

زمان، منجر به طراحی و اجرای اقدامات حفاظت خاک و آب مناسب، هدفمند، و مقرون به صرفه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: پیچیدگی مدل، رسوب‌دهی، فرسایش خاک، فرساینده‌گی باران، کارایی مدل، نسبت تحویل رسوب.

مقدمه

مدیریت آبخیز علم و هنر برنامه‌ریزی مستمر و اجرای اقدام‌های لازم برای مدیریت منابع حوزه‌های آبخیز اعم از طبیعی، کشاورزی، اقتصادی و انسانی بدون ایجاد اثرات منفی در منابع آب و خاک می‌باشد. با این حال یک برنامه به‌طور اعم شامل مطالعات، طرح‌ریزی، اجرا، نظارت و ارزشیابی است. از همین‌رو مؤلفه مطالعات در برنامه‌ریزی، با ضوابط و معیار فنی مطالعاتی، یعنی شرح خدمات صورت‌بندی می‌شود. از طرفی با توجه به شرایط متفاوت آب و هوایی، اداکی و وجود تشکیلات متفاوت زمین‌شناسی در مناطق مختلف کشور ضروری است با توجه به ویژگی‌های مختلف هر منطقه شرح خدمات متناسب با آن تهیه و ارائه گردد که در حال حاضر امکان آن وجود ندارد. همین امر یک ضعف اصلی به شمار می‌رود [۸۸]. بنابراین باید مطالعاتی طرح‌ریزی گردد که تا حد ممکن این ضعف را برطرف کرده و بتواند در مناطق مختلف کشور کارآمد باشد. یکی از این مطالعات، مطالعات فرسایش و رسوب است. در همین راستا فرسایش خاک را می‌توان، از بین رفتن سطح زمین توسط نیروهای فیزیکی مانند بارش، جریان آب، باد، یخ، تغییر دما، نیروی جاذبه و سایر عوامل طبیعی یا انسانی که باعث سقوط، جدا شدن و حذف خاک از یک نقطه بر روی سطح زمین و رسوب آن در بخشی دیگر از زمین تعریف کرد [۸۹]. بنابراین فرسایش خاک یک فرآیند پیچیده شامل جدایش^۳، بارگذاری^۴ حمل^۵ و رسوب‌گذاری است که منجر به انواع مختلف فرسایش شامل پاشماني، سطحی^۶، شیار^۷ و آب‌کندی^۸ می‌شود. فرسایش سطحی در اثر برخورد قطرات باران (جداشدگی) و فرسایش شیار^۷ و آب‌کندی در اثر تمرکز جریان (جداشدگی، انتقال) متناسب با

ارزیابی کیفی مدل‌های MPSIAC, EPM, IntErO و RUSLE به منظور انتخاب مدل‌های بهینه برای شرایط مختلف در شرح خدمات مطالعات تفصیلی اجرایی آبخیزداری

مصطفی ذبیحی سیلابی^۱ و عبدالواحد خالدی درویشان^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۷

چکیده

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در سطح جهانی است که مسائل و مشکلات فراوانی را برای جوامع بشری به وجود آورده است. از همین‌رو، ارزیابی دقیق فرسایش خاک در مطالعات فرسایش و رسوب به منظور طراحی و اجرای اقدامات حفاظتی مناسب، هدفمند، و مقرون به صرفه با توجه شدت مشکل و اثرات اجتماعی - اقتصادی ضروری است. از همین‌رو انتخاب مدل مناسب و متناسب به منظور برآورد فرسایش و رسوب با توجه به داده‌های موجود، شرایط متفاوت توپوگرافی و اقلیمی کشور و در نظر گرفتن نیازمندی‌های اطلاعاتی و میزان پیچیدگی مدل‌ها امری ضروری و مهم است. بر همین اساس در تحقیق حاضر نقاط قوت و ضعف چهار مدل تجربی شامل MPSIAC, EPM, IntErO و RUSLE به صورت کیفی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل MPSIAC در مناطق خشک، مدل RUSLE برای مناطق کوهستانی مدیترانه‌ای و نیز مناطق جنگلی با درصد شیب بالا و هم‌چنین مناطق کشاورزی و مدل‌های EPM و IntErO در مناطق کوهستانی و هم‌چنین برای مدیریت حوزه آبخیز و نیز مدیریت منابع آب نتایج مورد قبولی ارائه می‌دهند. لذا پیشنهاد می‌شود در شرح خدمات آبخیزداری مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب متناسب با اهداف مدیریتی، داده‌های در دسترس، شرایط توپوگرافی و اقلیمی انتخاب شوند. در نتیجه انتظار می‌رود در صورت انتخاب مدل مناسب برای برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب ضمن صرفه‌جویی در

3. Detachment
4. Deposition
5. Transport
6. Sheet Erosion
7. Rill Erosion
8. Gully erosion

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی مدیریت حوزه‌های آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نویسنده مسئول، Email: a.khaledi@modares.ac.ir

افزایش تدریجی حجم و سرعت رواناب سطحی به وجود می‌آیند [۴۱]. بر همین اساس فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی معاصر در سطح جهانی است که مسائل و مشکلات فراوانی از جمله کاهش حاصل‌خیزی و بهره‌وری اراضی زراعی و بیابان‌زایی [۵۳، ۵۴، ۶۴]، کاهش پایداری و عملکرد ساختارهای فنی و زیرساخت‌ها مانند پل‌ها، بنادر و جاده‌ها، افزایش زمین لغزش‌ها^۱ در مناطق مسکونی، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی و از بین بردن سدها به دلیل انباشت رسوب، آسیب سیستم‌های تولید برق به دلیل نفوذ رسوب [۵۹، ۷۳]، تخریب سیمای سرزمین^۲ (زوال خط ساحلی^۳، ناپایداری شیب، زمین لغزش و تخریب پوشش گیاهی طبیعی)، بالا آمدن بستر رودخانه به دلیل رسوب‌گذاری، کاهش ظرفیت حمل جریان و افزایش خطر سیلاب و کاهش کیفیت آب برای استفاده خانگی، صنعتی، هیدروالکتریک و تفریحی به دلیل مواد مغذی و شیمیایی حاصل از رسوبات حمل‌شده را به وجود می‌آورد [۵۹]. بنابراین، ارزیابی دقیق فرسایش خاک به منظور طراحی و اجرای اقدامات حفاظتی مناسب، هدفمند، و مقرون به صرفه با توجه به توزیع فضایی عواقب، شدت مشکل و اثرات اجتماعی - اقتصادی ضروری است [۲۶]. این نیاز، به همراه کمبود اندازه‌گیری‌های میدانی در مقیاس وسیع به سبب صرفه‌جویی در زمان و هزینه منجر به توسعه مدل‌های مختلف برای برآورد فرسایش به عنوان مثال ANSWERS^۴، EPM^۵، USLE^۶، [۱۰۱]، KINEROS^{۱۱}، [۱۰۳]، AGNPS^۹، [۵۲]، CREAMS^۸، [۱۰۲]، WEPP^{۱۰}، [۵۵]، RUSLE^{۱۲}، [۸۲]، EUROSEM^{۱۳}، [۶۴]، SWAT^{۱۴}، [۹]، PESERA^{۱۵}، [۵۱] و IntErO^{۱۶} [۹۰] شده است. با این حال یکی از مشکلات مطالعات فرسایش و رسوب کمبود آمار و اطلاعات مورد نیاز می‌باشد که این مسئله در کشورهای درحال توسعه حادتر بوده و کشور ایران از جمله کشورهایی است که با این معضل روبرو است [۳۷]. بنابراین به دلیل پیچیدگی فرایندها و کمبود آمار مناسب همراه با مشکلات در مورد دستیابی به آن‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی ضعیف و فقدان ایستگاه‌های اندازه‌گیری

1. Landslides,
2. Landscape Degradation
3. Coastline Deterioration
4. Modified Pacific Southwest Inter -Agency Committee
5. Erosion Potential Method
6. Universal Soil Loss Equation
7. Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation
8. Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems
9. AGricultural Non-Point Source Pollution Model
10. Kinematic runoff and erosion model
11. Water Erosion Prediction Project
12. Revised USLE
13. European Soil Erosion Model
14. Soil & Water Assessment Tool
15. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment
16. Intensity of Erosion and Outflow model

محدودیت‌های جدی برای اجرای کامل‌ترین مدل‌ها وجود دارد. این امر اغلب منجر به انتخاب مدل‌های تجربی می‌شود که به طور عمده با معیار داده‌های مورد نیاز کم همراه با سرعت محاسباتی، سهولت استفاده، هزینه پیاده‌سازی پایین مطابقت دارند و علاوه بر این اساس خوبی را از نظر تخمین اولیه فراهم می‌کنند. این انتخاب در این فرض نهفته است که احتمالاً چنین مدل‌هایی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های جامع خواهند داشت، زیرا استفاده/ کالیبراسیون کلیه پارامترهای موجود در آن‌ها ناگزیر خطاهایی را ایجاد می‌کند که ممکن است از روش‌های ساده و متمرکز کم‌تر نباشد [۲۷]. از سوی دیگر گزارش‌های متعدد نشان از تفاوت‌های اساسی در برآورد میزان فرسایش و رسوب در مقیاس‌های مختلف در کشور ایران دارد. به عنوان مثال در سال ۱۳۵۵ براساس برآوردهای انجام شده فرسایش خاک کشور معادل یک میلیارد تن بوده که ده سال بعد به ۱/۵ میلیارد تن و در سال ۱۳۷۵ به ۲/۵ میلیارد تن افزایش یافته است. براساس برآورد دیگری فرسایش خاک از ۱۰ تن در هکتار در دهه شصت به ۲ تن در هکتار در دهه هفتاد رسیده است [۷۶]. در گزارش دیگری میزان فرسایش و رسوب ویژه در کشور به ترتیب از شش تا ۳۰ و یک تا ۳/۵ تن در هکتار در سال متغیر و میزان رسوب خروجی از حوزه‌های آبخیز از ۰/۱ تا ۴ میلیارد تن در سال بیان شده است [۶۶]. بنابراین ارقام ارائه شده مبتنی بر اندازه‌گیری‌های جامعی نبوده و به نوعی برآوردی از میزان فرسایش و رسوب حادث شده می‌باشد. با این حال با توجه به مطالب ذکر شده برآورد دقیق مقدار فرسایش و رسوب به منظور ارائه نسخه‌های مدیریتی جهت کاهش اثرات منفی فرسایش و رسوب ضروری و مهم می‌باشد.

از همین‌رو پژوهش‌های مختلفی در رابطه با برآورد فرسایش و رسوب در ایران و جهان با استفاده از مدل‌های تجربی و مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها در برآورد فرسایش و رسوب صورت گرفته است. محمدی و همکاران [۶۲] در پژوهشی به برآورد مکانی فرسایش خاک در کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE پرداختند. در این پژوهش مقادیر متوسط سالانه عامل‌های P ، K ، C ، LS و R به ترتیب برابر با $۰/۰۶۵$ ، $۰/۰۴$ ، $(thMJ^{-1}mm^{-1})$ ، $۰/۴۶$ ، $۶/۳$ و ۱۹۵ ($Mj\ mm\ ha^{-1}y^{-1}ha^{-1}$) برآورد شدند. متوسط فرسایش سالانه خاک در کشور ایران نیز حدود ۲۴ تن بر هکتار بر سال برآورد شد. از همین‌رو عامل LS به عنوان موثرترین عامل در برآورد فرسایش با ضریب همبستگی $۰/۶۳$ انتخاب شد. ساکیونه و همکاران [۸۷] به انطباق و کاربرد مدل EPM در برآورد رسوب حاصل از فرسایش آبی در خاک‌های گرمسیری پرداختند. در این پژوهش داده‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، خاک‌شناسی، اقلیم و کاربری اراضی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پردازش شده و با داده‌های به دست آمده از مدل RUSLE مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش EPM دارای عملکرد عالی است و می‌تواند برای تخمین تولید رسوب از طریق فرسایش آبی در خاک‌های گرمسیری به کار رود. ال موآتاسیمه و همکاران [۳۱]، به مدل‌سازی فرایندهای

فرسایش خاک و رواناب با استفاده از مدل IntErO در حوزه آبخیز OUED EL ABID در مراکش پرداختند. نتایج ایشان نشان داد میزان هدررفت واقعی خاک به ازای هر کیلومتر مربع حدود ۴۰۲ متر مکعب در سال بود. همچنین نتایج مقایسه دو مدل IntErO و USLE با اندازه‌گیری‌های زمینی نشان داد که مدل USLE نتایج کمی بالاتری را ارائه می‌دهد. پراساناکومار و همکاران [۷۷] خطر فرسایش خاک در زیرحوزه آبخیز کوچک کوهستانی Karela در کشور هندوستان را با استفاده از مدل RUSLE برآورد کردند و به این نتیجه رسیدند که برآورد فرسایش خاک با روش RUSLE اگر با بررسی نمونه‌های میدانی همراه شود می‌تواند باعث افزایش توانایی و دقت نتایج گردد. افشیمو و همکاران [۲۷] به تحلیل مقایسه‌ای برآورد تولید رسوب در آبخیزهای کوهستانی مدیترانه‌ای با استفاده از مدل‌های مختلف تجربی شامل EPM، USLE، RUSLE، Koutsoyiannis و Tarla پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت مدل RUSLE در آبخیزهای مذکور بهتر از سه روش دیگر است. عبدالله و همکاران [۱] در تحقیقی به ارزیابی مدل‌های EPM، MPSIAC و RUSLE در برآورد فرسایش خاک در محیط‌های خشک کویت پرداختند. نتایج ایشان نشان داد دقت مدل‌های MPSIAC و EPM در توزیع فضایی فرسایش تقریباً مشابه بوده، گرچه مدل MPSIAC توزیع فضایی واقعی‌تری از فرسایش داشت. در صورتی که مدل RUSLE نتایج غیرواقعی ارائه داد. پانندی و همکاران [۷۴] در هندوستان برای شناسایی مناطق بحرانی فرسایش خاک در حوضه‌های کوچک کشاورزی از مدل USLE استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مناطق مختلف اختلاف رسوب برآوردی مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌ای از ۱/۳۷ تا ۱۳/۸ درصد متغیر بوده است. رنگزن و همکاران [۷۸]، با مقایسه دو مدل EPM و MPSIAC به برآورد فرسایش و رسوب حوزه پگاه سرخ گتوند خوزستان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل EPM برای شناسایی مناطق دارای فرسایش بالا به اندازه مدل MPSIAC قابل اطمینان نمی‌باشد. بذرافشان و تیموری [۱۵] به مقایسه کارایی مدل RUSLE و EPM در برآورد فرسایش خاک و میزان رسوب‌دهی بر اساس منحنی سنج رسوب در حوزه آبخیز جاسک گابریک پرداختند. نتایج ایشان نشان داد با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی مدل RUSLE به مقدار رسوب مشاهداتی، کارایی مدل RUSLE نسبت به مدل EPM در برآورد رسوب حوزه آبخیز مذکور بیش‌تر است. زندی و همکاران [۱۰۶]، با استفاده از مدل RUSLE، توزیع مکانی هدررفت خاک در حوزه آبخیز واز رود در استان مازندران را با دقت ۹۰ درصد تعیین کردند. خالدی درویشان و همکاران [۴۷]، به ارزیابی کارایی مدل IntErO در پیش‌بینی شدت فرسایش خاک و آورد رسوب حوزه آبخیز خامسان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که حداکثر جریان خروجی حوزه آبخیز مورد مطالعه ۵۰/۲۷ مترمکعب بر ثانیه برای یک دوره بازگشت صد ساله و میزان هدررفت خالص خاک از حوضه رودخانه برابر ۱۲۲۶۳/۴۴ مترمکعب در سال است.

امیری و همکاران [۶] در بررسی کارایی مدل MPSIC و EPM گزارش دادند که به لحاظ آماری تفاوت معنی داری در برآورد دو مدل وجود ندارد. امیری و همکاران [۷]، احمدی و همکاران [۳] در مقایسه مدل EPM و MPSIAC در مناطق خشک ایران اذعان نمودند، مدل MPSIAC دچار بیش برآورد و EPM دچار کم برآورد در محاسبه نرخ فرسایش و رسوب ویژه می‌شود، و به ترتیب مدل بدبینانه و خوش بینانه قلمداد می‌شوند. صدوق و همکاران [۸۵] با استفاده از سه مدل برآورد و پهنه‌بندی فرسایش و رسوب، شامل EPM، MPSIAC و FARGOS با هدف شناسایی و معرفی مدل مناسب، اقدام به ارزیابی مدل‌ها در پهنه‌بندی فرسایش در حوضه آبخیز کهمان کردند نتایج نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار بین دو روش MPSIAC و EPM است. انصاری لاری و انصاری [۸] و محمدپور و افسری [۶۳]، میلوک [۱۰۷]، طالب‌نیا و همکاران [۹۲] در بررسی مدل EPM مدل فوق را مدل مناسبی برای برآورد فرسایش معرفی نمودند. نیکولیک و همکاران [۶۶]، به بررسی تغییرات شدت فرسایش خاک با استفاده از مدل IntErO در Orahovacka Rijek واقع در مونته‌نگرو پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که بر اساس تغییر کاربری زمین در ۴۰ سال گذشته، شدت فرسایش خاک به میزان ۱۱ درصد در حوزه آبخیز مورد مطالعه افزایش یافته است. خالدی درویشان و همکاران [۴۸] به ارزیابی فرسایش خاک، تولید رسوب و حداکثر جریان خروجی در یکی از زیرآبخیزهای داخلی شیرین دره خراسان پرداختند. نتایج ایشان نشان داد برای آبخیز مطالعاتی، دبی اوج با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، ۱۳/۱ مترمکعب بر ثانیه، هدررفت خاک ۸/۰۶ تن در هکتار و نسبت تحویل رسوب نیز یک تن در هکتار در سال می‌باشد. بهزادفر و همکاران [۱۷]، به محاسبه هدررفت خاک و حداکثر جریان خروجی از حوزه آبخیز شیرین دره واقع در خراسان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد مقدار هدررفت خاک در حوضه رودخانه ۵۴۴۳ مترمکعب در سال است. این تحقیق نشان داد که مدل IntErO یک ابزار خوب برای ارزیابی سریع خطر فرسایش به‌منظور برنامه‌ریزی بلند مدت است. بررسی پژوهش‌های مرتبط از اهمیت برآورد دقیق رواناب و رسوب به‌منظور برنامه‌ریزی مستمر با هدف کاهش اثرات تخریبی فرسایش و رسوب در داخل و خارج از حوزه آبخیز دارد. در نهایت از آنجایی که در مطالعات تفصیلی-اجرایی آبخیزداری ایران برای برآورد میزان فرسایش و رسوب از مدل‌هایی همچون EPM، MPSIAC، PSIAC، USLE، RUSLE می‌شود بنابراین در پژوهش حاضر، سعی شده است مقایسه‌ای بین مدل IntErO و مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب در شرح خدمات مطالعات تفصیلی اجرایی EPM، MPSIAC، RUSLE انجام گرفته و در نهایت مدلی بهینه برای برآورد فرسایش و رسوب در مناطق مختلف کشور در شرح خدمات آبخیزداری معرفی گردد.

جدول ۱: عوامل مؤثر بر فرسایش خاک در مدل اصلاح شده MPSIAC [۴۴]

شماره عامل	عامل مؤثر در فرسایش	ضریب و فرمول عامل	شرح و تفسیر
۱	زمین شناسی سطحی	$X_1 = Y_1$	X1: حساسیت سنگ‌ها به فرسایش (۱۰-۰)
۲	خاک	$X_2 = 16.67K$	K: حساسیت خاک به فرسایش
۳	آب و هوا	$X_3 = 0.2 P_2$	P2: مقدار بارندگی ۶ ساعته با دوره برگشت دو سال
۴	رواناب	$X_4 = 0.006 R + 10 Q_p$	R: ارتفاع رواناب Qp: دبی ویژه پیک سالیانه
۵	پستی و بلندی	$X_5 = 0.33 S$	S: شیب متوسط حوزه برحسب درصد
۶	پوشش سطح زمین	$X_6 = 0.2 P_b$	P _b : درصد اراضی لخت و فاقد پوشش
۷	استفاده از زمین	$X_7 = 20 - 0.2 P_c$	P _c : درصد تاج پوشش
۸	فرسایش سطحی	$X_8 = 0.25 S.S.F$	SSF: فرسایش سطحی خاک که با استفاده از روش BLM محاسبه می‌شود
۹	فرسایش رودخانه‌ای	$X_9 = 1.67 SSF.g$	SSFg: امتیاز عامل فرسایش خندقی در روش BLM

مواد و روش‌ها مدل MPSIAC

مدل PSIAC در سال ۱۹۶۸ توسط کمیته مدیریت آب ناحیه جنوب غربی اقیانوس اطلس برای برآورد رسوب مناطق جنوب غرب آمریکا که دارای اقلیم خشک تا نیمه خشک می‌باشد ارائه شده است. یکی از مهم ترین ایرادها در بکارگیری مدل PSIAC نحوه نمره دهی به عوامل مدل است که کاملاً کیفی بوده و به قضاوت و تجربه کارشناسان بستگی دارد. این روش برای اولین بار در ایران در سال ۱۳۵۲ در حوزه آبخیز سد دز استفاده شد. در حال حاضر نیز برای بررسی فرسایش خاک و تولید رسوب در طرح‌های جامع کشور از این روش استفاده می‌شود [۴۳]. جانسون و گبهارت^۱ در سال ۱۹۸۲ میلادی با اصلاح مدل اولیه تا حدودی این عیب را برطرف کرده و روابطی را برای محاسبه نمره هر یک از عوامل ارائه نمودند که مدل اصلاح شده به مدل MPSIAC معروف شد [۴۴]. این روش در مقایسه با سایر روش‌های تجربی (مدل‌های تجربی EPM، فورنیه^۲، داگلاس^۳، کرک‌بی، ژئومرفولوژی و هیدروفیزیکی) موجود، بیشترین عامل مؤثر در فرسایش خاک برای محاسبه فرسایش ویژه و تولید رسوب را در نظر گرفته است. در این روش بسته به شدت و ضعف هر عامل، عددی به آن نسبت داده می‌شود. سرانجام با در نظر گرفتن مجموع اعداد بدست آمده برای عوامل مختلف میزان رسوب دهی آبخیز برآورد می‌شود. جانسون و گبهارت [۴۴] طی پژوهشی عوامل نه گانه این روش را به صورت معادلات عددی ارائه کردند که در مطالعه حوزه آبخیز از این معادلات استفاده می‌شود (جدول ۱).

این مدل در درجه اول برای کاربرد در مناطق خشک و نیمه خشک

1. Johnson and Gebhardt
2. Fournier
3. Douglas

در جنوب غربی ایالات متحده آمریکا ارائه شد و اعتقاد بر این است که برای شرایط مشابه محیطی در ایران مناسب است [۸۴]. بر طبق پژوهش‌های باقرزاده کریمی [۱۳]، بیات [۱۴] و طاهری و همکاران [۹۱] مقایسه نتایج دو مدل MPSIAC و EPM با داده‌های اندازه گیری نشان داد که مدل MPSIAC در مقایسه با مدل EPM نتایج دقیق تری ارائه می‌دهد. محمودی [۶۰] نتیجه گرفت که مدل MPSIAC در مقایسه با داده‌های میدانی در حوزه آبخیز گل‌آباد اصفهان حداکثر مقدار فرسایش را نشان می‌دهد و بیان داشت که این مدل دقیق نبوده و نیاز به اصلاح دارد. عیسی‌زاده و همکاران [۳۰] مدل‌های MPSIAC و USLE را در حوزه‌های آبخیز کوچک در آذربایجان غربی با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که هر دو مدل نتایج منطقی ارائه دادند، اگرچه MPSIAC با توجه به صحت نتایج، مدل برتر بود. با این حال یکی از موارد مهم در مطالعات صورت گرفته این است که اغلب مطالعات برای مناطق کشاورزی ایران انجام شده و هیچ کدام از آن‌ها در بوم‌سازگان‌های بیابانی بومی که نقش مهمی در کنترل و به حداقل رساندن فرسایش خاک دارند، مورد آزمایش و مقایسه قرار نگرفتند [۱]. [۳] از سوی دیگر خدابخش و همکاران [۴۹]، راستگو و همکاران [۷۸]، برزو و همکاران [۱۹] و قضاوی و همکاران [۳۸] در بررسی کاربرد سه روش PSIAC، MPSIAC و EPM گزارش دادند، مدل PSIAC و مشتقات آن برای حوضه‌های آبخیز کوچک مناسب است. از سوی دیگر خسروی و همکاران [۵۰] به ارزیابی کارایی هفت مدل تجربی برآورد فرسایش و رسوب شامل EPM، MPSIAC، فورنیه، داگلاس، کرک‌بی، ژئومرفولوژی و هیدروفیزیکی با مقادیر مشاهده‌ای در حوزه آبخیز بابلرود استان مازندران پرداختند. نتایج حاصل از بررسی مدل‌های مختلف نشان داد که مدل MPSIAC مناسب‌ترین مدل برای تخمین میزان فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز بابلرود شناخته شد. با

این حال محققینی مانند تنگستانی [۹۸]، قضاوی و همکاران [۳۸]، رنگزن و همکاران [۷۷]، راستگو و همکاران [۷۸] به کارایی بیش تر مدل MPSIC نسبت به مدل EPM اذعان کرده اند.

مدل EPM

مدل EPM با هدف بررسی شدت فرسایش خاک در کشور یوگسلاوی سابق به کار گرفته شده است. پیشینه معرفی مدل EPM به سال ۱۹۸۸ در کنفرانس بین المللی رژیم رودخانه توسط گاوریلوویچ^۱ در کشور چین باز می گردد. از طرف دیگر در صربستان و مونته نگرو، این مدل برای برآورد شدت فرسایش آبی به عنوان مدل ملی ترجیح داده می شود. [۳۵]. این مدل براساس تحقیقات بلندمدت در مورد فرآیند فرسایش خاک در Gredelica Gorge توسط گاوریلوویچ توسعه داده شده است [۱]. این روش به ندرت در آمریکا استفاده شده و به طور معمول در اروپا، خاورمیانه و شمال آفریقا استفاده می شود هم چنین در برخی از حوزه های آبخیز در ایتالیا و به طور مکرر در ایران مورد آزمایش قرار گرفته و محققان نتیجه گیری کردند که نتایج با مشاهدات میدانی سازگار است [۹۴]. بلینکوف و کاستادینف [۱۸] در پژوهشی عملکرد مدل های مختلف ارزیابی خطر فرسایش برای اهداف مهندسی رودخانه را مورد ارزیابی قرار دادند. عواملی که برای مقایسه در نظر گرفته شد شامل مقیاس، برآورد اشکال مختلف فرسایش و هم چنین نیازهای بخش مدیریتی بود. براساس یافته های آن ها، EPM در سطح آبخیز برای نیازهای مدیریت آبخیز در منطقه کشورهای اروپای شرقی جنوبی مناسب است. امیری [۵] در پژوهشی به تخمین فرسایش و رسوب با استفاده از مدل EPM در حوزه آبخیز نیمه خشک قره آقاج در ایران مرکزی پرداخت. نتیجه مقایسه مقادیر فرسایش و رسوب با استفاده از مدل EPM با مقادیر اندازه گیری شده نشان داد که هیچ تفاوت معنی داری بین مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده در سطح معنی داری (۰/۰۵ p <) وجود ندارد. با این حال از این مدل در بوسنی، هرزگوین، کرواسی، مونته نگرو، مقدونیه، صربستان و اسلونی و هم چنین در برزیل، ایتالیا و مراکش استفاده می شود [۴۰]. از طرفی این مدل قابلیت اطمینان بالایی در محاسبه رسوب تولیدی دارد [۶۶].

عوامل مؤثر در فرسایش خاک در این مدل شامل وضعیت توپوگرافی، سنگ شناسی، خاک، نحوه استفاده از اراضی و عوامل اقلیمی می باشد. محاسبه میزان فرسایش بر اساس این مدل به صورت رابطه ۱ ارائه شده است [۷۹].

$$W_{SP} = T.H.Z^2.\pi \quad (1)$$

که در آن H بارندگی سالانه (mm)، π معادل ۳،۱۴، W_{SP} نیز میزان فرسایش ($m^3/km^2/yr$) و Z که از رابطه ۲ بدست می آید ضریب شدت فرسایش است:

$$Z = Y.Xa (f + 1)^{1/5} \quad (2)$$

که در آن Y ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش،

1. Gavrilovic

ضریب استفاده از زمین، f ضریب فرسایش منطقه و I میانگین شیب حوضه است. T نیز ضریب درجه حرارت است که از رابطه ۳ بدست می آید و در آن t میانگین دمای سالانه بر حسب درجه سانتی گراد است:

$$T = (t/10 + 0.1)^{0.5} \quad (3)$$

این روش در حوضه هایی که متوسط دمای سالانه آن ها کم تر از ۱- درجه سانتی گراد می باشد قادر نیست وضعیت فرسایش را ارزیابی کند، زیرا در رابطه شماره (۳) داخل پرانتز منفی خواهد شد. پس از تعیین درجه رسوب دهی، کلاس رسوب دهی مطابق جدول ۲ برای مدل EPM به دست می آید.

جدول ۲: طبقه بندی شدت فرسایش بر اساس مدل EPM [۲]

طبقه بندی فرسایش	شدت فرسایش	مقادیر حد	ارزش متوسط Z
I	خیلی شدید	$Z > 1$	۱/۲۵
II	شدید	$0.71 < Z > 1$	۰/۸۵
III	متوسط	$0.41 < Z > 0.7$	۰/۵۵
IV	کم	$0.2 < Z > 0.4$	۰/۳۰
V	خیلی کم	$Z > 0.19$	۰/۱۰

مزایای اصلی این روش قابلیت کاربرد آن بدون توجه به کاربری زمین [۳۶] راحتی محاسباتی و نیاز به داده های ورودی کم، قابلیت اجرای آن در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و در نظر گرفتن مهم ترین اشکال فرسایش و فرآیندهای انتقال رسوب فرسایش سطحی، فرسایش شیار، فرسایش آب کنده، فرسایش رودخانه ای و زمین لغزش است [۲۳]. این مدل دارای معایبی نیز می باشد. علاوه بر لیتولوژی، دیگر پارامترهای مهم خاک (مانند دانه بندی، مقدار ماده آلی خاک) برای توصیف ویژگی های خاک در نظر گرفته نمی شوند. هم چنین مورفولوژی شیب در نظر گرفته نمی شود، در حالی که حجم و نوسانات زمانی رواناب به عوامل مدل نسبت داده نمی شود [۲۷]. در همین راستا پژوهش گرانی مانند رفاهی و نعمتی [۷۹]، خدابخش و همکاران [۴۹] و صدوق و همکاران [۸۵] کارایی نامناسب مدل EPM در برآورد میزان فرسایش و رسوب در مطالعات تفصیلی تأیید نموده اند. با این حال متوسط فرسایش برآورد شده با استفاده از مدل EPM برای کشور ایران در حدود شش تن بر هکتار بر سال گزارش شده است [۳۳].

این مدل برای نیازهای مدیریت آبخیز در کشورهای اروپای شرقی جنوبی مناسب تشخیص داده شده [۱۸] و از سوی دیگر به طور گسترده برای برآورد فرسایش خاک و شناسایی مناطق با آسیب پذیری بالا، هم در سطح ملی [۲۶، ۲۹، ۳۲، ۴۵] و سطوح بین المللی [۲۳، ۱۰۶] و ارائه نتایج دقیق و قابل اطمینان مورد استفاده قرار می گیرد.

مدل RUSLE

روش معادله جهانی اتلاف خاک (USLE) به دلیل سادگی، پرکاربردترین مدل تجربی در تحقیقات فرسایش خاک است، اگرچه

و همکاران، [۸۲] از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^j (EI_{30})_i}{N} \quad (5)$$

که در آن، $(EI_{30})_i$ شاخص فرسایش‌پذیری رگبار i (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت)، j تعداد رگبارها طی دوره N سال، E انرژی جنبشی رگبار (مگاژول بر هکتار) و I_{30} بزرگ‌ترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای آن (میلی‌متر بر ساعت) است. بر همین اساس ذبیحی و همکاران [۱۰۴] بر اساس اطلاعات حاصل از ۷۰ ایستگاه نقشه فرسایش‌پذیری باران را برای کل کشور استخراج نمودند.

عامل K: عامل فرسایش‌پذیری خاک که عبارت از مقدار فرسایش برای تیپ مشخص خاک منطقه به‌طوری که اندازه‌گیری در کرت‌های آزمایشی به‌طول ۲۲/۱ و شیب نه درصد و در حالت آیش‌دائم حاصل می‌شود و به مواد آلی، ترکیب خاک، نفوذپذیری و ساختار مقطع عرضی آن بستگی دارد. عامل فرسایش‌پذیری از اطلاعات پروفیل‌های خاک حفر شده در هر یک از واحدهای اراضی منطقه محاسبه و به کل واحدهای اراضی تعمیم داده می‌شود. در همین راستا عامل فرسایش‌پذیری خاک در ایران براساس اطلاعات پایگاه داده خاک‌های جهان^۱ و همچنین نمونه‌برداری‌های صورت گرفته توسط محمدی و همکاران [۶۲] برای کل کشور تهیه شده است.

عامل LS: اثر توپوگرافی در فرسایش خاک در مدل RUSLE از عامل بی‌بعد LS محاسبه می‌شود. مقدار عامل LS در مدل RUSLE براساس الگوریتم ارائه شده توسط رنارد و همکاران [۸۲] از روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22/13} \right)^{1/5} (10/8 \sin \theta + 0/03) \quad 9s \leq \% \quad (6)$$

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22/13} \right)^{1/5} \left(\frac{\sin \theta}{0.08960} \right)^{1/6} \quad s > \% 9 \quad (7)$$

این عامل برای استفاده از لایه شیب و جریان تجمعی برای کشور ایران توسط محمدی و همکاران [۶۲] استخراج شده است.

عامل C: عامل پوشش گیاهی را می‌توان با استفاده از شاخص پوشش گیاهی مشتق شده از سنجش تصاویر ماهواره‌ای برآورد کرد. شاخص گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) مقدار پوشش گیاهی سبز را اندازه می‌گیرد. برای محاسبه NDVI تفاوت بازتاب بین مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود [۷۴].

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (8)$$

در این معادله NIR مقدار باند مادون قرمز نزدیک و RED مقدار باند قرمز است.

اما با توجه به این‌که در کشور ایران ۵۰ درصد بارندگی مختص فصل پاییز بوده و بارندگی در این فصل از شدت زیادی برخوردار می‌باشد لذا رابطه لین و همکاران [۷، ۵۷] برآورد بهتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهد [۷]. از همین‌رو محمدی و همکاران [۶۲] براساس معادله لین و همکاران (رابطه ۹) عامل پوشش گیاهی را با

برای شیوه‌های کشاورزی طراحی شده است [۴۲]. به‌دنبال این مدل، نسخه جدید مدل USLE با نام معادله تجدیدنظر شده جهانی هدررفت خاک RUSLE توسعه یافته که برآوردهای دقیق‌تری از عوامل K, R, C, P و فرسایش خاک انجام می‌دهد [۹۸]. این مدل ساختار USLE را حفظ کرد، که شامل چندین تغییر در پارامترهای معادله به‌منظور در نظر گرفتن تحقیقات، آزمایش‌ها، داده‌ها و تفاسیر نظری موجود، با توجه به انتشار قبلی USLE بود [۹۸]. این مدل از نوع مدل‌های توزیعی بوده که توانایی شناسایی نقاط بحرانی فرسایش را دارد. از این مدل در مقیاس ملی در کشور استرالیا [۵۸، ۹۵] و در مقیاس قاره‌ای در قاره اروپا [۹۸] و آفریقا [۵۶] بهره گرفته شده است. در کشور ایران نیز متوسط فرسایش خاک با استفاده از مدل مذکور ۲۴ تن بر هکتار بر سال گزارش شده است [۶۲].

از سوی دیگر فرسایش خاک در این مدل، به روش ساده شده مدل‌سازی و برآورد می‌شود (فقط با ضرب عوامل مختلف)، اثرات فرسایش آب‌کنندگی در این مدل برآورد نمی‌شود (فقط فرسایش سطحی، شیاری و بین‌شیاری)، انتقال رسوب و رسوب‌گذاری در نظر گرفته نمی‌شود، هم‌چنین تولید رسوب در خروجی حوضه رانمی‌توان تخمین زد (مدل فقط می‌تواند فرسایش ناخالص را برآورد کند)، دقت برای وقایع سیل منفرد بسیار پایین است (مدل فقط برای برآورد بلندمدت و متوسط مناسب است) [۱۸]. علاوه بر این، در مناطقی که فاقد اندازه‌گیری هستند، این روش به‌عنوان یکی از روش‌ها برای ارزیابی هدررفت خاک در نظر گرفته می‌شود. کم بودن تعداد و بعضاً پراکنش نامناسب پروفیل‌های خاک حفر شده در مطالعات تفصیلی اجرایی آبخیزداری و کافی نبودن اطلاعات آن‌ها برای تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک از معایب دیگر این مدل است [۲۷]. که در صورت وجود داده‌های مرتبط با فرسایش‌پذیری خاک، برآورد هدررفت خاک با مدل RUSLE نتایج خوبی را در پی خواهد داشت. با این حال تمامی لایه‌های اطلاعاتی برای برآورد فرسایش توسط مدل مذکور در سطح کشور موجود است [۶۲].

از این مدل برای برآورد هدررفت خاک در مناطق کشاورزی، اراضی جنگلی با شیب بالا و مناطق کوهستانی مدیریت‌های نتایج خوب و منطقی در پی خواهد داشت [۲۰، ۲۷، ۹۲]. با این حال مدل RUSLE برای برآورد هدررفت خاک به‌طور گسترده پذیرفته و اجرا می‌شود [۱۰، ۲۸، ۳۴، ۶۸، ۷۲]. از همین‌رو محققینی مانند میگوئل و همکاران [۶۱]، لین و همکاران [۵۷]، واعظی و همکاران [۹۷] و رضائی و همکاران [۸۳] کارایی بالای مدل RUSLE را تأیید می‌نمایند. با این حال این مدل، یک مدل برآورد فرسایش آبی در اراضی کشاورزی و هم‌چنین مرتعی است که با شش عامل فرسایشی رابطه دارد و می‌تواند برای برآورد فرسایش در پایه‌های زمانی مختلف به‌کار برده شود [۸۱].

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (4)$$

در این معادله A ، میانگین فرسایش خاک در واحد سطح در پایه زمانی مورد نظر، عامل R : عامل فرسایش‌پذیری باران، نشان‌دهنده پتانسیل فرسایش ناشی از بارش باران در پایه زمانی مورد نظر است. مقدار R در مدل RUSLE براساس شاخص فرسایش‌پذیری (I_{30}) مطابق روش رنارد

1. Harmonized World Soil Database

توجه به ۱۳۰ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای سال ۱۳۹۳ تهیه کردند.
 $C = (-NDVI + 1) / 2$ (۹)

عامل P: عامل مدیریت اراضی را به عنوان مقدار هدررفت خاک در واحد سطح یک زمین حفاظت شده به زمینی که لخت باشد و در جهت تندترین شیب شخم خورده باشد، تعریف نمودند. بنابراین عامل کاربری اراضی براساس اقدامات حفاظتی و همچنین بر اساس کاربری اراضی محاسبه می‌شود [۱۰۰]. با این حال در مناطقی که وسعت منطقه مورد مطالعه زیاد باشد عامل P از طریق اثر خطوط هم‌تراز شیب بر مقدار فرسایش خاک بررسی می‌شود [۱۰۰، ۲۵]؛ زیرا مناطق هم‌تراز شیب از نظر مقدار عامل کاربری اراضی ارزش یکسانی به خود اختصاص می‌دهند [۲۵، ۶۲، ۹۵، ۱۰۰]. بر همین اساس محمدی و همکاران [۶۲] با استفاده از لایه شیب عامل کاربری اراضی را برای کل کشور برآورد کردند.

مدل IntEro

مدل IntEro بر پایه مدل EPM می‌باشد که اولین بار در مونته‌نگرو و شمال شرقی مدیترانه استفاده شده است [۸۹]. استفاده از این مدل در کشورهای مختلف جهان از جمله بوسنی هرزگوین، بلغارستان، کرواسی، جمهوری چک، ایتالیا، ایران، مقدونیه، صربستان، اسلوونی، مراکش، برزیل، نپال و ژاپن گزارش شده و نتایج مفیدی در پی داشته است [۴۸، ۶۸]. از سوی دیگر کارایی این مدل برای پیش‌بینی دبی اوج، فرسایش خاک و تولید رسوب در برخی موارد ارزیابی شد و نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند در انواع اندازه‌های حوزه آبخیز با کاربری‌های مختلف استفاده شود [۸۹].

