

## بررسی کارایی مدل‌های EPM و MPSIAC در تعیین وضعیت فرسایش حوزه آبخیز شهریاری

رضا بیات<sup>۱</sup>؛ استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی  
محمود عرب‌خدری؛ دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی  
نجمه بهنام؛ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی  
زهرا گرامی؛ دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه  
شهرکرد

پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲

### چکیده

اطلاعات محدودی از دقت نقشه‌ی فرسایش آبی به‌عنوان یکی از عوامل مهم تهدیدکننده منابع خاک وجود دارد. به این منظور، ارزیابی صحت و نحوه پراکنش طبقات فرسایش حاصل از مدل‌های EPM و MPSIAC در مقایسه با مدل BLM به‌عنوان مقادیر واقعیت زمینی در حوزه آبخیز شهریاری در این پژوهش انجام شد. ابتدا آمار و اطلاعات موردنیاز مدل‌های EPM، MPSIAC و BLM برای دستیابی به وضعیت فرسایش حوضه جمع‌آوری و به کمک نرم‌افزار  $ARC/GIS^{۹,۳}$  نقشه‌های طبقات فرسایش تهیه و با نقشه واقعیت زمینی تلافی داده شدند. همچنین یک نقشه نقطه‌ای حاوی ۱۴۰۰ نقطه تصادفی برای نمونه‌برداری از نقشه‌های حاصل از مدل‌ها تهیه و بر اساس این نقشه، میزان هر یک از شاخص‌های آماری  $RMSE$ ،  $RRMSE$ ،  $MAE$ ،  $MBE$ ،  $NSE$ ،  $CD$ ،  $MSE$  و  $CRM$  محاسبه شد. برای بررسی دقت و صحت مکانی نقشه‌های طبقات فرسایش حاصل از مدل‌ها ماتریس خطا و ضریب توافق کاپا، صحت کلی، صحت تولیدکننده و صحت کاربر تهیه شد. نتایج فرسایش حاصل از مدل‌ها نشان داد که میانگین شدت فرسایش در مدل MPSIAC، ۵۸۹ و در مدل EPM، ۲۸۷ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال برآورد شد که وضعیت فرسایش حوضه با کمک مدل MPSIAC، زیاد و مدل EPM، شرایط متوسطی را برآورد شده است. بررسی شاخص‌های آماری فوق‌الذکر نشان می‌دهد که میزان تطابق طبقات فرسایش مدل MPSIAC با خروجی BLM (به‌عنوان نقشه واقعیت زمینی) بیشتر از مدل EPM است. همچنین نتایج ارزیابی صحت مدل‌های MPSIAC و EPM نیز نشان داد که مقدار ضریب کاپا در مدل MPSIAC بیشتر از مدل EPM است.

واژه‌های کلیدی: ضریب کاپا، دقت طبقات فرسایش، BLM، شهریاری، دقت مکانی، MPSIAC

## مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مسائل زیست محیطی در جهان و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و تأثیر زیادی بر کیفیت، کمیت و بهره‌وری خاک و درنهایت فرآیندهای بیابان‌زایی دارد (Kairis et al., ۲۰۱۳) که عمدتاً ناشی از تغییر کاربری، چرای بی‌رویه، فعالیت‌های نامناسب کشاورزی و عمق کم خاک است (Poesen, ۲۰۱۸). همچنین فرسایش خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات زیست‌محیطی کشورهای درحال توسعه از جمله ایران است. از این رو، برای هر نوع فعالیت به‌ویژه برنامه‌ریزی آمایش‌سرزمین، ابتدا باید ویژگی‌ها، میزان و پراکندگی فرسایش خاک به‌عنوان مخاطره‌ی محیطی شناسایی شود و با شناخت کامل فرسایش، به برنامه‌ریزی برای مدیریت آن پرداخته شود. باوجود سابقه‌ی طولانی مطالعات فرسایش و رسوب در کشور اطلاعات دقیق از میزان فرسایش آبی بسیار کم است و بین اندازه‌گیری‌ها و برآوردهای انجام‌شده نیز اختلافاتی مشاهده می‌شود که عواملی از قبیل نبود اندازه‌گیری‌های طولانی‌مدت فرسایش، نوپا بودن تحقیقات در این زمینه (عرب‌خدری، ۱۳۸۴) هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن فرآیندهای اندازه‌گیری و درنهایت فقدان تعداد مناسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری، مانع دستیابی به اعداد قابل‌اعتماد شده است و اغلب مطالعات فرسایش و رسوب کشور با استفاده از روش‌های تجربی که ابزاری در راستای شناخت اولویت‌های فرسایشی حوزه‌های آبخیز بدون آمار هستند، انجام می‌گیرد (قضاوی و همکاران، ۱۳۹۱). مدل‌های <sup>۱</sup>MPSIAC، <sup>۲</sup>EPM و <sup>۳</sup>FSM، ازجمله مدل‌های تجربی متداولی هستند که به‌منظور برآورد شدت فرسایش خاک و تولید رسوب مورداستفاده قرار می‌گیرد (حسینخانی، ۱۳۹۲). در بین مدل‌های مذکور، مدل‌های EPM و MPSIAC بیش‌ترین کاربرد را در مطالعات و تحقیقات آبخیزداری در جهان (Ahmed et al., ۲۰۱۹; Poggetti et al., ۲۰۱۹; Lense et al., ۲۰۱۹; Dragičević et al., ۲۰۱۹) و ایران (شهاب‌آرخازلو و همکاران، ۱۳۹۸؛ شجاعی و همکاران، ۱۳۹۷؛ بهاروند و سوری، ۱۳۹۷؛ Elhag et al., ۲۰۱۹) و همکاران، ۱۳۹۶؛ قرمزچشمه و بیات، ۱۳۸۶ و بیات و همکاران، ۱۳۸۵) دارند. بررسی مقادیر فرسایش خروجی از این مدل‌ها با مقادیر واقعی و ارزیابی موقعیت مکانی طبقات فرسایش حاصل از مدل‌ها برای ارزیابی کارایی آن‌ها و برنامه‌ریزی‌های اقدامات حفاظتی ضروری است.

در این راستا شهاب‌آرخازلو و همکاران (۱۳۹۸) به مقایسه‌ی دو مدل MPSIAC و MMF<sup>۴</sup> در تهیه‌ی نقشه‌ی توزیع فرسایش خاک در حوزه آبخیز آق‌گونی اردبیل پرداختند. به این منظور آنها ۱۰۰ نقطه به فواصل ۳۰۰ متری و به‌صورت شبکه منظم از سطح حوضه نمونه برداری خاک و اندازه‌گیری‌های صحرائی انجام دادند و در این ۱۰۰ نقطه، تخمین فرسایش انجام و نقشه‌ی فرسایش خاک تهیه شد. نتایج آنها نشان داد که میانگین فرسایش خاک حوضه به کمک مدل‌های MPSIAC و MMF به ترتیب، حدود ۵ و ۴ تن در هکتار در سال برآورد شد که علت بالاتر بودن مقدار برآورد فرسایش با مدل MPSIAC، انطباق نقشه‌ی فرسایش این مدل با نقشه‌ی توزیع فرسایش خندقی و در واقع در نظر گرفتن این نوع فرسایش نسبت به مدل MMF بوده است.

پوگتی و همکاران (Poggetti et al., ۲۰۱۹) برای برآورد هدررفت خاک و رسوب در حوزه آبخیزی در کشور آرژانتین، به علت کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری، از مدل EPM استفاده کردند تا به کمک مدل، زیرحوضه‌های تولیدکننده‌ی

۱ - Modified Pacific South-West Inter Agency Committee

۲ - Erosion Potential Method

۳ - Factorial Scoring Model

۴ - Morgan Morgan Finney

اصلی رسوب را شناسایی کنند و اقدامات لازم حفاظتی را انجام دهند. الهگ و همکاران (Elhag et al., ۲۰۱۹) نیز برای برآورد فرسایش خاک حوزه آبخیز رودخانه برگنالنیکا در کشور مقدونیه از مدل EPM استفاده کردند. آنها مدل EPM را در دو منطقه با وضعیت ژئومورفولوژیکی متفاوت استفاده کردند تا توانایی مدل را در برآورد فرسایش در این دو موقعیت با دیگر مدل‌ها، ارزیابی کنند. نتایج تحقیق بیان می‌کند که مدل EPM برای برآورد فرسایش مدل مناسبی است.

