

ارزیابی تغییرات کاربری و اثرات آن در فرسایش خاک بعد از احداث سد (سد سهند هشتروند)

مریم بیاتی خطیبی^{۱*}، نگین راکمی^۲، مهرداد جیهونی^۳

۱-استاد، ژئومورفولوژی گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز،

ایران، M_bayati@tabrizu.ac.ir

۲-دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه

تبریز، تبریز، ایران،

۳-استادیار سنجش از دور، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز،

تبریز، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

چکیده

فرسایش خاک یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت پایدار منابع طبیعی است که تأثیرات منفی متعددی از جمله کاهش حاصلخیزی خاک، تخریب اکوسیستم‌ها، و کاهش عمر سازه‌های هیدرولیکی مانند سد‌ها را به دنبال دارد. این پژوهش با هدف ارزیابی تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر فرسایش خاک در حوضه آبریز سد سهند (هشتروند) پس از احداث سد، با استفاده از مدل تجربی EPM انجام شده است. داده‌های مورد نیاز شامل طبقات ارتفاعی، شیب زمین، کاربری اراضی، لیتولوژی، بارش، شاخص NDVI و بافت خاک از منابع مختلف گردآوری و با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI پردازش شدند. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای فرسایش خاک در این حوضه به دلیل ویژگی‌های فیزیوگرافیکی نظیر مساحت گسترده (۸۷۴ کیلومتر مربع)، اختلاف ارتفاع قابل توجه (۱۹۸۹ متر)، و شیب‌های تند است. بررسی تغییرات کاربری اراضی طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده کاهش مساحت مراتع ضعیف و متوسط و افزایش اراضی کشاورزی دیم و آبی است که عمدتاً ناشی از فشارهای انسانی، تغییرات اقلیمی، و اقدامات مدیریتی است. نتایج مدل EPM حاکی از افزایش شدت فرسایش خاک (از ۵۸۱/۸۶ به ۱۲۲۱/۴۳ متر مکعب در سال به ازای هر کیلومتر مربع) و دبی رسوب ویژه (از ۲۲۱/۳۷ به ۴۲۶/۶۶ متر مکعب در سال) است که با افزایش بارندگی و ضریب شدت فرسایش همخوانی دارد. تحلیل‌ها نشان داد که شیب‌های تندتر و کاربری‌های ناپایدار مانند مراتع، عوامل اصلی تشدید فرسایش هستند. این مطالعه بر ضرورت اتخاذ راهبردهای جامع مدیریت منابع طبیعی با تأکید بر حفاظت خاک و بهینه‌سازی کاربری اراضی برای کاهش فرسایش و حفظ پایداری اکوسیستم‌ها تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خاک، کاربری اراضی، مدل EPM، رسوب، حوضه سد سهند هشتروند.

* - M_bayati@tabrizu.ac.ir

نویسنده مسئول: مریم بیاتی خطیبی

مقدمه

فرسایش خاک در دهه‌ی اخیر، تحت تأثیر برهم‌کنش فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی، به یکی از تهدیدهای جدی برای امنیت غذایی، کارکرد اکوسیستم‌ها و سرمایه زیرساختی حوضه‌ها بدل شده است؛ از دست رفتن لایه‌ی سطحی، کاهش حاصل‌خیزی، رسوب‌گذاری در مخازن و افت ظرفیت تنظیم سیلاب از پیامدهای مستقیم آن است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷؛ بیات و همکاران، ۱۳۹۹؛ معتمدی راد و همکاران، ۱۴۰۲). هم‌زمان شواهد تازه نشان می‌دهد تشدید فرساینده‌ی بارش، به‌ویژه رخدادهای حدی، ریسک فرسایش و سیلاب را در نواحی نیمه‌خشک به‌طور معناداری افزایش داده است (Adeyeri et al., 2024, Zhao et al., 2024). در پاسخ به این شرایط، مدل‌های تجربی و عددی برآورد فرسایش/رسوب در محیط GIS و سنجش‌ازدور به ابزار اصلی برنامه‌ریزی حفاظت خاک و آب تبدیل شده‌اند (Wang et al., 2024؛ نعمتی و همکاران، ۱۴۰۲). در میان این رویکردها، روش پتانسیل فرسایش یا EPM (روش گاوریلوویچ) به‌سبب سادگی داده‌ای، سازگاری با GIS و امکان نقشه‌بندی شدت فرسایش در مقیاس حوضه کاربرد گسترده‌ای یافته است و نسخه‌های به‌روزشده‌ی آن نیز در سال‌های اخیر ارزیابی و توصیه شده‌اند (بدری، ۱۴۰۳؛ Bezak et al., 2024). در ارتباط با فرسایش خاک، طی دهه‌های اخیر مطالعات متعددی در سطح ملی و بین‌المللی اجرا شده است که در ادامه به مهم‌ترین مطالعات داخلی و جدیدترین مطالعات خارجی پرداخته می‌شود. کریمی و همکاران (۱۳۹۹) به مطالعه پهنه‌بندی فرسایش خاک در مناطق کارستی پرداخته‌اند؛ آن‌ها مدل SMLRK را در حوضه الوند (استان کرمانشاه) به‌کار برده و نشان دادند که در حالت عدم دخالت پارامتر نفوذ، تقریباً ۵۵٪ از مساحت حوضه و در حالت دخالت، حدود ۶۱٪ از مساحت در طبقات فرسایشی متوسط تا خیلی زیاد قرار دارند. نتایج آن‌ها نشان داد که شیب زیاد، بارش بالا و خاک کم‌ضخامت، عوامل عمده در تشدید فرسایش در بخش‌های کارستی هستند. مزبانی و همکاران (۱۴۰۰) فرسایش خاک را در حوضه آبریز سیکان با استفاده از معادله‌ی جهانی اصلاح‌شده (Modified Universal Soil Loss Equation) ارزیابی کردند؛ نتایج آنان نشان داد میزان کل فرسایش سالانه برابر با ۱۲،۸۱۱،۰۰۴ تن و میانگین فرسایش معادل ۱۷،۶۲ تن در هکتار بود. بیشترین فرسایش مربوط به مراتع متوسط (۲۷،۹۸ تن در هکتار) و کمترین مربوط به کاربری‌های آبی و مسکونی بود. ارتباط قوی ($r = 0.9$) بین عامل LS و میزان هدررفت خاک نشان داده شد و تقریباً ۴۲٪ از مساحت حوضه در وضعیت فرسایش شدید قرار داشتند. بیاتی‌خطیی و ساری‌صراف (۱۴۰۱) در مطالعه خود در زیرحوضه آتش‌بیگ توان فرسایشی رواناب‌ها را در سطوح شیب‌دار به کمک معادلات تجربی و شاخص CTI سنجیده‌اند؛ نتایج نشان داد بخش‌هایی از حوضه دارای CTI بیش از آستانه ۵ هستند که نشان‌دهنده توان کافی رواناب‌ها برای سایش شیب‌ها است. نی‌نوا و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی و پهنه‌بندی فرسایش خاک در زیرحوضه چهل‌گزی استان کردستان با استفاده از مدل SLEMSA، GIS و سنجش‌ازدور پرداختند. طبق نتایج، حدود ۹۳،۱۵٪ از زیرحوضه دارای فرسایش بین ۰ تا ۱۰ تن در هکتار بودند، ۲،۴۶٪ بین ۱۰ تا ۲۰ تن، ۳،۱۷٪ بین ۲۰ تا ۵۰ تن و ۱،۲۰٪ بین ۵۰ تا ۵۳۷ تن در هکتار. در مجموع، حدود ۶۱،۹۵٪ از زیرحوضه در کلاس کم تا متوسط قرار گرفتند. عبادی و همکاران (۱۴۰۳) با بهره‌گیری از شاخص‌های ژئومورفیک و منطق‌فازی به ارزیابی پتانسیل فرسایش خاک در حوضه فیروزآبادچای پرداختند. نتایج نشان داد که در بخش‌هایی از حوضه که چندین فاکتور مؤثر هم‌زمان وجود دارند (مانند مارن‌های ژپس‌دار، خاک ضعیف، شیب زیاد، تراکم زهکشی بالا)، میزان پتانسیل فرسایش تشدید شده است و این مناطق به عنوان پهنه‌های بحرانی شناسایی شدند. ایزدی‌پور و همکاران

(۱۴۰۴) تحلیل مکانی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه را با استفاده از مدل InVEST در منطقه سیستان انجام دادند. آن‌ها گزارش کردند که فرسایش سالانه حدود ۴۱۰۳ میلیون تن (معادل ۲۰۰۷ تن در هکتار) بوده است. نتایج نشان داد رابطه مثبت و معناداری بین کیفیت زیستگاه و شدت فرسایش ($\text{Spearman } R = 0.71, p < 0.01$) وجود دارد و تحلیل GWR نیز همبستگی مکانی قوی ($R^2 = 0.91$) بین این دو متغیر نشان داد. در مطالعاتی خارجی نیز Elaloui و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با عنوان "تأثیر تغییرات اقلیمی بر فرسایش خاک در مناطق نیمه‌خشک" بیان کردند که این مطالعه با استفاده از مدل EPM تأثیر تغییرات اقلیمی بر فرسایش خاک در مناطق نیمه‌خشک مراکش را مورد بررسی قرار داده است. داده‌های بارش و دمای تا سال ۲۰۹۰ مدل‌سازی و افزایش نرخ فرسایش پیش‌بینی شده است. نتایج نشان داد کاهش بارش و افزایش دما به شدت نرخ فرسایش را افزایش داده و تغییرات اقلیمی به عنوان عامل اصلی در تخریب خاک شناخته شد. Parente و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش "نقش عوامل انسانی و طبیعی در فرسایش خاک" با ترکیب داده‌های انسانی و طبیعی و نقشه‌برداری کلاس‌های فرسایش خاک از مدل EPM و تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی مناطق فرسایش‌پذیر بهره بردند. نتایج این پژوهش تأثیرات عمده تغییرات کاربری زمین بر افزایش خطر فرسایش در مناطق حساس را نشان داده و بر لزوم اقدامات پایدار تأکید دارد. Alemayehu و همکاران (۲۰۲۵) به تحلیل مکانی و زمانی فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز شافه، منطقه اصلی شکاف اتیوپی: تلفیق مدل GIS ، RUSLE و تکنیک‌های سنجش از دور پرداختند. آن‌ها فرسایش سالانه را در بازه‌های زمانی ۲۰۰۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ محاسبه کردند و به تغییرات زمانی بافت خاک، پوشش و شیب پرداختند. نتایج نشان داد که نرخ فرسایش در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است؛ همچنین نسبت حمل رسوب (SDR) برای تخمین رسوب در دهانه نیز محاسبه شد. Alebachew و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی مدل‌سازی فرسایش خاک و تولید رسوب مبتنی بر SWAT در حوضه آبریز بالایی گیلگل ابی، حوضه نیل آبی، اتیوپی پرداختند. نتایج نشان داد که ۲۸٪ از مساحت حوضه در طبقه فرسایش زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. نویسندگان پیشنهاد کردند که اقدامات حفاظتی مانند کشت حفاظتی و پوشش گیاهی می‌تواند بیش از ۴۰٪ از رسوبات تولیدی را کاهش دهد. Reta Roba و همکاران (۲۰۲۵) در بررسی خود بر روی حوضه Dumuga در اتیوپی، با بهره‌گیری از داده‌های ۳۰ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۳) و مدل RUSLE ، روند تغییرات فرسایش و رسوب را تحت تأثیر تغییرات کاربری زمین ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که بیشترین افزایش فرسایش مربوط به تبدیل جنگل‌ها به اراضی کشاورزی بوده و در برخی مناطق شدت فرسایش بیش از دو برابر شده است. حوضه‌ی سد سهند هشتروند—با شیب‌های تند، لیتولوژی حساس، بارندگی‌های متناوب و فشارهای کاربری از پهنه‌های مستعد فرسایش و رسوب‌دهی است و آثار آن در کاهش عمر مفید مخزن، افزایش هزینه‌های لایروبی/نگهداشت و افت کیفیت آب نمود دارد (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۶). هم‌راستا با رویکردهای جاری، بهره‌گیری از EPM در محیط GIS و اتکا به داده‌های سنجش‌ازدور می‌تواند برای این حوضه، نقشه‌های شدت فرسایش و پهنه‌های بحرانی را با عدم قطعیت کمتر فراهم کند. به علاوه، برآورد و پایش رسوب‌گذاری مخزن از طریق روش‌های مبتنی بر RS/GIS و پایش تراز مخزن در ایران نشان داده است که این روش‌ها با هزینه/زمان کم قابلیت پشتیبانی تصمیم‌سازی را دارند. با وجود پیشینه‌ی استفاده از EPM در ایران، سه شکاف برجسته است: (۱) کمبود مطالعات تلفیقی که EPM را هم‌زمان با سری‌های زمانی سنجش‌ازدور و لایه‌های مکانی به‌روز کالیبره کنند؛ (۲) عدم توجه نظام‌مند به مؤلفه‌های اقلیمی نوین (مانند روندهای فرسایش‌دهی بارش و رخداد‌های حدی) در چارچوب