بسته نرم‌افزاری تهیه شده برای مدل IntEro به زبان برنامه Delphi Borland ایجاد شده و با سیستم عامل ویندوز سازگار است. این نرم‌افزار در ورود اطلاعات دقت خاصی داشته و به همین دلیل در صورت ورود اطلاعات غیرمنطقی هشدار می‌دهد و اجازه محاسبه نتایج را نمی‌دهد. اجرای این نرم‌افزار به‌طور کلی نیازمند ۲۶ ورودی است و در نهایت ۲۲ خروجی را در اختیار قرار می‌دهد. استفاده از نرم‌افزار IntEro می‌تواند به صورت نسخه خلاصه مدل با تعداد ورودی و خروجی کم‌تر باشد یعنی به جای ۲۲ خروجی کاربر می‌تواند پردازش برخی نتایج خاص (داده‌های خروجی) را درخواست کند و این کار در بخش تنظیمات قابل انجام است. در نسخه کوتاه، نرم‌افزار به طور خودکار گروهی از داده‌ها را به عنوان داده ورودی انتخاب می‌کند. مدل IntEro به پیش‌بینی شدت فرسایش خاک و حداکثر جریان خروجی از حوزه آبخیز با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی، هواشناسی، زمین‌شناسی و خاک‌شناسی می‌پردازد [۴۸، ۸۹]. در شرح خدمات آبخیزداری به منظور دستیابی به حداکثر جریان خروجی برای مباحث طراحی سدها، مدل‌ها و روابط گوناگونی به کار می‌روند. که در صورت استفاده از مدل IntEro علاوه بر مقدار هدررفت خاک حداکثر جریان خروجی نیز قابل محاسبه است. که باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود. از مزایای دیگر این مدل، در دسترس بودن تمام مقادیر ورودی در اکثر حوزه‌های آبخیز کشور می‌باشد.

به منظور تأیید و اعتبارسنجی نتایج مدل IntEro، تولید رسوب در ۵۷ حوزه آبخیز در منطقه Polimlje واقع در کشور مونته‌نگرو برآورد شد. مقایسه اندازه‌گیری‌های میدانی با نتایج مدل نشان داد که این مدل از کارایی قابل قبولی برای برآورد تولید رسوب در این منطقه برخوردار است [۹۹]. اسپالویچ و همکاران [۹۰] در پژوهشی به ارزیابی تولید رسوب در حوزه آبخیز Tronosa واقع در مونته‌نگرو پرداختند. یافته‌های ایشان نشان داد که دبی اوج منطقه برابر ۲۱۶ مترمکعب در ثانیه، مقدار رسوب ۸۴۶۵ مترمکعب در سال و رسوب ویژه نیز به ترتیب برابر ۲۸۶ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال محاسبه شد. در پژوهشی دیگر دارگانیک و همکاران [۲۴] به محاسبه تولید رسوب در یکی از زیرآبخیزهای حوزه آبخیز شیرین‌دره (S1-3) پرداختند نتایج ایشان نشان داد دبی اوج زیرآبخیز مطالعاتی با دوره برگشت ۱۰۰ ساله برابر ۸۷ مترمکعب بر ثانیه، هدررفت خاک برابر ۵۵۷۴ مترمکعب در کیلومتر مربع و رسوب ویژه نیز برابر ۱۹۴ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال محاسبه شد. همچنین خالدی‌درویشان و همکاران [۴۶] به محاسبه رسوب تولیدی در یکی دیگر از زیرآبخیزهای حوزه آبخیز شیرین‌دره (S2-1) پرداختند. نتایج ایشان نشان داد دبی اوج با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و رسوب ویژه برای آبخیز مذکور به ترتیب برابر ۱۰۱ مترمکعب در ثانیه و ۲۶۷ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال، محاسبه شد. با این حال پژوهش‌های مذکور به این نتیجه رسیدند که مدل IntEro می‌تواند ابزاری مفید برای محققان در محاسبه میزان رواناب و تولید رسوب حوزه‌های آبخیز منتهی به دریای خزر با خصوصیات فیزیکی-جغرافیایی مشابه حوزه آبخیز شیرین‌دره باشد.

پارامترهایی که توسط مدل IntEro برای محاسبه تلفات سالانه خاک مورد توجه قرار می‌گیرند، در معادلات زیر خلاصه می‌شوند [۶۹].

$$W \text{ year} = T \times H \text{ year} \times \pi \times \sqrt{Z3} \times F \quad (9)$$

که در آن، W year کل فرسایش سالانه (مترمکعب بر سال)، T، ضریب دما، H year میانگین بارش سالانه (میلی‌متر)، F مساحت حوزه آبخیز (کیلومتر مربع) و Z ضریب فرسایش است که از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$Z = Y \times X \times (\sqrt[0]{I}) \quad (10)$$

که در آن، Y ضریب فرسایش‌پذیری خاک، X ضریب حفاظت خاک، Ø ضریب توسعه فرسایش است. از همین رو ضریب فرسایش‌پذیری خاک بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و خاک [۴۸، ۹۹]، ضریب حفاظت از خاک براساس کاربری اراضی [۹۹] و ضریب فرسایش‌پذیری خاک نیز از طریق سیمای فرسایشی حوزه آبخیز قابل محاسبه است [۴۸].

آورد رسوب واقعی از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$G \text{ year} = W \text{ year} \times Ru \quad (11)$$

که در آن، G year آورد رسوب واقعی (مترمکعب در سال)، W year کل فرسایش سالانه (مترمکعب بر سال)، Ru نسبت تحویل رسوب است. که از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$RU = \frac{\sqrt{0.5}}{2(L+10)}$$

که در آن، O محیط حوزه (کیلومتر)، D میانگین اختلاف ارتفاع حوزه (کیلومتر)، L طول حوزه (کیلومتر).
ورودی‌های نرم‌افزار مدل IntErO به شرح جداول ۳ تا ۸ می‌باشند [۶۸]:

جدول ۳: ویژگی هندسی حوزه رودخانه

ردیف	ورودی	واحد
۱	مساحت حوزه رودخانه (F)	کیلومترمربع
۲	محیط حوزه رودخانه (O)	کیلومتر
۳	طول آبراهه اصلی (Lv)	کیلومترمربع
۴	مساحت بخش بزرگ‌تر حوزه رودخانه (Fv)	کیلومترمربع
۵	مساحت بخش کوچک‌تر حوزه رودخانه (Fm)	کیلومترمربع
۶	طول حوزه رودخانه (Lb)	کیلومتر

جدول ۴: ویژگی‌های توپوگرافی حوزه رودخانه

ردیف	ورودی	واحد
۷	طول خطوط تراز (Liz)	کیلومتر
۸	مساحت بین خطوط تراز مجاور (f)	کیلومترمربع
۹	مقدار کم‌ترین خط تراز (h0)	متر
۱۰	مسافت مساوی (Δh)	کیلومتر
۱۱	پایین‌ترین نقطه ارتفاعی حوزه رودخانه (Hmin)	کیلومتر
۱۲	بالا‌ترین نقطه ارتفاعی حوزه رودخانه (Hmax)	کیلومتر

جدول ۵: حداکثر جریان خروجی از حوزه رودخانه

ردیف	ورودی	واحد
۱۳	مساحتی از حوزه شامل سنگ با نفوذپذیری بالا (fp)	درصد
۱۴	مساحتی از حوزه شامل سنگ با نفوذپذیری متوسط (fpp)	درصد
۱۵	مساحتی از حوزه شامل سنگ با نفوذپذیری کم (fo)	درصد
۱۶	مساحتی از حوزه شامل جنگل (fs)	درصد
۱۷	مساحتی از حوزه شامل گراس، علفزار، چراگاه و باغ (ft)	درصد

جدول ۸: داده‌های نشان‌دهنده شدت فرسایش خاک

ردیف	ورودی	واحد	توضیحات
۲۱	Y	-	نوع یا تیپ اجزای مختلف خاک که ارزش عددی آن عکس مقاومت خاک در برابر فرسایش است و در تابع فرسایش خاک با حرف Y نشان داده می‌شود (ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش).
۲۲	Xa	-	ضریب استفاده از زمین
۲۳	φ	-	ضریب فرسایش منطقه‌ای (ضریبی که معادل عددی فرایندهای فرسایش خاکی است، که به وضوح قابل مشاهده‌اند)

۱۸ مساحتی از حوزه شامل زمین‌های بایر، شخم خورده و بدون پوشش علفی (fg) درصد

جدول ۶: ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوزه رودخانه

ردیف	ورودی	واحد
۱۹	مجموع طول آبراهه‌های با رتبه ۲ و ۱ (ΣL)	کیلومتر
۲۰	کوتاه‌ترین فاصله بین سرشاخه‌ها و خروجی (Lm)	کیلومتر

جدول ۷: داده‌های هواشناسی

ردیف	ورودی	واحد
۲۱	ارتفاع بارندگی سیل آسا (hb)	میلی‌متر
۲۲	متوسط درجه حرارت سالانه (to)	درجه سانتی‌گراد
۲۳	متوسط بارش سالانه (H god)	میلی‌متر

با توجه به جداول فوق مواد مورد نیاز برای بدست آوردن مقادیر ورودی مدل IntErO به شرح زیر است؛

۱- از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ برای محاسبه مقادیر Fv، O، F، Liz، Lv، Fm، f استفاده می‌شود.

۲- از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ برای محاسبه مقادیر fp، fpp و fo استفاده خواهد شد.

۳- از نقشه‌های خاک‌شناسی موجود، برای محاسبه Y استفاده می‌شود.

۴- از داده‌های ممیزی اراضی برای محاسبه مقادیر ft، fs استفاده خواهد شد.

۵- از داده‌ها و اطلاعات هواشناسی برای محاسبه مقادیر to، hb و H god استفاده می‌شود.

در نهایت با استخراج ورودی‌ها و وارد کردن آن‌ها به محیط نرم افزار IntErO، نرم‌افزار صحت و درستی داده‌ها را بررسی می‌کند، اگر داده‌ها درست و با ارتباط منطقی و صحیح وارد شده باشند کل فرسایش سالانه و حداکثر جریان خروجی به صورت عدد نمایش داده می‌شوند.

جدول ۹: خلاصه‌ای از تحلیل کیفی مدل‌های مورد بررسی

RUSLE	MPSIAC	EPM	IntErO	مدل‌های مورد بررسی
				کاربردهای مختلف
*	*	*	*	ارزیابی الگوی متوسط خطر فرسایش
*	*	*	*	شناسایی مناطق پر خطر
*	*	*	*	شناسایی نقاط پرخطر
*	*	*	*	اثرات اقدامات حفاظتی
	*	*	*	برآورد کل مواد انتقال یافته
				مقیاس مورد استفاده
*				فیلد (دامنه، کرت)
*	*	*	*	حوزه‌های آبخیز با مساحت کم
*	*	*	*	حوزه‌های آبخیز با مساحت زیاد
				برآورد اشکال مختلف فرسایش
*	*	*	*	فرسایش سطحی
*	*	*	*	فرسایش شیبی
	*	*	*	فرسایش خندقی
	*	*	*	فرسایش رودخانه‌ای
		*	*	(Deposition) رسوب‌گذاری

بحث و نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی برای تعیین شدت فرسایش در سطح حوزه‌های آبخیز و ارائه‌ی نسخه‌های مدیریتی مبتنی بر وضعیت فرسایش تشخیص داده شده وجود دارد که متناسب با داده‌های در دسترس، دقت مورد انتظار، امکانات و بودجه‌ی موجود و زمان در دسترس، یکی از روش‌ها در شرح خدمات آبخیزداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین در تحقیق حاضر چهار مدل EPM، MPSIAC، RUSLE و IntErO با هدف بررسی دقت و کارایی مدل‌های مذکور در برآورد فرسایش و رسوب و انتخاب مدلی بهینه در شرایط مختلف و متناسب با اهداف مدیریتی برای محاسبه فرسایش و رسوب در شرح خدمات آبخیزداری مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه‌ای از تحلیل کیفی مدل‌های مورد بررسی در جدول ۹ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که هیچ یک از مدل‌ها را نمی‌توان در تمام مقیاس‌های مختلف به کار برد. به‌عنوان مثال مدل RUSLE برای مقیاس‌های کوچک و صحرایی به نسب مقیاس‌های وسیع نتایج معتبرتری ارائه می‌دهد. در صورتی که مدل EPM برای مقیاس‌های کوچک و بزرگ نیز قابل استفاده است [۱۸]. در برآورد اشکال مختلف فرسایش مدل RUSLE نمی‌تواند فرسایش آب‌کندی را برآورد کند. با این حال، این مدل برای برآورد فرسایش سطحی و بین‌شیاری مناسب بوده، در صورتی که مدل‌های MPSIAC، EPM و IntErO می‌توانند برای برآورد اشکال مختلف فرسایش مورد استفاده قرار گیرند.

مدل MPSIAC از آنجایی که برای مناطق خشک و نیمه‌خشک در ایالات متحده آمریکا طراحی شده است بنابراین می‌تواند در مناطق

وسیع و خشک نتایج مورد قبولی ارائه دهد [۱، ۱۳]. از همین رو توصیه می‌شود در صورت امکان در مناطق خشک از به‌کارگیری مدل‌های EPM و RUSLE اجتناب گردد. همچنین استفاده از مدل MPSIAC در آبخیزهای دارای مناطق کشاورزی نتایج مناسب‌تری نسبت به مدل EPM ارائه می‌دهد که با نتایج [۱۱، ۱۴، ۹۱]. هم‌خوانی دارد. مدل MPSIAC، ضمن این‌که از عوامل بیش‌تری برای محاسبه فرسایش و رسوب حوضه برخوردار می‌باشد تعیین امتیاز بیش‌تر عوامل آن براساس معادلات ویژه و از اطلاعات و آمار خاصی محاسبه می‌شود. همچنین تعداد جدول راهنمای مورد استفاده در این مدل کم‌تر و دارای محدوده‌های گسترده‌تری برای امتیازدهی هستند که متعاقباً از اعمال نظر کارشناسی در امتیازدهی مجموع عوامل کاسته می‌شود.

از سوی دیگر مدل EPM در رابطه با انجام وظایف مختلف از جمله ارزیابی الگوی متوسط خطر فرسایش، شناسایی مناطق پرخطر، شناسایی نقاط داغ از نظر فرسایش، تجمع رسوب، الگوهای رسوب‌گذاری و فرسایشی دقیق، اثرات اقدامات حفاظتی و برآورد کل مواد انتقال یافته مناسب است. از سوی دیگر نیازهای مدیریت منابع آب (به‌خصوص در ارتباط با اثرات خارج از سایت مانند رسوب در مناطق پایین‌دست یا حوزه یک سد) توسط مدل EPM به‌خوبی برآورد می‌شوند.

از طرفی مدل EPM می‌تواند عملکرد مناسبی را برای مناطق کوهستانی و نیز خاک‌های گرمسیری داشته باشد با این حال مورفولوژی شیب و حجم و نوسانات زمانی رواناب به عوامل مدل نسبت داده نمی‌شود. از سوی دیگر مدل RUSLE به علت سادگی محاسبات، دخیل کردن ورودی‌های تأثیرگذار در فرآیند فرسایش، تعداد کم

Tehran University Press. 714 pp. (In Persion)

3. Ahmadi, H., M. R., & Servati, A. M. Noormohamady. 2011. Sediment And Erosion Estimation Using EPM And MPSIAC, Using Geomorphological Method And GIS In Baghareh (Torbat Heydarieh) Catchment Basin, Journal of Geographical Science. 14: 28-33. (In Persion)

4. Ahmed, M., Al-Dousari, N., & Al-Dousari, A. 2016. The role of dominant perennial native plant species in controlling the mobile sand encroachment and fallen dust problem in Kuwait. Arabian Journal of Geosciences. 9 (2): 1-4.

5. Amiri, F. 2010. Estimate of erosion and sedimentation in semi-arid Basin using empirical Models of erosion potential within a Geographic Information system. Air, Soil and Water Research. 3 (1): 38-44

6. Amiri, F., Arzani, H., Chaichi, M. R., Khajehuddin, J. and Farahpour, M. 2009. Efficiency of mpsiac and epn models for assessment soil erosion in range suitability. Rangeland. 1 (3): 138-154. (In Persion)

7. Anache, J. A., Bacchi, C. G., & Alves-Sobrinho, T. 2014. Modeling of (R) USLE C-factor for pasture as a function of normalized difference vegetation index. Eur Int J Sci Technol. 3 (9): 214-221

8. Ansari Lari, A., Ansari, M. 2017. Evaluation of soil erosion risk & sedimentation potential by using epn model in gabric basin- se hormozgan- iran. Journal of natural environment hazards. 6 (11): 1-15. (In Persion)

9. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 34 (1): 73-89.

10. Atoma, H., Suryabagavan, K. V., Balakrishnan, M. 2020. Soil erosion assessment using RUSLE model and GIS in Huluka watershed, Central Ethiopia. Sustainable Water Resources Management. 6(1): 1-12.

11. Bagherzadeh, A., and Daneshvar, M. R. M. 2013. Evaluation of sediment yield and soil loss by the MPSIAC model using GIS at Golestan watershed, northeast of Iran. Arabian Journal of Geosciences. 6 (9): 3349-3362.

ورودی‌ها و محاسبه مقدار فرسایش در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه توانمندی بالایی برای برآورد فرسایش سطحی و بین‌شیاری دارد. مدل RUSLE به دلیل شناسایی مناطق بحرانی فرسایش و در صورت در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز مدل، ابزار مناسبی برای مدیران آبخیز و برنامه‌ریزان می‌باشد. برای پاسخ‌گویی به نیازها و بخش‌های مختلف علمی (کشاورزی، جنگل‌داری، منابع آب و مدیریت آبخیزداری)، مدل‌های USLE و RUSLE مناسب‌ترین مدل‌ها برای پاسخ‌گویی به نیازهای کشاورزی هستند. هم‌چنین در صورتی که این مدل برای مناطق کوهستانی مدیترانه‌ای و نیز مناطق جنگلی با درصد شیب بالا به کار برده شود نتایج دقیقی ارائه می‌دهد.

مدل IntEro یک روش کامپیوتری گرافیکی براساس روش پتانسیل فرسایش EPM است که در الگوریتم آن تعبیه شده است. با استفاده از مدل IntEro که اغلب ورودی‌های مورد نیاز آن در اکثر حوزه‌های آبخیز کشور قابل استخراج بوده و نرم‌افزاری برای سهولت استفاده از مدل تهیه شده و در دسترس می‌باشد، می‌توان میزان فرسایش خاک و هم‌چنین خروجی‌های متعدد را محاسبه کرد. از ویژگی‌های دیگر این مدل، به دخیل کردن اغلب پارامترهای تأثیرگذار در فرسایش و رسوب و میزان دبی است. از طرفی با در دسترس قرار دادن خروجی‌های متعدد از جمله حداکثر جریان خروجی از آبخیز و نسبت تحویل رسوب، مدلی کارا در برآورد میزان فرسایش و رسوب در مقیاس سالانه است. از آنجایی که این مدل مبتنی بر روش EPM بود، که در کشورهای مختلف در سال‌های اخیر مورد استفاده و پذیرش قرار گرفته است. بنابراین می‌تواند در اغلب نقاط کشور کارایی و دقت خوب و منطقی ارائه داده، و به عنوان مدلی مناسب برای برآورد فرسایش و رسوب در اغلب نقاط کشور از جمله شمال شرق و غرب کشور و هم‌چنین در آبخیزهای کوهستانی و خاک‌های گرمسیری و مناطق نیمه‌خشک به دلیل ارائه نتایج منطقی مورد استفاده قرار گیرد. اما در این مدل توزیع مکانی فرسایش مدنظر نیست و فقط مقدار مولفه‌های فرسایش و دبی در مقیاس سالانه برآورد می‌شود. با این حال توصیه می‌شود عملکرد سایر مدل‌های ارائه شده در سال‌های اخیر برای برآورد فرسایش و رسوب مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت مدل‌هایی متناسب با اهداف مدیریتی، داده‌های در دسترس، شرایط توپوگرافی و اقلیمی انتخاب شوند. در نهایت انتظار می‌رود در صورت انتخاب مدل مناسب برای برآورد فرسایش و رسوب در شرح خدمات مطالعات تفصیلی اجرایی آبخیزداری، ضمن صرفه‌جویی در زمان، طراحی و اجرای اقدامات حفاظتی نیز مناسب، هدفمند، و مقرون به صرفه خواهد بود.

منابع

1. Abdullah, M., Feagin, R., & Musawi, L. 2017. The use of spatial empirical models to estimate soil erosion in arid ecosystems. Environmental monitoring and assessment. 189 (2):1-17. (In Persion)

2. Ahmadi, h. Applied Geomorphology1. 2007.

21. Dastranj A, Kazemi M, Kazemi M, & Falah S, Adeli B. 2014. Assessment corrective methods for estimating suspended sediment (Case Study: Beshaar Watershed). Environmental Erosion Research Journal. 4 (3): 47-57. (In Persion)

22. De Vente, J. & Poesen, J. 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semiquantitative models. Earth-Science Reviews. 71 (1): 95–125.

23. De Vente, J., Poesen, J., Bazzoffi, P., Rompaey, A. V., & Verstraeten, G. 2006. Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: the importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins. Earth Surface Processes and Landforms. 31 (8): 1017-1034.

24. Draganic, J., Drobnjak, B., Campar, J., Bulajic, B., Zajovic, V., Behzadfar, M., & Spalevic, V. 2015. Calculation of Sediment yield using the IntErO Model in the S1-3 Watershed of the ShirinDareh River Basin, Iran. In 9th Congress of the Soil Science Society of Bosnia and Herzegovina. 1-8

25. Drzewiecki, W., Wężyk, P., Pierzchalski, M., & Szafrńska, B. 2014. Quantitative and qualitative assessment of soil erosion risk in Małopolska (Poland), supported by an object-based analysis of high-resolution satellite images. Pure and Applied Geophysics. 171 (6): 867-895.

26. Efthimiou, N., & Lykoudi, E. 2016. Soil erosion estimation using the EPM model. Bulletin of the Geological Society of Greece. 50 (1): 305-314

27. Efthimiou, N., Lykoudi, E., & Karavitis, C. 2017. Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. Hydrological Sciences Journal. 62 (16): 2674-2694.

28. Efthimiou, N., Lykoudi, E., & Karavitis, C. 2014. Soil erosion assessment using the RUSLE model and GIS. European Water. 47 (1): 15–30.

29. Efthimiou, N., Lykoudi, E., Panagoulia, D., & Karavitis, C. 2016. Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE Models: the case of Venetikos River Catchment. Global NEST Journal. 18 (1): 164-179.

12. Bahrawi, A., Elhag, M., Aldhebiani, AY. Galal, K., Hegazy, AK., & Alghailani, E. 2016. Soil Erosion Estimation Using Remote Sensing Techniques in Wadi Yalamlam Basin, Saudi Arabia, Hindawi Publishing Corporation. 15:1-8.

13. Baqerzadeh-Karimi, M. 1993. Studying the efficiency of the models of assessing the erosion, sediment, distance and GIS in the soil erosion studies estimation. Tarbiat Modares University. Tehran. 177 pp. (In Persion)

14. Bayat, R. 1999. Studying the efficiency of the MPSIAC and EPM models in assessing the erosion and sediment of the Taleqanroud basin using the Geographical Information System (M. Sc. thesis). The University of Tehran. 162 pp. (In Persion)

15. Bazrafshan, O., & teimouri, F. 2018. Comparison of the efficiency the RUSLE and EPM models in estimating soil erosion and sediment yield according to the sediment rating curve (case study: Jask-Gabrik watershed). Applied Geology. 12(23): 50-62. (In Persion)

16. Beasley, D.B., Huggins, L.F., & Monke, E.J., 1980. NSWERS: A model for watershed planning. Transactions of the ASAE, 23: 938–944.

17. Behzadfar, M. Spalevic, V. Billi, P. Chalise, D. L. 2018. Calculation of soil erosion intensity and runoff in the S7-8-int basin of the Calculation of Soil erosion intensity and Runoff in the S7-8-int basin of the Shirindareh Watershed in Iran. Green Room Sessions 2018 International GEA (Geo Eco-Eco Agro) Conference. (November): 111–116.

18. Blinkov, I., & Kostadinov, S. 2010. Applicability of various erosion risk assessment methods for engineering purposes. In BALWOIS 2010 Conference-Ohrid, Republic of Macedonia. 25-29.

19. Borzoo, A., Momayezi, M. ,& Nik Andish, A. 2008. Comparison of estimating soil erosion and sediment by epm, psiac and mpsiac methods in chehl cheshmeh basin, fars province. Dynamic agriculture. 1(5): 19-25. (In Persion)

20. Csáfordi, P., Pödör, A., Bug, J., & Gribovskyi, Z. 2012. Soil erosion analysis in a small forested catchment supported by ArcGIS Model Builder. Acta

RiverS (Case Study: Simineh Rood). *Journal of Environmental Science and Technology*. 19 (2): 1-13. (In Persion)

40. Guiçardi, A. C. F., Spalevic, V., & Mincato, R. L. 2017. Diagnóstico do meio físico como subsídio para o planejamento da sub-bacia hidrográfica do Córrego Estiva, Alfenas, Sul de Minas Gerais. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*. 1: 370-381.

41. Haan, C.T., Barfield, B.J., & Hayes, J.C. 1994. *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. San Diego, CA: Academic Press. 1- 578.

42. Harmon, R. S., & Doe, W. W. 2001. *Landscape erosion and evolution modeling*: Springer Science & Business Media. 1-540.

43. Jafarzadeh Estalkhouhi, A., Rezaei, P. 2017. Estimation of Soil Erosion in Sefidrood Watershed by Emphasis on the Role of Landforms. *Researches in Geographical Sciences*. 17 (44): 201-221.

44. Johnson, C.W. & Gebhardt, K. A. 1982. Predicting sediment yields from rangelands. In *proceedings of workshop on estimating erosion and sediment yield on rangelands*, Tucson, Arizona, March 1981 US Department of Agriculture, *Agriculture Reviews and Manuals, Western Series* . 26 (1): 145-146

45. Kalinderis, I., Sapountzis, M., Stathis, D., Tziaftani, F., Kourakli, P., & Stefanidis, P. 2009. The risk of sedimentation of artificial lakes, following the soil loss and degradation process in the wider drainage basin. Artificial lake of Smokovo case study (Central Greece). In *International Conference LANDCON (Vol. 905)*. 1-8.

46. Khaledi Darvishan, A., Behzadfar, M., Spalevic, V., Kalonde, P., Ouallali, A., & el MOUATASSIME, S. 2017. Calculation of sediment yield in the S2-1 watershed of the Shirindareh River Basin, Iran. *Transcultural Studies*. 63 (3): 23-32

47. 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.

30. Eisazadeh, L., Sokouti, R., Homae, M., & Pazira, E. 2012. Comparison of empirical models to estimate soil erosion and sediment yield in micro catchments. *Eurasian Journal of Soil Science*. 1 (1): 28-33.

31. 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. *Poljoprivredai Sumarstvo*. 65 (4): 241-250.

32. Emmanouloudis, D., Christou, O., & Filippidis, E., 2003. Quantitative estimation of degradation in the Aliakmon river basin using GIS. *IAHS Publication*. 279: 234-240.

33. Forest, range and watershed management organization 2007. *Landscape study of watersheds*. Deputy of watershed management, watershed annual report. 1-27. (In Persion)

34. Ganasri, B. P., & Ramesh, H. 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*. 7 (6): 953-961

35. Gavrilovic, S. 1962. A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion. *Bulletin of the Faculty of Forestry*. 26 (1): 151-168

36. Gavrilovic, Z. 1994. The importance of the laboratory tests during the experimental research of soil erosion. In: *I: irrigation and drainage in Serbia: proceedings of conferences*. Svilajnac. 327-331.

37. Ghazavi, R., Vali, A.A., Maghami, E. Abdi, ZH. & Sharafi, S. 2013. Comparison of EPM, MPSIAC and PSIAC models for estimation of erosion and sediment using GIS, *Journal of Geography and Development*. 5 (27): 117-126. (In Persion)

38. Ghazavi, R., Vali, A.A., Maghami, Y., Abdi, J. & Sharafi, S. 2012. Comparison of EPM, MPSIAC and PSIAC models in estimating erosion and sediment using GIS. *Geography and development*. 5 (27) 117-126. (In Persion)

39. Ghorbani, M., & Dehghani, R. 2017. Comparison of Bayesian Neural Networks and Artificial Neural Network to Estimate Suspended Sediments in the

58. Lu, D., Li, G., Valladares, G. S., & Batistella, M. 2004. Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land degradation & development*. 15 (5): 499-512.
59. Lykoudi, E. & Zarris, D. 2002. Identification of regions with high risk of soil erosion in the island of Cephalonia using the Universal Soil Loss Equation. In: *Proceedings of the 6th National Conference of the Geographical Society of Greece*, 3-6 October, Thessaloniki Greece. 2: 412-419
60. Mahmoodabadi, M. 2011. Sediment yield estimation using a semi-quantitative model and GIS-remote sensing data. *Int. Agrophys.* 25 (3): 241-247.
61. Miguel PA., Samuel-Rosa R., Simao Dennis Dalmolin F., Arajo Pedron J., & Moura Bueno, A 2011. The USLE model for estimating soil erosion in complex topography areas. *Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing, (SBSR), Brasil*, 85 (1): 9227-9230.
62. Mohammadi, S., Karimzadeh, H., Alizadeh, M. 2018. Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian journal of Ecohydrology*. 5(2): 551-569
63. Mohammadpour, A., & Afsari, R. 2012. rInvestigating the Accuracy and Efficiency of Fornier Index and Factorial Scoring Method in Soil Erosion Intensity Mapping and Comparing with EPM Method in Semiarid Watershed (A Case Study: In The Markazi Province Watershed (Mazlaqan Wtershed). *E.E.R.* 2 (1): 42-52. (In Persion)
64. Morgan, R. P .C., & Nearing,M. A. 2011 ,The future role of information technology in erosion modeling*Hand Book of Erosion Modeling*.1- 400.
65. Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., ... & Styczen, M. E. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*. 23(6): 527-544.
- Najafi, S. 2016. Pathology of Watershed status in five year development documents of the country (Iran). *Extension and Development of Watershed Management*. 3 (10): 37-46.
48. 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.
49. Khodabakhsh, S., Mohammadi, A., Rafiei, B. & Bozorgzadeh, A. 2010. Comparison of erosion and sediment yield estimation in sezar sub-basin (dez drainage basin) by mpsiac and epn empirical methods, using gis. *Iranian journal of geology*. 3 (12): 51-61.
50. Khosravi., K, Safari., A, Habibnezhad Roshan., M, & Mahmoudi., N. 2011. Evaluation of Soil Erosion and Sediment Yield Estimation Various Empirical Model by Observation Values. *Environmental Erosion Research*. 1 (4): 33-53. (In Persion)
51. Kirkby, M. J., Le Bissonais, Y., Coulthard, T. J., Daroussin, J., & McMahon, M. D. 2000. *Ecosystems & Environment*. 81(1): 125-135.
52. Knisel, W.G., ed., 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. Washington, DC: USDA-ARS (USDA Conservation Research Report 26): 1- 640.
53. Kosmas, C., Danalatos, N. G., & Gerontidis, S. 2000. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. *Catena*. 40 (1):3-17.
54. Kosmas C, Danalatos N, Kosma D, Kosmopoulou P. 2006. Greece. In: Boardman J, and Poesen J. (Eds.) *Soil erosion in Europe*. Wiley, Chichester. 279-288.
55. Laflen, J.M., Lane, L.J., & Foster, G.R. 1991. WEPP - A next generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*. 46 (1): 34-38.
56. Le Roux, J. J., Morgenthal, T. L., Malherbe, J., Pretorius, D. J., & Sumner, P. D. 2008. Water erosion prediction at a national scale for South Africa. *Water SA*. 34(3): 305-314.
57. Lin, C. Y., Lin, W. T., & Chou, W. C. 2002. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil and Tillage Research*. 68 (2): 143-152

management factor (C) of USLE in Shakker river watershed. International Conference on Chemical, Agricultural and Medical Sciences (CAMS-2013) Dec. 29-30, 2013 Kuala Lumpur, Malaysia.1-4.