همچنین توسیک و همکاران (Tosic et al., ۲۰۱۹) به بررسی اثر کاهش جمعیت در منطقه‌ی جنگ‌زده‌ای در بوسنی و هرزگوین بر فرسایش خاک به کمک مدل EPM پرداختند که نتایج رابطه‌ی معنی‌دار و مستقیم بین کاهش فرسایش و جمعیت داشته است به‌طوری‌که با کاهش جمعیت در فواصل سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۳ میزان فرسایش از ۲۹۸/۲ به ۲۳۹/۹ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال کاهش یافته است و ضریب رگرسیون خطی در مناطق مختلف بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۵ بوده است. نتایج این تحقیق، پایه‌ی خوبی برای پروژه‌های مدیریت یکپارچه آب، حفاظت از خاک، اکوسیستم‌های جنگلی، حفاظت از محیط‌زیست، برنامه‌ریزی مکانی، کشاورزی و سایر فعالیت‌های انسانی است. جعفری و همکاران (۱۳۹۷) نیز با کمک مدل EPM، فرسایش خاک در حوضه‌ی بدرانلو ارزیابی کردند. نتایج نشان داد میانگین فرسایش سالانه حدود ۲۴ تن در هکتار بوده است که علاوه بر شرایط سنگ‌شناختی و تغییر کاربری اراضی، شیب و جهت شیب، با توجه به همبستگی زیاد ( $R^2 = ۰,۸۷$ ) بیشترین تأثیر را در شدت فرسایش خاک حوضه داشته‌اند.

دانش‌فراز و همکاران (Daneshfaraz et al., ۲۰۱۷) در حوضه‌ی آی‌دوغموش در استان آذربایجان شرقی با استفاده از مدل MPSIAC و فناوری‌های GIS<sup>۱</sup> و RS<sup>۲</sup>، فرسایش خاک را برآورد و نقشه‌ی رسوب حوضه را تهیه کردند که نتایج نشان داد سالانه ۴۷۵ تن بر کیلومترمربع خاک فرسوده شده و از حوضه خارج شده است و شیب و پوشش زمین مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده‌ی رسوب هستند. زارعی و امیری (Zarei and Amiri, ۲۰۱۷) نیز با استفاده از مدل MPSIAC، هدررفت خاک و تولید رسوب را در حوضه‌ی کچویه برآورد کردند. بر اساس نتایج حاصل از مدل MPSIAC، ۹۴/۲ درصد (۴۷۶/۱ کیلومترمربع) از مساحت مورد مطالعه در کلاس فرسایش جزئی و ۲۹/۲ درصد (۱۴۷/۵ کیلومتر) در کلاس فرسایش متوسط طبقه‌بندی شده‌اند. تولید رسوب کل حوضه ۱۲۳۶/۵ مترمربع و کل فرسایش ۵۰۹۱/۶ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال محاسبه شد. تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل MPSIAC نشان داد که حساس‌ترین پارامترهای مدل با توجه به اهمیت آن‌ها، فرسایش کانالی، پوشش زمین و زمین‌شناسی با همبستگی پیرسون از ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ بوده است و عامل استفاده از زمین اثر کمتری بر خروجی حوضه داشته است.

در مطالعه‌ای دیگر نوری و همکاران (Noori et al., ۲۰۱۶) تولید رسوب را به کمک RS و GIS در دو زیرحوضه از حوزه‌ی آبخیز دز با استفاده از دو مدل MPSIAC و EPM، در دو بازه‌ی کوتاه و بلندمدت ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشتر از نصف فرسایش به علت نوع پوشش زمین و سازندهای زمین‌شناسی بوده و در بررسی طولانی‌مدت، تولید رسوب ۳۸۷ و ۶۱۵ کیلو تن بر سال به ترتیب در مدل‌های MPSIAC و EPM برآورد شدند که مقایسه‌ی این مقادیر با تولید رسوب مشاهده‌ای (۶۱۲ کیلو تن بر سال) نشان از برتری مدل EPM در برآورد تولید رسوب زیرحوضه‌ها بوده است. همچنین نتایج آن‌ها ناکارآمد بودن مدل‌ها در موقعیت‌های سیلابی را نشان داد. باین وجود همبستگی (R) تولید رسوب

۱- Geographical Information Systems

۲- Remote Sensing

تخمین زده شده در کوتاه مدت با تولید رسوب مشاهده‌ای در دو مدل EPM و MPSIAC به ترتیب به میزان ۰/۹۳ و ۰/۸۵ بوده است.

ارزیابی خطر فرسایش خاک و پتانسیل رسوب در حوزه آبریز گابریک استان هرمزگان با استفاده از مدل EPM نشان داد که رسوب ویژه و کل در این حوزه آبریز به ترتیب ۴۰/۶ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال و ۲۲۷۷۲۵/۸ مترمکعب در سال و شدت فرسایش در حوضه شدید است (انصاری لاری و انصاری، ۱۳۹۶). عفیفی (۱۳۹۶) نیز با کمک مدل تجربی MPSIAC و GIS به ارزیابی فرسایش خاک و رسوبدهی حوزه آبریز نمدان پرداخت. ایشان برای محاسبه عامل فرسایش سطحی مناطق بالادست از روش سازمان مدیریت اراضی آمریکا (BLM<sup>۱</sup>) استفاده کردند. نتایج حاصل از پهنه بندی فرسایش که از تقسیم رسوبدهی بر نسبت تحویل رسوب حوضه به دست آمده و حوضه را در ۳ کلاس فرسایش بالا، متوسط و کم قرار داده و کلاس رسوبدهی با فرسایش پذیری زیاد بیشترین سطح حوضه را پوشانده است.

عابدینی و طولایی (۱۳۹۶) نیز برای مدل سازی فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز سولاچای اردبیل از سه مدل WEPP، EPM و Fournier در محیط GIS استفاده کردند. مقدار رسوب ویژه به دست آمده از سه مدل WEPP، EPM و Fournier به ترتیب ۰/۱۷۸، ۰/۳۳ و ۱/۰۲ تن در هکتار در سال برآورد شده است. مقایسه رسوب مشاهده‌ای به دست آمده آمده از منحنی سنج با مقدار ۰/۲۴۱ تن در هکتار در سال، با مدل‌های مذکور نشان داد که مدل فرآیندی WEPP از کارایی بهتری در برآورد فرسایش و رسوب حوضه مورد مطالعه برخوردار است. افتمیو و لیکودی (Eftthimiou and Lykoudi, ۲۰۱۶) با مدل EPM، فرسایش خاک را در حوضه‌ای در شمال غربی یونان به طور سالانه و شش ماهه برآورد کردند. مقایسه‌ی نتایج مدل نشان از کم برآورد کردن فرسایش در حالت سالانه در مقایسه با مقادیر رسوب مشاهده‌ای داشته است؛ اما در حالت شش ماهه، نتایج مدل نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای رسوب بوده است.

همچنین قلی پوری و همکاران (۱۳۹۲) در حوزه آبخیز ورده کرج از مدل‌های MPSIAC و EPM برای برآورد فرسایش و رسوب و تهیه نقشه کلاس‌های شدت فرسایش استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر حاصل از مدل EPM بیشتر و در مدل MPSIAC کمتر از مقدار رسوب مشاهده‌ای در ایستگاه‌های هیدرومتری خروجی حوضه بوده است. به این علت که مدل EPM پتانسیل فرسایش و رسوب را نشان می‌دهد. در صورتی که مدل MPSIAC عوامل بیشتری را بر پایه شرایط موجود در منطقه بررسی می‌کند. همچنین میزان طبقه‌ی فرسایش در دو مدل برای حوضه مورد مطالعه زیاد برآورد شده است. برآورد تولید رسوب به کمک مدل EPM توسط بزرگ‌زاده و کمانی (Bozorgzadeh and Kamani, ۲۰۱۲) در حوزه آبخیز بختیاری در استان لرستان انجام شد. آن‌ها در این مطالعه به اصلاح دو عامل فرسایش مشاهده‌ای و ضریب استفاده از زمین پرداختند و مدل تغییر یافته‌ای از مدل EPM (MEPM<sup>۲</sup>) معرفی کردند که در این مدل تغییر یافته، ضریب فرسایش مشاهده‌ای بر اساس شاخص اقلیم، درصد پوشش، تراکم زهکشی و عوامل زمین‌شناسی سطحی و با استفاده از درصد پوشش و شیب، ضریب استفاده از زمین محاسبه شده است. مقایسه‌ی نتایج داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داد که دقت مدل تغییر یافته‌ی مدل MEPM بیشتر از مدل EPM است و همبستگی بالایی بین مدل‌های MEPM و EPM وجود دارد.

۱- Bureau of Land Management

۲- Modified Erosion Potential Method

بررسی صحت موقعیت مکانی طبقات فرسایش حاصل از مدل‌ها با موقعیت واقعی آن‌ها و بررسی کارایی مدل‌ها از آماره‌های مختلفی استفاده می‌شود که کوهپیما و همکاران (Kouhpeima et al., ۲۰۱۱) برای ارزیابی نتایج مدل EPM در پنج حوزه آبخیز کوچک در استان سمنان از ضریب کارایی ناش و ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطا استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، اگرچه میزان کفایت مدل در محدوده قابل قبول است (۰/۵۶)، اما مدل کفایت بالایی ندارد. همچنین آماره جذر میانگین مربعات خطا، کفایت کم مدل در برآورد فرسایش حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه را نشان داد. در پژوهشی دیگر نقشه خطر فرسایش خاک مدل RUSLE را به روش فازی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در حوزه آبخیز قرناوه گلستان تهیه شد که برای اعتبار سنجی مدل نیز از روش فازی استفاده کردند. نتایج صحت کل ۵۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۶ (برای طبقه فرسایش خیلی زیاد)، بیانگر تطابق بالا بین نقشه خطر مدل فازی و نقشه خطر مدل RUSLE در این طبقه است (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۲). پرویزی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از مدل ناش و ساتکلیف، کارایی مدل فرآیندی WEPP در برآورد تلفات خاک در حوزه آبخیز قره‌سو کرمانشاه را در شیب‌های مختلف بررسی کردند. در مجموع کارایی مدل در برآورد رواناب در هر سه شیب نسبتاً بالا است به گونه‌ای که در این سه شیب ضریب کارایی ناش و ساتکلیف بین ۰/۶۹ تا ۰/۷۳ محاسبه گردیده که نشانگر کارایی بالای مدل در این زمینه است. در مطالعه‌ای دیگر نیز به منظور مقایسه و ارزیابی دقت نقشه‌های کاربری اراضی تولیدشده از داده‌های دو سنجنده ماهواره‌ای مختلف و همچنین قابلیت روش‌های زمین‌آمار و سنجش‌ازدور در تهیه نقشه شوری و سدیمی خاک از ضرایب کاپا، ضریب کاربر و ضریب تولیدکننده استفاده نمودند (کاظمی و همکاران، ۱۳۸۹).

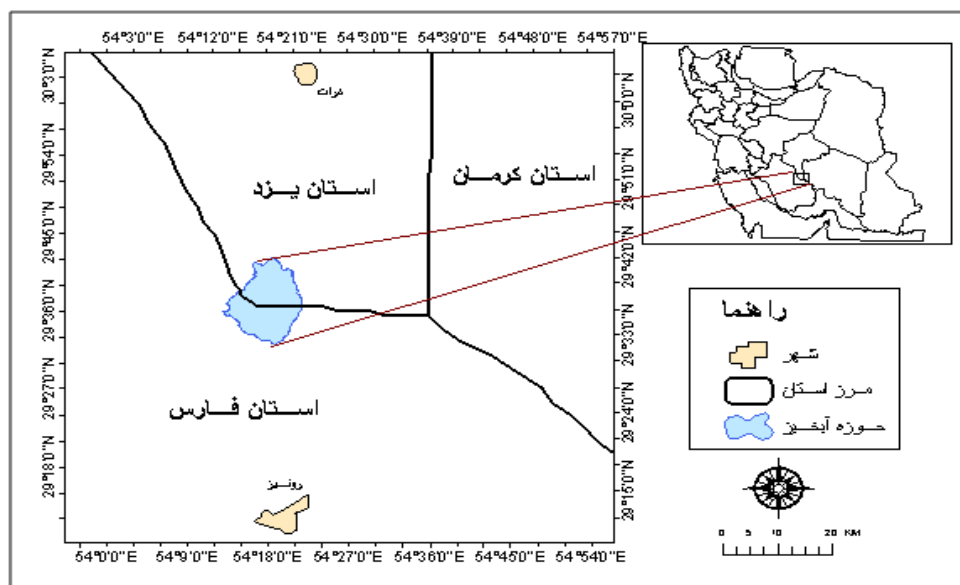
در دهه‌های اخیر مخاطرات محیطی اعم از طبیعی و انسانی مانند فرسایش خاک از جمله مسائلی است که در سطح جهان و ایران با آن رو به رو هستند و سالانه هزینه‌های کلانی هم متحمل می‌شوند. از این رو، ابتدا مخاطرات محیطی از قبیل فرسایش خاک و تولید رسوب باید شناسایی شوند تا مدیران مربوطه با اطلاعات کامل و دقیقی برای مدیریت و کنترل آن، برنامه‌ریزی متناسبی انجام دهند. از آنجایی که مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب به عنوان ابزاری در راستای شناخت اولویت‌های فرسایشی حوزه آبخیز هستند و مدل‌های EPM و MPSIAC بیش‌ترین کاربرد را در مطالعات و تحقیقات آبخیزداری دارند، لذا ارزیابی صحت، دقت و نحوه پراکنش طبقات فرسایش حاصل از آن‌ها در سطح حوضه می‌تواند کمک مؤثری در نتیجه‌گیری بهتر از مدل‌ها و به‌کارگیری نتایج آن‌ها در پیشگیری از وقوع مخاطرات زیست‌محیطی، اولویت‌بندی مناطق برای اقدامات اجرایی و برنامه‌ریزی‌های حفاظتی داشته باشد که در این زمینه مطالعه-ای انجام نگرفته است. به همین منظور در این مطالعه به بررسی دقت توزیع طبقات فرسایش حاصل از مدل‌های EPM و MPSIAC در مقایسه با طبقات فرسایش مدل BLM به عنوان مقادیر مشاهده‌ای در حوزه آبخیز شهریاری اقدام شد.

## داده‌ها و روش کار

### الف) قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

این پژوهش در حوضه آبخیز شهریاری با مساحت ۱۵۷۱۴/۵ هکتار در ۳۸ کیلومتری جنوب شهرستان هرات (استان یزد) و ۳۲ کیلومتری شمال شهرستان رونیز در استان فارس در مختصات ۱۳° و ۵۴' (دقیقه و درجه) تا ۲۲° و ۵۴' طول جغرافیایی و ۳۲° و ۲۹' تا ۴۲° و ۲۹' عرض جغرافیایی انجام شد که در شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز شهریاری در کشور مشاهده می‌شود. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه به ترتیب حدود ۱۸۰۰ و ۲۵۰۰ متر و ارتفاع متوسط وزنی حوضه نیز ۲۲۵۳ متر از سطح دریا است. عمده کاربری‌های منطقه شامل مرتع و کشاورزی دیم بوده و کشت آبی بخش کوچکی را

در برمی‌گیرد. از دیدگاه ژئومورفولوژیکی، حوزه آبخیز شهریار از سه واحد کوهستان، تپه‌ماهور و دشت و دو تیپ دامنه‌های منظم و نامنظم و ۱۳ رخساره تشکیل شده است. سنگ‌شناسی آن‌ها متأثر از وضعیت زمین‌ساخت منطقه از سنگ‌های رسوبی و دگرگونی ترکیب یافته است. واحدهای سنگی این حوزه نیز عمدتاً شامل فلیش‌های ترشیری است که به صورت توربیدیت حاوی قطعات بزرگ و کوچک الیستولیت از واحدهای سنگی و سازندهای قدیمی تر است. همچنین در حوزه شهریار، مناطق بسیار حساس و حساس به فرسایش با توجه به سازندهای زمین‌شناسی، بالغ بر ۶۰ درصد از مساحت حوزه را به خود اختصاص داده‌اند.

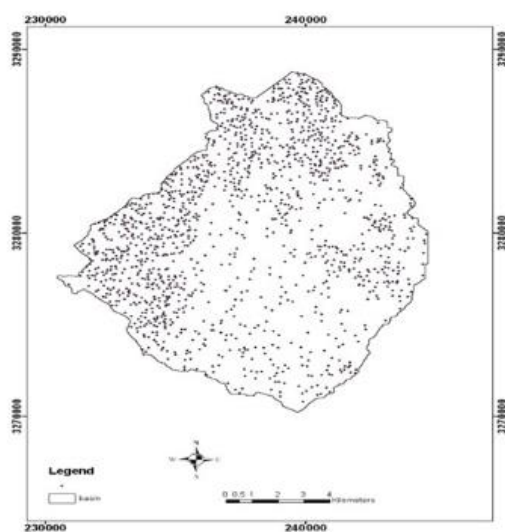


شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز شهریار در کشور و استان یزد

## ب) روش کار

برای انجام این پژوهش، آمار و اطلاعات موردنیاز مدل‌های MPSIAC، EPM و BLM برای دستیابی به وضعیت فرسایش و رسوب حوزه از قبیل نقشه‌های فیزیوگرافی، واحدهای هیدرولوژیکی، شبکه آبراهه‌ها، طبقات شیب، ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، حساسیت به فرسایش واحدهای سنگی، اجزاء واحد اراضی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، تیپ پوشش گیاهی، نقشه کاربری در یک بانک اطلاعاتی ذخیره شد. سپس به کمک نرم‌افزار  $ARC/GIS^{9,3}$  و بر اساس فرمول هر مدل (رفاهی، ۱۳۸۸، ۳۰۵)، نقشه فرسایش برای حوزه آبخیز و نقشه‌های طبقات فرسایش بر اساس جدول تعیین میزان تولید رسوب سالانه و طبقات فرسایش خاک به روش رفاهی (۱۳۸۸، ۳۰۵) تهیه شد. از آنجایی که در مدل BLM تمامی عوامل به‌وسیله‌ی کارشناس و از طریق بازدید صحرایی امتیازدهی می‌شوند، لذا در این بررسی به‌عنوان نقشه واقعیت زمینی طبقات فرسایش بکار گرفته شد و نقشه طبقه‌بندی‌شده دو مدل MPSIAC و EPM با مدل BLM به منظور بررسی دقت دو مدل، برای کل حوزه تلاقی داده شدند. همچنین یک نقشه نقطه‌ای حاوی ۱۴۰۰ نقطه تصادفی با استفاده از نرم‌افزار  $ARC/GIS^{9,3}$  در حوزه‌ی مورد مطالعه تهیه شد که این نقشه، دارای تراکم حدود ۱ نقطه برای هر ۱۰ هکتار است. از این نقشه ۱۴۰۰ نقطه‌ای، برای نمونه‌برداری از نقشه‌های حاصل از مدل‌ها، جهت بررسی دقت و صحت نقطه‌ای نقشه‌های حاصل از دو مدل MPSIAC و EPM استفاده شد. به این ترتیب که در ۱۴۰۰ نقطه‌ی تصادفی،

کلاس فرسایش دو مدل MPSIAC و EPM با مدل BLM مقایسه و میزان تطابق مدل‌ها با واقعیت زمینی (مدل BLM) بررسی شد که در شکل ۲ نقشه نقاط تصادفی مشاهده می‌شود.



شکل ۲: نقشه نقاط تصادفی

بر اساس نقشه نقاط تصادفی نمونه‌برداری، میزان هر یک از آماره‌های  $RMSE^1$  (جذر میانگین مربعات خطا)،  $MBE^2$  (میانگین خطا)،  $MAE^3$  (میانگین خطای مطلق)،  $NSE^4$  (ضریب کارایی ناش و ساتکلیف)،  $CD^5$  (ضریب تبیین)،  $CRM^6$  (ضریب جرم باقیمانده)،  $MSE^7$  (میانگین مربعات خطا) و  $RRMSE^8$  (میانگین نسبی مربعات خطا) برای بررسی دقت و صحت مکانی نقشه‌های فرسایش حاصل از مدل‌های EPM و MPSIAC در نقاط نمونه‌برداری شده به کمک نرم‌افزار Excel محاسبه شد. همچنین بررسی دقت و صحت مکانی نقشه‌های طبقات فرسایش حاصل از مدل‌ها برای کل منطقه‌ی مورد مطالعه نیز به وسیله ماتریس خطا یا جدول درهمی انجام شد که این ماتریس روابط بین داده‌های زمینی (خروجی مدل BLM) و داده‌های مدل‌های MPSIAC و EPM را تعیین می‌کند (Landis and Koch, ۱۹۷۷) و محاسبه ضریب توافق کاپا<sup>۹</sup> برای هر طبقه فرسایش و مقدار درصد صحت کلی<sup>۱۰</sup>، صحت تولیدکننده<sup>۱۱</sup> و صحت کاربر<sup>۱۲</sup> انجام گرفت. معادلات مربوط به این آماره‌ها در جدول ۱ آورده شده است (جلالی و همایی، ۱۳۹۰؛ دائم پناه و همکاران، ۱۳۹۰ و هاشمی و عرب‌خداری، ۱۳۸۶). بر اساس نتیجه ارزیابی شاخص‌های مذکور، کارایی مدل‌ها تعیین و تحلیل شدند.

دول ۱: فرمول آماره‌های مورد بررسی

| نام آماره              | فرمول                                        | نام آماره  | فرمول                                                                        |
|------------------------|----------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------|
| جذر میانگین مربعات خطا | $RMSE = \frac{\sqrt{\sum (O_i - P_i)^2}}{N}$ | ضریب تبیین | $CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$ |

۱- Root Mean Square Error

۲- Minimum Bias Error

۳- Minimum Absolute Error

۴- Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient

۵- Coefficient of Determination

۶- Coefficient of Residual Mass

۷- Mean Square Error

۸- Relative Root Mean Square Error

۹- Kappa Coefficient

۱۰- Overall Accuracy

۱۱- Producer Accuracy

۱۲- User Accuracy

|                                                                      |                         |                                                                               |                           |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| $CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$ | ضریب جرم باقیمانده      | $MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{N}$                                    | میانگین خطا               |
| $MSE = \sqrt{RMSE}$                                                  | میانگین مربعات خطا      | $MAE = \frac{\sum_{i=1}^n  O_i - P_i }{N}$                                    | میانگین خطای مطلق         |
| $RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\sum_{i=1}^n O_i}$ | میانگین نسبی مربعات خطا | $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$ | ضریب کارایی ناش و ساتکلیف |
| $OA = 100 * \frac{SCP}{SP}$                                          | صحت کلی                 | $KC = N \sum X_{ii} - \sum X_{i+} X_{+i} / N^2 - \sum X_{i+} X_{+i}$          | توافق کاپا                |
| $UA = 100 * \frac{NCP}{SGP}$                                         | صحت کاربر               | $PA = 100 * \frac{NCP}{SGP}$                                                  | صحت تولیدکننده            |

$Q_i$ : مقادیر اندازه‌گیری شده یا مشاهده‌ای،  $O_i$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده یا مشاهده‌ای،  $P_i$ : مقادیر برآورد شده و  $n$  تعداد نمونه‌های مورد ارزیابی،  $X_{+i}$  مجموع ستون‌های حاشیه‌ای  $i$ ،  $X_{i+}$  مجموع ردیف‌های حاشیه‌ای  $i$ ،  $N$  مجموع مشاهدات،  $X_{ii}$  مشاهده ردیف  $i$  و ستون  $i$ ،  $SCP$  مجموع پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده،  $SP$  مجموع پیکسل‌های مورد طبقه‌بندی،  $NCP$  تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده در طبقه مورد نظر،  $SGP$  کل پیکسل‌های طبقه‌بندی در واقعیت زمینی،  $NCP$  تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده در طبقه مورد نظر،  $SGP$  تعداد پیکسل‌های طبقه مورد نظر در طبقه‌بندی

### شرح و تفسیر نتایج

مقادیر عوامل مدل‌های EPM و MPSIAC در سطح حوضه شهریار در جدول ۲ مشاهده می‌شود. از عوامل نه‌گانه‌ی مدل MPSIAC که از عوامل مؤثر بر تولید رسوب هستند، عوامل استفاده از زمین، پوشش زمین و فرسایش سطحی به ترتیب با مقادیر ۱۷/۴، ۹/۶ و ۸/۴ بالاترین مقدار از عوامل موردبررسی را به خود اختصاص داده‌اند که علت بالا بودن مقدار عامل استفاده از زمین، کاربری مرتع و کشت دیم به عنوان کاربری اراضی غالب منطقه است که این اراضی نسبت به دیگر کاربری‌ها حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش خاک دارند و موجب بالارفتن فرسایش خاک در این حوضه شده‌اند.

نتایج عوامل مدل EPM نیز نشان می‌دهد که ضریب مقاومت سنگ و خاک به فرسایش ۱/۲۱ محاسبه شده است. علت آن است که در این حوضه بالغ بر ۶۰ درصد از مساحت حوضه را سازندهای بسیار حساس و حساس به فرسایش به خود اختصاص می‌دهند که این عوامل موجب بالا بودن عامل مقاومت سنگ و خاک به فرسایش شده است. کاربری اراضی به عنوان ضریب استفاده از زمین در مدل EPM، یکی از عوامل اصلی و مؤثر در فرسایش خاک است که با توجه به نقشه‌ی کاربری اراضی حوضه، کاربری مرتع و کشت دیم بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است و امتیاز مربوط به این عامل ۰/۴۷ تعیین شد. عامل شیب حوضه نیز رابطه مستقیم با جریان سطحی و نفوذ آب در خاک دارد که در میزان فرسایش و تولید رسوب حوضه نیز مؤثر است؛ زیرا هر چه شیب بیشتر باشد فرآیندهای فرسایش نیز تأثیرگذارتر خواهند بود که در این حوضه مقدار ۰/۲۹ را به خود اختصاص داده است. همچنین نتایج دو مدل نشان داد که میانگین شدت فرسایش در مدل MPSIAC، ۵۸۹ و در مدل EPM، ۲۸۷ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال برآورد شد که وضعیت فرسایش حوضه با کمک مدل MPSIAC، زیاد و مدل EPM، شرایط متوسطی را برای حوضه برآورد کرده است. علت تفاوت میانگین شدت فرسایش در دو مدل مورد بررسی آن است که در مدل MPSIAC، عوامل بیشتری مانند فرسایش رودخانه‌ای و پوشش زمین و فرسایش خندقی در مقایسه با مدل EPM در نظر گرفته شده است و این عوامل باعث اختلاف برآورد شدت فرسایش به کمک مدل MPSIAC می‌شود.

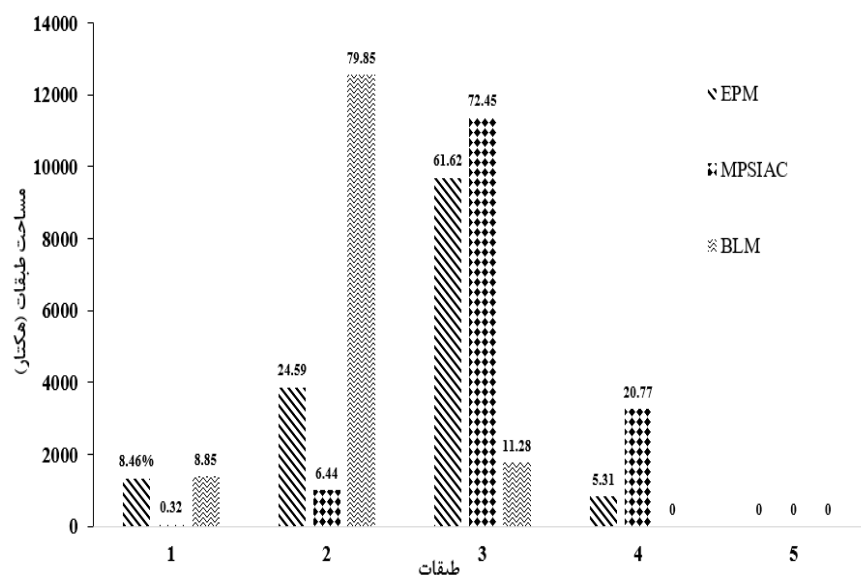
جدول ۲: مقادیر میانگین عوامل مدل EPM و MPSIAC در سطح حوضه

| مدل | عوامل مدل | مقدار | مدل | عوامل مدل | مقدار |
|-----|-----------|-------|-----|-----------|-------|
|-----|-----------|-------|-----|-----------|-------|

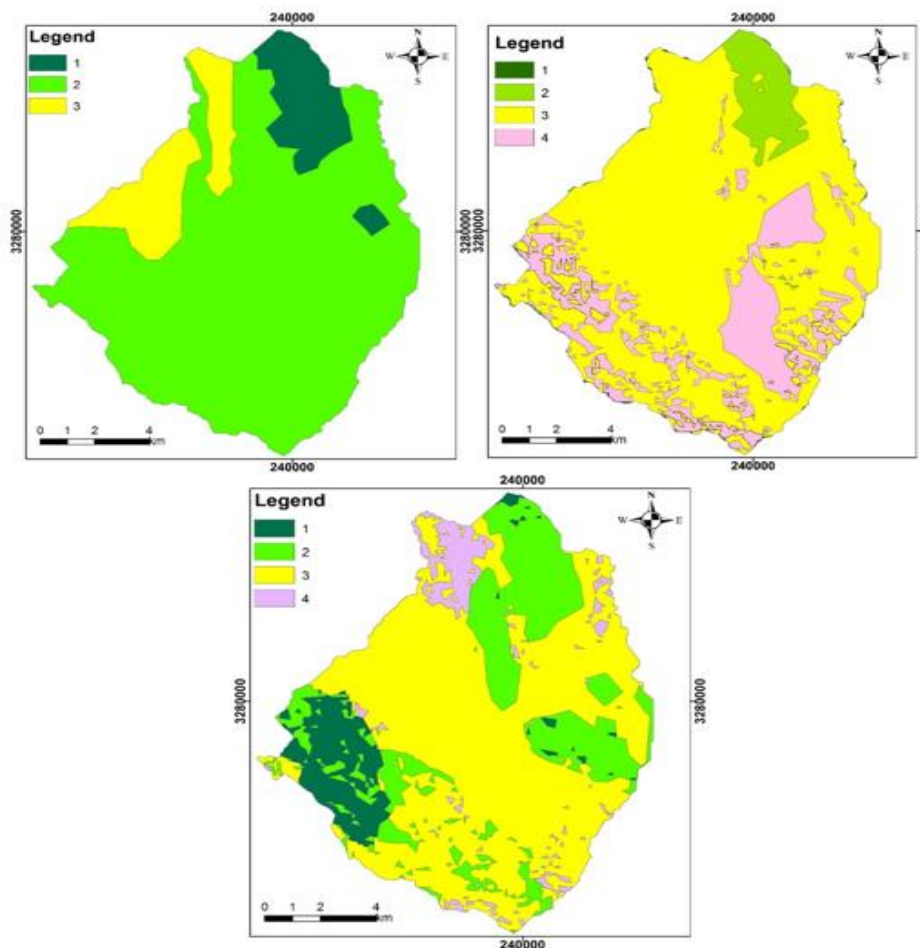
|      |                                                |       |                                                 |
|------|------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------|
| ۶/۵  | زمین‌شناسی سطحی                                | ۰/۵۹  | ضریب فرسایش مشاهده‌ای                           |
| ۵/۷  | خاک                                            | ۰/۴۷  | ضریب استفاده از زمین                            |
| ۰/۷۴ | آب‌وهوا                                        | ۱/۲۱  | ضریب مقاومت سنگ و خاک                           |
| ۱/۸  | رواناب                                         | ۰/۲۹  | ضریب شیب                                        |
| ۴/۳  | توپوگرافی                                      | ۰/۵۱  | ضریب فرسایش                                     |
| ۹/۶  | پوشش زمین                                      | ۱۳/۷  | درجه حرارت سالیانه (درجه سانتی گراد)            |
| ۱۷/۴ | استفاده از زمین                                | ۱۹۶/۶ | بارندگی سالیانه (میلی‌متر)                      |
| ۸/۴  | فرسایش سطحی                                    |       |                                                 |
| ۴/۴  | فرسایش رودخانه‌ای                              | ۲۸۷   | فرسایش ویژه<br>(مترمکعب بر کیلومترمربع در سال)  |
| ۵۴/۴ | درجه رسوب‌دهی                                  |       |                                                 |
| ۱۷۰  | شدت رسوب‌دهی                                   | ۱۳۶   | شدت رسوب‌دهی<br>(مترمکعب بر کیلومترمربع در سال) |
|      | (مترمکعب بر کیلومترمربع در سال)                |       |                                                 |
| ۵۸۹  | فرسایش ویژه<br>(مترمکعب بر کیلومترمربع در سال) |       |                                                 |

نتایج مساحت طبقات فرسایش مدل‌های BLM، MPSIAC و EPM (شکل ۳) نشان می‌دهد که در مدل EPM، طبقه ۳ و ۲ به ترتیب با ۶۱/۶۲ و ۲۴/۵۹ درصد از مساحت کل حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. در مدل MPSIAC، طبقه‌ی ۳ و ۴، بالاترین درصد مساحت در حوضه را دارد و در مدل BLM، طبقات ۲ و ۳، با ۷۹/۸۵ و ۱۱/۲۸ درصد بیشترین مساحت را در حوزه‌ی آبخیز شهریاری به خود اختصاص داده‌اند که علت می‌تواند مربوط به تأثیر لایه‌های متفاوت مورداستفاده دو مدل MPSIAC و EPM و تنوع شرایط در این مناطق باشد. همچنین در سه مدل موردبررسی، درصد مساحت طبقه ۵، صفر است که در مدل BLM، علاوه بر طبقه‌ی پنج، طبقه‌ی چهار نیز درصدی از مساحت حوضه را شامل نشده است.

همچنین در شکل ۴ نقشه‌ی طبقات فرسایش مدل BLM، MPSIAC و EPM مشاهده می‌شود که هر دو مدل به‌طور مشترک منطقه کشاورزی که در شمال حوضه قرار دارد را در کلاس فرسایش کم پهنه‌بندی کرده‌اند که باهم همخوانی دارند. در مناطق جنوب غربی، شرق، شمال غرب و جنوب حوضه بیشترین عدم همخوانی وجود دارد که علت آن می‌تواند تأثیر تلفیقی تغییرات شیب و ارتفاع (بارندگی و دما به‌عنوان عامل تأثیرپذیر از ارتفاع) باشد که میزان تأثیرگذاری آن‌ها در مدل‌ها نیز متفاوت بوده است.



شکل ۳: مساحت طبقات فرسایش مدل‌های EPM، MPSIAC و BLM



شکل ۴: نقشه‌ی طبقات فرسایش مدل BLM (بالا راست)، مدل MPSIAC (بالا چپ) و مدل EPM (پایین)

نتایج بررسی صحت مکانی نقشه‌های فرسایش حاصل از مدل‌های تجربی EPM و MPSIAC، به کمک شاخص‌های آماری RMSE، MAE، RRMSE، MBE، NSE، CD، CRM و MSE بر اساس نقشه نقاط تصادفی (۱۴۰۰ نقطه) در

جدول ۳ آورده شده است. مقایسه مدل‌های MPSIAC و EPM از نظر مقادیر آماره‌های MAE، RMSE و MBE و MSE نشان می‌دهد که آماره‌ها در مدل MPSIAC دارای مقادیر پایین‌تری هستند. در نتیجه مدل MPSIAC دارای خطای کمتری نسبت به مدل EPM است. همچنین بررسی مقدار ضریب کارایی ناش و ساتکلیف در دو مدل نشان داد که مقدار این ضریب در مدل MPSIAC بیش‌تر است که نشان از کارایی بهتر این مدل در برآورد فرسایش دارد. مقدار آماره RMSE در مدل EPM بیان‌کننده‌ی آن است که مدل EPM نسبت به مدل MPSIAC دارای برآوردی بیش‌ازحد و یا کمتر از حد در مقایسه با مقادیر مشاهده‌ای (مدل BLM) است و میزان این بیش و یا کم برآوردی به چه میزان است. مقدار آماره NSE در هر دو مدل منفی شده و نشانگر آن است که هر دو مدل از صحت کمی در مقایسه با مدل BLM برخوردار هستند. با این وجود مدل MPSIAC نسبت به مدل EPM، مقدار NSE بالاتری دارد که نشان‌دهنده کارایی بهتر این مدل در برآورد فرسایش است.

بررسی آماره CRM نیز نشان می‌دهد که CRM مدل EPM منفی بوده است و برآورد فرسایش توسط این مدل دارای بیش برآوردی است، به همین علت مدل MPSIAC بر مدل EPM برتری دارد. آماره CD که نسبت بین پراکنش مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد، در مدل MPSIAC از یک بیش‌تر است که تمایل مدل به بیش‌تر برآورد نمودن مقادیر تخمینی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقادیر شاخص‌های آماری بررسی صحت مکانی نقشه مدل‌های EPM و MPSIAC

| شاخص   |       |        |        |        |        |      |        | مدل    |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|------|--------|--------|
| RRMSE  | RMSE  | MAE    | MBE    | NSE    | CRM    | CD   | MSE    |        |
| ۰/۱۰۳۵ | ۰/۶۳۷ | ۰/۴۲۳۷ | ۰/۰۳۶۶ | -۰/۰۴۴ | ۰/۰۱۷۹ | ۶/۰۱ | ۰/۷۹۸۱ | MPSIAC |
| ۰/۱۰۳۰ | ۰/۶۳۸ | ۰/۷۱۱  | ۰/۳۶۱۷ | -۱/۱۱۳ | -۰/۱۷۶ | ۰/۴۳ | ۰/۷۹۸۷ | EPM    |

درستی طبقه‌بندی طبقات فرسایش دو مدل MPSIAC و EPM با خروجی مدل BLM برای ارزیابی صحت و هم‌پوشانی نقشه طبقات فرسایش مدل‌ها در ماتریس خطا یا جدول درهمی (جدول ۴) آورده شده است که ماتریس خطا برای محاسبه ضریب کاپا و درصد دقت کل و دقت تولیدکننده و کاربر موردنیاز است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، صحت تولیدکننده برای مدل MPSIAC در طبقه‌ی سه برابر ۹۷/۹۷ درصد است که نشان می‌دهد در ۹۷/۹۷ درصد از برآورد طبقه سه، واقعیت زمینی (BLM) با مدل MPSIAC وجود دارد و همچنین مدل، هم‌پوشانی خوبی با BLM (مرجع) دارد. صحت تولیدکننده طبقه‌ی سه مدل EPM (جدول ۴) نیز نشان می‌دهد که ۷۹/۶۱ درصد از برآورد مدل EPM دارای واقعیت و همخوانی زمینی است. در صورتی که دقت کاربر برای حالات فوق مقادیر پایینی تعیین شده است.

بررسی مقدار ضریب کاپا نشان می‌دهد که این ضریب برای مدل MPSIAC بیشتر از مدل EPM است. به همین علت میزان هم‌پوشانی طبقات فرسایش حاصل از مدل MPSIAC با طبقات فرسایش حاصل از مدل BLM (واقعیت زمینی) بیشتر از مدل EPM است. ولی مقدار دقت کلی برای مدل EPM بیشتر از مدل MPSIAC است که در این مورد اظهار نظر کارشناسی معنا ندارد و بهتر است به نتایج ضریب کاپا توجه شود، چرا که صحت کلی درواقع میانگینی از کار انجام شده است و در محاسبه آن تمامی طبقات در نظر گرفته نمی‌شود ولی در محاسبه ضریب کاپا تمامی طبقات در نظر گرفته می‌شود، بنابراین نتایج حاصل از ضریب کاپا معتبرتر از میانگین کلی است.

درمجموع نتایج نشان داد که میزان صحت و دقت طبقات فرسایش حاصل از مدل MPSIAC با طبقات فرسایش حاصل از مدل BLM (واقعیت زمینی) بیشتر از مدل EPM است. همچنین نقشه‌های طبقات فرسایش مدل MPSIAC هم‌پوشانی بیشتری با مدل BLM و در واقع با شرایط واقعی منطقه دارد. نتایج خیام و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان داد که مدل EPM ۷۴ درصد رسوب مشاهده‌ای حوزه آبخیز سقزچی چای اردبیل را برآورد کرده است. درحالی‌که مدل MPSIAC توانسته است با دقت ۹۸ درصد رسوب مشاهده‌ای را به‌دست‌آمده بیاورد. همچنین عبدالله و همکاران (Abdullah et al., ۲۰۱۷) در مطالعه‌ای برای تخمین فرسایش خاک در مناطق خشک کویت نشان دادند که مدل‌های MPSIAC و EPM در توزیع مکانی فرسایش مشابه بودند، هرچند MPSIAC توزیع مکانی واقعی‌تر و سطوح دقیق‌تری از فرسایش ارائه داده است و مدل مناسب‌تری برای منطقه مورد مطالعه معرفی شده است که یافته‌های این پژوهش با نتایج منابع ذکر شده همخوانی دارد.

