed, Arunachal Pradesh*. *Journal of Earth System Science*, 129, 1-18.
- Das, B., Paul, A., Bordoloi, R., Tripathi, O. P., & Pandey, P. K. (2018). *Soil erosion risk assessment of hilly terrain through integrated approach of RUSLE and geospatial technology: a case study of Tirap District, Arunachal Pradesh*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 373-381.
- Fallah, M., Kavian, A., & Omidvar, E. (2016). *Watershed prioritization in order to implement soil and water conservation practices*. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-17.
- Gayen, A., & Saha, S. (2017). *Application of weights-of-evidence (WoE) and evidential belief function (EBF) models for the delineation of soil erosion vulnerable zones: a study on Pathro river basin, Jharkhand, India*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(3), 1123-1139.
- Getnet, T., & Mulu, A. (2021). *Assessment of soil erosion rate and hotspot areas using RUSLE and multi-criteria evaluation technique at Jedeb watershed, Upper Blue Nile, Amhara Region, Ethiopia*. *Environmental Challenges*, 4, 100174.
- Ghosh, A., & Maiti, R. (2021). *Soil erosion susceptibility assessment using logistic regression, decision tree and random forest: study on the Mayurakshi river basin of Eastern India*. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-16.
- Haidara, I., Tahri, M., Maanan, M., & Hakdaoui, M. (2019). *Efficiency of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to detect soil erosion vulnerability*. *Geoderma*, 354, 113853.
- Halefom, A., & Teshome, A. (2019). *Modelling and mapping of erosion potentiality watersheds using AHP and GIS technique: a case study of Alamata Watershed, South Tigray, Ethiopia*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(3), 819-831.
- Halefom, A., Ahmad, I., & Dar, M. A. (2022). *Soil loss rate estimation using a hybrid model of geographic information system coupled with fuzzy logic technique*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(1), 421-432.
- Hembram, T. K., Paul, G. C., & Saha, S. (2019). *Comparative analysis between morphometry and geo-environmental factor based soil erosion risk assessment using weight of evidence model: a study on Jainti river basin, eastern India*. *Environmental processes*, 6(4), 883-913.
- Jennifer, J. J., Saravanan, S., & Abijith, D. (2021). *Application of frequency ratio and logistic regression model in the assessment of landslide susceptibility mapping for Nilgiris district, Tamilnadu, India*. *Indian Geotechnical Journal*, 51(4), 773-787.
- Kashiwar, S. R., Kundu, M. C., & Dongarwar, U. R. (2022). *Soil erosion estimation of Bhandara region of Maharashtra, India, by integrated use of RUSLE, remote sensing, and GIS*. *Natural Hazards*, 110(2), 937-959.
- Liu, H., Li, X., Meng, T., & Liu, Y. (2020). *Susceptibility mapping of damming landslide based on slope unit using frequency ratio model*. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-19.

- Ma, J., Wang, X. & Yuan, G. (2023). Evaluation of Geological Hazard Susceptibility Based on the Regional Division Information Value Method. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(1), 17.
- Maqsoom, A., Aslam, B., Hassan, U., Kazmi, Z. A., Sodangi, M., Tufail, R. F., & Farooq, D. (2020). Geospatial assessment of soil erosion intensity and sediment yield using the revised universal soil loss equation (RUSLE) model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 356.
- Meliho, M., Khattabi, A., & 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.
- Mihi, A., Benarfa, N., & Arar, A. (2020). Assessing and mapping water erosion-prone areas in northeastern Algeria using analytic hierarchy process, USLE/RUSLE equation, GIS, and remote sensing. *Applied Geomatics*, 12(2), 179-191.
- Mitra, R., Saha, P., & Das, J. (2022). Assessment of the performance of GIS-based analytical hierarchical process (AHP) approach for flood modelling in Uttar Dinajpur district of West Bengal, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 2183-2226.