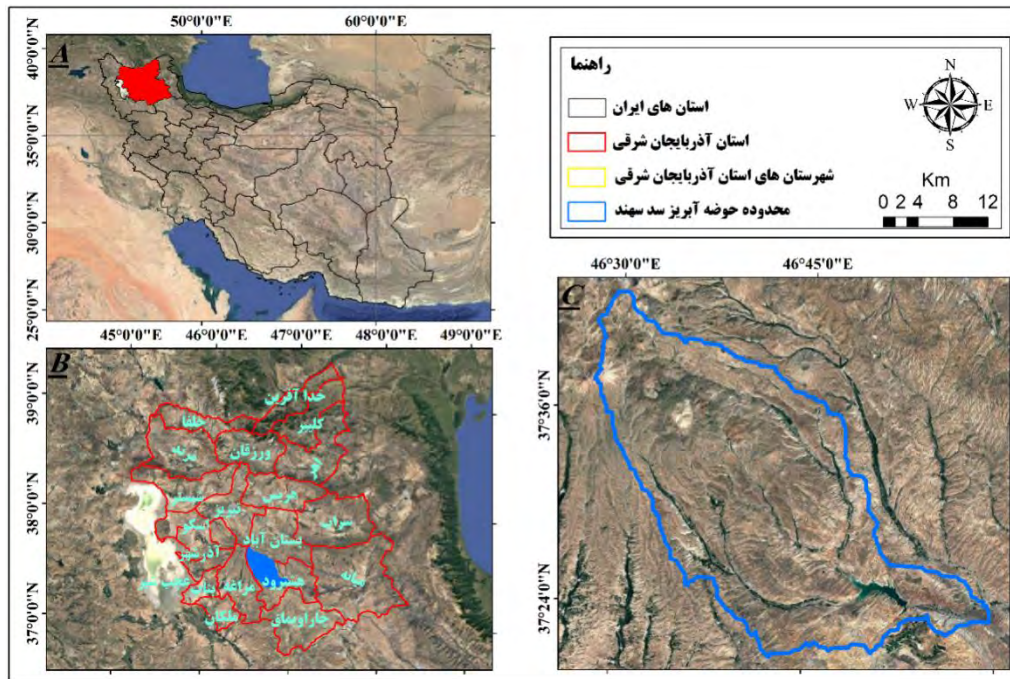
EPM؛ (۳) پیوند ضعیف بین نقشه‌های شدت فرسایش و سنجه‌های رسوب‌گذاری مخزن و خدمات بهره‌برداری. این پژوهش با نوآوری در ادغام EPM با GIS و سنجش‌ازدور (NDVI، بارش‌های ماهواره‌ای، کاربری/پوشش) و به‌کارگیری شاخص‌های مورفومتریک/فیزیوگرافی، به‌دنبال تولید نقشه‌ی شدت فرسایش و شناسایی پهنه‌های بحرانی در حوضه‌ی سد سهند هشتروند و نیز تخمین تولید رسوب برای پشتیبانی از تصمیم‌سازی آبخیزداری و مدیریت مخزن است. اهداف مشخص عبارت‌اند از: (الف) برآورد فضایی-زمانی شدت فرسایش و تولید رسوب با EPM؛ (ب) سنجش نقش عوامل کلیدی (شیب، پوشش/کاربری، بارش/فرساینده‌گی).

مواد و روش

معرفی محدوده مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد سهند هشتروند از نظر موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه ۳۰ دقیقه تا ۴۶ درجه ۵۰ دقیقه شرقی و ۳۷ درجه ۲۰ دقیقه تا ۳۷ درجه ۴۰ دقیقه و در منطقه‌ای کوهستانی و مرتفع در شمال غرب ایران واقع شده و به دلیل ویژگی‌های خاص توپوگرافی و اقلیمی، در معرض فرسایش خاک قرار دارد. این حوضه با داشتن مساحتی قابل توجه، شامل زیرحوضه‌هایی است که در روند آبخیزداری و تحلیل فرسایش خاک تأثیر بسزایی دارند. ارتفاعات منطقه و تغییرات توپوگرافیک باعث افزایش رواناب سطحی و تسهیل فرآیندهای فرسایش شده است. همچنین، وجود شیب‌های تند و شبکه زهکشی گسترده در حوضه سد هشتروند، شرایط مساعدی را برای انواع فرسایش‌های آبی از قبیل شیاری، بین‌شیاری و ورقه‌ای فراهم کرده است. بررسی‌های ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی با استفاده از شاخص‌های مورفومتری، شکل کشیده حوضه را مشخص کرده که به دلیل نسبت طول به عرض بالا، سیلاب‌های با زمان تمرکز بیشتری در این منطقه اتفاق می‌افتد و شدت فرسایش کاهش می‌یابد. به‌کارگیری مدل EPM در این حوضه به‌منظور ارزیابی و پیش‌بینی میزان فرسایش، با توجه به شاخص‌های فرسایشی مانند شیب، بافت خاک، و کاربری اراضی، امکان ارزیابی دقیقی از الگوهای فرسایشی در حوضه سد هشتروند را فراهم می‌آورد (شکل ۱).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

داده

روش پژوهش حاضر از نوع توصیفی-تحلیلی بوده و گردآوری داده‌ها به دو شیوه‌ی پیمایشی و کتابخانه‌ای انجام شده است. از نظر هدف، این پژوهش در زمره‌ی تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد. در فرآیند برآورد فرسایش و رسوب در حوضه‌ی سد هشت‌رود، مجموعه‌ای از معیارهای مؤثر مورد استفاده قرار گرفت که شامل طبقات ارتفاعی، شیب زمین، کاربری اراضی، لیتولوژی، بارش، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و بافت خاک است. تهیه و پردازش لایه‌های اطلاعاتی مربوط به معیارهای مذکور با بهره‌گیری از داده‌های سازمان‌ها و پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر صورت گرفت. در ادامه، داده‌های مکانی و توصیفی گردآوری شده به کمک نرم‌افزارهای تخصصی مورد تحلیل قرار گرفتند. به طور مشخص، نرم‌افزار ENVI 5.3 برای استخراج و محاسبه‌ی شاخص NDVI و تهیه نقشه‌های کاربری اراضی بر اساس طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال به کار گرفته شد. همچنین نرم‌افزار ArcGIS 10.8 در تولید، استخراج و تلفیق لایه‌های معیارهای پژوهش، شامل نقشه‌های ارتفاع، شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، بارش و بافت خاک نقش اساسی داشته و در تحلیل فضایی و محاسبه پارامترهای مرتبط با فرسایش خاک مورد استفاده قرار گرفت. منابع داده‌ای به کاررفته برای تولید لایه‌های مکانی و ویژگی‌های محیطی در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

جدول (۱): داده‌های مورد استفاده در تحقیق

داده‌ها	مشخصات	لایه استخراج شده	تابع	منبع
خاک	۱:۱۰۰۰۰۰	بافت خاک	*	سازمان منابع طبیعی
لیتولوژی	۱:۱۰۰۰۰۰	لیتولوژی	*	سازمان زمین شناسی
لندست ۸	۳۰ * ۳۰ متر	کاربری اراضی	حداکثر احتمال	سازمان زمین شناسی آمریکا
		پوشش گیاهی	NDVI	USGS

DEM Aster	شیب	Slope	۳۰ * ۳۰ متر
	طبقات ارتفاعی	هیپسومتری	
داده‌های بارانسجی	۱۳۷۰ تا ۱۴۰۲	بارندگی	IDW
		سازمان آب و منطقه‌ای	

روش

مدل EPM

مدل EPM در سال ۱۹۵۲ برای بررسی شدت فرسایش خاک در کشور یوگسلاوی سابق، در مؤسسه cerni Jaroslav مورد استفاده قرار گرفته و موجب کشف یک روش طبقه بندی فرسایش به نام E.C.Q.M گردید. مدل EPM که به عنوان یک روش پیشرفته برای طبقه بندی کمی فرسایش شناخته می شود، مبتنی بر محاسبه و تحلیل عوامل مؤثر بر فرسایش خاک است. این روش برای تعیین شدت فرسایش و مقدار رسوب حمل شده به کار گرفته می شود (روستایی و همکاران، ۱۴۰۴؛ جعفری، همکاران، ۱۳۹۷).

این مدل در دو مرحله اصلی انجام می گیرد:

مرحله اول: محاسبه مقدار رسوب حمل شده در حوضه آبخیز.

مرحله دوم: تعیین شدت فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه.

عوامل مؤثر در تعیین شدت فرسایش:

برای تعیین شدت فرسایش، چهار عامل اصلی مورد بررسی قرار می گیرند:

ضریب فرسایش حوضه آبخیز: (۱۲) میزان فرسایش پذیری حوضه.

ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش: (Y) نشان دهنده حساسیت مواد زمین شناسی منطقه به فرسایش.

ضریب استفاده از زمین یا کاربری اراضی: (Xa) تأثیر نوع کاربری زمین بر فرسایش.

شیب متوسط حوضه: (I) درصد شیب در واحدهای مختلف حوضه.

محاسبه شدت فرسایش:

شدت فرسایش با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می شود

$$Z = Y \cdot Xa (\psi + I^{0.5})$$

رابطه

این فرمول بر اساس ترکیب ضرایب مذکور، شدت فرسایش خاک را در مناطق مختلف محاسبه می کند (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۳).

برای محاسبه هر کدام از ضرایب چهارگانه، از منابع زیر استفاده می شود:

ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y): برای محاسبه و استخراج ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش از نقشه های لیتولوژی و بافت خاک طبق جدول ۲ انجام به عمل آمد.

جدول (۲): مقادیر ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y)

شماره	شرایط سنگ شناسی و خاک شناسی	ضریب حساسیت سنگ و خاک
۱	ماسه، سنگ ریزه، شیبست	۲
۲	لس، توف، خاک شور، خاک استپی	۱/۶
۳	سنگ آهک هوازده و مارن	۱/۲
۴	ماسه سنگ قرمز، سربانتین و رسوبات فلیشی	۱/۱
۵	پدزول، پاراپدزول، شیبست خردشده، میکاشیبست، گنیس، شیبست آرژیلیت دار	۱
۶	سنگ آهک سخت، تراروسا، خاک های هوموسی و سیلیکات دار	۰/۹
۷	خاکهای قهوه‌ای جنگلی و خاکهای کوهستانی	۰/۸
۸	خاکهای باتلاقی و هیدرومورف سیاه یا خاکستری تیره	۰/۶
۹	چرنوزیوم و رسوبات آبرفتی با بافت خوب	۰/۵
۱۰	سنگ های آذرین سخت	۰/۲۵

ضریب استفاده از زمین (Xa): ضریب استفاده از زمین نیز از روی کاربری اراضی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای طبق جدول ۳ محاسبه گردید.

جدول (۳): مقادیر استفاده از زمین (Xa)

شماره	شرایط استفاده از زمین	ضریب استفاده از زمین
۱	اراضی غیرقابل کشت و زرع و بادلندا	۱
۲	اراضی تپه ماهوری و شخم خورده برای زراعت	۰/۹
۳	باغات میوه، تاکستان‌های بدون پوشش گیاهی مرتعی	۰/۸
۴	کشتزارهای شخم خورده بر روی خطوط تراز	۰/۷
۵	جنگل‌های مخروبه و فرسایش یافته و بوته‌زارهای ایجاد شده بر روی خاک‌های فرسوده	۰/۶
۶	مراعات کوهستانی خشک	۰/۵
۷	مزارع دائمی و یونجه زارها	۰/۴
۸	مراعات زهکشی شده و پوشیده از گراس‌ها	۰/۳
۹	جنگل‌های خوب بر روی شیب‌های تند	۰/۲
۱۰	جنگل‌های خوب بر روی شیب‌های ملایم	۰/۱

ضریب فرسایش حوضه آبخیز (ψ): ضریب فرسایش حوضه نشان دهنده وضعیت ظاهری فرسایش در حوضه است. تعیین این ضریب از طریق و گوگل ارث و با استفاده از جدول ۴ استخراج گردید.

جدول (۴): مقادیر ضریب فرسایش (ψ)

شماره	شرایط فرسایش حوضه آبخیز	ضریب فرسایش حوضه آبخیز
۱	منطقه دارای خندق های زیاد و فرسایش شدید میباشد	۱
۲	در حدود ۸۰٪ منطقه دارای فرسایش خندقی و شیار می باشد	۰/۹
۳	در حدود ۵۰٪ منطقه دارای فرسایش خندقی و شیار می باشد	۰/۸
۴	کل منطقه دارای فرسایش سطحی، رسوبات و واریزه ها، به مقدار کم فرسایش خندقی و شیار و به مقدار زیاد فرسایش کارستی	۰/۷
۵	کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش عمیق (خندق ها، شیارها و واریزه ها و ...) می باشد	۰/۶

۶	۵۰٪ درصد منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش	۰/۵
۷	۲۰٪ منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش	۰/۴
۸	سطح زمین فاقد فرسایش قابل رویت و در کنار رودخانه ها واریزه و لغزش مشاهده میشود	۰/۳
۹	سطح زمین فاقد فرسایش قابل رویت بوده و اغلب دارای پوشش زراعی است	۰/۲
۱۰	سطح زمین فاقد فرسایش قابل رویت بوده و غالبا تحت پوشش جنگل و گیاهان دائمی است	۰/۱

شیب متوسط حوضه (I): شیب متوسط حوضه با استفاده از DEM محدوده مورد مطالعه استخراج گردید. بدین صورت ابتدا شیب با استفاده دستور Slope از روی DEM محاسبه شد و سپس شیب متوسط تهیه گردید.

طبقه‌بندی نهایی فرسایش

پس از محاسبه ضرایب چهارگانه، شدت فرسایش با استفاده از جدول ۵ به صورت کیفی طبقه‌بندی می‌شود. این طبقه‌بندی به مدیریت بهتر فرسایش خاک در منطقه کمک می‌کند.

جدول (۵): طبقه بندی کیفی فرسایش

طبقه بندی فرسایش	شدت فرسایش	مقادیر حد Z	مقادیر متوسط Z
I	خیلی شدید	$1 < Z$	۱/۲۵
II	شدید	$0.71 < Z < 1$	۰/۸۵
III	متوسط	$0.41 < Z < 0.7$	۰/۵۵
IV	کم	$0.2 < Z < 0.4$	۰/۲
V	خیلی کم	$Z < 0.19$	۰/۱

برای برآورد رسوب حمل شده پارامترهایی مانند: فرسایش ویژه، رسوب کل و رسوب ویژه محاسبه می‌شود (آرخی و بارانی، ۱۴۰۳؛ شاه کرمی و همکاران، ۱۴۰۴). متوسط سالانه فرسایش ویژه از رابطه ی ۲ به دست می‌آید:

$$W_{SP} = T \cdot H \cdot Z^{1.5} \cdot I$$

۲

که در آن H: متوسط بارندگی سالیانه حوضه بر حسب میلیمتر WSP: مقدار فرسایش بر حسب مترمکعب در سال در کیلومترمربع، Z: شدت فرسایش، I: عدد ثابت برابر ۳/۱۴ و T: ضریب درجه حرارت که از رابطه ی ۳ به دست می‌آید.

$$T = (t/10 + 0.1)^{0.5}$$

رابطه ۳

در این رابطه (t) متوسط درجه حرارت سالیانه حوضه بر حسب درجه سانتی گراد می‌باشد. مقدار WSP محاسبه شده در رابطه ی داده شده، بیان کننده ی میزان خاکی است که از بستر خود جدا شده و انتقال پیدا کرده است، اما همه ی این مواد فرسایش یافته به خروجی حوضه نمی‌رسد و آن مقدار خاک فرسایش یافته که به رسوب خروجی تبدیل خواهد شد بستگی به متغیرهای مختلفی دارد که در واقع بر ضریب رسوبدهی حوضه تأثیر خواهد گذاشت (ابراهیم زاده و همکاران، ۱۴۰۳). دبی رسوب ویژه حوضه آبخیز از طریق رابطه ی ۴ به دست می‌آید، که در آن Gsp: رسوب ویژه بر حسب متر مکعب در سال در کیلومترمربع، Wsp: فرسایش ویژه بر حسب متر مکعب در سال در کیلومترمربع و Ru: ضریب رسوبدهی حوضه آبخیز می‌باشد. ضریب رسوبدهی حوضه یا ضریب نگهداشت مواد فرسایش - یافته

معین می‌نماید که چه میزان مواد رسوبی از نقطه خروجی خارج می‌شود و مقدار آن از طریق رابطه ۵، حاصل می‌شود. در این رابطه L : طول حوضه به کیلومتر، P : محیط حوضه به کیلومتر و D : اختلاف ارتفاع بر حسب کیلومتر که از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$1-G_{sp} = W_{sp} \cdot R_u \text{ رابطه}$$

۴

$$2-R_u = 4(P \cdot D)^{0.5} / L + 10 \text{ رابطه}$$

۵

$$3-D = D_{av} - D$$

رابطه ۶

در رابطه ۶، D_{av} : ارتفاع متوسط حوضه آبخیز و D : ارتفاع نقطه خروجی رودخانه می‌باشد.

رسوب کل حوضه نیز براساس رابطه ۷ بدست می‌آید:

$$G_s = G_{sp} \cdot A$$

رابطه ۷

که در آن G_s : رسوب کل بر حسب متر مکعب در سال در کیلومتر مربع، G_{sp} : رسوب ویژه بر حسب متر مکعب در سال در کیلومتر مربع و A : مساحت حوضه آبخیز بر حسب کیلومتر مربع می‌باشد.

ویژگی‌های فیزیوگرافی و مورفومتریک حوضه آبریز

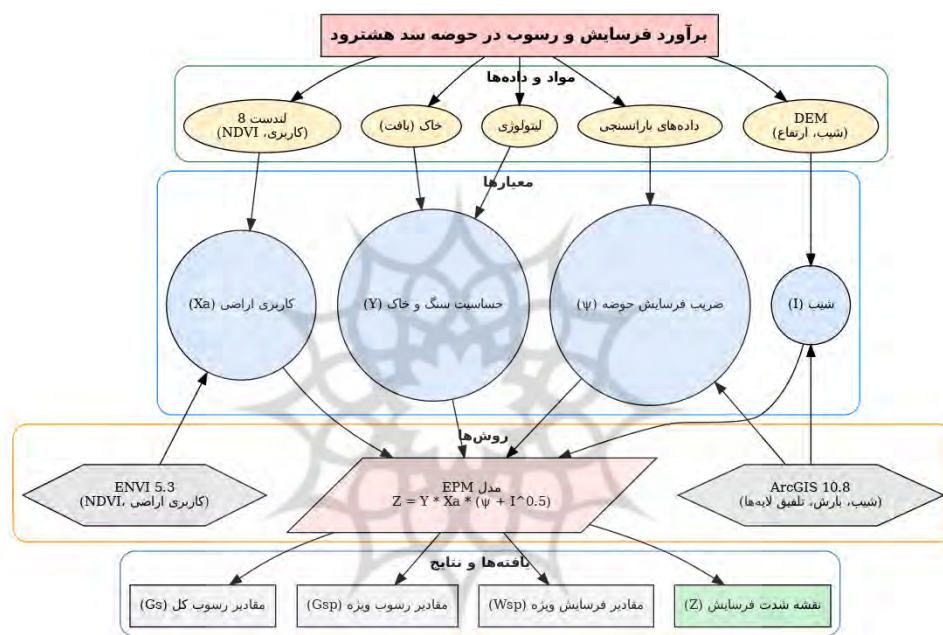
برای تحلیل ویژگی‌های فیزیوگرافی و مورفومتریک حوضه آبریز سد سه‌سدها، مجموعه‌ای از شاخص‌های هندسی، توپوگرافی و هیدرولوژیکی محاسبه گردید. داده‌های مورد استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و نقشه‌های مکانی استخراج و در محیط نرم‌افزار ArcGIS پردازش شدند. ابتدا مرز حوضه و شبکه آبراهه‌ها با استفاده از ابزارهای هیدرولوژیکی نرم‌افزار استخراج شد و سپس شاخص‌های مورفومتری با فرمول‌های استاندارد محاسبه گردید. فرمول‌ها و تعاریف مربوط به شاخص‌های مورفومتری در جدول (۶) ارائه شده‌اند.

جدول (۶): فرمول‌های ویژگی‌های فیزیوگرافی و مورفومتریک حوضه آبریز

ویژگی / شاخص	فرمول ریاضی	توضیح متغیرها
مساحت حوضه (A)	مساحت کل پلیگونی حوضه (کیلومتر مربع)	A: مساحت حوضه (مربع کیلومتر)
محیط حوضه (P)	طول مرز پلیگونی حوضه (کیلومتر)	P: محیط حوضه (کیلومتر)
طول حوضه (Lb)	طول بلندترین مسیر جریان اصلی (کیلومتر)	Lb: طول حوضه
نسبت شکل (Form Factor - FF)	$FF = A / Lb^2$	نسبت شکل: FF
نسبت دایره‌ای بودن (Circularity Ratio - CR)	$CR = (4\pi A) / P^2$	نسبت دایره‌ای بودن حوضه: CR
نسبت کشیدگی (Elongation Ratio - ER)	$ER = (2\sqrt{(A/\pi)}) / Lb$	نسبت کشیدگی: ER
تراکم زهکشی (Drainage Density - DD)	$DD = \Sigma L / A$	ΣL : مجموع طول آبراهه (کیلومتر)
فاکتور ناهمواری (Ruggedness Number - RN)	$RN = DD \times (H_{max} - H_{min})$	H_{max} و H_{min} : کمینه و بیشینه ارتفاع (متر)
درجه انشعاب (Bifurcation Ratio - Rb)	$Rb = N_i / N_{i+1}$	N_i : تعداد آبراهه‌های مرتبه بالاتر
میانگین شیب حوضه	$Slope_avg = \Sigma(\text{شیب سلول‌ها}) / n$	n: تعداد کل سلول‌ها
طول کل آبراهه‌ها (ΣL)	مجموع طول آبراهه‌ها = ΣL	Li: طول هر آبراهه

مدل مفهومی تحقیق

این مدل مفهومی فرآیند تحقیق را در چهار بخش اصلی نشان می‌دهد. ابتدا داده‌های پایه شامل خاک، لیتولوژی، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای لندست (برای کاربری اراضی و شاخص NDVI) و داده‌های بارانسجی گردآوری می‌شوند. در مرحله دوم این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI (برای استخراج پوشش گیاهی و کاربری اراضی) و ArcGIS (برای تولید و تلفیق لایه‌های شیب، ارتفاع و بارندگی) پردازش می‌گردند. سپس در مرحله سوم با به‌کارگیری مدل تجربی EPM و محاسبه ضرایب اصلی آن (X_a, Y, ψ و I) شاخص شدت فرسایش (Z)، فرسایش ویژه و رسوب ویژه و کل برآورد می‌شود. نهایتاً در مرحله چهارم خروجی‌های پژوهش شامل نقشه شدت فرسایش و مقادیر کمی فرسایش و رسوب استخراج شده و برای شناسایی پهنه‌های بحرانی و ارائه راهکارهای مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۲).



شکل (۲): مدل مفهومی تحقیق

نتایج

تحلیل ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه‌های آبریز و تأثیر آن بر فرسایش خاک

ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه‌های آبریز از عوامل کلیدی در تعیین الگوهای هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و به‌ویژه فرآیندهای فرسایش خاک به شمار می‌روند. این ویژگی‌ها شامل مساحت حوضه، طول، محیط، اختلاف ارتفاع، نسبت‌های هندسی و شاخص ناهمواری هستند که هر یک به‌نحوی بر دینامیک هیدرولوژیکی و رفتار فرسایشی حوضه اثر می‌گذارند. جدول (۷) مجموعه‌ای از این مشخصه‌ها را ارائه می‌دهد که به‌عنوان مبنای تحلیل‌های دقیق در این حوضه مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین صورت که حوضه مورد مطالعه با مساحت ۸۷۴ کیلومتر مربع و طول ۸۰/۷۹ کیلومتر دارای اختلاف ارتفاع قابل‌توجهی (۱۹۸۹ متر) است که بیانگر ناهمواری شدید و پتانسیل بالای فرسایش می‌باشد. نسبت شکل (۰/۱۳)، نسبت دایره‌ای بودن (۰/۴۵) و نسبت کشیدگی (۰/۴۱) حاکی از کشیدگی زیاد و شکل باریک حوضه است که منجر به تمرکز سریع رواناب و افزایش خطر سیلاب و فرسایش می‌شود. تراکم

زهکشی ۳۰/۲ نیز نشان‌دهنده شبکه زهکشی نسبتاً توسعه‌یافته بوده که همراه با فاکتور ناهمواری بالا (۵۵/۴۵۷۱)، پایداری مورفولوژیکی پایین و حساسیت بیشتر به فرسایش خاک را تأیید می‌کند.

جدول (۷): ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه

ردیف	عوامل	مقادیر	ردیف	عوامل	مقادیر
۱	طول حوضه (L) به کیلومتر	۸۰/۷۹	۷	Pi	۳/۱۴
۲	محیط حوضه (P) به کیلومتر	۱۵۶/۳	۸	نسبت شکل	۰/۱۳
۳	مساحت حوضه (A) به کیلومتر مربع	۸۷۴	۹	نسبت دایره‌ای بودن	۰/۴۵
۴	حداکثر ارتفاع	۳۵۱۴	۱۰	نسبت کشیدگی	۰/۴۱
۵	حداقل ارتفاع	۱۵۲۵	۱۱	تراکم زهکشی	۲/۳۰
۶	اختلاف ارتفاع	۱۹۸۹	۱۲	فاکتور ناهمواری	۴۵۷۱/۵۵

ارزیابی دقت و کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۴

در پژوهش حاضر از تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸ برای طبقه‌بندی کاربری اراضی در فصل تابستان استفاده شد. برای ارزیابی از ماتریس خطا، ضریب کاپا و دقت کلی بهره گرفته شد که در جدول ۸ نشان داده شده است. جدول نتایج ارزیابی دقت کاربری و پوشش اراضی در سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که هر دو دوره زمانی از دقت کلی و ضریب کاپای قابل قبول و بالا برخوردار بوده‌اند. مقدار کاپا در سال ۱۹۹۶ برابر ۸۹۱/۰ و در سال ۲۰۲۴ معادل ۹۲۳/۰ گزارش شده است که بیانگر توافق بسیار خوب میان داده‌های طبقه‌بندی شده و واقعیت زمینی است. همچنین، دقت کلی از ۹۰/۴۷ درصد در سال ۱۹۹۶ به ۹۳/۶۱ درصد در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته و این امر حاکی از بهبود روش‌های طبقه‌بندی یا کیفیت داده‌ها در دوره اخیر است. بررسی کلاس‌ها نشان می‌دهد که در هر دو سال، طبقه‌ی پهنه‌های آبی بالاترین دقت را داشته و بدون خطا شناسایی شده است. مراتع متوسط و غنی نیز دقت بالایی داشته‌اند، اما در سال ۱۹۹۶ بخشی از آن‌ها با کشاورزی دیم و آبی اشتباه گرفته شده‌اند. در مقابل، در سال ۲۰۲۴ این اختلاط کمتر شده و تفکیک مراتع با کشاورزی دقیق‌تر انجام گرفته است. در عین حال، کشاورزی آبی و باغات و کشاورزی دیم در هر دو سال بیشترین میزان خطاهای طبقه‌بندی نسبی را داشته‌اند، هرچند که دقت آن‌ها در سال ۲۰۲۴ نسبت به سال ۱۹۹۶ بهبود یافته است. به طور کلی، نتایج نشان‌دهنده افزایش دقت نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های اخیر و قابلیت اعتماد بیشتر آن‌ها در مطالعات مدیریتی و برنامه‌ریزی سرزمین است.

جدول (۸): ماتریس خطا، ضریب کاپا و دقت کلی

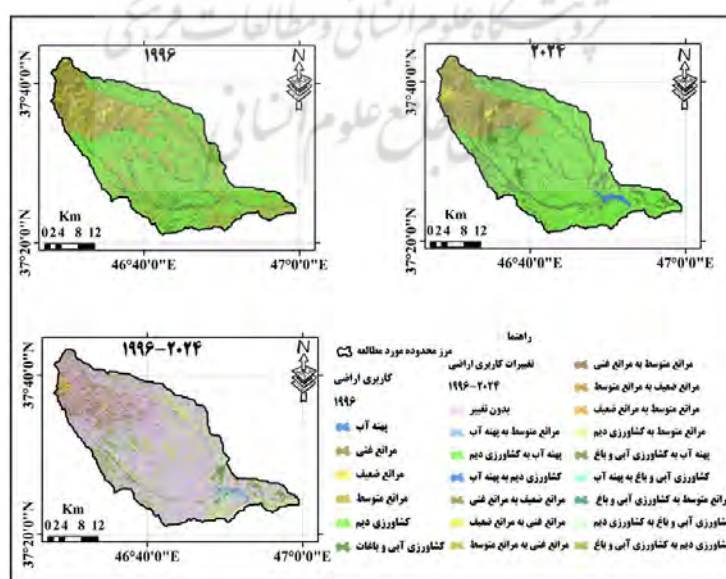
سال	مجموع تعداد نمونه	کشاورزی آبی و باغات	کشاورزی دیم	پهنه آب	مرتع غنی	مرتع متوسط	مرتع ضعیف	دقت کاربر	کاپا
۱۹۹۶	۵۰	۰	۱	۰	۱	۱	۴۷	۹۴	۰/۸۱
	۵۶	۱	۲	۰	۲	۴۹	۲	۸۷/۵	
	۵۱	۱	۱	۰	۴۶	۲	۱	۹۰/۱۹	
	۹	۰	۰	۹	۰	۰	۰	۱۰۰	
	۷۲	۳	۶۴	۰	۲	۲	۱	۸۸/۸۸	
	۶۲	۵۶	۳	۱	۰	۱	۱	۹۰/۳۲	
	۳۰۰	۶۱	۷۱	۱۰	۵۱	۵۵	۵۲		
دقت تولید کننده									
۹۱/۸۰									
۹۰/۱۴									
۹۰/۴۷									
دقت کلی									
۴۲									
مرتع ضعیف									
۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۴۰	۹۵/۲۳	۰