جدول ۴: درستی طبقه‌بندی طبقات فرسایش مدل MPSIAC و EPM با خروجی مدل BLM

| مدل BLM           |        |         |        |   |         |           |
|-------------------|--------|---------|--------|---|---------|-----------|
| شماره طبقات       | ۱      | ۲       | ۳      | ۴ | کل      | دقت کاربر |
| ۱                 | ۲/۷۱   | ۳۹/۹۲   | ۵/۹۸   | ۰ | ۴۸/۶۱   | ۵/۵۷      |
| ۲                 | ۱۰۰/۶۲ | ۱۲/۶۰   | ۰      | ۰ | ۱۰۱۴/۲۲ | ۱/۲۴      |
| ۳                 | ۳۸۶/۴۸ | ۹۲۵۸/۷۹ | ۱۷۳/۴۸ | ۰ | ۱۱۳۸/۷۶ | ۱۵/۲۶     |
| ۴                 | ۰/۰۵   | ۳۲۳۲/۳۴ | ۲۹/۸۸  | ۰ | ۳۲۶/۲۸  | ۰         |
| کل                | ۱۳۹/۸۷ | ۱۲۵۴/۶۶ | ۱۷۷/۳۵ | ۰ | ۱۵۷۰/۸۸ |           |
| دقت تولیدکننده    | ۰/۱۹   | ۰/۱۰    | ۹۷/۹۷  | ۰ |         |           |
| ۱۱/۱۵ = دقت کلی   |        |         |        |   |         |           |
| ۰/۰۲۵ = ضریب کاپا |        |         |        |   |         |           |
| مدل BLM           |        |         |        |   |         |           |
| شماره طبقات       | ۱      | ۲       | ۳      | ۴ | کل      | دقت کاربر |
| ۱                 | ۴۱/۶   | ۱۲۷۹/۶  | ۸/۸    | ۰ | ۱۳۳۰/۱  | ۵/۵۷      |
| ۲                 | ۱۳۲۸/۱ | ۲۴۸۵/۳  | ۴۲/۸   | ۰ | ۳۸۵۶/۲  | ۱/۲۴      |
| ۳                 | ۲۰/۸   | ۸۲۵۴/۳  | ۱۴۱۱/۸ | ۰ | ۹۶۸۶/۹  | ۱۵/۲۶     |
| ۴                 | ۰/۴    | ۵۲۴/۴   | ۳۰۹/۹  | ۰ | ۸۳۴/۸   | ۰         |
| کل                | ۱۳۹/۰۹ | ۱۲۵۴۳/۷ | ۱۷۷۳/۴ | ۰ | ۱۵۷۰۷/۹ |           |
| دقت تولیدکننده    | ۲/۹۸   | ۱۹/۸۱   | ۷۹/۶۱  | ۰ |         |           |
| ۲۵/۰۷ = دقت کلی   |        |         |        |   |         |           |
| -۰/۰۳ = ضریب کاپا |        |         |        |   |         |           |

### نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف بررسی دقت توزیع طبقات فرسایش حاصل از مدل‌های EPM و MPSIAC در مقایسه با طبقات فرسایش مدل BLM به‌عنوان مقادیر مشاهده‌ای در حوزه آبخیز شهریاری انجام شد. مقادیر عوامل مدل‌های MPSIAC و EPM در سطح حوضه نشان داد که عوامل استفاده از زمین در مدل MPSIAC و ضریب مقاومت سنگ و خاک به فرسایش در مدل EPM، بالاترین مقدار از عوامل مورد بررسی در مدل‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. علت بالا بودن مقدار عامل استفاده از زمین، کاربری مرتع و کشت دیم به عنوان کاربری اراضی غالب منطقه است که موجب بالا رفتن فرسایش خاک در این حوضه شده است. همچنین بالا بودن عامل مقاومت سنگ و خاک به فرسایش نیز به این علت است که بالغ بر ۶۰ درصد از مساحت حوضه را سازندهای بسیار حساس و حساس به فرسایش به خود اختصاص می‌دهند.

نتایج فرسایش حاصل از مدل‌ها نشان داد که میانگین شدت فرسایش در مدل MPSIAC، ۵۸۹ و در مدل EPM، ۲۸۷ مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال برآورد شد که وضعیت فرسایش حوضه با کمک مدل MPSIAC، زیاد و مدل EPM، شرایط متوسطی را برای حوضه برآورد کرده است. همچنین نقشه‌های تهیه‌شده برای دو مدل MPSIAC و EPM، تفاوت‌ها و شباهت‌هایی را نشان دادند. در مدل MPSIAC، توزیع طبقات فرسایش بیشتر در کلاس‌های ۳ و ۴ است ولی در مدل EPM بیشتر در کلاس‌های ۳ و ۲ است که می‌تواند مربوط به تأثیر لایه‌های متفاوت مورداستفاده دو مدل و تنوع شرایط در این مناطق باشد. همچنین در دو مدل موردبررسی، درصد مساحت طبقه ۵، صفر است. هر دو مدل به‌طور مشترک منطقه کشاورزی که در شمال حوضه قرار دارد را در کلاس فرسایش کم پهنه‌بندی کرده‌اند که باهم همخوانی دارند. در مناطق جنوب غربی، شرق، شمال غرب و جنوب حوضه بیشترین عدم همخوانی وجود دارد که علت آن می‌تواند تأثیر تلفیقی تغییرات شیب و ارتفاع (بارندگی و دما به‌عنوان عامل تأثیرپذیر از ارتفاع) باشد که میزان تأثیرگذاری آن‌ها در مدل‌ها نیز متفاوت بوده است.

بررسی تمام آماره‌های مورداستفاده (به‌جز آماره CD که در مدل MPSIAC از یک بیش‌تر بوده و تمایل مدل را به بیش‌تر برآورد نمودن مقادیر تخمینی نشان می‌دهد و همین‌طور آماره RRMSE که در این مدل بیش‌تر بوده که نشان‌دهنده خطای برآورد بیش‌تر است)، نشان می‌دهد که میزان تطابق طبقات فرسایش مدل MPSIAC با خروجی BLM (به‌عنوان نقشه واقعیت زمینی) بیش‌تر از مدل EPM است؛ بنابراین مدل MPSIAC نسبت به مدل EPM، توزیع مکانی بهتری دارد. همچنین نتایج ارزیابی صحت مدل‌های MPSIAC و EPM نیز نشان داد که مقدار ضریب کاپا در مدل MPSIAC بیش‌تر از مدل EPM است، لذا میزان صحت و دقت طبقات فرسایش حاصل از مدل MPSIAC با طبقات فرسایش حاصل از مدل BLM (واقعیت زمینی) بیش‌تر از مدل EPM است.

درمجموع نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که نقشه‌های طبقات فرسایش مدل MPSIAC هم‌پوشانی بیش‌تری، با مدل BLM و درواقع با شرایط واقعی منطقه دارد. از آنجایی که فرسایش خاک امروزه به عنوان یکی از مهمترین مخاطرات زیست محیطی به شمار می‌رود، اطلاعات دقیق از میزان فرسایش به کمک مدل‌هایی که به واقعیت نزدیک‌تر باشند و دقت بالایی داشته باشند، می‌تواند به ارائه روش‌های مناسب برای مدیریت فرسایش خاک به عنوان مخاطره محیطی و حفاظت خاک کمک کند. همچنین این نتایج حاصل از داده‌های این منطقه بوده و در مناطق مشابه آن نیز کاربرد دارد و در انتها پیشنهاد می‌شود تحقیقات بعدی، در مناطق متفاوت از نظر مشخصات اقلیمی، مورفولوژی و کاربری انجام شود.

### سپاسگزاری

این مقاله از طرح تحقیقاتی مصوب پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به شماره ۸۹۰۵-۲۹-۲۹-۲ استخراج شده است که از همکاران و مدیران پژوهشکده به خاطر تأمین منابع مالی، امکانات عملیاتی صحرائی و مشاوره‌های علمی قدردانی می‌شود.

