

ارزیابی مقایسه‌ای برآوردهای فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز دولت‌آباد با استفاده از مدل‌های EPM، MPSIAC و IntErO

جبار هادی قورقی^۱، سعید درختی^۲، زهرا عبداللهی^۳، لیلا غلامی^۴، عبدالواحد خالدی درویشان^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

چکیده

فرسایش خاک از جمله مشکلات مهم محیط‌زیستی است که می‌تواند کشور را تحت تأثیر قرار دهد؛ به همین دلیل، برآورد فرسایش خاک می‌تواند برای تصمیم‌گیران کمک‌کننده باشد. از طرفی، یکی از روش‌های برآورد فرسایش و رسوب استفاده از مدل‌هاست. بنابراین هدف این پژوهش ارزیابی مقایسه‌ای برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز دولت‌آباد دهگلان در استان کردستان، با استفاده از مدل‌های EPM، MPSIAC و IntErO است. برای این منظور، عوامل نه‌گانه مؤثر در مدل MPSIAC ارزش‌گذاری شدند. سپس با استفاده از مجموع این ۹ عامل فرسایش و رسوب حوزه محاسبه شد. در مرحله بعد، برای برآورد میزان فرسایش و رسوب حوزه آبخیز با استفاده از روش EPM چهار مشخصه شامل ضریب فرسایش حوزه (Ψ)، ضریب استفاده از زمین (X_a)، شیب متوسط حوزه (I) و ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) در واحدهای مختلف اراضی بررسی گردید. در نهایت، مدل IntErO که از نقشه‌های توپوگرافی، خاک، زمین و کاربری اراضی و همچنین داده‌های هواشناسی برای برآورد فرسایش و رسوب استفاده می‌کند، اجرا شد. نتایج نشان داد که متوسط فرسایش به‌دست‌آمده در سه مدل EPM، MPSIAC و IntErO به‌ترتیب برابر ۹/۰۳۴ تن در هکتار در سال، ۱۳/۸۸ تن در هکتار در سال و ۱۰/۰۱ تن در هکتار در سال است و مقدار رسوب سالانه مدل‌های EPM، MPSIAC و IntErO به‌ترتیب برابر ۲/۷۴، ۲/۶۵ و ۲/۸۸ تن در هکتار در سال است. براساس نتایج این پژوهش، مدل‌های EPM، MPSIAC و IntErO به‌ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۱۲ کم‌برآوردی و مدل IntErO ۰/۱۱ بیش‌برآوردی، در برآورد رسوب سالانه دارند. بنابراین به‌دلیل سادگی و صرفه‌جویی در زمان و هزینه، استفاده از این مدل‌ها در برآورد فرسایش خاک و رسوب توصیه می‌شود. هرچند پیشنهاد می‌شود که مدل IntErO در حوزه‌های آبریز بزرگ کشور هم برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: حوزه آبخیز دولت‌آباد، فرسایش و رسوب، مدل IntErO، مدل EPM، مدل MPSIAC

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، کردستان، ایران، j.hadi88@gmail.com

۲. دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، s.drakhti@gmail.com

۳. عضو هیئت‌علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی زنجان، زنجان، ایران، abdollahi.zhr.65@gmail.com

۴. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، نویسنده مسئول، l.gholami@sanru.ac.ir

۵. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، a.khaledi@modares.ac.ir

مقدمه

تخریب منابع طبیعی و مسائل فرسایش خاک و تولید رسوب شرایط را برای ادامه زندگی انسان با مشکلاتی روبه‌رو کرده است. فرسایش خاک از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی است (مورگان،^۱ ۲۰۰۹). به گزارش یانگ^۲ و همکاران (۲۰۰۳) در میان انواع مختلف فرسایش، ۵۵٪ آن به فرسایش آبی اختصاص دارد و تولید مواد غذایی را در سطح جهانی به میزان ۱۶٪ کاهش داده است. مسئله فرسایش و رسوب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به عنوان مانع بزرگی در راه پیشرفت اقتصادی جوامع به شمار می‌رود (زاپاتا،^۳ ۲۰۰۳). فرسایش در قرن بیستم به یک بحران جهانی مبدل شد و در قرن بیست و یکم به دلیل تأثیر آن بر امنیت غذایی، بهره‌وری کشاورزی، محیط‌زیست و کیفیت زندگی به طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفت (آگبو،^۴ ۲۰۲۱).

فائو^۵ (۲۰۰۵) گزارش کرد که تخریب خاک بر اثر فعالیت‌های انسانی از نظر شدت در چهار گروه با تخریب کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد با وسعت جهانی به ترتیب ۳۴۲/۹۱۷ (۳۷/۷٪)، ۳۹/۴۴۰ (۴/۳٪)، ۲۴۰/۴۹۵ (۲۶/۳٪) و ۲۵۵/۱۶۷ (۲۷/۹٪) کیلومتر مربع قرار گرفته است. از این رو، شناخت پدیده فرسایش، تولید رسوب و فاکتورهای مؤثر بر آن می‌تواند کمک مؤثری در جهت ارائه بهترین راه‌حل‌ها در تدوین خط‌مشی سیستماتیک آبخیزداری نموده و ما را به برنامه‌ریزی صحیح، دقیق و مناسب، برای کنترل و مبارزه با این پدیده رهنمون سازد (قضایی، ۲۰۱۳).

از آنجاکه برآورد مقادیر رسوب از طریق ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی پرهزینه و زمان‌بر است، یافتن رویکردها و روش‌هایی برای برآورد دقیق میزان رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز امری ضروری است (اسمعیل‌عوری و همکاران، ۲۰۱۴). در همین راستا، بررسی‌های گسترده در زمینه برآورد فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز از سال‌ها پیش آغاز شده و مدل‌های تجربی و فرایندی متعددی

برای برآورد فرسایش و رسوب تهیه و توسعه یافته‌اند. لولر^۶ و همکاران (۲۰۰۱) و لولر (۲۰۰۸) از فن پین فرسایشی معروف به پین فرسایشی فوتوالکتریک برای نظارت بر رسوب در کرانه کانال و فرسایش خاک استفاده کردند. والینگ^۷ (۲۰۰۵) از روش منشأیابی رسوب در مطالعات فرسایش خاک بهره گرفت. مانو^۸ و همکاران (۲۰۰۹)، مارتیلا و کلاو^۹ (۲۰۱۰) از روش منحنی رتبه‌بندی رسوب برای مطالعات خود در مورد فرسایش خاک استفاده کردند. در سال‌های اخیر، مدل‌سازی در مطالعات ارزیابی فرسایش خاک به جهت درک بهتر فرایند برداشت رسوب، انتقال و رسوب‌گذاری به طور گسترده‌ای مورد توجه محققان مختلف در سراسر جهان قرار گرفته است. سیبکائر و هوفیرکا^{۱۰} (۲۰۰۸)، باگالی و پاتس^{۱۱} (۲۰۱۷)، سینها^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸) با ارزیابی فرایند فرسایش خاک با استفاده از مدل‌های مختلف در مناطق جغرافیایی مختلف اظهار داشتند که مدل‌سازی نسبت به روش‌های معمول دیگر در حوزه‌های آبخیز بزرگ به لحاظ زمان و هزینه مقرون به صرفه بوده و دقت قابل قبولی دارد. هرچند انتخاب مدل به هدف مطالعه، وضعیت حوزه آبخیز و در دسترس بودن داده و اطلاعات بستگی دارد و کاربرد نامناسب آن‌ها باعث ایجاد خطا در میزان رسوب برآوردی می‌شود. همچنین ممکن است یک مدل با مفهوم‌سازی صحیح فرایند فرسایش و رسوب به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات ورودی در بسیاری از مناطق کاربردی نداشته باشد (دیدان،^{۱۳} ۲۰۱۷). مدل‌های فیزیکی با دقت بالا از جمله EUROSEM (کیتون^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۱)، KINEROS (مارتینز کارراس^{۱۵} و همکاران، ۲۰۰۷)، LISEM (هسل^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۱) به سبب نیاز به اطلاعات ورودی زیاد برای تخمین مقدار فرسایش در مقیاس حوزه آبخیز کاربرد چندانی ندارند. مدل‌های مفهومی از قبیل AGNPS (والینگ و همکاران،

6. Lawler

7. Walling

8. Mano

9. Marttila & Klove

10. Cebecauer & Hofierka

11. Baggeley & Potts

12. Sinha

13. Didone

14. Quinton

15. Martinez-Carreras

16. Hessel

1. Morgan

2. Yang

3. Zapata

4. Agbo

5. Fao

داشته و به همین دلیل در صورت ورود اطلاعات غیرمنطقی هشدار می دهد و اجازه محاسبه نتایج را نمی دهد. اجرای این نرم افزار به طور کلی نیازمند ۲۶ ورودی است و در نهایت ۲۲ خروجی را در اختیار قرار می دهد. نرم افزار IntErO می تواند حسب نیاز به صورت نسخه خالص با تعداد ورودی و خروجی کمتر نیز استفاده شود (اسپالوویچ، ۲۰۱۱؛ خالدی درویشان و همکاران، ۲۰۱۹؛ حزبای و همکاران، ۲۰۲۰). مرادی و همکاران (۲۰۱۰) در حوزه آبخیز پوراحمدی واقع در استان هرمزگان میزان فرسایش ویژه و رسوب ویژه را با استفاده از دو مدل EPM و MPSIAC به دست آوردند. نتایج نشان داد که در بعضی از زیرحوزه ها مدل EPM و MPSIAC باهم انطباق خوبی دارند، ولی نتایج مدل EPM در مناطق با فرسایش بالا نسبت به مدل MPSIAC از اطمینان کمتری برخوردار است. قورقی و اوسطی^۴ (۲۰۱۶) نیز در حوزه معرف زوجی خامسان مقدار کل رسوب حوضه را با استفاده از مدل MPSIAC و EPM طی رگبارهای ثبت شده برآورد و گزارش نمودند که مقدار رسوب جمع شده در کرت های خروجی حوضه نمونه ۰/۵۹ و در حوضه شاهد ۰/۰۶۸ تن در هکتار در سال بود. بیات و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی نحوه پراکنش طبقات فرسایش با استفاده از دو مدل MPSIAC و EPM و ارزیابی صحت آن دو با مقادیر واقعیت زمینی در حوزه آبخیز شهریاری پرداختند. نتایج ارزیابی صحت مدل های MPSIAC و EPM نیز نشان داد که مقدار ضریب کاپا در مدل MPSIAC بیشتر از مدل EPM است. ذبیحی سیلابی و خالدی درویشان (۲۰۲۱) در بررسی های خود گزارش نمودند که مدل MPSIAC در مناطق خشک و مدل EPM در مناطق کوهستانی و همچنین برای مدیریت حوزه آبخیز و نیز مدیریت منابع آب نتایج مورد قبولی ارائه می دهند.

ذبیحی سیلابی و خالدی درویشان (۲۰۲۱) با استفاده از مدل IntErO، تأثیر اقدامات مدیریت اراضی بر فرسایش خاک و تولید رسوب را در حوضه آبخیز گلزچای بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که تخصیص قابلیت اراضی در منطقه مطالعاتی، فرسایش و رسوب و حداکثر جریان خروجی را به ترتیب ۷/۱ و

۲۰۰۳)، MMF (مورگان و همکاران، ۲۰۰۸) و SWAT (شن^۱ و همکاران، ۲۰۰۹) نیز به سبب نیاز به بانک اطلاعاتی غنی، محدودیت زمانی و هزینه بالا برای استفاده در مطالعه حاضر و حوزه مطالعاتی دولت آباد با بانک اطلاعاتی محدود انتخاب مناسبی نبودند. مدل تجربی Southwest Inter-Agency Committee (PSIAC) Pacific در سال ۱۹۶۸ توسط کمیته مدیریت آب آمریکا برای محاسبه شدت تولید رسوب مناطق خشک و نیمه خشک غرب ایالت متحده ارائه شد. این مدل توسط جانسن و گبهارت^۲ (۱۹۸۲) مورد تجدید نظر قرار گرفت و تحت عنوان مدل PSIAC اصلاح شده (MPSIAC) در حوضه های مشابه به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت (آگبو، ۲۰۲۱). این مدل اولین بار در ایران در سال ۱۳۵۲ در حوضه آبخیز سد دز استفاده شد (رفاهی، ۲۰۰۳). سپس با توجه به کارایی بالای آن در مقایسه با سایر روش ها و مدل های تجربی در دیگر حوزه های آبخیز کشور مانند دوخواهران، کهیر، زاینده رود، مارون، هلیل رود، دز، سراوان، زيردان، و اوزندره مورد استفاده قرار گرفت. در حال حاضر نیز برای بررسی فرسایش خاک و تولید رسوب در طرح جامع کشور از این روش استفاده می شود. مدل EPM نیز برای اولین بار در کشور یوگسلاوی سابق به کار رفته و در برخی از حوضه های ایران نیز مورد استفاده قرار گرفته است (تنگستانی، ۲۰۰۶؛ صادقی و همکاران، ۲۰۰۸؛ قهاری و حسینی، ۲۰۱۹). از طرفی، مدل IntErO برای پیش بینی شدت فرسایش خاک و حداکثر جریان خروجی از حوزه آبخیز با استفاده از ویژگی های فیزیکی، هواشناسی، زمین شناسی و خاک شناسی کاربرد دارد. این مدل توسط پروفیسور گاوریلوویچ براساس تعیین شدت فرسایش خاک و حداکثر جریان خروجی در حوضه یک رودخانه طبیعی ارائه شده است. این مدل بر پایه مدل EPM است. مدل IntErO اولین بار توسط اسپالوویچ^۳ (۲۰۱۲) در مونته نگرو استفاده شده است. بسته نرم افزاری تهیه شده برای این مدل با زبان برنامه نویسی Delphi ایجاد شده و با سیستم عامل ویندوز سازگار است. این نرم افزار در ورود اطلاعات دقت خاصی

1. Shen

2. Johnson & Gebhart

3. Spalevic

4. Ghorghi & Osati

۲۱۸۳۵۵۸ متر مکعب در سال افزایش یافت و تلفات واقعی خاک در سال (بازده رسوب) در حوضه از ۴۴۰۴۸۲/۴ به ۵۰۱۴۲۱/۳ متر مکعب افزایش یافت. رودریگوئز نتو^۴ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل IntErO و EPM، به برآورد هدررفت خاک در حوزه آبخیز رودخانه ماچادو برزیل پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین هدررفت خاک ۱۸/۲ میلی گرم در هکتار در سال و در مجموع، حدود دو میلیون تن در سال است. در حدود ۸۵ درصد از حوضه، هدررفت خاک بیش از حد قابل تحمل بود که بیشترین میانگین هدررفت خاک در کاربری کشاورزی و مرتعی رخ می داد.

این پژوهش اولاً یک مقایسه جامع بین سه مدل مختلف برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب یعنی MPSIAC، EPM و IntErO در حوزه آبخیز دولت آباد انجام می دهد که تاکنون در این منطقه به صورت همزمان و دقیق انجام نشده است. ازسوی دیگر، استفاده از مدل IntErO که کاربرد محدودی در ایران داشته، و مقایسه عملکرد آن با مدل های رایج تر داخلی با بهره گیری از داده های واقعی رسوب، گامی نو در ارزیابی دقیق تر فرسایش در مناطق مشابه محسوب می شود. این مقایسه نه تنها به شناسایی مدل مناسب تر برای شرایط خاص این حوزه کمک می کند، بلکه می تواند الگویی کارآمد برای مدیریت پایدار منابع خاک و آب در سایر حوزه های مشابه با داده های محدود باشد. با توجه به سوابق تحقیقی صورت گرفته و شرایط حوزه مورد مطالعه که به دلیل شرایط اقلیمی و فعالیت های فزاینده انسانی در معرض تخریب قرار گرفته است و ازطرفی با توجه به محدودیت دسترسی به اطلاعات ورودی که در این حوزه وجود دارد؛ ازاین رو هدف از این پژوهش، ارزیابی مقایسه ای برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز دولت آباد دهگلان است.

مواد و روش ها

- معرفی منطقه مورد مطالعه

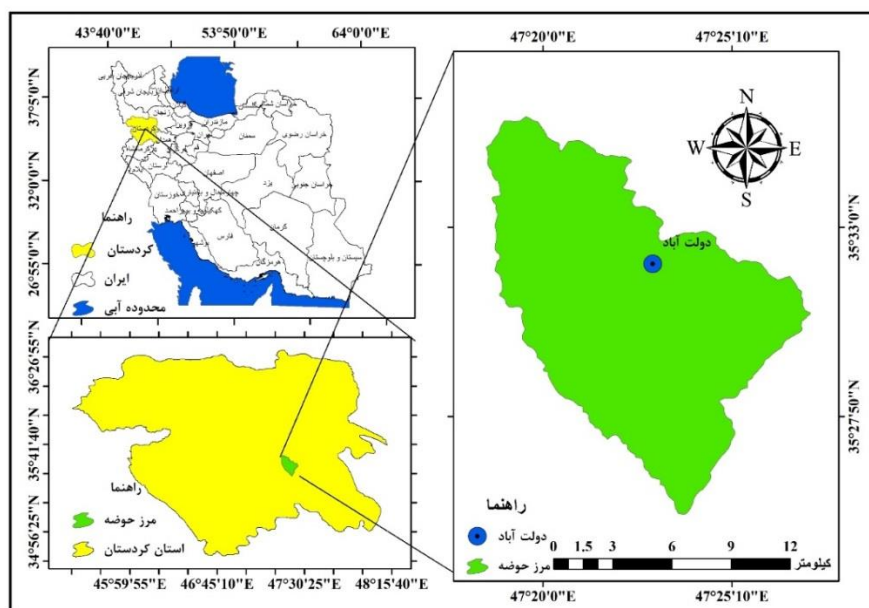
حوزه آبخیز دولت آباد از نظر تقسیم بندی سیاسی در محدوده استان کردستان و از نظر تقسیم بندی استانی در محدوده شهرستان

۱/۳۳ درصد کاهش خواهد داد. در مطالعه ای دیگر، اولالی^۱ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی کاربرد مدل IntErO برای ارزیابی شدت فرسایش و رواناب در حوزه آبخیز رودخانه آریا آچا در مراکش پرداختند. در این مطالعه، ضریب شدت فرسایش، ۰/۶۹۴ دبی حداکثر حوزه آبخیز برای دوره بازگشت صدساله ۱۱۳/۷۲ متر مکعب بر ثانیه و تلفات خاک ۲۲۸/۹۴ متر مکعب بر کیلومتر مربع برآورد شد. خالدی درویشان و همکاران (۲۰۱۸) نیز با استفاده از مدل IntErO، به بررسی تخمین شدت فرسایش خاک و برآورد رسوب در حوزه آبخیز خامسان استان کردستان پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که حداکثر جریان خروجی حوزه آبخیز مورد مطالعه، ۲۷/۵۰ متر مکعب بر ثانیه برای یک دوره بازگشت صدساله و میزان هدررفت خالص خاک از حوضه رودخانه برابر با ۱۲۲۶۳/۴۴ متر مکعب در سال است. روند شدت فرسایش در حوضه خامسان، در حد متوسط و فرسایش غالب حوزه آبخیز مطالعاتی از نوع فرسایش سطحی است. ال مواتاسیم^۲ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل IntErO، به برآورد فرایندهای فرسایش خاک و رواناب در حوزه آبخیز ابیدال و در مراکش پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میزان هدررفت واقعی خاک به ازای هر کیلومتر مربع، حدود ۴۰۲ متر مکعب در سال است. در پژوهشی تاواریز^۳ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل IntErO، به تجزیه و تحلیل پتانسیل فرسایش و بازده رسوب در یک حوضه کارستی در برزیل پرداختند. براساس محاسبات مدل IntErO، ۱۶ درصد از مواد فرسایش یافته به خروجی حوضه هیدروگرافی می رسد و ۸۴ درصد از این رسوبات در داخل حوضه، داخل غارها و کارست های سطحی و زیرزمینی نهشته می شود. محمدی و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه ای با هدف بررسی چگونگی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک، از شدت فرسایش و جریان خروجی مدل IntErO به عنوان یک مدل فرسایش خاک فرایندگرا در حوزه آبخیز تالار استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۳، میزان تولید مواد فرسایشی (فرسایش ناخالص) در حوضه از ۱۹۱۸۱۸۶ به

1. Ouallali
2. El Mouatassime
3. Tavares

دهگلان قرار دارد و در محدوده طول جغرافیایی $۴۷^{\circ} ۱۸' ۲۶''$ تا $۴۷^{\circ} ۲۷' ۰۷''$ و عرض جغرافیایی $۳۵^{\circ} ۲۵' ۵۷''$ تا $۳۵^{\circ} ۱۲' ۲۵''$ قرار گرفته است (شکل ۱). بلندترین نقطه ارتفاعی حوضه دارای ارتفاع ۲۲۰۰ متر و پست‌ترین نقطه ارتفاعی آن دارای ارتفاع ۱۷۹۰ متر از سطح دریاست. براساس مطالعات هواشناسی، منشأ اصلی بارندگی‌های حوزه مورد مطالعه و نواحی اطراف سیستم‌های باران‌زایی است که از بخش غربی به کشور وارد می‌شود و بارندگی‌های فلات ایران را باعث می‌گردند. به‌طور متوسط $۱/۶۲$ درصد بارندگی‌ها در فصل تابستان، $۲۸/۷۱$ درصد در فصل پاییز، $۳۶/۹۸$ درصد در فصل زمستان و $۳۲/۶۹۷$ درصد در فصل بهار اتفاق می‌افتد. متوسط بارندگی کل حوزه $۳۵۶/۵۸$ میلی‌متر برآورد شده است. متوسط حداکثر و حداقل دمای سالانه به‌ترتیب $۱۶/۷$ و $۵/۳۲$ درجه سانتی‌گراد است. تعداد روزهای یخبندان این حوزه

دهگلان قرار دارد و در محدوده طول جغرافیایی $۴۷^{\circ} ۱۸' ۲۶''$ تا $۴۷^{\circ} ۲۷' ۰۷''$ و عرض جغرافیایی $۳۵^{\circ} ۲۵' ۵۷''$ تا $۳۵^{\circ} ۱۲' ۲۵''$ قرار گرفته است (شکل ۱). بلندترین نقطه ارتفاعی حوضه دارای ارتفاع ۲۲۰۰ متر و پست‌ترین نقطه ارتفاعی آن دارای ارتفاع ۱۷۹۰ متر از سطح دریاست. براساس مطالعات هواشناسی، منشأ اصلی بارندگی‌های حوزه مورد مطالعه و نواحی اطراف سیستم‌های باران‌زایی است که از بخش غربی به کشور وارد می‌شود و بارندگی‌های فلات ایران را باعث می‌گردند. به‌طور متوسط $۱/۶۲$ درصد بارندگی‌ها در فصل تابستان، $۲۸/۷۱$ درصد در فصل پاییز، $۳۶/۹۸$ درصد در فصل زمستان و $۳۲/۶۹۷$ درصد در فصل بهار اتفاق می‌افتد. متوسط بارندگی کل حوزه $۳۵۶/۵۸$ میلی‌متر برآورد شده است. متوسط حداکثر و حداقل دمای سالانه به‌ترتیب $۱۶/۷$ و $۵/۳۲$ درجه سانتی‌گراد است. تعداد روزهای یخبندان این حوزه



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure (1): Location of study area

فرسایش آبراهه‌ای (Y_9) در فرسایش و تولید رسوب سطح حوزه آبخیز دولت‌آباد ارزیابی شده است. این مدل با اختصاص معادلات تجربی-ریاضی به هریک از ۹ عامل، مفهوم توصیفی مدل را به مقادیر عددی تبدیل می‌کند. ارزیابی عوامل نه‌گانه مدل مذکور و روابط حاکم بر آن‌ها براساس نمودار جریان‌ی شکل (۲) خلاصه شده است. R در شکل (۲) مقدار رتبه کل برحسب متر مکعب در کیلومتر مربع در سال است. جانسن و

– مدل MPSIAC

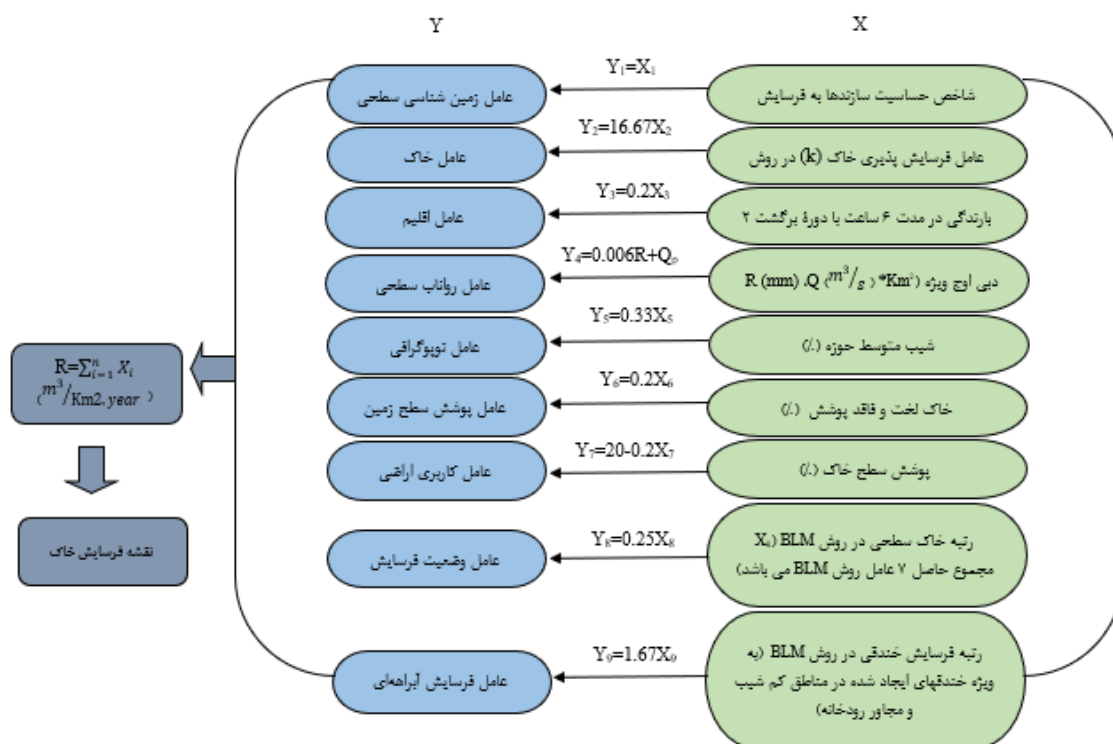
در این مطالعه با استفاده از مدل MPSIAC، نقش و تأثیر ۹ عامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز شامل زمین‌شناسی سطحی (Y_1)، خاک (Y_2)، اقلیم (Y_3)، رواناب سطحی (Y_4)، توپوگرافی (Y_5)، پوشش سطحی زمین (Y_6)، کاربری اراضی (Y_7)، وضعیت فعلی فرسایش (Y_8) و