۵۳	۰	۰	۳	۴۸	۲	۹۰/۰۵	مراعات متوسط
۵۳	۰	۱	۴۹	۲	۱	۹۲/۴۵	مراعات غنی
۱۹	۰	۰	۱۹	۰	۰	۱۰۰	پهنه آب
۷۳	۳	۶۷	۰	۱	۱	۹۱/۷۸	کشاورزی دیم
۶۰	۵۷	۲	۱	۰	۰	۹۵	کشاورزی آبی و باغات
۳۰۰	۶۰	۷۲	۲۰	۵۳	۵۱	۴۴	مجموع تعداد نمونه
۹۵	۹۳/۰۵	۹۵	۹۲/۴۵	۹۴/۱۱	۹۰/۹۰		دقت تولید کننده
۹۳/۶۱							دقت کلی

کاربری اراضی و تغییرات آن در محدوده مورد مطالعه

بررسی تغییرات کاربری اراضی در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که سیمای سرزمین دستخوش دگرگونی‌های چشمگیری شده است. در سال ۱۹۹۶ بخش عمده‌ای از محدوده تحت پوشش مراعات متوسط قرار داشت که مساحتی معادل ۲۹۶,۳۷ کیلومتر مربع (حدود ۹۱ درصد کل محدوده) را شامل می‌شد. اما در سال ۲۰۲۴ این مقدار به شدت کاهش یافته و تنها ۹۷,۹۱ کیلومتر مربع (۲۰ درصد) از اراضی را تشکیل می‌دهد. این افت چشمگیر حکایت از فشارهای انسانی، بهره‌برداری بی‌رویه و توسعه‌ی اراضی کشاورزی دارد که سبب تغییر وضعیت مراعات شده است. در همین دوره، مراعات ضعیف نیز با کاهش روبه‌رو شده‌اند؛ از ۱۳,۳۵ کیلومتر مربع (۵۳,۱ درصد) در سال ۱۹۹۶ به ۱۰,۹۰ کیلومتر مربع (۲۵,۱ درصد) در سال ۲۰۲۴ رسیده است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده‌ی آن باشد که بخشی از این مراعات یا به سمت کاربری کشاورزی تغییر یافته‌اند یا در اثر بهبود شرایط مدیریتی و اکولوژیکی، ارتقا یافته و در گروه مراعات غنی جای گرفته‌اند. شواهد این تغییر را می‌توان در افزایش قابل توجه مراعات غنی مشاهده کرد که از ۴۸,۰۹ کیلومتر مربع (۵,۵ درصد) به ۸۰,۱۱ کیلومتر مربع (۱۷,۹ درصد) رسیده است؛ تغییری که می‌تواند حاصل مدیریت بهتر منابع طبیعی، اجرای طرح‌های مرتعداری یا تغییرات اقلیمی به نفع پوشش گیاهی باشد. از سوی دیگر، روند توسعه‌ی کشاورزی کاملاً مشهود است. کشاورزی دیم به‌عنوان غالب‌ترین کاربری در سال ۲۰۲۴ مساحت خود را از ۴۳۱,۶۸ کیلومتر مربع (۴۹,۳۹ درصد) در سال ۱۹۹۶ به ۵۴۹,۷۷ کیلومتر مربع (۶۲,۹ درصد) رسانده است. این رشد به‌خوبی نشان می‌دهد که فشار برای تبدیل مراعات به زمین‌های زراعی طی سه دهه اخیر افزایش یافته است. در کنار آن، کشاورزی آبی و باغات نیز رشد قابل توجهی را تجربه کرده‌اند و از ۸۳,۵۱ کیلومتر مربع (۹,۵۹ درصد) به ۱۲۷,۵۶ کیلومتر مربع (۱۴,۵۹ درصد) رسیده‌اند. افزایش این نوع کاربری‌ها رابطه مستقیمی با گسترش منابع آبی و مدیریت آبیاری دارد. یکی از تغییرات برجسته در نقشه‌ها، افزایش پهنه‌های آبی است. در سال ۱۹۹۶ تنها ۱ کیلومتر مربع (۰,۱۱ درصد) از محدوده به پهنه آبی اختصاص داشت، اما در سال ۲۰۲۴ این مقدار به ۷,۷۵ کیلومتر مربع (۰,۸۹ درصد) رسیده است. این تغییر که در نقشه دوم به‌خوبی قابل مشاهده است، ناشی از شکل‌گیری یک مخزن بزرگ آبی در بخش شرقی محدوده می‌باشد. این مخزن می‌تواند تأثیرات مهمی بر سیمای سرزمین داشته باشد؛ از یک سو زمینه‌ساز توسعه کشاورزی آبی و باغات است و از سوی دیگر ممکن است به تغییر در زیستگاه‌های طبیعی و حذف بخشی از مراعات منجر شده باشد. در مجموع، روند تغییرات کاربری اراضی از ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴ بیانگر جابه‌جایی آشکار از مراعات متوسط و ضعیف به سمت کشاورزی دیم و آبی است. در کنار آن، افزایش پهنه‌های آبی نیز به‌عنوان یک

محرك جديد، ساختار فضايي منطقه را تغيير داده است. بنابر اين مي توان گفت كه فشار انساني و بهره برداري اقتصادي از زمين و آب طی سه دهه اخير نقش تعيين كننده‌اي در تغيير سيمای اکولوژیکی منطقه داشته است؛ تغییری که هم فرصت‌هایی همچون توسعه کشاورزی را فراهم آورده و هم تهدیدهایی برای پایداری منابع طبیعی و مراتع به همراه داشته است. براساس جدول (۹) و نقشه‌های (شکل ۳) تغییرات کاربری اراضی طی دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده تحولات قابل توجه در سیمای سرزمین هستند. در این بازه، بیش از ۶۱ درصد از منطقه (۵۳۵,۹۸ کیلومتر مربع) بدون تغییر باقی مانده که بیانگر ثبات نسبی در بخش عمده‌ای از محدوده است. با این حال، تغییرات مهمی در سایر کاربری‌ها رخ داده است. بزرگ‌ترین تحول به تبدیل کشاورزی دیم به کشاورزی آبی و باغات با مساحت ۶۰,۲۶ کیلومتر مربع (۶,۸۹ درصد) مربوط می‌شود که حاکی از سرمایه‌گذاری در سامانه‌های آبیاری و تلاش برای افزایش بهره‌وری است. در مقابل، تغییرات معکوس مانند تبدیل اراضی آبی به دیم یا پهنه‌های آبی، نشان‌دهنده محدودیت منابع آب یا پیامدهای تغییرات اقلیمی از جمله خشکسالی و سیلاب‌ها است. در بخش کشاورزی دیم، تبدیل وسیع مراتع متوسط به این کاربری (۱۴۹,۶۵ کیلومتر مربع، ۱۷,۱۲ درصد) دومین تغییر عمده محسوب می‌شود که فشار بالای توسعه کشاورزی در نواحی خشک و نیمه‌خشک را بازتاب می‌دهد. چنین روندی اگرچه نیاز به زمین کشاورزی را برطرف می‌کند، اما خطر فرسایش خاک و تشدید بیابانزایی را نیز به همراه دارد. مراتع نیز تغییرات دوسویه‌ای را تجربه کرده‌اند. از یک سو بهبودهایی مانند تبدیل مراتع ضعیف و متوسط به مراتع غنی (۴۳,۶۶ کیلومتر مربع، ۴,۹۷ درصد) بیانگر اثر اقدامات حفاظتی یا بهبود شرایط اقلیمی است. از سوی دیگر، تخریب‌هایی مانند تبدیل مراتع غنی به متوسط و ضعیف نشان‌دهنده فشار چرا و مدیریت ناکارآمد منابع طبیعی است. در مجموع، نقشه‌های تغییرات (شکل ۳) نشان می‌دهند که بیشترین دگرگونی‌ها در نواحی شمالی و بخش‌هایی از جنوب رخ داده است. این الگوی مکانی می‌تواند به دسترسی به منابع آبی، ویژگی‌های طبیعی و روندهای توسعه منطقه‌ای مرتبط باشد. بنابرین، اگرچه بخش قابل توجهی از اراضی پایدار مانده است، اما تغییرات چشمگیر در کشاورزی و مراتع بر ضرورت مدیریت پایدار منابع آب و خاک تأکید دارد.



شکل (۳): نقشه کاربری اراضی و تغییرات آن در محدوده مورد مطالعه برای سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۴

جدول (۹): مساحت و درصد مساحت کاربری اراضی و تغییرات آن

درصد مساحت		مساحت (کیلومتر مربع)		طبقات
۱۹۹۶	۲۰۲۴	۱۹۹۶	۲۰۲۴	
۱/۵۳	۱/۲۵	۱۳/۳۵	۱۰/۹۰	مراتع ضعیف
۳۳/۹۱	۱۱/۲۰	۲۹۶/۳۷	۹۷/۹۱	مراتع متوسط
۵/۵۰	۹/۱۷	۴۸/۰۹	۸۰/۱۱	مراتع غنی
۰/۱۱	۰/۸۹	۱	۷/۷۵	پهنه آب
۴۹/۳۹	۶۲/۹۰	۴۳۱/۶۸	۵۴۹/۷۷	کشاورزی دیم
۹/۵۹	۱۴/۵۹	۸۳/۵۱	۱۲۷/۵۶	کشاورزی آبی و باغات
تغییرات کاربری اراضی				
۶۱/۳۲	۵۳۵/۹۸	بدون تغییر		
۰/۰۳	۰/۲۲	پهنه آب به کشاورزی آبی و باغ		
۰/۰۷	۰/۶۱	پهنه آب به کشاورزی دیم		
۰/۳۵	۳/۰۳	کشاورزی آبی و باغات به پهنه		
۳/۴۷	۳۰/۳۲	کشاورزی آبی و باغات به کشاورزی دیم		
۰/۲۸	۲/۴۷	کشاورزی دیم به پهنه آب		
۶/۸۹	۶۰/۲۶	کشاورزی دیم به کشاورزی آبی		
۰/۰۷	۰/۶۱	مراتع ضعیف به مراتع غنی		
۱/۱۱	۹/۶۸	مراتع ضعیف به مراتع متوسط		
۰/۱۵	۱/۲۷	مراتع غنی به مراتع ضعیف		
۱/۲۳	۱۰/۷۷	مراتع غنی به مراتع متوسط		
۰/۲۴	۲/۱۳	مراتع متوسط به پهنه آب		
۱/۹۴	۱۶/۹۳	مراتع متوسط به کشاورزی آبی		
۱۷/۱۲	۱۴۹/۶۵	مراتع متوسط به کشاورزی دیم		
۰/۷۵	۶/۶۰	مراتع متوسط به مراتع ضعیف		
۴/۹۷	۴۳/۴۶	مراتع متوسط به مراتع غنی		

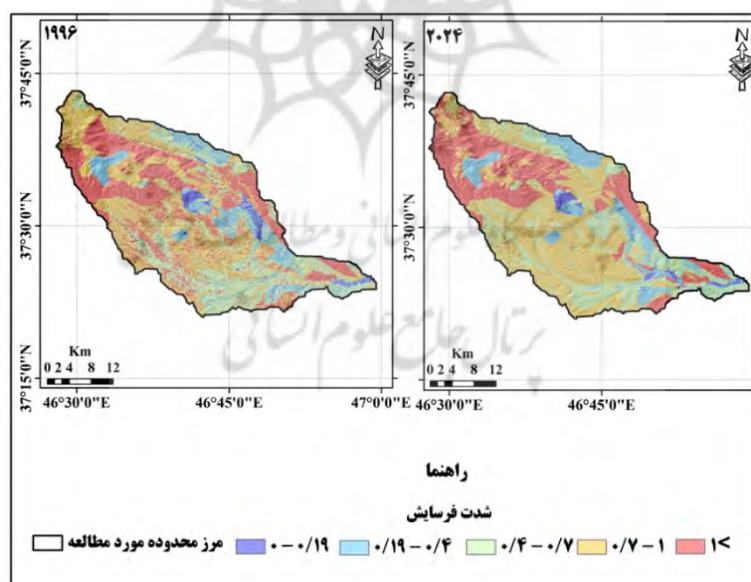
نتایج مدل EPM برای سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴

تحلیل داده‌های جدول (۱۰) و نقشه‌ی شدت فرسایش خاک (شکل ۴) بر اساس مدل EPM نشان می‌دهد که طی دوره‌ی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴ وضعیت فرسایش خاک در منطقه به‌طور کلی تشدید شده است. در سال ۱۹۹۶ حدود ۲,۴۱ درصد از منطقه در طبقه‌ی فرسایش بسیار کم قرار داشت، اما این مقدار در سال ۲۰۲۴ به ۱,۵۶ درصد کاهش یافت که بیانگر افت پایداری بخشی از اراضی است. هم‌زمان، مساحت اراضی با فرسایش کم تا متوسط از ۱۰,۶۸ به ۱۱,۵۳ درصد افزایش یافته که نشان‌دهنده انتقال بخشی از اراضی پایدار به طبقات فرسایشی بالاتر است. در مقابل، اراضی با فرسایش متوسط تا زیاد از ۲۳,۹۹ به ۲۲,۰۲ درصد کاهش داشته‌اند، که می‌تواند حاصل جابه‌جایی به سمت طبقات شدیدتر یا بهبود نسبی در برخی نواحی باشد. مهم‌ترین تغییر مربوط به طبقه‌ی فرسایش زیاد تا بسیار زیاد است که از ۳۳,۱۶ درصد در ۱۹۹۶ به ۳۹,۱۷ درصد در ۲۰۲۴ افزایش یافته و رشد ۱۸ درصدی آن نشان‌دهنده گسترش

نگران‌کننده مناطق بحرانی است. در طبقه‌ی فرسایش بسیار شدید، مساحت از ۲۹,۷۵ به ۲۵,۷۱ درصد کاهش یافته است که احتمالاً ناشی از تخریب کامل برخی اراضی یا اقدامات مدیریتی محدود بوده است. در مجموع، سهم اراضی با فرسایش شدید (طبقات بالاتر از ۰,۷) از ۶۲,۹۱ درصد در سال ۱۹۹۶ به ۶۴,۸۸ درصد در سال ۲۰۲۴ رسیده است. بررسی نقشه‌ها نشان می‌دهد که مناطق مرتعی به‌ویژه در بخش‌های شمالی و مرکزی بیشترین شدت فرسایش را تجربه کرده‌اند؛ عاملی که می‌تواند ناشی از چرای مفرط، کاهش پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی باشد. بدین ترتیب، تغییرات فضایی و عددی به‌روشنی بیانگر روند تشدید فرسایش خاک در منطقه است. این روند علاوه بر تهدید پایداری اکوسیستم‌ها، پیامدهایی همچون کاهش حاصلخیزی خاک، افزایش رسوب‌گذاری و بالا رفتن خطر سیلاب را در پی دارد. بر این اساس، اتخاذ رویکردهای مدیریتی و حفاظتی هدفمند، نظیر عملیات آبخیزداری و تقویت پوشش گیاهی، برای مهار روند فعلی و حفظ منابع طبیعی منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

جدول (۱۰): مساحت و درصد مساحت شدت فرسایش خاک حاصل از مدل EPM

طبقات	درصد مساحت		مساحت (کیلومتر مربع)	
	۲۰۲۴	۱۹۹۶	۲۰۲۴	۱۹۹۶
۰ - ۰/۱۹	۱/۵۶	۲/۴۱	۱۳/۶۴	۲۱/۰۷
۰/۱۹ - ۰/۴	۱۱/۵۳	۱۰/۶۸	۱۰۰/۷۹	۹۳/۳۹
۰/۴ - ۰/۷	۲۲/۰۲	۲۳/۹۹	۱۹۲/۴۶	۲۰۹/۶۹
۰/۷ - ۱	۳۹/۱۷	۳۳/۱۶	۳۴۲/۳۹	۲۸۹/۸۶
> ۱	۲۵/۷۱	۲۹/۷۵	۲۲۴/۷۳	۲۵۹/۹۹



شکل (۴): نقشه شدت فرسایش خاک محدوده مورد مطالعه بین سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۴

نتایج پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی فرآیندهای فرسایش و رسوب

جدول (۱۱) نتایج محاسبات مربوط به فرسایش و رسوب حوضه آبخیز را در دو مقطع زمانی ۱۹۹۶ و ۲۰۲۴ نشان

می‌دهد.

جدول (۱۱): پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه فرسایش و رسوب و نتایج آن‌ها

ردیف	عوامل	مقادیر
۱	متوسط بارندگی سالانه (H) بر حسب میلی‌متر	۱۹۹۶ ۱۹۲ ۲۰۲۴ ۳۶۲
۲	متوسط دمای سالانه (t) بر حسب درجه سانتی‌گراد	۱۰/۵
۳	ضریب درجه حرارت (T)	۱/۰۷
۴	متوسط ضریب شدت فرسایش (Z)	۱۹۹۶ ۰/۹ ۲۰۲۴ ۰/۹۲
۵	طول حوضه (L) به کیلومتر	۸۰/۷۹
۶	محیط حوضه (P) به کیلومتر	۱۵۶/۳
۷	مساحت حوضه (A) به کیلومتر مربع	۸۷۴
۸	ارتفاع متوسط حوضه (Dav) به متر	۲۰۰۳/۰۸
۹	ارتفاع نقطه خروجی رودخانه (Du) به کیلومتر	۱۵۲۶
۱۰	اختلاف ارتفاع (D) به کیلومتر	۰/۴۷۷
۱۱	ضریب رسوب دهی حوضه (Ru)	۰/۳۸
۱۲	Pi	۳/۱۴
۱۳	متوسط سالانه فرسایش ویژه (Wsp) بر حسب مترمکعب در سال در کیلومتر مربع	۱۹۹۶ ۵۸۱/۸۶ ۲۰۲۴ ۱۱۲۱/۴۳
۱۴	متوسط دبی رسوب ویژه (Gsp) بر حسب مترمکعب در سال در کیلومتر مربع	۱۹۹۶ ۲۲۱/۳۷ ۲۰۲۴ ۴۲۶/۶۶
۱۵	رسوب کل (Gs) بر حسب مترمکعب در سال در کیلومتر مربع	۱۹۹۶ ۱۹۳۴۸۴/۴ ۲۰۲۴ ۳۷۲۹۰۵/۳
۱۶	ایستگاه چپینی	۱۹۹۶ ۱۹۰۹۹۰/۹ ۲۰۲۴ ۳۶۷۸۷۲/۵

تحلیل داده‌ها حاکی از آن است که بارندگی سالانه از ۱۹۲ میلی‌متر در سال ۱۹۹۶ به ۳۶۲ میلی‌متر در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته که این رشد تقریباً دو برابری، محرک اصلی تشدید رواناب و فرسایش در منطقه است. در همین راستا، ضریب شدت فرسایش نیز از ۰/۹ به ۰/۹۲ افزایش یافته که بیانگر شرایط حساس‌تر حوضه نسبت به فرآیندهای فرسایشی است. از نتایج مدل مشخص است که فرسایش ویژه از ۵۸۱/۸۶ مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۶ به ۱۱۲۱/۴۳ مترمکعب در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته؛ یعنی رشدی نزدیک به دو برابر. به موازات آن، دبی رسوب ویژه نیز از ۲۲۱/۳۷ به ۴۲۶/۶۶ مترمکعب بر کیلومتر مربع رسیده و این امر منجر به افزایش کل رسوب تولیدی از ۱۹۳،۴۸۴،۴ به ۳۷۲،۹۰۵،۳ مترمکعب در سال شده است. داده‌های ایستگاه زمینی چپینی نیز این روند را تأیید کرده و از افزایش ۱۹۰،۹۹۰،۹ مترمکعب در سال ۱۹۹۶ به ۳۶۷،۸۷۲،۵ مترمکعب در سال ۲۰۲۴ حکایت دارد. به طور کلی، نتایج جدول نشان می‌دهند که طی حدود سه دهه گذشته، حوضه آبخیز مورد مطالعه با افزایش چشمگیر بارندگی و در نتیجه رشد قابل توجه فرسایش و رسوب مواجه بوده است. این تغییرات نه تنها بیانگر تغییرات اقلیمی و تشدید فرآیندهای طبیعی هستند، بلکه می‌توانند پیامدهای جدی زیست‌محیطی و اقتصادی از جمله کاهش حاصلخیزی خاک،

رسوب‌گذاری در مخازن و افزایش خطر سیلاب به همراه داشته باشند. از این رو، لزوم اتخاذ رویکردهای مدیریتی نظیر احیای پوشش گیاهی، مدیریت کاربری اراضی، و اجرای اقدامات مکانیکی مانند احداث سازه‌های رسوب‌گیر بیش از پیش احساس می‌شود.

نتایج رابطه بین کاربری اراضی، شیب زمین و شدت فرسایش خاک

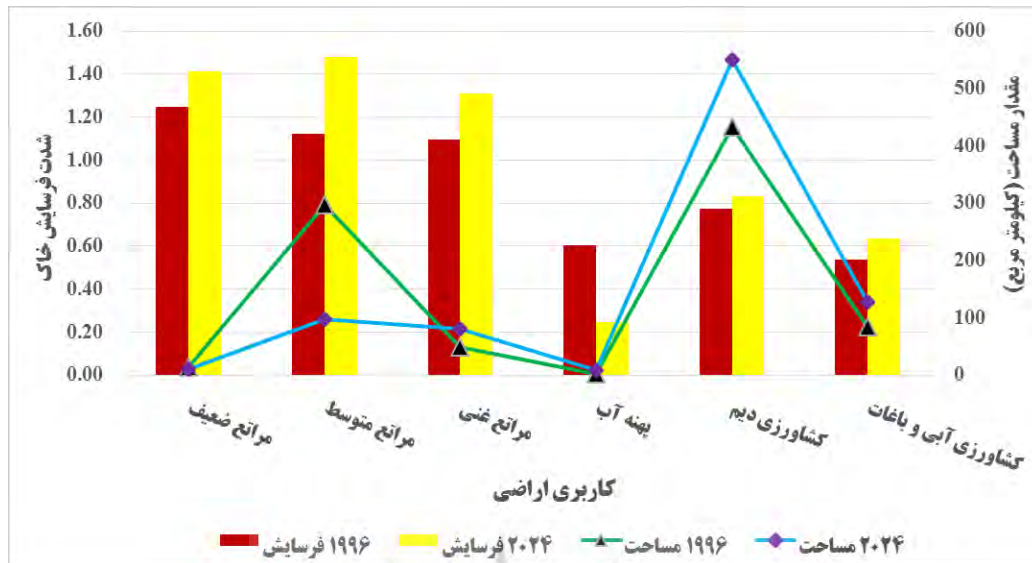
جدول (۱۲) و اشکال (۵ و ۶) تغییرات فرسایش خاک و مساحت کاربری‌های مختلف اراضی در سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد.

جدول (۱۲): مقدار فرسایش در طبقات شیب، کاربری‌های مختلف و مساحت آن‌ها

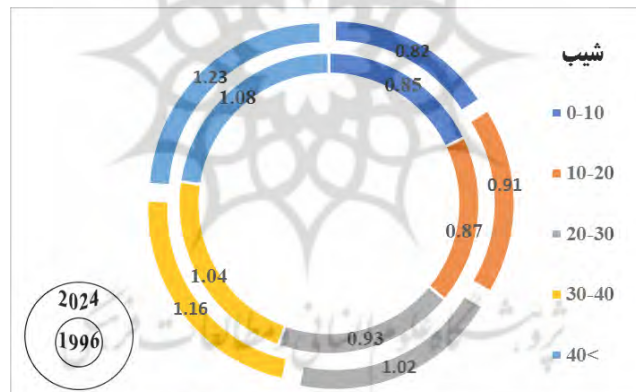
مقدار فرسایش کاربری مراتع ۲۰۲۴	مقدار فرسایش کاربری مراتع ۱۹۹۶	مساحت کاربری مراتع ۲۰۲۴	مساحت کاربری مراتع ۱۹۹۶	مساحت	فرسایش	فرسایش کاربری
۱/۴۰	۱/۱۵	۱۸۹/۰۱	۳۵۷/۸۱	۹۷/۹۵	۲۹۶/۳۷	۱/۱۲
۱/۴۱	۱/۲۵	۱۳/۳۵	۱۰/۹۴	۸۰/۱۲	۴۸/۰۹	۱/۳۱
۷/۷۹	۰/۶۱	۰/۲۵	۱	۵۴۹/۹۱	۳۴۱/۸۸	۰/۸۳
۱۲۷/۵۸	۰/۵۴	۰/۶۳	۸۳/۵۲	۱۲۷/۵۸	۸۳/۵۲	۰/۶۳
شیب						
۰/۸۲	۰/۸۵	۰-۱۰	۰/۸۵	۰/۸۲	۰-۱۰	۰/۸۵
۰/۹۱	۰/۸۷	۱۰-۲۰	۰/۸۷	۰/۹۱	۱۰-۲۰	۰/۸۷
۱/۰۲	۰/۹۳	۲۰-۳۰	۰/۹۳	۱/۰۲	۲۰-۳۰	۰/۹۳
۱/۱۶	۱/۰۴	۳۰-۴۰	۱/۰۴	۱/۱۶	۳۰-۴۰	۱/۰۴
۱/۲۳	۱/۰۸	>۴۰	۱/۰۸	۱/۲۳	>۴۰	۱/۰۸

نتایج بیانگر آن است که در مراتع ضعیف فرسایش از ۱,۲۵ به ۱,۴۱ تن در هکتار افزایش یافته و مساحت آن از ۱۳,۳۵ به ۱۰,۹۴ کیلومتر مربع کاهش یافته است. در مراتع متوسط فرسایش از ۱,۱۲ به ۱,۴۸ تن در هکتار و مساحت از ۲۹۶,۳۷ به ۹۷,۹۵ کیلومتر مربع رسیده که کاهش شدیدی را نشان می‌دهد. در مقابل، مراتع غنی از نظر مساحت از ۴۸,۰۹ به ۸۰,۱۲ کیلومتر مربع گسترش یافته و میزان فرسایش آن نیز از ۱,۱۰ به ۱,۳۱ تن در هکتار افزایش یافته است. در پهنه‌های آبی، مساحت از ۱ به ۷,۷۹ کیلومتر مربع افزایش یافته اما فرسایش از ۰,۶۱ به ۰,۲۵ تن در هکتار کاهش داشته است. کشاورزی دیم رشد محسوسی داشته و مساحت آن از ۴۳۱,۸۸ به ۵۴۹,۹۱ کیلومتر مربع رسیده و میزان فرسایش از ۰,۷۷ به ۰,۸۳ تن در هکتار افزایش یافته است. همچنین در کشاورزی آبی و باغات مساحت از ۸۳,۵۲ به ۱۲۷,۵۸ کیلومتر مربع و فرسایش از ۰,۵۴ به ۰,۶۳ تن در هکتار افزایش یافته است. از نظر شیب، داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شیب، میزان فرسایش نیز افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که در شیب‌های کمتر از ۱۰ درصد فرسایش حدود ۰,۸۲ تن در هکتار بوده و در شیب‌های بیش از ۴۰ درصد به ۱,۲۳ تن در هکتار در سال ۲۰۲۴ رسیده است. به طور کلی، نتایج جدول نشان می‌دهد که در بازه مورد مطالعه، بیشتر کاربری‌های اراضی با افزایش

فرسایش و تغییرات قابل توجه در مساحت مواجه شده‌اند. کاهش مساحت مراتع متوسط و ضعیف در کنار گسترش کشاورزی دیم و آبی و همچنین افزایش پهنه‌های آبی از تغییرات برجسته این دوره محسوب می‌شود.



شکل (۵): نمودار مقدار فرسایش در کاربری های مختلف و مساحت آن‌ها



شکل (۶): نمودار مقدار فرسایش در طبقات شیب

بحث و نتیجه‌گیری

برآیند شواهد فیزیوگرافی، نقشه‌ها و جداول (۵-۲، ۵-۳، ۵-۴، ۵-۵ و ۵-۶) نشان می‌دهد حوضه‌ی مطالعه‌شده پتانسیل بالایی برای فرسایش دارد و طی ۱۹۹۶-۲۰۲۴ این پتانسیل بالفعل‌تر شده است. کشیدگی زیاد حوضه (نسبت شکل ۰,۱۳، نسبت کشیدگی ۰,۴۱)، اختلاف ارتفاع زیاد (حدود ۱۹۸۹ متر) تراکم زهکشی ۲,۳۰ و فاکتور ناهمواری بالا همگی شرایط تمرکز سریع رواناب و تشدید انرژی فرسایشی را فراهم می‌کنند. این چارچوب فیزیوگرافی با الگوی مکانی نقشه‌های شدت فرسایش هم‌خوان است؛ به‌طوری که سهم طبقات زیاد تا بسیار زیاد از ۳۳,۱۶٪ در ۱۹۹۶ به ۳۹,۱۷٪ در ۲۰۲۴ افزایش یافته و مجموع اراضی با فرسایش شدید از ۶۲,۹۱٪ به ۶۴,۸۸٪ رسیده است. در

حوزه‌ی کاربری اراضی، ساختار سرزمین از مراتع (به‌ویژه مراتع متوسط) به سمت کشاورزی—به‌خصوص کشاورزی دیم و سپس توسعه کشاورزی آبی/ باغات جابجا شده است. مساحت مراتع متوسط از ۲۹۶,۳۷ به ۹۷,۹۱ km² کاهش و هم‌زمان کشاورزی دیم از ۴۳۱,۶۸ به ۵۴۹,۷۷ km² و کشاورزی آبی/باغات از ۸۳,۵۱ به ۱۲۷,۵۶ km² افزایش یافته است. افزایش پهنه‌های آبی (از ۱ به ۷,۷۹ km²) نیز—هم‌راستا با شواهد نقشه‌ها نشان از شکل‌گیری مخزن/سد و اثرگذاری آن بر الگوی بهره‌برداری و رسوب دارد. این تغییرات کاربری با روند افزایشی شاخص‌های رسوب‌دهی مدل EPM هم‌زمان است: فرسایش ویژه از ۵۸۱,۸۶ به ۱۱۲۱,۴۳ m³ km⁻² yr⁻¹، دبی رسوب ویژه از ۲۲۱,۳۷ به ۴۲۶,۶۶ m³ km⁻² yr⁻¹ و رسوب کل از ۱۹۳,۴۸۴ به ۱۳۷۲,۹۰۵ m³ yr⁻¹ افزایش یافته؛ اندازه‌گیری‌های ایستگاه چپینی نیز همین جهش را تأیید می‌کند. از منظر توپوگرافی، افزایش فرسایش با افزایش شیب قابل مشاهده است (مثلاً در $1,23 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$، که با فهم مکانیکی فرسایش شیب‌ری و سطحی سازگار است. این جمع‌بندی از نظر صحت نقشه‌ها پشتوانه‌ی قابل‌قبولی دارد؛ دقت کلی و کاپا از ۰,۸۹۱/۰,۹۰,۴۷ در ۱۹۹۶ به ۰,۹۲۳/۰,۹۳,۶۱ در ۲۰۲۴ بهبود یافته است. یافته‌ی ما مبنی بر نقش تعیین‌کننده‌ی تغییر کاربری (کاهش مراتع و گسترش کشاورزی) در افزایش فرسایش و رسوب با مطالعات متعددی سازگار است که نشان داده‌اند تغییر کاربری می‌تواند بار رسوب و پاسخ هیدرولوژیک حوضه را تشدید کند (مثلاً افزایش رسوبات و مواد مغذی در پی تبدیل اراضی)؛ این نتیجه در پژوهش‌های صورت‌گرفته در ایران و سایر مناطق نیمه‌خشک نیز گزارش شده است (Mohammadi et al., 2021).