## منابع

- انصاری‌لاری، احمد؛ و مریم انصاری. ۱۳۹۶. ارزیابی خطر فرسایش خاک و پتانسیل رسوب‌دهی حوضه‌ی آبریز گابریک استان هرمزگان با استفاده از مدل EPM. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۶(۱۱): ۱-۱۴.
- بیات، رضا. ۱۳۸۵. بررسی اهمیت عوامل مدل‌های تجربی MPSIAC و EPM در برآورد رسوب. *بیابان*، ۱۱(۱): ۶۵-۷۴.
- بهاروند، سیامک؛ و سلمان سوری. ۱۳۹۷. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش‌پذیری حوضه وارک و پهنه‌بندی خطر آن با استفاده از روش EPM. *فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی محیط زیست*، ۱۲(۴۵): ۶۷-۷۷.
- پرویزی، یحیی؛ شاهرخ حکیمخانی، همایون حصادی، محمد احمدی و محمد قیطوری. ۱۳۹۱. *بررسی کارایی نسخه دامنه مدل فرایندی WEPP در برآورد تلفات خاک در حوزه آبخیز قره‌سو کرمانشاه*. گزارش نهایی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران.
- جعفری، تیمور؛ مهناز ناعمی‌تبار و سید احمد ذاکریان. ۱۳۹۷. ارزیابی کمی فرسایش آبی خاک با مدل EPM (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز بدرانلو). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۹(۲): ۱۴۱-۱۵۸.
- جلالی، وحیدرضا؛ و مهدی همایی. ۱۳۹۰. ارائه مدلی غیرپارامتریک برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع K- خاک با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه. *نشریه آب‌و‌خاک، دانشگاه فردوسی مشهد*، ۲۵(۲): ۳۴۷-۳۵۵.
- حسینخانی، حسین. ۱۳۹۲. ارزیابی خطر فرسایش و پتانسیل رسوب‌دهی حوضه آبریز سد میانه با استفاده از تکنیک‌های GIS و مدل EPM. *فصلنامه زمین‌شناسی ایران*، ۷(۲۶): ۹۶-۸۷.
- خیام، مقصود؛ مصطفی غنمی‌جابر و رسول صمد زاده. ۱۳۹۲. مقایسه کارایی مدل‌های MPSIAC و EPM در برآورد فرسایش و رسوب‌زایی حوضه آبخیز سقزچی چای نمین. *دوفصلنامه‌ی ژئومورفولوژی کاربردی ایران*، ۱: ۱-۱۵.
- دائم پناه، راضیه؛ غلامحسین حق‌نیا، امین علیزاده و علیرضا کریمی کارویه. ۱۳۹۰. تهیه نقشه شوری و سدیمی خاک سطحی با روش‌های دورسنجی و زمین‌آماری در جنوب شهرستان مه ولات. *نشریه آب‌و‌خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۵(۳): ۵۰۸-۴۹۸.
- رفاهی، حسینقلی. ۱۳۸۸. *فرسایش آبی و کنترل آن*. چاپ ششم. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- عابدینی، موسی؛ و سوسن طولابی. ۱۳۹۶. مدل‌سازی فرسایش خاک و تولید رسوب با سه مدل EPM، WEPP و Fournier در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سولاچای-اردبیل). *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۲(۲): ۹۳-۱۰۵.
- رمضانی، بهمن؛ هدی ابراهیمی و لیلا حق‌پرست‌مژده‌ی. ۱۳۹۶. نقش پارامترهای محیط طبیعی در میزان فرسایش و تولید رسوب به دو روش MPSIAC و EPM (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد برنجستانک). *مهندسی جغرافیایی سرزمین*، ۱۱(۲): ۴۹-۵۹.
- شجاعی، شهرز؛ محمدرضا نورا و شهرام حبیبی‌مود. ۱۳۹۷. تخمین میزان رسوب‌دهی و فرسایش با استفاده از مدل‌های تجربی MPSIAC و FSM و روش اندازه‌گیری مستقیم (مطالعه موردی: حوضه‌ی آبخیز گابریک، جنوب شرق ایران). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۸(۴): ۸۲-۱۰۰.
- شهاب‌آرخازلو، حسین؛ سمیرا زاهد و شکراله اصغری. ۱۳۹۸. مقایسه‌ی دو مدل MPSIAC و MMF در تهیه‌ی نقشه‌ی توزیع فرسایش خاک حوضه آبخیز آق‌گونی اردبیل. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۸(۲): ۷۲-۸۸.
- عرب‌خدری، محمود. ۱۳۸۴. بررسی رسوب‌دهی معلق حوضه‌های آبخیز ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱(۲): ۵۱-۶۰.
- عرفانیان، مهدی؛ پریسا قهرمانی و حسین سعادت. ۱۳۹۲. تهیه نقشه خطر پتانسیل خاک با استفاده از منطق فازی در حوزه آبخیز قرناوه گلستان. *نشریه علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۷(۲۳): ۴۳-۵۲.
- عفیفی، محمد ابراهیم. ۱۳۹۶. ارزیابی فرسایش خاک و درجه رسوب‌دهی در حوضه‌ی آبریز نم‌دان با استفاده از مدل MPSIAC و GIS. *فصلنامه جغرافیایی سرزمین*، ۱۴(۵۵): ۳۷-۵۷.

- قرمزچشمه، باقر؛ رضا بیات. ۱۳۸۶. بررسی اثر توزیعی عوامل موثر در خطای نقشه‌های تولید رسوب مدل‌های EPM و MPSIAC. سومین همایش ملی فرسایش و رسوب.
- قضاوی، رضا؛ عباسعلی ولی، یاسر مقامی، ژاله عبدی و سیامک شرفی. ۱۳۹۱. مقایسه مدل‌های EPM، MPSIAC و PSIAC در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از GIS. *جغرافیا و توسعه*، ۱۰(۲۷): ۱۱۷-۱۲۶.
- قلی‌پوری، شمیم؛ پرویز غضنفری، محمود الماسیان و نادر جلالی. ۱۳۹۲. روش‌های کمی و کیفی برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از مدل‌های MPSIAC و EPM در حوضه آبخیز ورده (شمال باختری کرج). *علوم زمین*، ۲۲(۸۸): ۱۴۵-۱۵۴.
- کاظمی، روح‌اله؛ حسن یگانه، سیدجمال‌الدین خواجه‌الدین. ۱۳۸۹. مقایسه نقشه‌های کاربری اراضی تولیدی با داده‌های دو سنجنده MODIS و IRS-WiFS در منطقه سمیرم- بروجن. *فصلنامه کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم منابع طبیعی*، ۱۱(۱): ۱-۱۱.
- هاشمی، سید علی‌اصغر؛ محمود عرب‌خدری. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل EPM از طریق رسوب سنجی مخازن سدهای کوچک. *علوم آب‌وخاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۱۱(۴۲): ۳۴۵-۳۵۵.
- Abdullah, M.; R. Feagin, and L. Musawi. ۲۰۱۷. The use of spatial empirical models to estimate soil erosion in arid ecosystems. *Environ Monit Assess*, ۱۸۹(۷۸): ۱-۱۷.
- Ahmed, A.; D. Adil, B. Hasna, A. Elbachir, and R. Lazaar. ۲۰۱۹. Using EPM Mmodel and GIS for eEstimation of soil erosion in Souss basin, Morocco. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, ۷(۸): ۱۲۲۸-۱۲۳۲.
- Bozorgzadeh, E.; and N. Kamani. ۲۰۱۲. Ageographic information system (GIS)-based modified erosion potential (EPM) model for evaluation of sediment production. *Journal of Geology and Mining Research*, ۴(۶): ۱۳۰-۱۴۱.
- Daneshfaraz, R.; M. Rahmati, and P. Akbari Moghanjig. ۲۰۱۷. Soil erosion and sediment mapping in Aidoghmoush watershed using MPSIAC model and GIS and RS technologies. *Environmental Resources Research*, ۵(۱): ۳۵-۴۹.
- Dragičević, N.; B. Karleuša, and N. Ožanić. ۲۰۱۹. Different approaches to estimation of drainage density and their effect on the erosion potential method. *Water*, ۱۱(۵۹۳): ۱-۱۴.
- Efthimiou, N.; and E. Lykoudi. ۲۰۱۶. Soil erosion estimation using the EPM model. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, ۵۰: ۳۰۵-۳۱۴.
- Elhag, M.; T. Kojchevska, and S. Boteva. ۲۰۱۹. EPM for soil loss estimation in different geomorphologic conditions and data conversion by using GIS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, ۲۲۱.
- Kairis, O.; C. Karavitis, A. Kounalaki, L. Salvati, and C. Kosmas. ۲۰۱۳. The effect of land management practices on soil erosion and land desertification in an olive grove. *Soil Use and Management*, ۲۹(۴): ۵۹۷-۶۰۶.
- Kouhpeima, A.; S.A.A. Hashemi, and S. Feiznia. ۲۰۱۱. A study on the efficiency of Erosion Potential Model (EPM) using reservoir sediment. *Elixir Pollution*, ۳۸: ۴۱۳۵-۴۱۳۹.
- Landis J.R.; and G.G. Koch. ۱۹۷۷. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, ۳۳: ۱۵۹-۱۷۴.
- Lense, G.H.E.; T.C. Parreiras, R.S. Moreira, J.C. Avanzi, and R.L. Mincato. ۲۰۱۹. Estimates of soil losses by the erosion potential method in tropical latosols. *Ciência e Agrotecnologia*, ۴۳: ۴-۱۰.
- Noori, H.; S.M. Siadatmousavi, and B. Mojaradi. ۲۰۱۶. Assessment of sediment yield using RS and GIS at two sub-basins of Dez Watershed Iran. *International Soil and Water Conservation Research*, ۴: ۱۹۹-۲۰۶.
- Poesen, J. ۲۰۱۸. Soil erosion in the anthropocene: research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, ۴۳: ۶۴-۸۴.
- Poggetti, E.; C. Cencetti, P. DeRosa, A. Fredduzzi, and F.R. Rivelli. ۲۰۱۹. Sediment supply and hydrogeological hazard in the Quebrada de Humahuaca (province of Jujuy, northwestern Argentina)—Rio Huasamayo and Tilcara area. *Geosciences*, ۹(۴۸۳): ۱-۲۵.

- Tosic, R.; N. Lovric, and S. Dragicevic. ۲۰۱۹. Assessment of the impact of depopulation on soil erosion: case study-Republika Srpska (Bosnia and Herzegovina). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, ۱۴(۲): ۵۰۵-۵۱۸.
- Zarei, A.R.; and M.J. Amiri. ۲۰۱۷. Evaluation of soil losses and sediment yield using modified PSIAC model. *Iran Agricultural Research*, ۳۶(۱): ۱۱۱-۱۱۶.