می‌تواند به‌عنوان یک معیار مقایسه‌ای استفاده شود. همچنین برای برآورد عامل خاک مبنای پیشنهادی توسط ویشمایر و اهمیت در ارزیابی فاکتور فرسایش پذیری خاک (K) مورد استفاده قرار گرفته است (قهراری و حسینی، ۲۰۱۹). در تعیین این پارامتر، فاکتورهای سیلت و شن ریز، درصد شن، درصد ماده آلی، ساختمان خاک و وضعیت نفوذپذیری آن به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی تسهیل‌کننده و کندکننده فرسایش خاک مد نظر قرار گرفته‌اند. مقدار فرسایش‌پذیری خاک (K) براساس دستورالعمل مدل USLE (آگبو، ۲۰۲۱) و با استفاده از اطلاعات حاصل از مطالعه خاک‌شناسی و پروفیل‌های خاک در منطقه مورد بررسی، حاصل می‌شود. سپس با استفاده از رابطه ارائه‌شده در شکل (۲) عامل خاک محاسبه گردید. مقدار عددی این پارامتر از صفر تا ده تغییر می‌کند که طبیعتاً بیشترین آن متعلق به خاک‌های با بافت نرم و سیلتی بوده و کمترین آن به خاک‌های حاوی رس با ساختمان محکم و خاک‌های با ماده آلی فراوان نسبت داده می‌شود. در تعیین فاکتور سطحی خاک هفت عامل حرکت خاک، لاشبرگ سطحی، سنگفرش، مجسمه‌های فرسایشی، شیارها، الگوی جریان و خندق‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

گبهارت (۱۹۸۲) برای بهبود دقت مدل و کنترل معادله، رابطه (۱) را برای تخمین مقدار کل فرسایش خاک با در نظر گرفتن مجموع اعداد به‌دست‌آمده برای عوامل مختلف ارائه نمودند.

(۱) $Q_s = 38.77e^{0.0353R}$

که در آن، Q_s رسوب تولیدی سالیانه در واحد سطح (متر مکعب در کیلومتر مربع در سال)، e عدد ثابت نپرین و R ضریب نمایی (مجموع اعداد فاکتورهای نه‌گانه) است. مقدار وزنی عامل زمین‌شناسی سطحی از صفر تا ده متغیر است. در مطالعه حاضر، برای بررسی حساسیت به فرسایش سنگ‌ها از روش فیض‌نیا استفاده شده که مزیت آن، نسبت به سایر روش‌ها، در نظر گرفتن عامل اقلیم در کنار خصوصیات سنگ‌شناسی است (ذبیحی سیلابی و خالیدی‌درویشان، ۲۰۲۱). با توجه به اقلیم مرطوب سرد در حوزه مطالعاتی، وضعیت مقاومتی سنگ‌ها به فرسایش در جدول (۱) ارائه شده است. باید به این نکته توجه داشت که مسئله فرسایش و هوازگی کاملاً پیچیده است و تنها تغییرات اقلیم و خصوصیات سنگ‌شناسی نمی‌تواند رفتار سنگ را در مقابل فرسایش توجیه کند و یک سنگ مشخص می‌تواند رفتار کاملاً متفاوتی در برابر فرسایش از خود نشان دهد؛ اما با وجود این، روش مذکور



شکل (۲). فرایند تخمین فرسایش خاک و نقشه فرسایش براساس عوامل مؤثر در مدل MPSIAC
Figure (2): Soil erosion estimation process based on effective factors in the MPSIAC model

جدول (۱): طبقه بندی سنگ ها در مقابل فرسایش در منطقه مطالعاتی دولت آباد

Table (1): Classification of rocks against erosion in the study area of Dowlatabad

سن	رده مقاومت	امتیاز	جنس سنگ
	نسبتاً مقاوم به فرسایش	۵	OM ^{S.1} : مارن و مارن آهکی آبی رنگ، کنگلومرا، ماسه سنگ
۳ ۴ ۵	مقاوم به فرسایش	۴	Ng ^v : واحد آذرین، داسیت و داسیتیک آندزیت
	نسبتاً مقاوم به فرسایش	۵/۵	PLQ ^{mc} : تناوبی از کنگلومرا و مارن
	نسبتاً فرسایش پذیر	۶	PI ^{mt} : سنگ آهک رسی، مارن، توف، کنگلومرا و تراورتن
۶ ۷	فرسایش پذیر	۷	PI ^{ta} : سنگ های آذر آواری، توف، توف برش، لایلی توف، پومیس و لاهار PLQ ^{la} : سنگ های آذر آوری از قبیل توف، لایلی توف، پومیس پلیوسن
	نسبتاً مقاوم به فرسایش	۵	Q ^{tr} : تراورتن دارای ضخامت کم، تخلخل بالا و ناخالصی فراوان
۷ ۸ ۹	فرسایش پذیری نسبتاً زیاد	۷/۵	Q ^{t1} : انباشته های آبرفتی و پادگانه ای
		۷/۵	Q ^{t2} : انباشته های آبرفتی و پادگانه ای
	فرسایش پذیری زیاد	۸	Qal: رسوباتی در کف کانال روخانه و آبراهه های بزرگ حوضه

که در آن، SDR نسبت تولید رسوب به درصد و A مساحت حوزه به مایل مربع هستند.

نسبت تحویل رسوب (SDR) درحقیقت نسبت میزان رسوب حمل شده از حوزه آبخیز به فرسایش ناخالص است. فرسایش شامل مجموع فرسایش سطحی، خندقی و کناری در حوزه آبخیز است که با توجه به معادله (۵) عبارت است از:

$$SDR = SY / Erosion \quad (5)$$

که در آن، SDR نسبت تولید رسوب به درصد، SY میزان رسوب دهی و Erosion همان فرسایش ناخالص است.

– مدل EPM

برای برآورد میزان فرسایش و رسوب حوزه آبخیز با استفاده از روش EPM چهار مشخصه شامل ضریب فرسایش حوزه (Ψ)، ضریب استفاده از زمین (X_a)، شیب متوسط حوزه (I) و ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) در واحدهای مختلف اراضی بررسی می گردد. براساس این چهار عامل مقدار Z یا ضریب شدت فرسایش از رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$Z = YX_a(\psi + I^{0.5}) \quad (6)$$

که در آن، به ضریب فرسایش حوزه آبخیز نمره ای بین ۱ (برای فرسایش های عمیق و گالی) و ۰/۱ (برای اراضی فاقد فرسایش) اختصاص داده می شود. بقیه اشکال فرسایش بین این دو عدد قرار می گیرند. برای متغیر ضریب استفاده از زمین (X_a) نمره ۱

به منظور برآورد میزان رسوب مجموع نمرات عوامل نه گانه مدل محاسبه می شود و سپس با استفاده از رابطه (۱) میزان رسوب بر حسب متر مکعب در کیلومتر مربع در سال تخمین زده می شود. سپس با استفاده از رابطه (۲) میزان رسوب دهی به تن در هکتار در سال برآورد می گردد. در همین راستا و با توجه به نتایج به دست آمده طبقه فرسایشی خاک براساس میزان رسوب تولیدی مشخص خواهد شد.

$$Q_s = 0.253 \times e^{0.036R} \quad (2)$$

از آنجاکه این روش مبادرت به تخمین رسوب دهی حوزه مورد مطالعه می کند و لذا کسب اطلاع از وضعیت فرسایش خاک حوزه آبخیز نیز به منظور کنترل در محل فرسایش (on-site) آن بسیار حائز اهمیت بوده و دورنمای بهتری از وضعیت تخریب و هدر رفتن خاک را در حوزه آبخیز عرضه می نماید. بنابراین برای برآورد فرسایش با استفاده از میزان رسوب تولیدی، استفاده از معیاری تحت عنوان نسبت تحویل رسوب (SDR) ضروری است. در این پژوهش، میزان SDR با توجه به معیار مساحت و وضعیت بافت خاک (متوسط) و با کمک روابط زیر محاسبه می شود:

$$SDR = 43.4 A^{-0.1753} \quad (3)$$

مساحت کمتر از ۱۰ مایل مربع

$$SDR = 46.7 A^{-0.2071} \quad (4)$$

مساحت ۱۰ تا ۱۰۰ مایل مربع

- مدل IntEro

مدل IntEro دارای ۲۶ داده ورودی شامل ۱۱ ویژگی فیزیوگرافی و توپوگرافی (مساحت حوضه، محیط حوضه، طول حوضه، مساحت بخش بزرگ‌تر حوضه، مساحت بخش کوچک‌تر حوضه، مقدار کمترین خط تراز، مسافت مساوی بین خطوط تراز، پایین‌ترین نقطه ارتفاعی و بالاترین نقطه ارتفاعی، طول خطوط تراز و مساحت بین خطوط تراز)، ۶ ویژگی خاک‌شناسی و کاربری اراضی (درصد مساحت حوضه با نفوذپذیری کم، متوسط، زیاد، درصد مساحت حوضه شامل جنگل، درصد مساحت حوضه شامل گراس، علفزار، چراگاه و باغ، درصد مساحت حوضه شامل زمین‌های بایر، شخم‌خورده و فاقد پوشش علفی)، ۶ ویژگی هیدرولوژی و هواشناسی (ارتفاع بارندگی سیل‌آسا، متوسط بارش سالانه، متوسط درجه‌حرارت سالانه، کوتاه‌ترین فاصله بین سرشاخه‌ها و خروجی، طول آبراهه اصلی و مجموع طول آبراهه‌های با رتبه ۲ و ۱)، و ۳ ویژگی شدت فرسایش خاک (ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش، ضریب استفاده از زمین و ضریب فرسایش منطقه‌ای) است. برای به دست آوردن این ۲۶ ورودی ابتدا نقشه مدل رقومی ارتفاعی و مرز حوضه استخراج می‌گردد، سپس با استفاده از مرز حوضه، محیط و مساحت محاسبه می‌شود و با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی، مساحت طبقات ارتفاعی و طول خطوط تراز و پس از رتبه‌بندی آبراهه‌ها، مجموع طول آبراهه‌های ۱ و ۲، فاصله نزدیک‌ترین شاخه تا خروجی و طول آبراهه اصلی حاصل می‌شود و با استفاده از آبراهه اصلی، حوضه به دو بخش بزرگ و کوچک تقسیم می‌گردد. همچنین با استفاده از نقشه‌های خاک‌شناسی و کاربری اراضی، درصد مساحت نفوذپذیری و کاربری‌های مختلف مورد نیاز مدل به دست می‌آید. برای محاسبه ویژگی‌های هواشناسی حوضه از متوسط باران سالانه، متوسط درجه‌حرارت سالانه و حداکثر بارش ۲۴ ساعته استفاده می‌شود در نهایت با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ویژگی‌های شدت فرسایش خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد (جدول ۲). در نهایت با وارد کردن این داده‌ها به مدل مقدار فرسایش و جریان خروجی حاصل می‌شود. پارامترهایی که توسط مدل IntEro برای محاسبه تلفات سالانه

به اراضی غیرقابل کشت و لخت و نمره ۰/۰۵ به جنگل‌های مرغوب اختصاص می‌یابد. ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) نیز برای ماسه، شن و خاک‌های رسی نمره ۲ و برای سنگ‌های آذرین متراکم و لخت نمره ۰/۲۵ است. بقیه انواع خاک و سنگ بین این دو عدد قرار می‌گیرند. برای تعیین حساسیت سنگ و خاک به فرسایش مطالعات زمین‌شناسی و خاک‌شناسی در حوزه انجام گرفت (مطالعات تفصیلی اجرایی آبخیزداری حوزه آبخیز دولت‌آباد، ۲۰۱۲) و با توجه به مطالعات صورت‌گرفته و ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش تعیین می‌شود و در نهایت پس از ارزیابی و امتیازدهی این عوامل، میزان رسوب‌دهی ویژه (G_{sp}) از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$G_{sp} = W_{sp} \cdot R_u \quad (7)$$

$$W_{sp} = T \cdot H \cdot Z^{3/2} \cdot \pi \quad (8)$$

$$T = \left(\frac{t}{10} + 0.1 \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$R_u = \frac{4(P \times D)^{1/2}}{L + 10} \quad (10)$$

که در آن، G_{sp} رسوب ویژه برحسب متر مکعب در سال در کیلومتر مربع، W_{sp} فرسایش ویژه برحسب متر مکعب در سال در کیلومتر مربع، R_u ضریب رسوب‌دهی حوزه آبخیز، T ضریب درجه دمای، H متوسط مقدار بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر، Z ضریب فرسایش، π عدد ۳/۱۴۱۵۹، t میانگین دمای سالیانه برحسب سانتی‌گراد، P طول محیط حوزه آبخیز برحسب کیلومتر، D اختلاف ارتفاع متوسط حوزه آبخیز و ارتفاع نقطه خروجی و L طول حوزه آبخیز برحسب کیلومتر است.

سپس فرسایش حوزه (V_p) برحسب متر مکعب در سال و رسوب کل حوزه (G_s) برحسب متر مکعب در سال از رابطه (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردد که در آن W_{sp} فرسایش ویژه برحسب مترمکعب در سال در کیلومتر مربع، G_{sp} رسوب ویژه برحسب مترمکعب در سال در کیلومتر مربع و A مساحت حوزه آبخیز برحسب کیلومتر مربع است.

$$V_p = W_{sp} \times A \quad (11)$$

$$G_s = G_{sp} \cdot A \quad (12)$$

خاک استفاده می شوند، به صورت معادلات زیر هستند (اوالالی و همکاران، ۲۰۲۰).

$$W_{year} = T \times H_{year} \times \pi \times \sqrt{Z^3} \times F \quad (13)$$

که در آن، W_{year} کل فرسایش سالانه (متر مکعب بر سال)، T ضریب دما، H_{year} میانگین بارش سالانه (میلی متر)، F مساحت حوزه آبخیز (کیلومتر مربع) و Z ضریب فرسایش است که از رابطه (۱۴) محاسبه می شود.

$$Z = Y \times X \times (\phi \sqrt{I}) \quad (14)$$

که در آن، Y ضریب فرسایش پذیری خاک، X ضریب حفاظت خاک و ϕ ضریب توسعه فرسایش است. آورد رسوب واقعی

نیز از رابطه (۱۵) محاسبه می شود.

$$G_{year} = W_{year} \times Ru \quad (15)$$

که در آن، G_{year} آورد رسوب واقعی (متر مکعب در سال)، W_{year} کل فرسایش سالانه (متر مکعب بر سال) و Ru نسبت تحویل رسوب است که از رابطه (۱۶) به دست می آید.

$$Ru = \frac{\sqrt{O \times D}}{2(L + 10)} \quad (16)$$

که در آن، O محیط حوضه به کیلومتر، D میانگین اختلاف ارتفاع حوضه به کیلومتر و L طول حوضه (کیلومتر) است.

جدول (۲): ورودی های مدل IntErO برای حوزه آبخیز دولت آباد

Table (2): IntErO model inputs for Dowlatabad watershed

ویژگی های هندسی			
ردیف	ورودی	واحد	مقدار
۱	مساحت	کیلومتر مربع	۱۳۴/۷
۲	محیط	کیلومتر	۶۰/۰۸
۳	طول آبراهه اصلی	کیلومتر مربع	۲۲/۴
۴	مساحت بخش بزرگ تر	کیلومتر مربع	۸۶/۰۲
۵	مساحت بخش کوچک تر	کیلومتر مربع	۴۸/۶۸
۶	طول حوزه آبخیز	کیلومتر	۲۱/۰۶
ویژگی های توپوگرافی			
۷	مقدار کمترین خط تراز	متر	۱۸۰۰
۸	مسافت مساوی	متر	۵۰
۹	پایین ترین نقطه ارتفاعی	متر	۱۷۹۲
۱۰	بالا ترین نقطه ارتفاعی	متر	۲۱۵۷
ویژگی های خاک شناسی و کاربری اراضی			
۱۱	مساحتی از حوضه شامل سنگ با نفوذپذیری بالا	درصد	۰/۱۳
۱۲	مساحتی از حوضه شامل سنگ با نفوذپذیری متوسط	درصد	۰/۶۲۸
۱۳	مساحتی از حوضه شامل سنگ با نفوذپذیری کم	درصد	۰/۲۴۲
۱۴	مساحتی از حوضه شامل جنگل	درصد	۰
۱۵	مساحتی از حوضه شامل گراس، علفزار، چراگاه و باغ	درصد	۰/۶۷۱۴
۱۶	مساحتی از حوضه شامل زمین های بایر، شخم خورده و بدون پوشش علفی	درصد	۰/۳۲۸۶
ویژگی های هیدرولوژی و هواشناسی			
۱۷	مجموع طول آبراهه های ۱ و ۲	کیلومتر	۲۳۴/۹۹
۱۸	کوتاه ترین فاصله بین سرشاخه ها و خروجی	کیلومتر	۲/۵۳
۱۹	ارتفاع بارندگی سیل آسا	میلی متر	۸۷
۲۰	متوسط درجه حرارت سالانه	درجه سانتی گراد	۱۶/۷
۲۱	متوسط بارش سالانه	میلی متر	۳۵۶/۵
ویژگی های شدت فرسایش خاک			
۲۲	ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش	-	۰/۹۸
۲۳	ضریب استفاده از زمین	-	۰/۷۱۳
۲۴	ضریب فرسایش منطقه ای	-	۰/۵۱۲

نتایج و بحث

- مدل MPSIAC

با توجه به عدم تنوع زیاد زمین‌شناسی منطقه، حساسیت به فرسایش حوضه از تنوع نسبی متوسطی برخوردار است. مقدار متوسط وزنی به‌دست‌آمده پارامتر مذکور برای کل حوزه آبخیز دولت‌آباد ۵/۸۱ است که نمایانگر حساسیت متوسط از لحاظ وضعیت زمین‌شناسی است. مقدار میانگین وزنی پارامتر فرسایش‌پذیری خاک (K) در کل دولت‌آباد برابر با ۰/۳۸ و امتیاز عامل خاک برابر با ۶/۳۵ است. حداکثر مقدار بارندگی شش‌ساعته با دوره برگشت دوساله در حوزه مورد مطالعه برابر با ۲۰/۲ میلی‌متر و در نتیجه میانگین وزنی پارامتر آب و هوا در کل حوزه آبخیز دولت‌آباد ۴/۰۴ است. با توجه به پایین بودن دبی پیک در حوضه، کمترین متوسط امتیاز برابر با ۱/۸ متعلق به عامل رواناب (Y₄) بود. مقدار متوسط عامل توپوگرافی در دولت‌آباد برابر با ۳/۱۷ است. بالا بودن این پارامتر نمایانگر نقش مهم شیب در تعیین میزان رسوب تولیدی در حوضه است. بررسی جدول نشان می‌دهد که مقدار پارامتر پوشش زمین در

کل حوزه آبخیز دولت‌آباد برابر با ۶/۵۷ است. عامل کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در رسوب‌زدایی حوضه دارد. طبیعتاً هر کاربری که موجب کاهش درصد پوشش زمین بر روی شیب تند با خاک‌های فرسایش‌پذیر و شرایط آب‌وهوایی مساعد برای فرسایش شود، به میزان قابل توجهی روی تولید رسوب به‌عنوان تابعی از فرسایش خاک اثر می‌گذارد. تخریب مراتع و تبدیل آن‌ها به دیمزارها و اعمال فشار بیش از حد چرای دام پوشش حفاظتی مناسب را از بین برده و سبب افزایش تولید رسوب می‌شود. بدیهی است این پارامتر مستقیماً به درصد تاج‌پوشش گیاهی وابسته بوده و هرچه درصد تاج‌پوشش زیادتر باشد، نقش کاهندگی پوشش گیاهی بر روی فرسایش خاک و طبعاً تولید رسوب نمایان می‌گردد. مقدار این پارامتر در کل دولت‌آباد برابر با ۱۲/۰۴ است. امتیاز وضعیت فعلی فرسایش و فرسایش آبراه‌ای در حوضه به‌ترتیب برابر با ۹/۳۸ و ۷/۹۳ است و مجموع امتیاز عوامل نه‌گانه در حوزه آبخیز دولت‌آباد برابر با ۵۷/۲۵ است.

جدول (۳): عوامل نه‌گانه مدل MPSIAC در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

Table (3): The nine factors of the MPESIAC model in the studied watershed

عوامل	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	مجموع عوامل
دولت‌آباد	۵/۸۱	۶/۳۵	۴/۰۴	۱/۷۸	۳/۳۵	۶/۵۷	۱۲/۰۴	۹/۳۸	۷/۹۳	۵۷/۲۵

پس از محاسبه مجموع عوامل مؤثر بر فرسایش در مدل MPSIAC، با توجه به رابطه (۱) و (۲) مقدار رسوب و فرسایش برآورد گردید (جدول ۴). نتایج نشان داد که در حوزه آبخیز دولت‌آباد مقدار فرسایش ویژه برابر با ۹ تن در هکتار در سال و رسوب ویژه نیز برابر با ۱/۹ تن در هکتار در سال

جدول (۴): مقادیر پارامترهای مدل MPSIAC

Table (4): MPSIAC model parameter values

نام حوضه	MPSIAC	نسبت تحول رسوب (SDR)	رسوب‌دهی ویژه سالانه (T/ha/y)	رسوب‌دهی ویژه سالانه (m ³ /km ² /y)	فرسایش ویژه سالانه (T/ha/y)	مساحت (ha)	رسوب‌دهی کل سالانه (T)	فرسایش کل سالانه (T)
دولت‌آباد	۵۷/۲۵	۰/۲۴۷	۱/۹۶۱	۱۴۴/۱۷۹	۹/۰۳۴	۱۳۴۷۰	۲۶۴۳۲/۸۶	۱۰۶۶۰۴/۴۶

- مدل EPM

در صورتی که وزن مخصوص ظاهری $1/4$ تن در هکتار در سال فرض شود، مقدار رسوب تخمین زده شده با مدل EPM برابر $2/65$ تن در سال خواهد بود. حوزه آبخیز دولت آباد در طبقه بندی فرسایش با استفاده از دو مدل MPSIAC و EPM به ترتیب در طبقه با فرسایش متوسط III و فرسایش شدید IV قرار گرفت (جدول ۶).

با توجه به رابطه (۶) ضریب شدت فرسایش با استفاده از مدل EPM برای حوزه آبخیز دولت آباد محاسبه شد (جدول ۵). میزان فرسایش ویژه و رسوب ویژه کل حوزه آبخیز مورد مطالعه با استفاده از مدل EPM به ترتیب، 1068 و 451 متر مکعب در کیلومتر مربع در سال است (جدول ۵) که

جدول (۵): مقادیر پارامترهای مدل EPM

Table (5): Values of EPM model parameters

نام حوضه	شرایط	مقادیر	مقادیر ضریب	ضریب	مقدار	رسوب ویژه	رسوب کل
مساحت (هکتار)	استفاده از زمین (Xa)	ضریب فرسایش (λ)	حساسیت سنگ و خاک	فرسایش (Z)	رسوب دهی (R_{ii})	فرسایش (W_{sp})	سالانه (G_s)
			به فرسایش			($m^3/km^2/y$)	(m^3/y)
دولت آباد	$0/86$	$0/658$	$1/17$	$2/952$	$0/42$	$1068/32$	$60790/69$
						$451/026$	

جدول (۶): تعیین میزان تولید رسوب سالانه و طبقه فرسایشی خاک

Table (6): Determining the amount of annual sediment production and soil erosion class

مجموع امتیازات	تولید رسوب سالانه		شدت رسوب دهی	طبقه رسوب دهی و فرسایشی
	m^3/km^2	T/km^2		
> 100	> 1429	> 2500	خیلی زیاد	V
$75-100$	$547-1429$	$1500-2500$	زیاد	IV
$50-75$	$238-547$	$500-1500$	متوسط	III
$25-50$	$95-238$	$200-500$	کم	II
< 25	< 95	> 200	خیلی کم	I

- مدل IntErO

از طرفی چون ضریب فرسایش حوضه برابر با $0/592$ است، می توان گفت که منطقه از نظر مقاومت خاک و فرایند فرسایش در وضعیت متوسطی قرار دارد. میزان فرسایش در حوضه برابر با $91474/1519$ متر مکعب در سال است که اگر وزن مخصوص ظاهری خاک را برابر $1/5$ تن در کیلومتر مربع فرض کنیم، میانگین فرسایش برآوردی توسط مدل IntErO برابر $10/01$ تن بر هکتار در سال است. در ضمن مقدار رسوب دهی ویژه در این مدل نشان می دهد که براساس طبقه بندی مد نظر ارائه دهنده مدل (گاوریلوویچ)، حوضه مورد مطالعه در طبقه پنجم و تحت فرسایش ضعیف است.

نتایج حاصل از محاسبه متغیرهای خروجی حاصل از مدل IntErO در جدول (۷) ارائه شده است. نتایج نشان داد که ضریب نفوذپذیری حوضه برابر با $0/73$ است. از آنجاکه با افزایش پوشش، نفوذپذیری هم افزایش می یابد، با توجه به ضریب پوشش منطقه ($0/87$) می توان نتیجه گرفت نفوذپذیری منطقه در شرایط مناسبی قرار دارد. تراکم زهکشی بر هیدروگراف سیل و فرایند فرسایش تأثیرگذار است و از آنجاکه این شاخص به مقدار جریان از طریق کانال و نوع خاک بستگی دارد (محمدی و همکاران، 2021 ؛ کاظمی و همکاران، 2022) و

جدول (۷): خروجی‌های مدل IntErO برای حوزه آبخیز دولت‌آباد

Table (7): IntErO model outputs for Dowlatabad watershed

خروجی	مقدار برآوردی	خروجی	مقدار برآوردی
ضریب شکل	۰/۵۲	ضریب پوشش حوضه	۰/۸۷
ضریب توسعه	۰/۵۴	ضریب ماندگاری آب در حوضه	۰/۷۹۲۴ m
میانگین پهنای حوضه	۶/۴۰ km	پتانسیل جریان یافتن آب در باران‌های سیل‌آسا	$۷۱۳/۴۳ \text{ mkm s}^{-1}$
ضریب همسان‌سازی حوضه	۰/۵۵	حداکثر جریان خروجی حوضه	$۱۸۷/۷۹ \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
تراکم شبکه زهکشی	۱/۷۴	ضریب دما	۱/۳۳
ارتفاع مبنای فرسایش محلی	۳۶۵/۱۵ m	ضریب فرسایش حوضه	۰/۵۹۲
ارتفاع متوسط حوضه	۱۹۸۵/۰۶ m	کل رسوب ناشی از فرسایش حوضه	۹۱۴۷۴/۱۵
میانگین اختلاف ارتفاع حوضه	۱۹۲/۵۹ m	ضریب انتقال رسوبات حاصل از فرسایش (SDR)	۰/۲۱۰
شیب متوسط حوضه	۱۰/۸۵	رسوب‌دهی	$۱۹۲۰۹/۵۷ \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$
ضریب سینوزیته جریان در حوضه	۸/۸۵	رسوب‌دهی ویژه	$۱۴۲/۵۹ \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ year}^{-1}$
ضریب انرژی فرسایش حوضه	۳۴/۱۲		
ضریب نفوذپذیری حوضه	۰/۷۳		

EPM دارد. همچنین، ذبیحی سیلابی و خالیدی درویشان (۲۰۲۱) بیان داشتند که از آنجاکه مدل IntErO، یک مدل مبتنی بر روش EPM است که در سال‌های اخیر در کشورهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، می‌تواند مدلی مناسب برای برآورد فرسایش و رسوب در اغلب نقاط کشور از جمله شمال شرق و غرب کشور و نیز در آبخیزهای کوهستانی و خاک‌های گرمسیری و مناطق نیمه‌خشک به دلیل ارائه نتایج منطقی، مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

برآورد دقیق میزان فرسایش و رسوب در تمامی مناطق به دلایل فنی، حفاظتی و اقتصادی غیرممکن است. بنابراین مدل‌ها مناسب‌ترین روش تخمین میزان فرسایش و رسوب‌دهی هستند که نیاز به آگاهی از مکانیسم‌های فرسایش و عوامل مؤثر بر آن دارد. از سوی دیگر، انتخاب مدل مناسب برای هر منطقه مستلزم ارزیابی دقت روش‌های مختلف با مقایسه نتایج آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در یک حوضه است. در تحقیق حاضر از روش‌های EPM، MPSIAC و IntErO برای برآورد میزان فرسایش و رسوب‌دهی استفاده شد. نتایج روش‌های تجربی نشان داد که وضعیت فرسایش منطقه با استفاده از مدل‌های MPSIAC و IntErO در کلاس فرسایش متوسط و با استفاده از مدل EPM در کلاس فرسایش شدید قرار دارد؛ بنابراین انجام

برای بررسی کارایی مدل‌ها به رسوب مشاهداتی حوضه نیاز است، اما با توجه به اینکه در حوضه مورد مطالعه، داده رسوب اندازه‌گیری نشده است، از داده مشاهداتی حوضه خامسان (خالیدی و همکاران، ۲۰۱۸) که نزدیک‌ترین حوضه به منطقه مورد مطالعه است استفاده گردید. مقدار رسوب سالانه در خامسان ۲/۷۷ تن در هکتار در سال است و مقدار رسوب سالانه در سالانه در مدل‌های EPM، MPSIAC و IntErO در حوضه دولت‌آباد به ترتیب برابر ۲/۷۴، ۲/۶۵ و ۲/۸۸ تن در هکتار در سال است؛ که نشان می‌دهد که مدل‌های EPM، MPSIAC به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۱۲ کم‌برآوردی و مدل IntErO ۰/۱۱ بیش‌برآوردی دارند.

از مقایسه خروجی سه مدل می‌توان نتیجه گرفت که دو مدل MPSIAC و EPM تقریباً رسوب تولیدی تخمین زده‌شده را نزدیک به هم پیش‌بینی کرده‌اند (به ترتیب ۲/۷۴ و ۲/۶۵) اما مدل IntErO، رسوب را به میزان بیشتری (۲/۸۸) برآورد کرده است. به طور کلی، نتایج نشان داد که روش MPSIAC برآورد خوبی از میزان فرسایش و رسوب در منطقه را نشان می‌دهد که با مطالعه قورقی و اوسطی (۲۰۱۶) در حوضه معرف زوجی خامسان با توجه به نزدیکی دو حوضه و شرایط تخریب پوشش گیاهی حوضه مورد مطالعه هم‌خوانی دارد؛ از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که مدل MPSIAC کارایی بالاتری نسبت به

استفاده قرار گرفته است. بنابراین پیشنهاد می شود که این مدل در حوضه هایی با مساحت های مختلف در کشور اجرا شود.

آبخیزداری و حفاظت خاک در این منطقه ضروری است. در ایران بررسی های متعددی توسط دو مدل MPSIAC و EPM انجام شده، اما مدل IntEro فقط در برخی از مناطق کشور مورد

منابع

- Agbo, K.C. (2021). *Integrated assessment of soil erosion processes and policy in Oguta watershed Imo state southes, Nigeria. School of Civil Engineering and Geosciences*. Newcastle University, UK.
- Baggaley, N., & Potts, J. (2017). Sensitivity of the PESERA soil erosion model to terrain and soil inputs. *Geoderma Regional*, no. 11, 104-112.
- Bayat, R., Arab Khedri, M., Behnam, N., & Grami, Z. (2019). Investigating the effectiveness of EPM and MPSIAC models in determining the erosion status of Shahriari watershed. *Spatial analysis of environmental hazards*, 7(3), 1-16. (In persian)
- Cebecauer, T., & Hofierka, J. (2008). The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology*, 98(3-4), 187-198.
- Detailed watershed management studies of Dowlatabad watershed, Dehghan, geology, hydrology, meteorology, vegetation, soil science. 1392. (In Persian).
- Didone, E.J., Minella, J.G., & Evrard, O. (2017). Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 174, 24-33.
- El Mouatassime, S., Boukdir, A., Karaoui, I., Skataric, G., Nacka, M., Khaledi Darvishan, A., & Spalevic, V. (2019). Modelling of soil erosion processes and runoff for sustainable watershed management: Case study Oued el Abid Watershed, Morocco. *Poljoprivreda i Sumarstvo*, 65(4), 241-250.
- Esmaliouri, A., Ahmadi, H., & Tahmourth, M. (2014). Quantitative evaluation of the intensity of water erosion using a regional model for estimation of erosion and sediment production (Nir watershed, Ardabil). *Pasture and Watershed management, Journal of Natural Resources of Iran*, 67(3), 407-417. (In Persian)
- Ghazaei, R., Wali, A., Maqami, Y., Abdi, Zh., & shrafi, S. (2013). Comparison of EPM, MPSIAC and PSIAC models in estimating erosion and sedimentation using GIS. *Geography and Development*, 27, 117-126. (In Persian)
- Ghorghi, H., & Osati, Kh. (2016). Evaluation of runoff and sediment values from natural rainstorms "Case study: field plots of Khamsan Jovi representative basin". *The second national hydrology conference of Iran*. on July 20 and 21. (In Persian)
- Ghahari, Sh., & Hosseini, M. (2019). Technical report on EPM model efficiency evaluation through sediment measurement of small dam reservoirs. *scientific-research journal of watershed engineering and management*, 12(4), 1133-1145. (In Persian)
- Hazbavi, Z., Azizi, E., Sharifi, Z., Alaei, N., Mostafazadeh, R., Behzadfar, M., & Spalevic, V. (2020). Comprehensive estimation of erosion and sediment components using IntErO model in the KoozehTopraghi Watershed, Ardabil Province. *Environmental Erosion Research Journal*, 10(1), 92-110.
- Hessel, R., Jetten, V. G., Liu, B., & Qiu, Y. (2011). *Evaluating effects of soil and water management and land use change on the Loess Plateau of China using LISEM*, Handbook of Erosion Modelling.
- Johnson, CW., & Gebhart, K. A. (1982). MPSIAC Predicting sediment yields from sagebrush rangelands. In: ARS (Ed.), *Estimating Soil Erosion and Sediment Yield on Rangelands*, 26(13), 145-156.
- Kazemi, M., Zabihi Silabi, M., Jafarpour, A., Qaramahmoodli, S., & Mohammadi, F. (2022). Estimation of erosion and sedimentation components using IntErO model (Case study: Kohoristan watershed). *Environmental Erosion Research*, 13: 2(50), 177-191. (In Persian).
- Kerr, J., & Chung, K. (2006). *Environment and Production Technology Division International Food Policy*, Research Institute, Washington, D. C. 65PP.
- Khaledi Darvishan, A., Derikvandi, M., Aliramaee, R., Khorsand, M., Spalevic, V., Gholami, L., & Vujacic, D. (2018). Efficiency of IntErO Model to Predict Soil Erosion Intensity and Sediment Yield in Khamsan Representative Watershed (West of Iran). *Agrofor*, 3(2), 22-31.
- Khaledi Darvishan, A., Mohammadi, M., Skataric, G., Popović, S. G., Behzadfar, M., Sakuno, N.R. R., & Spalevic V. (2019). Yield and maximum outflow, using IntErO model (Case study: S8-intA Shirindarreh Watershed, Iran). *Agriculture & Forestry*, 65(4), 203-210.
- Lawler, D. M., West, J. R., Couperthwaite, J. S., & Mitchell, S. B. (2001). Application of a novel automatic erosion and deposition monitoring system at a channel bank site on the Tidal River Trent, U.K. *Estuarine. Coastal and Shelf Science*, 53(2), 237-247.
- Lawler, DM. (2008). Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the new PEEP-3T system. *Geomorphology*, 93(1-2), 17-39.
- Mano, V., Nemery, J., Belleudy, P., & Poirel, A. (2009). Assessment of suspended sediment transport in four alpine watersheds. *Hydrological Processes*, 23(5), 777-792.