- Mondal, S., & Mandal, S. (2019). Landslide susceptibility mapping of Darjeeling Himalaya, India using index of entropy (IOE) model. *Applied Geomatics*, 11, 129-146.
- Ouma, Y. O., Lottering, L., & Tateishi, R. (2022). Soil erosion susceptibility prediction in railway corridors using RUSLE, soil degradation index and the new normalized difference railway erosivity index (NDReLI). *Remote Sensing*, 14(2), 348.
- Pei, T., Qin, C. Z., Zhu, A. X., Yang, L., Luo, M., Li, B., & Zhou, C. (2010). Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecological Indicators*, 10(3), 610-619.
- Pournader, M., Ahmadi, H., Feiznia, S., Karimi, H., & Peirovan, H. R. (2018). Spatial prediction of soil erosion susceptibility: an evaluation of the maximum entropy model. *Earth Science Informatics*, 11, 389-401.
- Puente, C., Olague, G., Trabucchi, M., Arjona-Villicaña, P. D., & Soubervielle-Montalvo, C. (2019). Synthesis of vegetation indices using genetic programming for soil erosion estimation. *Remote Sensing*, 11(2), 156.
- Rahman, M. R., Shi, Z. H., & Chongfa, C. (2009). Soil erosion hazard evaluation—an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecological Modelling*, 220(13-14), 1724-1734.
- Rehman, A., Song, J., Haq, F., Mahmood, S., Ahamad, M. I., Basharat, M., ... & Mehmood, M. S. (2022). Multi-hazard susceptibility assessment using the analytical hierarchy process and frequency ratio techniques in the Northwest Himalayas, Pakistan. *Remote Sensing*, 14(3), 554.
- Saha, S., Gayen, A., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2019). Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-18.
- Saranaathan, S. E., Mani, S., Ramesh, V., & Prasanna Venkatesh, S. (2021). Landslide susceptibility zonation mapping using bivariate statistical frequency ratio method and GIS: a case study in part of SH 37 Ghat Road, Nadugani, Panthalur Taluk, The Nilgiris. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 275-291.

- Seutloali, K. E., Dube, T., & Mutanga, O. (2017). Assessing and mapping the severity of soil erosion using the 30-m Landsat multispectral satellite data in the former South African homelands of Transkei. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 296-304.
- Shirzadi, A., Bui, D. T., Pham, B. T., Solaimani, K., Chapi, K., Kavian, A., ... & Revhaug, I. (2017). Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-18.
- Sinshaw, B. G., Belete, A. M., Tefera, A. K., Dessie, A. B., Bizuneh, B. B., Alem, H. T., ... & Moges, M. A. (2021). Prioritization of potential soil erosion susceptibility region using fuzzy logic and analytical hierarchy process, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water-Energy Nexus*, 4, 10-24.
- Tehrany, M. S., Shabani, F., Javier, D. N., & Kumar, L. (2017). Soil erosion susceptibility mapping for current and 2100 climate conditions using evidential belief function and frequency ratio. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1695-1714.
- Vijith, H., & Dodge-Wan, D. (2019). Modelling terrain erosion susceptibility of logged and regenerated forested region in northern Borneo through the Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS techniques. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 1-18.
- Wang, Q., Li, W., Yan, S., Wu, Y., & Pei, Y. (2016). GIS based frequency ratio and index of entropy models to landslide susceptibility mapping (Daguan, China). *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-16.
- Wubalem, A., Getahun, B., Hailemariam, Y., Mesele, A., Tesfaw, G., Dawit, Z., & Goshe, E. (2022). Landslide susceptibility modeling using the index of entropy and frequency ratio method from Nefas-Mewcha to Weldiya Road Corridor, Northwestern Ethiopia. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(10), 5249-5278.
- Yetemen, O., Istanbuluoglu, E., & Duvall, A. R. (2015). Solar radiation as a global driver of hillslope asymmetry: Insights from an ecogeomorphic landscape evolution model. *Water Resources Research*, 51(12), 9843-9861.
- Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed