



عطاله کاویان^۱
راضیه عسگریان^۲
تاروش ناطقی^۳
زینب جعفریان جلودار^۴
عطا صفری^۵

ارزیابی کارایی مدل‌های FSM، PSIAC و EPM در برآورد تولید رسوب اراضی مرتعی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سرخ آباد، استان مازندران)

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۰۶/۱۴

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۰۹/۲۲

چکیده

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی وضعیت فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبخیز سرخ آباد استان مازندران، ابتدا به اندازه‌گیری رسوب ویژه مشاهده‌ای از طریق بررسی ابعاد رسوبات تجمع یافته در پشت دو بند سنگ و ملات موجود در خروجی حوضه مذکور پرداخته و سپس با به‌کارگیری مدل‌های FSM، PSIAC و EPM کارایی هر یک از این مدل‌ها در برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج حاصل مقدار رسوب مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده در پشت بندهای موجود در منطقه مورد مطالعه، ۳۹۰/۹۹۷ تن در کیلومترمربع در سال به‌دست آمد که این میزان برای مدل‌های FSM (رابطه ۱۰)، PSIAC و EPM به ترتیب ۶۱۱/۴۱۱، ۲۳۹/۱۵۷ و ۲۸۰/۴۳۶ تن در کیلومترمربع در سال برآورد گردید. هم‌چنین درصد خطای نسبی

E- mail: a.kavian@sanru.ac.ir

۱- دانشیار دانشکده منابع طبیعی ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۳- دانش‌آموخته کارشناسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۴- دانشیار دانشکده منابع طبیعی ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۵- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

محاسبه شده برای مدل‌های فوق، به ترتیب معادل ۲۲، ۳۶ و ۵۰ درصد بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل EPM به دلیل درصد خطای نسبی کم‌تر نسبت به سایر مدل‌های به کار رفته، کارایی بهتری در برآورد فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز سرخ آباد داشته است.

کلید واژه‌ها: تولید رسوب، بندهای اصلاحی، اراضی مرتعی، حوضه آبخیز سرخ آباد، استان مازندران.

مقدمه

فرسایش خاک فرآیندی طبیعی و همیشگی است که شدت آن به وسیله انسان و از طریق دخالت‌های غیراصولی از حد طبیعی بیش‌تر می‌شود (محمدی، ۱۳۹۰: ۱۱). این در حالی است که در یک زیست‌بوم دست‌نخورده، مقدار هدررفت خاک با مقدار تولید آن برابر می‌باشد؛ اما متأسفانه امروزه به دلیل دخالت‌های بشر و فقدان مدیریت فعالیت‌های انسانی و بهره‌برداری‌های بی‌رویه، این نظم به هم خورده است (صادقی و یثربی، ۱۳۸۷: ۶۴). با گسترش فرسایش خاک در یک منطقه، خاک سطحی تکامل یافته با حاصل‌خیزی زیاد به طور مستمر از دسترس خارج می‌شود. به طوری که هرچه هدررفت آب و خاک زیاد شود، به همان نسبت نیز حاصل‌خیزی و تولیدات گیاهی کاهش می‌یابد (آزموده، ۱۳۸۹: ۱۵). به منظور اجرای برنامه‌های حفاظت و کنترل فرسایش خاک و کاهش رسوب‌دهی ضرورت دارد که حجم کل بار رسوبی و شدت فرسایش‌پذیری در یک حوضه آبخیز ارزیابی و برآورد گردد و عوامل مؤثر در فرسایش حوضه شناسایی گردند که این کار با استفاده از مدل‌های فرسایش امکان‌پذیر می‌باشد (ساعدی و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۰۳). روش‌های تجربی گوناگونی برای اندازه‌گیری نرخ فرسایش خاک وجود دارد، اما بیش‌تر این روش‌ها دارای خطای برآورد بوده و صحت قضاوت در مورد متغیرهای وابسته مدل، مورد تردید است (پارساخو، ۱۳۹۱: ۴۸). محدودیت ثبت آمار و پراکنش نامناسب ایستگاه‌های رسوب‌سنجی ضرورت استفاده از مدل‌های تجربی را ایجاب می‌نماید (دهزاد و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۴). نکته اساسی در استفاده از مدل‌های موجود، علاوه بر دستیابی به مقادیر فرسایش و رسوب، انتخاب مناسب‌ترین مدل به ویژه در حوضه‌های فاقد آمار رسوب‌سنجی می‌باشد (بیات و همکاران، ۱۳۸۰: ۲۰۶). مطالعات زیادی در رابطه با استفاده از مدل‌های برآورد رسوب به تنهایی و یا در مقایسه با سایر روش‌ها گزارش شده است. هارگوین و همکاران^۱ (۲۰۰۵: ۳۲۵)، مدل FSM را به همراه مدل PSIAC در اتیوپی آزمایش و تغییراتی در فاکتورها و شرح آن‌ها اعمال نمودند، نتایج حاصل نشان داد که مدل FSM می‌تواند تطابق مناسبی بین رسوب ویژه پیش‌بینی شده و مقدار برآوردی آن برقرار کند.

تنگستانی (۲۰۰۶: ۵۹۲)، دو مدل PSIAC و EPM را برای بررسی فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز افزر به کار برد و نشان داد که نتایج مدل PSIAC نسبت به مدل EPM معتبرتر بوده و با توجه به تحقیقات میدانی صورت گرفته، نتایج مدل PSIAC از قطعیت و اطمینان بیش تری برخوردار می‌باشد. صفامنش و همکاران (۲۰۰۶: ۱۱۷)، مدل‌های تجربی مختلف را برای ارزیابی خطر فرسایش در حوضه آبخیز زرگه استفاده کردند که در مدل MPSIAC مقدار I^2 معادل ۶۱٪ و بیش تر از سایر مدل‌های مورد استفاده به دست آمد، هم‌چنین نتایج نشان داد که فاکتور مؤثر در تعیین فرسایش، اقلیم می‌باشد. رومرو دیاز و همکاران^۷ (۲۰۰۷: ۱۷۶)، در مطالعه‌ای به بررسی نرخ فرسایش به دست آمده از رسوبات سدهای اصلاحی در جنوب اسپانیا پرداختند. با مقایسه نرخ فرسایش در کل حوضه و هم‌چنین در زیرحوضه‌ها با نرخ به دست آمده از دیگر روش‌ها مانند USLE, Fournier و باتیمتری دریافتند که نرخ به دست آمده از روش باتیمتری با مقادیر به دست آمده از دایک‌ها مشابه، اما مقادیر به دست آمده از مدل USLE، ۵/۴ برابر بیش تر از مقادیر دایک برآورد شده بود. دبیتس و پوئسن^۸ (۲۰۱۰: ۴۲۹)، به منظور پیش‌بینی فرسایش و بررسی اثرات گیاهان در کاهش فرسایش از مدل‌های تجربی استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های تجربی دارای بیش تخمینی نسبت به داده‌های مشاهده‌ای می‌باشند. باگارلو و همکاران^۹ (۲۰۱۱: ۲۷۱)، با استفاده از مدل‌های تجربی به برآورد هدررفت خاک در شیب‌های متوسط پرداختند. نتایج نشان داد که رواناب به عنوان یک فاکتور اولیه مستقل در مدل‌سازی فرسایش رگبار می‌باشد به نحوی که غلظت رسوب با توان رواناب افزایش می‌یابد.