22. Martinez- Carreras, N., Soler, M., Hernandez, E., & Gallaret, F. (2007). Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Catena*, 17(1), 145-154.
23. Marttila, H., & Klove, B. (2010). Dynamic of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forestry. *Journal of Hydrology*, 388(3-4): 414-425.
24. Mohammadi, M., Khaledi Darvishan, A. V., 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*, no. 13, 881.
25. Morgan, R.P.C. (2009). Modified MMF (Morgan–Morgan–Finney) model for evaluating effects of crops and vegetation cover on soil erosion. *Earth Surface Process and Landforms*, 33(1), 90-106.
26. Moradi, M., Ghanchepour, D., Nohegar, A., Mehmohudinejad, W. (2010). Comparison of EPM and MPSIAC models in estimation of erosion and sedimentation in Pourahmadi watershed (Hormozgan province). *Environmental erosion research*, 1(4), 53-67. (In Persian)
27. Ouallali, A., Spalevic, V., Aassoumi, H., Moukhchane, M., & Berradm, F. (2016). The assessment of the soil erosion intensity and runoff in the river basin of Arbaa Ayacha, Western Rif. Morocco. *International Journal of Scientific and Research Publication*.
28. PSIAC. (1968). Report of the Water Management Subcommittee on Factors Affecting Sediment Yield in the Pacific Southwest Area and Selection and Evaluation of Measures for Reduction of Erosion and Sediment Yield. *American Society of Civil Engineers*, 98, Report No. HY12 .
29. Quinton, J.N., Krueger, T., Freer, J., Brazier, R.E., & Bilotta, G.S. (2011). *A case study of uncertainty: Applying GLUE to EUROSEM*, pp. 80-97.
30. Refahi, H. (2003). *Water erosion and its control*, Tehran University Press. 4th edition. (In Persian)
31. Rodrigues Neto, M. R., Musselli, D. G., Lense, G. H. E., Servidoni, L. E., Stefanidis, S., Spalevic, V., & Mincato, R. L. (2022). Soil loss modelling by the IntErO model-erosion potential method in the Machado River Basin, Minas Gerais, Brezil. *Agriculture & Forestry/ Poljoprivredai Sumarstvo*, 68(2).
32. Sadeghi, S.H.R., Azari, M., & GhaderiVangah, B. (2008). Field evaluation of the hill slope Erosion Model (HEM) in Iran. *Biosystems Engineering*, no. 99, 304–311.
33. Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Li, Y.H., Hong, Q., Xu, L., & Liu, R.M. (2009). A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management*, no. 96, 1435–1442.
34. Sinha, N., Debasis, D., Khanindra, P., & Paramanik, R. (2018). Modified E30 Model for assessing soil erosion potential in a highly precipitated hilly watershed of North-East India: Remote Sensing Applications. *Society and Environment*. No. 10, 173-182.
35. Spalevic, V. (2012). *Impact of land use on runoff and soil erosion in Polimlje*. Doctoral thesis, Faculty of Agriculture of the University of Belgrade, Serbia, 1-260.
36. Tangestani, M.H. (2006). Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar catchment, Fars proviance, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(5): 585-597. (In Persian)
37. Tavares, A.S., Uagoda, R.E.S., Spalevic, V., & Mincato, R.L. (2021): Analysis of the erosion potential and sediment yield using the IntErO model in an experimental watershed dominated by karst in Brazil. *Agriculture and Forestry*, 67(2), 153-162.
38. Walling, D. E. (2005). Tracing suspended sediment sources in catchments and river system. *Science of the Total Environment*, 344(1–3), 159–184.
39. Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., & Musiake, K. (2003). Globale potential soil erosion with reference to land use and climate change, *Hydrological process*, 17(14), 2913-2928.
40. Zabihi Silabi, M., & Khalidi Darvishan A. (2021). Qualitative evaluation of IntErO, EPM, MPSIAC and RUSLE models in order to select the optimal models for different conditions in the description of watershed executive detailed studies services. *Promotion and development of watershed management*, 9(32), 52-66. (In Persian)
41. Zapata, F. (2003). The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments. *Soil Tillage and Research*, 69, 3-13.

Comparative Evaluation of Soil Erosion and Sediment Yield Estimation in the Dowlatabad Watershed Using the EPM, MPSIAC, and IntErO Models

Jabar Hadi Ghorghi,¹ Saeid Derakhti,² Zahra Abdollahi,³ Leila Gholami,^{4*} Abdolvahed Khaledi Darvishan⁵

Received: 09/03/2025

Accepted: 22/10/2025

Extended Abstract

Introduction: Soil is a vital, non-renewable resource fundamental to ecosystem stability and human subsistence. However, this resource is under constant threat from soil erosion—the detachment, transport, and deposition of earth materials by water or wind. This process degrades agricultural productivity by stripping fertile topsoil, impairs water resources through reservoir siltation and pollutant transport, and inflicts significant socio-economic costs. Given its status as a critical global environmental challenge, the accurate quantification of soil erosion is a prerequisite for effective watershed management and conservation planning. Empirical models offer a practical and efficient methodology for such assessments. This study therefore aims to conduct a comparative evaluation of three prominent empirical models—the EPM, MPSIAC, and IntErO for estimating soil erosion and sediment yield within the Dowlatabad Dehgalan watershed.

Materials and Methods: This study employed three empirical models of -the MPSIAC, EPM, and IntErO- to estimate soil erosion and sediment yield in the Dowlatabad watershed. The Modified Pacific Southwest Inter-Agency Committee (MPSIAC) model was applied by systematically quantifying its nine governing factors, which include surface geology, soil, climate, runoff, land cover, and land use. The overall erosion and sedimentation status of the watershed was subsequently determined based on the cumulative scores assigned to these parameters. The Erosion Potential Method (EPM) was then implemented. This required the evaluation of four key coefficients across distinct land units: the coefficient of watershed erosion and rock permeability (Ψ), the land use coefficient (X_a), the average land slope (I), and the soil and rock erodibility coefficient (Y). These coefficients were integrated to calculate the erosion intensity and resultant sediment yield. Finally, the IntErO model was utilized. As a comprehensive algorithm for predicting erosion and sediment transport, it integrates topographic, soil, geological, and land use data, supplemented by meteorological inputs such as precipitation and temperature, to simulate erosion processes and quantify potential sediment yield.

Results and Discussion: The evaluation of the governing parameters within the MPSIAC model revealed that land use (Factor Y7, score: 12.04) exerted the most substantial influence on soil erosion within the watershed. In contrast, surface runoff (Factor Y4, score: 1.78) was identified as the least significant factor. A comparative analysis of the three models yielded distinct estimates for the average annual soil erosion rate. The MPSIAC model estimated a rate of $9.034 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, while the IntErO model produced a closely aligned estimate of $10.01 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. The EPM model, which reports its output in volumetric terms, estimated $1068 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (equivalent to approximately $10.68 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, assuming a standard bulk density). Despite these differing erosion rates, the models demonstrated a notable convergence in their predictions of specific sediment yield, with values of 2.74, 2.88, and $2.65 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ for the MPSIAC, IntErO, and EPM models, respectively. A key point of divergence among the models was the calculated Sediment Delivery Ratio (SDR). The EPM model predicted a substantially higher SDR of 0.420, indicating a more efficient transport of eroded

1. Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Kurdistan, Iran. Email: j.hadi88@gmail.com

2. Ph.D., Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: s.drakhti@gmail.com

3. Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran. Email: abdollahi.zhr.65@gmail.com

4. Associate Professor Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. (Corresponding Author); Email: l.gholami@sanru.ac.ir

5. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: a.khaledi@modares.ac.ir

material from its source to the watershed outlet. Conversely, the MPSIAC and IntErO models yielded lower and more conservative SDR estimates of 0.247 and 0.210, respectively. This discrepancy highlights the differing theoretical approaches and structural assumptions of each model regarding sediment transport and deposition processes within the catchment.

Conclusion and Suggestions: Accurately quantifying soil erosion and sediment yield through direct measurement is often prohibitive due to technical, environmental, and economic constraints. Consequently, empirical models are indispensable tools, though their application necessitates a robust understanding of erosional processes and a critical evaluation of their accuracy under specific regional conditions. This study applied the EPM, MPSIAC, and IntErO models to the Dowlatabad watershed, revealing a significant methodological divergence in assessing erosion severity. While both the MPSIAC and IntErO models classified the region within a moderate erosion class, the EPM model indicated a severe erosion class. This discrepancy underscores the inherent uncertainty in model selection and the urgent need for proactive watershed management and soil conservation measures in the area. Regarding sediment yield, the estimated values were 451.026, 144.179, and 142.59 $\text{m}^3 \text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$ for the EPM, MPSIAC, and IntErO models, respectively. The close agreement between the MPSIAC and IntErO models suggests a higher degree of reliability for these estimates in this context. In contrast, the EPM model's substantially higher sediment yield and previously noted high sediment delivery ratio (SDR) point to its more extreme and less conservative predictive behavior. Based on these findings, the following recommendations are proposed: Promote the Application of the IntErO Model: Given its performance, which closely aligns with the established MPSIAC model, the IntErO algorithm is recommended for further application and validation in watersheds of varying scales across Iran. This would help broaden the national toolkit for rapid and reliable erosion assessment. Prioritize Conservation Planning: The consensus among the models that the area falls within at least a moderate erosion class necessitates the immediate planning and execution of integrated soil and water conservation programs to mitigate ongoing land degradation. Implement Ground-Truthing Studies: To calibrate and validate these empirical models for local conditions, future work must correlate model outputs with direct sediment measurement techniques, such as systematic field monitoring and sediment sampling.

Keywords: Dowlatabad Watershed, Intero Model, EPM Model, MPSIAC Model.