75. Plan and Budget Organization, 1999: Third Development Plan Document, Fields of Extension. 314-315.

76. Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., & Geetha, N. 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*. 3(2): 209-215.

77. Ranghzan, K. Zarasvandi, A. and Heydari, A. 2009. Comparison of EPM and MPSIAC models for estimation of erosion and sediment (Case study: Peghah sorkh basin of Khuzestan Province). *Geographical research* 40 (64): 123-136.

78. Rastgoo, S., Ghahraman, B., Sanacinejad, H., Davari, K & Khodashenas, AS. 2006. Estimation of Erosion and Sedimentation of Tang-e-Kenesht Basin with Empirical Models of MPSIAC and EPM Using GIS. *JWSS*. 10 (1): 91-105. (In Persian)

79. Refahi, H. & Nemati, M. 1975. Application of IPM method in the study of erosion and sediment production of Alamut River watershed. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*. 2 (1): 32-45. (In Persian)

80. Refahi, H., & Nemati, M.R. 2004. Applying the EPM method to the study of erosion and sediment yield in the Alamut basin. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*. 26 (2): 32 45. (In Persian)

81. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. 1991. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 46 (1): 30-33.

82. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., & McCool, D.K. 1996. Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agricultural Handbook 703*. US Govt Print Office, Washington. 1-383.

83. Rezaei, P., Faridi, P., Ghorbani, M. & Kazemi, M. 2014. Estimation of soil erosion using RUSLE

66. Nikolic, G., Spalevic, V., Curovic, M., Khaledi Darvishan, A., Skataric, G., Pajic, M., & Tanaskovik, V. 2019. Variability of soil erosion intensity due to vegetation cover changes: Case study of Orahovacka Rijeka, Montenegro. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 47 (1): 237-248.

67. Nouri, H., Siadat Mousavi, S. M & Mojaradi, B. 2017. Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield Based on Satellite Imagery Using the GIS Technique and Employing Erosion Potential Method (EPM) on Watersheds (Case study: the Dez Watershed). *Management System*. 10 (32): 45-54. (In Persian)

68. Nyesheja, E. M., Chen, X., El-Tantawi, A. M., Karamage, F., Mupenzi, C., & Nsengiyumva, J. B. 2019. Soil erosion assessment using RUSLE model in the Congo Nile Ridge region of Rwanda. *Physical Geography*. 40 (4): 339-360.

69. Ouallali, A., Aassoumi, H., Moukhchane, M., Moumou, A., Houssni, M., Spalevic, V., & Keesstra, S. 2020. Sediment mobilization study on Cretaceous, Tertiary and Quaternary lithological formations of an external Rif catchment, Morocco. *Hydrological Sciences Journal*. 1-15.

70. Ouallali, A., Spalevic, V., Aassoumi, H., Moukhchane, M., Berrad, F. 2016. The Assessment of the Soil Erosion Intensity and Runoff in the River basin of ArbaaAyacha, Western Rif. Morocco. *International Journal of Scientific and Research Publication*. 6 (1): 111-118.

71. Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. 2015. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land use policy*. 48 (1): 38-50.

72. Panagoulia, D, & Dimou, G. 1997 Sensitivity of flood events to global climate change. *Journal of Hydrology*. 191 (1-4): 208-222.

73. Pandey, A., Chowdary, V. M., & Mal B. C. 2007. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management*. 21(4): 729-746

74. Patil, R. J., & Sharma, S. K. 2013. Remote Sensing and GIS based modeling of crop/cover

and EPM model, International Journal of Forest, Soil and Erosion. 6 (3): 83-96. (In Persian)

93. Tangestani, M.H. 2006. Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi- arid envornment: Afzar Catchment Fars Province, Iran. Journal of Asian Earth Sciences. 27: 585-597.

94. Tazioli, A. 2009. Evaluation of erosion in equipped basins: preliminary results of a comparison between the Gavrilovic model and direct measurements of sediment transport. Environmental Geology. 56 (5): 825-831.

95. Teng H, Rossel RA, Shi Z, Behrens T, Chappell A, Bui E. 2016. Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. Environmental Modelling & Software. 77 (1):156-67.

96. Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R., & Iaquina, P. 2009. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: an application model for Calabria (southern Italy). Geomorphology. 112 (3): 228-245

97. Vaezi, AR., Bahrami, HA., Sadeghi, SH. R., & Mahdian, MH. 2010. Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. Journal of Agricultural Science and Technology. 12 (1): 241-252

98. Van Remortel, R.D., Maichle, R.W., and Hickey, R.J. 2004. Computing the LS Factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using C++ executable. Computers and Geosciences. 30 (1): 1043-1053

99. Vujacic, D., & Spalevic, V. 2016. Assessment of runoff and soil erosion in the Radulicka Rijeka Watershed, Polimlje, Montenegro. Poljoprivreda i Sumarstvo. 62(2): 283.

100. Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537. United States Department of Agriculture washington DC. 1-8.

101. Woolhiser, D.A., Smith, R.E., and Goodrich,

model and identification of its most effective factor in Gabrik watershed-southeast of Hormozgan province. Quantitative Geomorphological Research. 3(1): 97-113. (In Persian)

84. Sadeghi, H. 1993. Comparison of some erosion potential and sediment yield assessment models in Ozon-Dareh sub-catchment. In Proceedings of the National Conference on Land Use Planning, Tehran. Iran. 41-75.

85. Saduq, H. 2015. Determining the Erosion in Kahman Drainage Basin Using EPM, BLM and Fargas Models. Hydrogeomorphology. 1 (2): 137-154. (In Persian)

86. Sakuno, N. R. R., Guiçardi, A. C. F., Spalevic, V., Avanzi, J. C., Silva, M. L. N., & Mincato, R. L. 2020. Adaptation and application of the erosion potential method for tropical soils. Revista Ciência Agrônômica, 51(1): 1-10.

87. Service description of Watershed. 2017. Organization of Forests, Rangelands and Watersheds of the Country. 1-2. (In Persian)

88. Soil Science Society of America, 2001. Glossary of soil science terms. Madison, WI: Soil Science Society of America. Staut, M., 2004. Recent erosional processes in the catchment of the Dragonja River. Unpublished thesis. University of Ljubljana.

89. Spalevic, V. 2011. Impact of land use on runoff and soil erosion in Polimlje. Doctoral thesis, Faculty of Agriculture of the University of Belgrade, Serbia, 1-260.

90. Spalevic, V., Curovic, M., Barovic, G., Florijancic, T., Boskovic, I., & Kistic, I. 2015,. Assessment of Sediment Yield in the Tronosa River Basin of Montenegro. In The 9th International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. 1-2.

91. Taheri, M., Landi, A., & Archangi, B. 2013. Using RS, GIS systems and MPSIAC model to produce erosion map and to estimate sedimentation. International Journal of Agriculture: Research and Review. 3 (4): 881-886.

92. Talebiniya, M, Zohrabi, S, & Khosravi, H. 2016. Evaluating the erosion danger and sedimentation potential in Fasa Forest watershed using GIS techniques

106. Zemljic, M. 1971. Calculation of sediment load. Evaluation of vegetation as anti-erosive factor. In Proceedings of the international symposium Interpraevent, Villach (Australia). (In French).
107. Milevski, I. 2008. Estimation of soil erosion risk in the upper part of Bregalnica watershed- Republic of Macedonia, based on digital elevation model and satellite imagery. 5th international conference on geographic information system (ICGIS), 2-5 July 2008 at Fatih university in Istanbul, Turkey. 351-358.
- D.C., 1990. KINEROS: A kinematic runoff and erosion model. Washington, DC: ARS-77, USDA-ARS (Documentation and user manual). 1-130.
102. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, & W. R. Anderson, 1987. AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollutin Model. A Watershed Analysis Tool. USDA Conservation Research Report 35.
103. Sadeghi S.H.R, & Vafakhah M. 2015. Spatial analysis of rainfall erosivity index patterns at different time scales in Iran. Watershed Engineering and Management. 7 (4): 442-457
104. Zabihi M, Sadeghi S.H.R, Vafakhah M. 2015. Spatial analysis of rainfall erosivity index patterns at different time scales in Iran. Watershed Engineering and Management. 7(4): 442-457.
105. Zandi, J., Habibnejad Roshan, M., Solaimani, K. 2013. Soil erosion risk assessment and its relationship with some environmental parameters (Case study: Vazroud watershed, Mazandaran), Journal of Rangeland and watershed Management. 66 (3): 401-415. (In Persion)



Abstract

Qualitative Evaluation of IntErO, EPM, MPSIAC and RUSLE Models in Order to Select the Optimal Models for Different Conditions for Description of Detailed-Executive Watershed Management ServicesM. Zabihi Silabi¹ and A. Khaledi Darvishan^{2*}

Received: 2020/11/10 Accepted: 2021/01/16

Soil erosion is one of the most important environmental problems in the world, which has created many problems for human societies. Therefore, accurate evaluation of soil erosion in erosion and sedimentation studies is necessary to design and implement appropriate, targeted, and cost-effective conservation measures due to the severity of the problem and socio-economic effects. Therefore, it is necessary to select a suitable and appropriate model for estimating erosion and sedimentation according to the available data, different topographic and climatic conditions of the country and considering the information needs and complexity of the models. Accordingly, in the present study, the strengths and weaknesses of four experimental models including EPM, MPSIAC, RUSLE and IntErO were analyzed qualitatively. The results showed the acceptable results of MPSIAC model in arid regions, the RUSLE model in Mediterranean mountainous areas, high slope forest areas and agricultural areas and EPM and IntErO models in mountainous area and also for watershed management and water resources management. Therefore, it is recommended to select erosion and sediment estimation models in accordance with management goals, available data, topographic and climatic conditions. As a result, it is expected that having suitable selection of a soil erosion and sediment yield model will lead to save time, designing and implementing appropriate, selective and cost-effective conservation measures.

Keywords: Model complexity, Model efficiency, Rainfall erosivity, Sediment delivery ratio, Sediment yield, Soil erosion

1. Ph. D Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor

2. Associate Professor Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Corresponding Author, Email: a.khaledi@modares.ac.ir