بهرامی و رحیمی (۱۳۸۷: ۸۷)، حجم رسوب ناشی از فرسایش را در حوضه آبخیز رودخانه کردشیر با استفاده از مدل‌های EPM, MPSIAC و Fournier برآورد کردند و طبق نتایج حاصل، مدل MPSIAC را به دلیل استفاده از پارامترهای بیشتر (۹ عامل) به عنوان مدلی مناسب معرفی کردند. برزو و همکاران (۱۳۸۷: ۲۶)، سه مدل PSIAC, MPSIAC و EPM را در حوضه آبخیز چهل چشمه مورد مقایسه قرار دادند که بر اساس نتایج حاصل، مدل MPSIAC به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. خدابخش و همکاران (۱۳۸۸: ۵۸)، میزان فرسایش در زیرحوضه سزار را با استفاده از مدل‌های EPM, MPSIAC و به کمک دانش فازی برآورد نمودند، نتایج حاصل نشان داد که هرچند هر سه روش تمایل به بیش تخمینی دارند اما روش MPSIAC نتایج بهتری را ارائه می‌کند. رنجبر و راز (۱۳۸۸: ۱۰۶)، حجم رسوب‌دهی حوضه آبخیز رودخانه سبزکوه را به کمک MPSIAC برآورد کردند که منطقه مورد مطالعه از نظر شدت رسوب‌دهی در کلاس زیاد قرار گرفت. احمدی و محمدی (۱۳۸۹: ۳۴۹)، به بررسی تخمین رسوب با استفاده از مدل‌های PSIAC و EPM پرداختند که هر دو مدل دارای نتایجی تا حدودی نزدیک به هم بوده

7- Romero-Díaz et al

8- De-Baets and Poesen

9- Bagarello et al

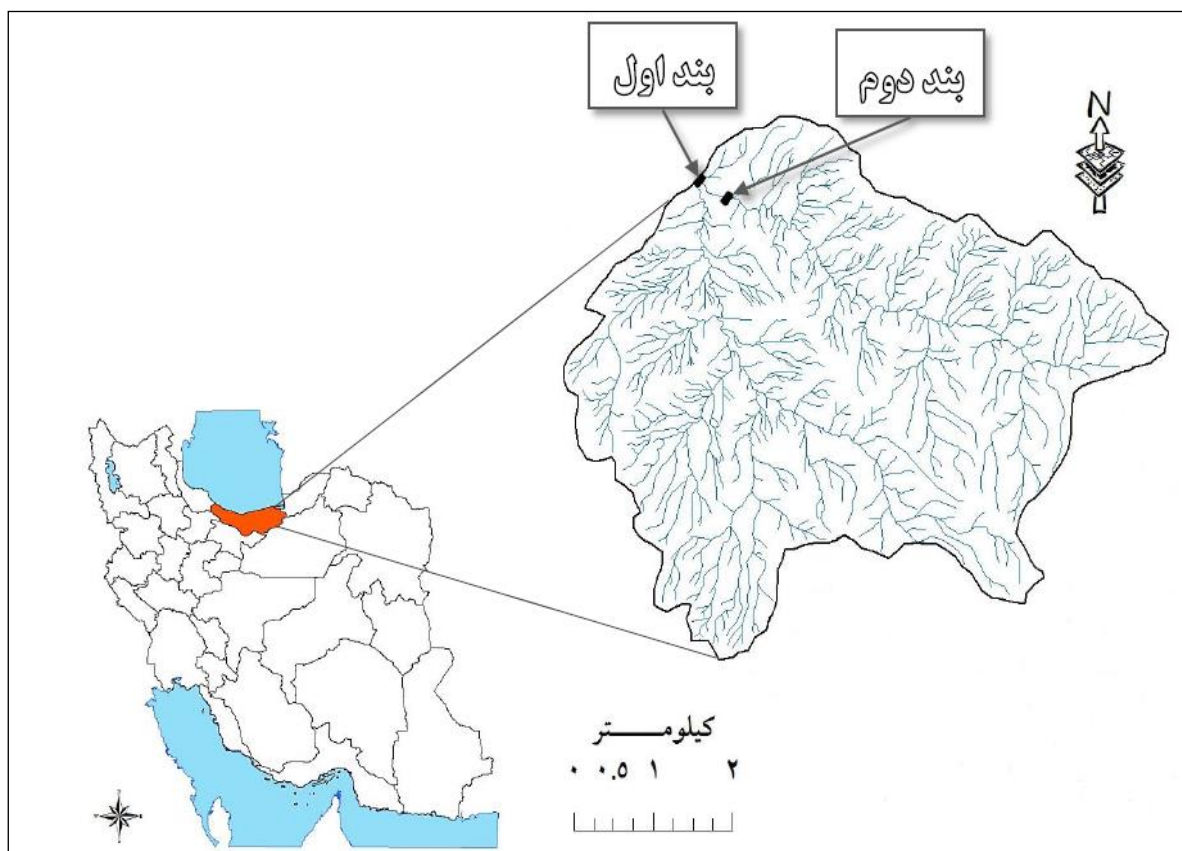
اما مدل PSIAC با توجه به جامع و کامل بودن آن، برای تخمین رسوب‌دهی توصیه شده است. محسنی و همکاران (۱۳۹۰: ۱۲۴)، ارزیابی دقت و کارایی ۴ مدل EPM، MPSIAC، ژئومورفولوژی و هیدروفیزیکی را برای برآورد فرسایش و رسوب انجام دادند که مدل ژئومورفولوژی را با اختلاف نسبی ۳/۳۶ درصد مناسب‌ترین مدل ارائه دادند. کاویان و صفری (۱۳۹۲: ۱۲۶)، به منظور ارزیابی و تعیین مدل مناسب جهت برآورد تولید رسوب در حوضه آبخیز بابلرود، تعداد ۱۰ مدل تجربی را به کار بردند، با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های آماری و مقادیر رسوب مشاهده‌ای در خروجی حوضه، مدل MPSIAC به عنوان مدل مناسب‌تر تشخیص و تعیین گردید.

یکی از روش‌های بسیار دقیق به خصوص در حوضه‌های آبخیز کوچک برای برآورد رسوب، استفاده از رسوبات سدهای اصلاحی است. به علت اینکه حجم بالای رسوبات معلق وقتی از حوضه خارج می‌شود که اوج سیلاب است و در این زمان معمولاً نمونه رسوب گرفته نمی‌شود، هم‌چنین با توجه به این‌که در خروجی بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشور، ایستگاه‌های رسوب‌سنجی نداریم و معمولاً ایستگاه‌های رسوب‌سنجی در خروجی حوضه-های آبخیز خیلی بزرگ وجود دارد، بنابراین نتایج حاصل از برآورد رسوب با استفاده از سدهای اصلاحی، مشروط به این‌که ارزش‌گذاری کیفی با استفاده از عملیات میدانی درست و صحیح انجام پذیرد، معمولاً قابل اطمینان است.

این مطالعه، با هدف ارزیابی کارایی سه مدل PSIAC، FSM و EPM در اراضی مرتعی، به برآورد تولید رسوب با استفاده از رسوبات پشت دو بند سنگی - ملاتی که در داخل حوضه مورد مطالعه قرار داشته، می‌پردازد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه آبخیز سرخ آباد سوادکوه در استان مازندران است (شکل ۱). از لحاظ مشخصات جغرافیایی، این زیرحوضه در طول جغرافیایی ۸۸° ۵۲' تا ۹۴° ۵۲' و عرض جغرافیایی ۳۵° ۹۳' تا ۳۵° ۹۶' قرار دارد. حداکثر و حداقل ارتفاع زیرحوضه به ترتیب ۳۳۶۰ و ۲۰۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد و دارای مساحتی برابر با ۱۴۲۵/۲۴۴ هکتار است. میانگین بارش منطقه ۴۲۶/۷ میلی‌متر می‌باشد و منطقه دارای رطوبت نسبی بالا (بین ۵۵ تا ۷۱ درصد) در تمام طول سال می‌باشد. اقلیم منطقه با توجه به داده‌های ایستگاه‌های مجاور و با استفاده از روش‌های دومارتن، کوپن و آمبرژه از نوع اقلیم مرطوب تا نیمه مرطوب معتدل شناخته شده است. خاک‌های منطقه بیش‌تر از نوع شنی لومی، لومی شنی و رس می‌باشد. از لحاظ مشخصات ژئومورفولوژی، جنس بیش‌تر رسوبات از نوع ماسه‌سنگ و آهک است. از فرسایش‌های موجود در منطقه می‌توان به فرسایش‌های توده‌ای، خندقی، کنار رودخانه‌ای و خطی یا کنار جاده‌ای اشاره کرد. فلور گیاهی مناطق مرتفع و کوهستانی در این منطقه به چشم می‌خورد. بیش‌تر گونه‌ها از نوع گراس‌ها، فرب‌ها، بالشتکی‌های خاردار و بوته‌های خشبی هستند.



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری رسوبات بندها

در حوضه آبخیز سرخ آباد با توجه به مورفولوژی رودخانه و مکان‌یابی مناسب جهت کنترل رسوبات، تنها تعداد دو بند از جنس سنگ و ملات با ارتفاع ۵ متر ساخته شده است، لذا دو بند سنگی ملاتی موجود در منطقه مورد مطالعه که بر روی آبراهه اصلی احداث شده بود، برای برآورد رسوب ویژه مشاهده‌ای انتخاب شد (شکل ۲). ابعاد سازه‌ها و رسوبات پشت آن‌ها شامل عرض و ارتفاع بند، طول رسوبات پشت بند و ارتفاع آن‌ها اندازه‌گیری شد که مشخصات بندها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات بندها در منطقه مورد مطالعه

سن بند (year)	X_2 (m)	X_1 (m)	P_2	P_1	ارتفاع رسوب (m)	ارتفاع بند (m)	عرض آبراهه در ورودی مخزن بند (m)	عرض بند (m)	طول رسوب‌گذاری (m)	
۲/۰۸	۵/۹۶	۵	۴۰	۴۵	۵	۵	۳	۱۲/۹	۶۳	بند اول
۲/۰۸	۸	۸	۳۲	۳۲	۴/۲	۵	۳	۱۹/۸	۳۰	بند دوم

P_1 : شیب دیواره راست آبراهه بر حسب درجه (زاویه بین دامنه سمت راست و خط افق)، P_2 : شیب دیواره چپ آبراهه بر حسب درجه (زاویه بین دامنه سمت چپ و خط افق)، X_1 : عرض رسوب ترسیب شده بر روی دامنه سمت راست آبراهه بر حسب متر (عرض قاعده مثلث قائم‌الزاویه تشکیل شده بین دامنه سمت راست و خط عمود)، X_2 : عرض رسوب ترسیب شده بر روی دامنه سمت چپ آبراهه بر حسب متر (عرض قاعده مثلث قائم‌الزاویه تشکیل شده بین دامنه سمت چپ و خط عمود).



شکل ۲: تصویرباز بندهایی که برای برآورد رسوب ویژه انتخاب شده‌اند

برای دستیابی به مقدار رسوب مشاهده‌ای، جهت ارزیابی دقت مدل‌های مختلف برآورد رسوب با استفاده از مدل‌های انتخابی، اقدام به اندازه‌گیری حجم رسوبات به تله افتاده در پشت هر بند گردید. با توجه به این‌که بند دوم (در پایین‌دست) کاملاً از رسوب پر نشده بود، اطمینان از اینکه کلیه رسوبات در دوره پس از ساخت سد به تله افتاده حاصل گردید. به عبارتی دیگر، کلیه حجم رسوبات موجود در پشت بندها پس از احداث آن‌ها به دام افتاده و ترسیب شده است؛ بنابراین با موجود بودن پلان اولیه محل سد و نیز نقشه‌برداری از رسوبات پشت بند و با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ اقدام به اندازه‌گیری حجم رسوبات حوضه آبخیز بالادست این بندها گردید. لازم به ذکر است، مسأله رسوب‌گذاری به‌ویژه در آبخیزداری مفهوم انقطاع داشته و رسوبات گاه در اثر عوامل مختلف دارای حرکت و

جابه‌جایی بوده و در نهایت ترسیب می‌شوند. در تحقیق حاضر با توجه به این‌که هدف، بررسی و اندازه‌گیری رسوبات به دام افتاده در پشت بندهای موجود در منطقه مورد مطالعه می‌باشد ملاک فرسایش‌پذیری و عوامل دخیل در آن تنها به مواردی منتهی می‌شود که رسوبات حاصل از آن‌ها در پشت بندهای اصلاحی منطقه ترسیب یافته و قابل اندازه‌گیری می‌باشند و از سایر ترسیب‌های موجود در سطح حوضه صرف‌نظر گردیده است، زیرا که عملاً قابل اندازه‌گیری نبوده و فقط رسوبات به تله افتاده در پشت بندهای موجود در خروجی حوضه می‌تواند مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گیرد و رسوب مشاهده‌ای موجود در حوضه آبخیز مورد مطالعه را تشکیل دهد. بخشی از رسوب ایجاد شده در حوضه، در پشت بندهای ساخته‌شده در مسیر آبراهه ته‌نشین می‌شوند. برای به‌دست آوردن مقدار رسوب ذخیره شده در مخزن سدها از رابطه ۱ استفاده گردید (ورستراتن و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۳).

$$SSY = 100 \times M / (A \times STE \times Y) \quad \text{رابطه (۱)}$$

SSY: میزان رسوب مشاهده‌ای بر حسب تن بر کیلومتر مربع در سال، M: جرم (وزن) رسوبات بر حسب تن، A: مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع، STE: تله اندازی رسوب توسط سد بر حسب درصد، Y: سن رسوبات بر حسب سال.

به منظور اندازه‌گیری تله اندازی بندها اقدام به نمونه‌برداری بار معلق رسوب در قبل و بعد از هر یک از بندها گردید. برای این منظور، تعداد ۱۶ نمونه آب گل آلود، ۴ نمونه قبل و ۴ نمونه بعد از هر یک از بندها برداشت شد و میزان بار معلق رسوب به روش فیلتراسیون (کاویان و همکاران، ۱۳۸۹) اندازه‌گیری شد (جدول ۲). تله اندازی رسوب بندها (STE) با استفاده از رابطه ۲ به‌دست آمد.

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{STE} = \text{وزن رسوب قبل از بند} / (\text{وزن رسوب بعد از بند} - \text{وزن رسوب قبل از بند})$$

هم‌چنین برای به‌دست آوردن جرم رسوبات از رابطه ۳ استفاده شد (ورستراتن و همکاران، ۲۰۰۳).

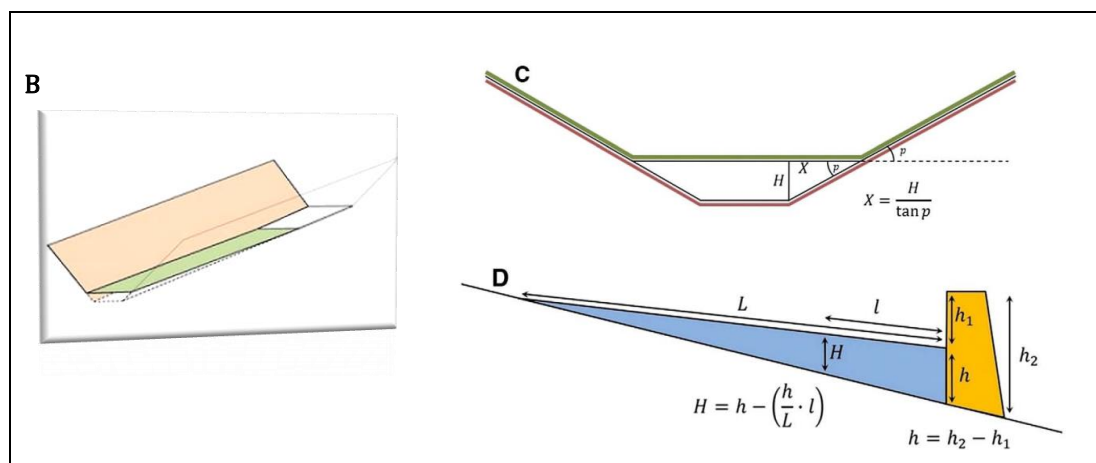
$$M = Sv \times d_{BD} \quad \text{رابطه (۳)}$$

Sv: حجم رسوبات اندازه‌گیری شده در پشت بند بر حسب مترمکعب، d_{BD} : وزن مخصوص رسوبات بر حسب تن بر مترمکعب که حجم رسوبات پشت بندها با توجه به شکل بستر آبراهه و شیب دامنه‌های اطراف آن‌ها تعیین می‌شود (کاستیلو و همکاران^{۱۱}، ۲۰۰۷). با توجه به نقشه‌برداری‌ها و عملیات میدانی صورت گرفته و بررسی مقطع

10- Verstraeten et al.

11- Castillo et al.

رودخانه در منطقه مورد مطالعه، سطح مقطع رسوبات جمع شده در پشت بندها جهت انجام محاسبات و اندازه‌گیری حجم رسوبات به شکل دوزنقه در نظر گرفته شد (شکل ۳) با در نظر گرفتن شیب دو طرف آبراهه در نزدیکی بندها می‌توان عرض آبراهه در محل بند و در نتیجه حجم رسوبات پشت بند را محاسبه کرد (کاستیلو و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۳: شکل سد اصلاحی و روش استفاده شده برای به دست آوردن حجم رسوبات. B: نمایش سه بعدی مقطع رسوب‌گذاری، C: مقطع

عرضی رسوب‌گذاری و D: برآورد عمق رسوب (H) در هر نقطه در طول سطح رسوب‌گذاری (L). ماخذ: کاستیلو و همکاران، ۲۰۰۷

پس از اندازه‌گیری رسوبات مشاهده‌ای حوضه آبخیز از طریق سدهای اصلاحی، به برآورد رسوبات از طریق روش‌های برآورد تولید رسوب شامل میانگین شیب حوضه، مساحت حوضه، مدل FSM، مدل اصلاح‌شده FSM، مدل EPM و مدل PSIAC اقدام گردید.

برآورد رسوب ویژه از طریق میانگین شیب حوضه

برآورد رسوب بر اساس میانگین شیب حوضه توسط رابطه زیر انجام شد (ورستران و همکاران، ۲۰۰۳).

$$SSY = 42 S \quad \text{رابطه (۴)}$$

SSY: میزان رسوب بر حسب تن بر کیلومتر مربع در سال، S: میانگین شیب حوضه مورد مطالعه به درصد.

برآورد رسوب ویژه از طریق مساحت حوضه

یکی از مهم‌ترین خصوصیات که بر بار رسوب حوضه‌ها تأثیر دارد، مساحت حوضه آبخیز است. با افزایش مساحت حوضه، مناطق رسوب‌گیر در حوضه‌ها افزایش یافته و عموماً بار رسوب کاهش می‌یابد. رابطه زیر برای برآورد رسوب ویژه از طریق مساحت حوضه ارائه شده است.

$$SSY = 4139 A^{-0.43} \quad \text{رابطه (۵)}$$

SSY: میزان رسوب بر حسب تن بر کیلومتر مربع در سال، A: مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع.