حساسیت فرسایش به شیب مشاهده‌شده در داده‌های ما افزایش منظم فرسایش از کلاس‌های شیب کم به زیاد با نتایج آزمایشگاهی و میدانی اخیر هم‌خوان است که رابطه‌ی افزایشی شیب با نرخ اتلاف خاک را نشان داده‌اند و ریشه در معادلاتی چون USLE دارد (Wang et al., 2023). هم‌سویی افزایش بارندگی سالانه‌ی مشاهده‌شده در این حوضه (از ۱۹۲ به ۳۶۲ mm) با افزایش برآوردهای فرسایش/رسوب، با مطالعات مدل‌سازی سناریوهای اقلیمی که نشان می‌دهند تقویت بارش یا رگبارها می‌تواند فرسایش و تولید رسوب را بالا ببرد، سازگار است؛ با این حال برخی برآوردهای سراسری برای ایران کاهش آتی فرسایش‌دهی بارش را در بخشی از استان‌ها پیش‌بینی کرده‌اند نکته‌ای که بر ناهمگنی مکانی—زمانی و ضرورت ارزیابی‌های محلی تأکید دارد (Chen et al., 2020). به‌کارگیری روش EPM و افزایش شاخص‌های Z و خروجی‌های Wsp/Gsp/Gs در دوره‌ی اخیر با کاربردهای گسترده‌ی این روش در حوضه‌های نیمه‌خشک و نتایج تحلیل حساسیت آن وابستگی شدید خروجی‌ها به پارامترهای کاربری/پوشش و اقلیم سازگار است؛ بنابراین، تفسیر نتایج همراه با دقت‌سنجی و کنترل عدم قطعیت ضروری است (Dragičević et al., 2017). با توجه به رشد کلاس‌های فرسایشی بالا، جابه‌جایی از مراتع به کشاورزی، و حساسیت بالای فرسایش به شیب، بسته‌ای از اقدامات توصیه می‌شود: حفاظت و احیای پوشش مرتعی در شیب‌های میانی و زیاد، بهینه‌سازی الگوی کشت و گسترش کشاورزی حفاظتی (کشت حداقلی، کاه‌پوش)، سازه‌های رسوب‌گیر در آبراهه‌های پرشیب، و پایش بارش—فرسایش با تمرکز بر رخدادهای رگباری. این توصیه‌ها با شواهد بین‌المللی درباره‌ی نقش کاربری، شیب و بارش در کنترل رسوب هم‌راستا است (Mohammadi et al., 2021).

۱. ابراهیم زاده، سمیه، ارگانی، میثم و میردار هریجانی، فرشاد. (۱۴۰۳). مدلسازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل RUSLE/SDR در حوضه آبریز دیزگران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳(۳۹)، ۱-۲۴.
۲. آرخی، صالح و بارانی، حسین. (۱۴۰۳). مقایسه مدل‌های RUSLE و EPM در برآورد فرسایش و تولید رسوب با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه چم‌گردلان استان ایلام). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۳(۲)، ۳۳۹-۳۷۱.
۳. اصغری سراسکانرود، صیاد، آقایاری، لیلا، و پیروزی، الناز. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات کاربری اراضی و تاثیر آن بر فرسایش با استفاده از RS و GIS (مطالعه موردی: شهرستان نیر). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)، ۸(۴) (پیاپی ۲۹)، ۴۹-۶۲.
۴. ایزدی پور، محمد امین، دهمرده بهروز، رضا، عین الهی پیر، فاطمه و رجائی، فاطمه. (۱۴۰۴). تحلیل مکانی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها بر مبنای الگوی کاربری اراضی در منطقه سیستان. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۴(۱)، ۲۲-۴۲.
۵. بدری، مرجان، (۱۴۰۳)، مروری بر روند فرسایش و تخریب خاک و راهکارهای حفاظت از آن در ایران، پنجمین کنفرانس ملی توسعه و ترویج مهندسی کشاورزی و علوم خاک در جامعه، تهران.
۶. بیات، رضا، عرب خدري، محمود، بهنام، نجمه، گرامی، زهرا. (۱۳۹۹)، بررسی کارایی مدل‌های EPM و MPSIAC در تعیین وضعیت فرسایش حوزه آبخیز شهریار. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۷ (۳): ۱-۱۶.
۷. بیاتی خطیبی، مریم و ساری صراف، بهروز. (۱۴۰۱). سنجش کمی توان فرسایشی رواناب‌ها در سطوح شیب‌دار نواحی کوهستانی مطالعه موردی: زیرحوضه آتش‌بیگ. مجله جغرافیا و توسعه، ۲۰(۶۷)، ۸۲-۱۰۲.
۸. جعفری، تیمور، ناعمی تبار، مهناز، و ذاکریان، سیداحمد. (۱۳۹۷). ارزیابی کمی فرسایش آبی خاک با مدل EPM (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بدرانلو). جغرافیا و برنامه ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، ۲۹(۷۰)، ۱۴۱-۱۵۸.
۹. روستایی، شهرام، حجازی، میر اسدالله و شیرزادی، هدیه. (۱۴۰۴). برآورد میزان فرسایش و رسوب حوضه آبریز زیمکان در استان کرمانشاه با تأکید بر متغیرهای تأثیرگذار. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۴(۱)، ۲۱۰-۲۲۶.
۱۰. شاه کرمی، عزیزاله، عالی نژادیان بیدآبادی، افسانه، ملکی، عباس و فیضیان، محمد. (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات عملیات حفاظت خاک و آب بر ویژگی‌های خاک، فرسایش و رسوب در حوضه‌ی آبخیز ریمله استان لرستان. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۱)، ۱۵-۲۸.

۱۱. عابدینی، موسی، فتحی جوکندان، رقیه و پاسبان، امیرحسام. (۱۴۰۳). برآورد فرسایش و رسوب از طریق ارزیابی متغیرهای تأثیرگذار در حوضه آبریز کرگانرود با استفاده از روش EPM. جغرافیا و روابط انسانی، ۱۷(۱)، ۶۵۸-۶۷۲.

۱۲. عبادی، الهامه، اسفندیاری درآباد، فریبا، اصغری، صیاد و مصطفی زاده، رئوف. (۱۴۰۳). ارزیابی پتانسیل فرسایش خاک در سطح حوضه آبریز فیروزآبادچای با استفاده از شاخص های ژئومورفیک و منطق فازی. جغرافیا و روابط انسانی، ۱۷(۱)، ۱۷۸-۱۸۵.

۱۳. کریمی، سمیه، رجبی، معصومه و رضایی مقدم، محمد حسین. (۱۳۹۹). ارزیابی و پهنه بندی فرسایش خاک در مناطق کارستی با استفاده از مدل SMLRK (مطالعه موردی: حوضه الوند، استان کرمانشاه). جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۴(۷۴)، ۱۹۷-۲۱۴.

۱۴. مزبانی، مهدی، رضایی مقدم، محمد حسین و حجازی، اسداله. (۱۴۰۰). ارزیابی خطر فرسایش خاک در کاربری های اراضی با استفاده از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیکان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۱)، ۴۱-۶۳.

۱۵. معتمدی راد، محمد، زنگنه اسدی، محمد علی و عجم، حسین. (۱۴۰۲). بررسی میزان فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از مدل RUSLE و روش پسیاک اصلاح شده (مطالعه موردی: حوضه آبریز کال اسماعیل دره شهرستان شاهرود استان سمنان). پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۴)، ۱۴۷-۱۶۵.

۱۶. نعمتی، مینا، فرجی، آیلین و مختارپور، اسماعیل. (۱۴۰۲). اثربخشی عملیات آبخیزداری در کاهش فرسایش و رسوب حوزه آبخیز نکارود در استان مازندران. ترویج و توسعه آبخیزداری، ۱۱(۴۳)، ۵۰-۶۲.

۱۷. نی نیوا، سید پدram و ستاروند، عاطفه. (۱۴۰۲). ارزیابی و تخمین شدت فرسایش خاک در زیر حوضه چهل گزی استان کردستان. ترویج و توسعه آبخیزداری، ۱۰(۳۹)، ۳۸-۴۷.

1. Adeyeri, O. E., Folorunsho, A. H., Adeliyi, T. E., Ayegbusi, K. I., Akinsanola, A. A., Ndehedehe, C. E., ... & Babalola, T. E. (2024). Climate change is intensifying rainfall erosivity and soil erosion in West Africa. *Science of The Total Environment*, 955, 177174.
2. Alebachew, E. D., Wolka, K., Molla, M. B., Emiru, N. C., Dengiz, O., & Agbor, D. T. (2025). SWAT-based soil erosion and sediment yield modeling in the upper Gilgel Abay catchment, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Scientific Reports*, 15(1), 28821.
3. Alemayehu, S., Getahun, E., & Jothimani, M. (2025). Spatial and temporal analysis of soil erosion and sediment yield in the shafe watershed, main ethiopian rift region: integrating RUSLE model, GIS, and remote sensing techniques. *Discover Sustainability*, 6(1), 1-31.
4. Bezak, N., Borrelli, P., Mikoš, M., Auflič, M. J., & Panagos, P. (2024). Towards multi-model soil erosion modelling: An evaluation of the erosion potential method (EPM) for global soil erosion assessments. *Catena*, 234, 107596.

5. Chen, C. N., Tfwala, S. S., & Tsai, C. H. (2020). Climate change impacts on soil erosion and sediment yield in a watershed. *Water*, 12(8), 2247.
6. Dragičević, N., Karleuša, B., & Ožanić, N. (2017). Erosion potential method (Gavrilović method) sensitivity analysis.
7. Elaloui, A., Khalki, E. M. E., Namous, M., Ziadi, K., Eloudi, H., Faouzi, E., ... & Chehbouni, A. (2022). Soil erosion under future climate change scenarios in a semi-arid region. *Water*, 15(1), 146.
8. Mohammadi, M., Khaledi Darvishan, A., Spalevic, V., Dudic, B., & Billi, P. (2021). Analysis of the impact of land use changes on soil erosion intensity and sediment yield using the intero model in the talar watershed of Iran. *Water*, 13(6), 881.
9. Parente, J., Girona-García, A., Lopes, A. R., Keizer, J. J., & Vieira, D. C. S. (2022). Prediction, validation, and uncertainties of a nation-wide post-fire soil erosion risk assessment in Portugal. *Scientific Reports*, 12(1), 2945.
10. Reta Roba, Z., Moisa, M. B., Purohit, S., Tsegay Deribew, K., & Obsi Gemeda, D. (2025). Assessment of soil erosion and sediment yield in response to land use and land cover changes using geospatial techniques in Dumuga Watershed, Ethiopia. *All Earth*, 37(1), 1-18.
11. Wang, J., Yang, J., Li, Z., Ke, L., Li, Q., Fan, J., & Wang, X. (2024). Research on soil erosion based on remote sensing technology: A review. *Agriculture*, 15(1), 18.
12. Wang, L., Li, Y., Wu, J., An, Z., Suo, L., Ding, J., ... & Jin, L. (2023). Effects of the rainfall intensity and slope gradient on soil erosion and nitrogen loss on the sloping fields of miyun reservoir. *Plants*. 12, 423.
13. Zhao, Y., Zhu, D., Wu, Z., & Cao, Z. (2024). Extreme rainfall erosivity: Research advances and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 917, 170425.