برآورد رسوب ویژه از طریق مدل نمره‌دهی فاکتوریل (FSM)

این مدل به پنج عامل مؤثر در فرسایش شامل توپوگرافی (T)، میزان خندق‌ها (G)، پوشش گیاهی (V)، سنگ‌شناسی (L) و شکل حوضه آبخیز (S) اشاره دارد (ورستراتن و همکاران، ۲۰۰۳) که با استفاده از رابطه ۶، مقدار I (اندیس نیمه کمی) محاسبه گردیده (فیض‌نیا، ۱۳۸۷) و در نهایت با بهره‌گیری از روابط ارائه شده زیر، رسوب ویژه را برآورد می‌نماید (هارگوین و همکاران، ۲۰۰۵).

$$I = T.G.V.L.S \quad \text{رابطه (۶)}$$

مدل اولیه FSM به صورت رابطه ۷ می‌باشد (ورستراتن و همکاران، ۲۰۰۳).

$$SSY_{FSM-1} = 4139 A^{-0.43} + 7 I + 326 \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن اندیس I از رابطه ۶ به دست می‌آید و A و SSY_{FSM-1} به ترتیب مساحت حوضه آبخیز بالادست سدهای اصلاحی به کیلومتر مربع و رسوب ویژه به مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال می‌باشد. این مدل پس از بررسی‌های بیش‌تر در نقاط دیگر دنیا مورد اصلاح قرار گرفت و به شکل رابطه ۸ ارائه گردید (ورستراتن و همکاران، ۲۰۰۳).

$$SSY_{FSM-2} = 4139 A^{-0.43} + 4.55 I + 211 \quad \text{رابطه (۸)}$$

هارگوین و همکاران (۲۰۰۵)، در نسخه‌های اصلاح‌شده، تغییراتی در معادلات پیش‌بینی SSY به وجود آورده و در آن‌ها اندیس Ig، Ig-s و Ie از ضرب امتیازات جداول اصلاح‌شده به صورت زیر محاسبه گردید.

$$SSY_{FSM-3} = 5 I_g + 627 \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$I_g = T.G.V.L.S$$

$$SSY_{FSM-4} = 14 I_{g-s} + 514 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$I_{g-s} = T.G.V.L$$

$$SSY_{FSM-5} = 4 I_e + 588 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$I_e = T.V.G.L.P$$

برآورد رسوب ویژه از طریق مدل EPM

در این روش ۴ عامل در برآورد میزان رسوب و پهنه‌بندی فرسایش مؤثر هستند که عبارتند از ضریب فرسایش حوضه آبخیز (Ψ)، ضریب استفاده از زمین (Xa)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط حوضه (I) که هر کدام طبق جداول استاندارد مربوط به خود امتیازدهی می‌شوند. بر اساس این ۴ عامل مقدار Z یا ضریب شدت فرسایش از رابطه زیر محاسبه می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۵).

$$Z = Yxa (\Psi + I^{0.5}) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$Wsp = T. H. \pi. Z^{1.5} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

Wsp : میانگین سالانه فرسایش ویژه بر حسب مترمکعب در کیلومتر مربع در سال، H : ارتفاع متوسط بارندگی سالانه حوضه آبخیز بر حسب میلی‌متر، Z : ضریب شدت فرسایش، π : عدد پی معادل ۳/۱۴، T : ضریب درجه حرارت که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T = (t/10 + 0.1)^{0.5} t \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

t : میانگین درجه حرارت سالانه در حوضه آبخیز به درجه سانتی‌گراد.

در این مدل از ضریبی برای تبدیل میزان فرسایش به رسوب استفاده می‌شود که ضریب رسوب‌دهی حوضه نام دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۵؛ احمدی، ۱۳۸۷):

$$Ru = 4(P \times D)^{0.5} / L + 10 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

p : محیط حوضه به کیلومتر، L : طول حوضه به کیلومتر، D : متوسط اختلاف سطح در حوضه به کیلومتر که عبارت است از تفاضل ارتفاع متوسط حوضه و ارتفاع نقطه خروجی.

به این ترتیب برای برآورد میزان رسوب ویژه در حوضه آبخیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Gsp = Wsp.Ru \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

Gsp : رسوب ویژه حوضه بر حسب مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال، Wsp : میانگین سالانه فرسایش ویژه بر حسب مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال، Ru : ضریب رسوب‌دهی حوضه یا ضریب نگه‌داشت مواد فرسایش یافته.

برآورد رسوب ویژه از طریق مدل PSIAC

در این روش تأثیر و نقش ۹ عامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبخیز ارزیابی می‌گردد. این عوامل عبارتند از زمین‌شناسی سطحی، خاک، آب و هوا، رواناب، پستی و بلندی، پوشش زمین، استفاده از زمین،

وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوضه آبخیز و فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب که هر کدام طبق جداول استاندارد مربوط به خود امتیازدهی می‌شوند. با در نظر گرفتن مجموع اعداد به دست آمده برای عوامل مختلف، میزان رسوبدهی حوضه طبق رابطه زیر برآورد می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۵).

$$Qs = 38.77 e^{0.0353R} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

QS: میزان رسوبدهی سالانه بر حسب مترمکعب در کیلومتر مربع، R: درجه رسوبدهی (مجموع امتیازات عوامل مختلف).

سپس با توجه به جدول ۲ میزان رسوبزایی در هر یک از اجزای واحد اراضی مشخص می‌گردد.

جدول ۲- تعیین میزان رسوب سالانه و کلاس فرسایش خاک در روش PSIAC

نمرات نشان‌دهنده شدت رسوبدهی	تولید رسوب سالانه		شدت رسوبدهی	کلاس رسوبدهی و فرسایش
	ایکرفیت در مایل مربع	مترمکعب در کیلومتر مربع		
> ۱۰۰	> ۳	> ۱۴۲۹	خیلی زیاد	V
۷۵ - ۱۰۰	۱ - ۳	۴۷۶ - ۱۴۲۹	زیاد	IV
۵۰ - ۷۵	۰/۵ - ۱	۲۳۸ - ۴۷۶	متوسط	III
۲۵ - ۵۰	۰/۲ - ۰/۵	۹۵ - ۲۳۸	کم	II
۰ - ۲۵	< ۰/۲	< ۹۵	خیلی کم یا جزئی	I

ماخذ: رفاهی، ۱۳۸۵

ارزیابی کارایی مدل‌ها

پس از برآورد رسوبات توسط مدل‌های مذکور، برای ارزیابی کارایی مدل‌های بکار رفته از رابطه ۱۹ استفاده گردید. لازم به ذکر است با توجه به این که داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی موجود در این مطالعه، بسیار محدود و فقط یکسال داده اندازه‌گیری در دسترس بوده و هم‌چنین اساس کار این تحقیق، بررسی وضعیت فرسایش و تولید رسوب برای حال حاضر و به صورت سالانه می‌باشد، لذا تنها آزمون آماری مناسب جهت ارزیابی دقت مدل‌های

مورد استفاده، محاسبه RE می‌باشد و استفاده از سایر آزمون‌های آماری، روابط رگرسیونی و روش‌های متداول دیگر عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد.

$$RE = (|S_o - S_e| / S_o) \times 100 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

RE: درصد خطای نسبی مدل، S_o : مقدار رسوب مشاهده‌ای، S_e : مقدار رسوب برآوردی.

یافته‌ها و بحث

نتایج اندازه‌گیری رسوب ویژه مشاهده‌ای

نتایج اندازه‌گیری رسوبات پشت بندها و تبدیل آن به رسوب ویژه مشاهده‌ای در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- نتایج برآورد رسوب ویژه مشاهده‌ای با استفاده از رسوبات بندها در حوضه آبخیز سرخ آباد استان مازندران

بند اصلاحی	حجم رسوبات اندازه‌گیری شده در پشت بند (m^3)	وزن مخصوص رسوبات (ton/m^3)	جرم رسوبات	درصد تله اندازی رسوب توسط سد (STE)	میزان رسوب مشاهده‌ای ($ton/km^2/year$)
بند اول	۷۴۱/۸۷۳	۱/۳	۹۶۴/۳۸۸	۰/۲۸	۸۷/۹۲۱۹۹
بند دوم	۴۷۸/۸	۱/۳	۶۲۲/۴۴	۰/۴۵	۵۶/۷۴۷۰۴۴
میزان رسوب پشت دو بند ($ton/km^2/year$)					$SSY = ۸۷/۹۲۱۹۹ + ۵۶/۷۴۷۰۴۴ = ۱۴۴/۶۶۹$

با توجه به این‌که درصد تله اندازی رسوب، با استفاده از رابطه ۲ به‌طور میانگین ۳۷٪ تخمین زده شده است، مقدار واقعی رسوب تولید شده در حوضه ۳۹۰/۹۹۷۲ تن در کیلومترمربع در سال به‌دست آمد.

نتایج برآورد مقدار رسوب حوضه بر اساس مساحت و شیب حوضه

برای برآورد مقدار رسوب ویژه حوضه بر اساس شیب، از رابطه ۴ استفاده شد که در این رابطه میانگین شیب حوضه از روش میانگین وزنی به‌دست آمد. هم‌چنین به منظور برآورد مقدار رسوب حوضه بر اساس مساحت، از رابطه ۵ استفاده گردید. نتایج حاصل در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- برآورد رسوب از طریق میانگین شیب و مساحت حوضه

میزان رسوب ویژه (ton/km ² /year)	روش برآورد رسوب
۹۱۸/۵۴	برآورد رسوب از طریق میانگین شیب حوضه
۱۳۲۰/۴۶۵۷	برآورد رسوب از طریق مساحت حوضه

نتایج برآورد مقدار رسوب حوضه بر اساس مدل FSM

طبق اطلاعات به دست آمده از حوضه و عملیات میدانی صورت گرفته، امتیازات در مدل اولیه FSM و مدل اصلاح شده آن، به صورت جدول ۵ به هر یک از پارامترها تخصیص داده شد. قابل توضیح است که در مدل اصلاح شده FSM، دو پارامتر عملیات حفاظت خاک و اقلیم به آن اضافه گردیده است.

جدول ۵- امتیازدهی مدل نمره‌دهی فاکتوریل FSM در حوضه آبخیز سرخ آباد استان مازندران

عامل	مشخصات اصلی برای امتیازدهی	امتیاز در مدل اولیه	امتیاز در مدل اصلاحی
توپوگرافی (T)	- در اطراف آبراهه و نزدیکی محل بندها شیب زیادی مشاهده گردید. - اختلاف ارتفاع در محدوده ۵ کیلومتری حدود ۹۵۰ متر می‌باشد.	۳	۳
آب‌کندها (G)	- در برخی مناطق آب‌کندهای کناره‌ای و موقتی دیده شد اما به تعداد و شدت پیشروی کم.	۱/۵	۱/۵
پوشش گیاهی (V)	- پوشش خاک در بخش‌هایی که پلات گذاری انجام گرفت بیش از ۸۰٪ برآورد شده است. - در ارتفاعات بخش‌هایی دارای بیرون‌زدگی سنگی و فاقد پوشش گیاهی هستند.	۱/۲	۱/۲
سنگ‌شناسی (L)	- حوضه بیشتر تحت تأثیر سازند شمشک و سپس کرج و لار قرار دارد.	۱/۲۸۵۵	۱/۲۹
شکل حوضه (S)	- شکل حوضه بین کشیده و گرد تا نیمه گرد می‌باشد.	۲	۲
عملیات حفاظت خاک (P)	- در منطقه عملیات مهمی جز ساخت دو بند سنگ و ملات انجام نشده است.	-	۳
اقلیم (C)	- اقلیم مرطوب تا نیمه مرطوب.	-	۳

در روش FSM برای هر یک از سازندها امتیازی در نظر گرفته شده است. امتیاز عامل سنگ‌شناسی به وسیله میانگین وزنی مشخص شده است. میانگین وزنی هر یک از سازندهای موجود در منطقه مورد مطالعه در جدول ۶ و نتایج نهایی برآورد مقدار رسوب توسط رابطه‌های مختلف مدل در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول ۶- امتیاز عامل سنگ‌شناسی در مدل FSM

میانگین وزنی	امتیاز	مساحت (km ²)	سازند
۰/۲۴۷۲	۱	۳/۵۲۳۷۸	Jl: سنگ آهک توده‌ای- نازک لایه خاکستری روشن (سازند لار)
۰/۱۵۶۲	۱	۲/۲۲۶۶۸	Ek: شیل تیره توف دار با میان‌لایه‌هایی از توف (سازند کرج)
۰/۸۸۲۱	۱/۵	۸/۳۸۱۶۴	Js, Sh: سنگ آهک، شیل و مارن تفکیک نشده و ماسه‌سنگ (سازند شمشک)
۱/۲۸۵۵			مجموع

جدول ۷- برآورد مقدار رسوب بر حسب تن در کیلومترمربع در سال توسط مدل FSM در منطقه مورد مطالعه

برآورد رسوب از طریق رابطه اولیه FSM رابطه (۷)	برآورد رسوب از طریق رابطه اصلاح شده FSM رابطه (۸)	برآورد رسوب از طریق رابطه اصلاح شده FSM رابطه (۹)	برآورد رسوب از طریق رابطه اصلاح شده FSM رابطه (۱۰)	برآورد رسوب از طریق رابطه اصلاح شده FSM رابطه (۱۱)
$I = ۱۳/۸۸۳۴$	$I = ۱۳/۸۸۳۴$	$I_g = ۱۳/۸۸۳۴$	$I_{g-s} = ۶/۹۵۷۹$	$I_e = ۲۰/۸۷۳۷$
$SSY = ۱۷۴۳/۵۲۲۴۸$	$SSY = ۱۵۹۴/۶۳۵۱$	$SSY = ۶۹۶/۴۱۷$	$SSY = ۶۱۱/۴۱۰۶$	$SSY = ۶۷۱/۴۹۴۶$

نتایج برآورد مقدار رسوب حوضه بر اساس مدل PSIAC

برای تعیین مقدار رسوب و هم‌چنین فرسایش ویژه با استفاده از مدل PSIAC ابتدا برای تعیین امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی از میانگین وزنی سازندهای زمین‌شناسی طبق جدول ۸ استفاده گردید. سپس سایر امتیازات بر اساس ویژگی‌های مشاهده شده در حوضه به صورت جدول ۹ تعیین و ارائه شده است.

با توجه به مجموع عوامل به دست آمده در جدول ۹، میزان رسوب، $۱۸۳/۹۶۷۲$ مترمکعب بر کیلومترمربع برآورد و در نتیجه بر اساس جدول ۲ در این مدل، کلاس رسوب‌دهی و فرسایش، II و شدت رسوب‌دهی کم است. با توجه به این که وزن مخصوص رسوبات $۱/۳$ تن بر مترمکعب است، مقدار رسوب‌دهی سالانه $۲۳۹/۱۵۷۳$ تن در کیلومتر مربع در سال برآورد شد. همچنین برای برآورد فرسایش ویژه از طریق مدل PSIAC ابتدا SDR محاسبه شد. با توجه به این که نوع بافت خاک، ریز و متوسط و مساحت حوضه $۱۴/۲۵۲۴۴$ کیلومترمربع معادل $۵/۵۰۳$ مایل مربع است، بر اساس منحنی نشان‌دهنده وضعیت سطح و نسبت تحویل رسوب، مقدار SDR، ۴۴ درصد در نظر گرفته شد. بنابراین بر اساس رابطه ۱۸ میزان فرسایش ویژه در منطقه مورد مطالعه $۵/۴۳۵۳$ تن بر مایل مربع برآورد گردید

جدول ۸- میانگین وزنی سازندها در مدل PSIAC

میانگین وزنی	امتیاز	مساحت (km ²)	سازند
۰/۴۹۴۴	۲	۳/۵۲۳۷۸	Jl: سنگ آهک توده‌ای- نازک لایه خاکستری روشن (سازند لار)
۰/۴۹۹۹	۳/۵	۲/۲۲۶۶۸	Ek: شیل تیره توف دار با میان‌لایه‌هایی از توف (سازند کرج)
۴/۱۱۶۵	۷	۸/۵۰۱۹۸	Js, Sh: سنگ آهک، شیل و مارن تفکیک نشده و ماسه‌سنگ (سازند شمشک)
۵/۱۱۰۸		۱۴/۲۵۲۴۴	مجموع

جدول ۹- امتیازات تعیین‌شده برای فاکتورهای مدل PSIAC در حوضه آبخیز سرخ آباد استان مازندران

امتیاز	شرح عامل	عامل
۵/۱	- میانگین وزنی سازندهای زمین‌شناسی	زمین‌شناسی سطحی
۷	- بافت خاک متوسط و شنی لومی - دارای قطعات تخته‌سنگی پراکنده	خاک
۵	- وجود بارندگی با شدت و مدت متوسط - وجود جریان حاصل از ذوب برف - یخ بستن و ذوب شدن (در ارتفاعات)	آب و هوا
۶	- خاک‌های گروه هیدرولوژیکی B و C - دبی حداکثر متوسط	هرزآب یا رواناب
۱۱	- شیب متوسط منطقه حدود ۲۱/۸۷ درجه	پستی و بلندی
-۸	- پوشش گیاهی حدود ۶۹ و پوشش کل خاک ۸۲ درصد - وجود درخت به طور پراکنده و نامتراکم	پوشش زمین
۱	- وجود بخش بزرگی از منطقه به شکل مرتع - وجود جاده خاکی و تهادادی ابنیه مسکونی، زیارتی و دامپروری	کاربری اراضی
۵	- فرسایش کم تا متوسط - عدم وجود فرسایش بادی	وضعیت فرسایش در سطح حوضه آبخیز
۱۲	- وجود فرسایش کناره‌ای اتفاقی با عمق و تداوم جریان آب به‌طور متوسط - فرسایش بالا رونده در نه‌های فرعی و کاهش ارتفاع آن‌ها	فرسایش رودخانه‌ای

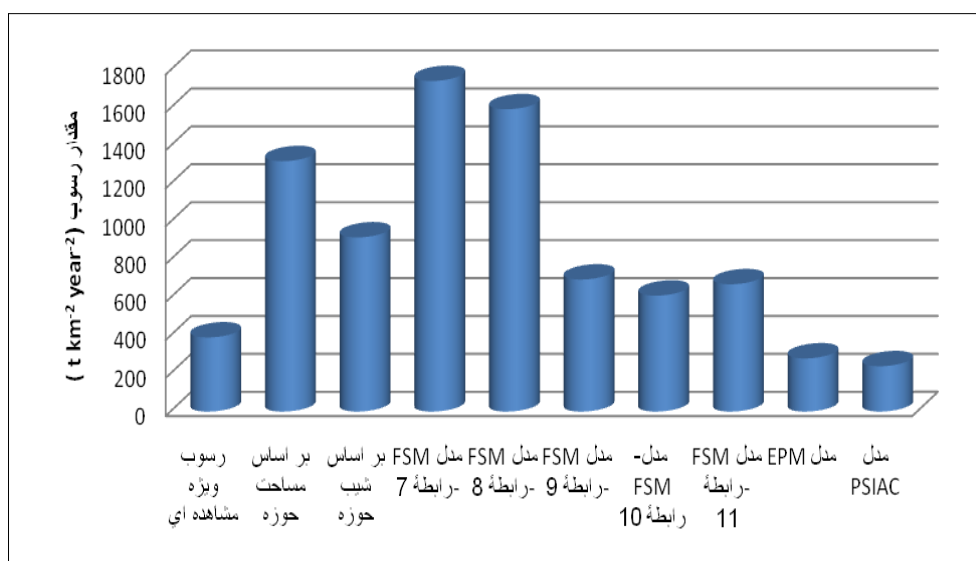
نکته‌ای که در این‌جا لازم است به آن اشاره گردد عدم تطابق و هم‌خوانی وضعیت فرسایشی منطقه مورد مطالعه با عملیات آبخیزداری صورت گرفته در آن می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، کلاس فرسایشی و رسوب‌دهی حوضه در گروه ۲ و شدت کم قرار گرفته در حالی که پروژه‌ها و عملیات آبخیزداری انجام شده در منطقه از نوع مکانیکی و آن‌هم سدهای سنگی ملاتی حجیم بوده که نمی‌تواند توجیه‌پذیر باشد و بیانگر مدیریت ضعیف و اجرایی شدن طرح‌های غیرضروری است.

مقدار رسوب حوضه بر اساس مدل EPM

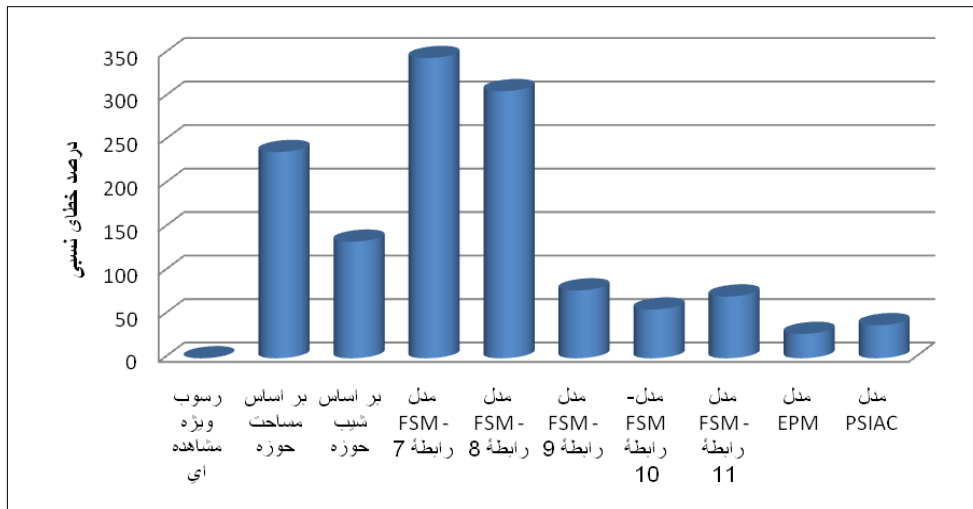
با توجه به امتیازات جداول مربوط به مدل و امتیاز حساسیت خاک به فرسایش که از روش میانگین وزنی استفاده گردید، ضریب شدت فرسایش در حوضه مورد مطالعه ۰/۳۲ به‌دست آمد. سپس بر اساس رابطه ۱۳ میانگین سالانه فرسایش ویژه، ۲۵۸/۶۷۹ مترمکعب در کیلومترمربع برآورد شد. در نهایت بر اساس رابطه ۱۶، میزان رسوب ویژه ۲۱۵/۷۲ مترمکعب در کیلومترمربع در سال و با توجه به وزن مخصوص رسوبات که برابر با ۱/۳ می‌باشد، مقدار رسوب سالیانه ۲۸۰/۴۳۶ تن در کیلومترمربع در سال برآورد گردید.

نتایج ارزیابی کارایی مدل‌ها

پس از برآورد میزان تولید رسوب در حوضه مورد مطالعه توسط مدل‌ها و روش‌های مذکور، میزان درصد خطای نسبی تعیین و نتایج بررسی و ارزیابی کارایی مدل‌ها توسط اشکال ۴ و ۵ ارائه گردید.



شکل ۴: مقدار رسوب برآوردی توسط روش‌های مذکور در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵: درصد خطای نسبی روش‌های مذکور در برآورد مقدار رسوب و مقایسه آن‌ها با یکدیگر

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا به برآورد رسوب ویژه مشاهده‌ای از طریق بررسی ابعاد رسوبات تجمع یافته در پشت دو بند سنگ و ملات موجود در خروجی حوضه پرداخته و سپس با به‌کارگیری مدل‌های FSM، PSIAC و EPM کارایی هر یک از این مدل‌ها در برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب منطقه بررسی گردید. مقدار رسوب مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده در پشت بندهای موجود در منطقه مورد مطالعه، ۳۹۰/۹۹۷۲ تن در کیلومتر مربع در سال به‌دست آمد که این میزان برای مدل‌های FSM (رابطه ۱۰ که کم‌ترین درصد خطای نسبی را در بین سایر روابط مدل مذکور داشته است)، EPM و PSIAC به ترتیب ۶۱۱/۴۱۰۶، ۲۳۹/۱۵۷۳ و ۲۸۰/۴۳۶ تن در کیلومتر مربع در سال برآورد گردید. هم‌چنین درصد خطای نسبی محاسبه شده برای مدل‌های فوق، به ترتیب معادل ۲۲، ۳۶ و ۵۰ درصد بوده است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر، حاکی از بیش‌تخمینی مدل FSM و کم‌تخمینی مدل‌های EPM و PSIAC نسبت به مقدار مشاهده‌ای آن می‌باشد. به‌طور کلی، با توجه به نتایج به‌دست آمده (طبق اشکال ۴ و ۵)، مدل EPM به دلیل درصد خطای نسبی کم‌تر نسبت به سایر مدل‌های به‌کار رفته، کارایی بهتری در برآورد فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز سرخ آباد داشته و نتایج حاصل از آن تشابه و نزدیکی بیشتری با مقدار مشاهده‌ای رسوب حوضه داشته است. پس از EPM، مدل PSIAC و هم‌چنین رابطه ۱۰ از مدل FSM از دقت و کارایی قابل قبول‌تری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردارند. لازم به توضیح است که مدل EPM از روش‌های خیلی قدیمی در برآورد رسوب بوده و امروزه مدل‌های جدیدتر و دقیق‌تر از نوع فیزیکی و مفهومی تعریف و ارائه گردیده است اما استفاده از این مدل‌ها دارای محدودیت‌هایی نیز بوده و دسترسی به برخی اطلاعات و داده‌های لازم جهت اجرای آن‌ها، عملاً در

بعضی مناطق و شرایط منطقه‌ای بسیار سخت و حتی غیرممکن می‌باشد. لذا با توجه به شرایط و امکانات موجود در منطقه مورد مطالعه از مدل‌های تجربی مورد بررسی، استفاده گردید. هم‌چنین، مدل‌هایی نظیر FSM و PSIAC نیز که از ارزش‌گذاری کیفی و نظرات کارشناسی برخوردار بوده و دقت کارشناسی مربوطه می‌تواند بر روی دقت و کارایی آن‌ها تأثیرگذار باشد، از محدودیت‌ها و نواقص مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد و می‌تواند عدم قطعیت نتایج حاصل از آن‌ها را بیش از پیش نشان دهد. البته در این تحقیق دقت لازم در برداشت داده‌های میدانی، به منظور کاهش عوامل عدم قطعیت اعمال و بررسی‌های کارشناسی با دقت هرچه بیشتر صورت گرفته است. هم‌چنین باید اشاره نمود که مدل PSIAC در تحقیق حاضر، با توجه به اهداف مورد نظر و ارزیابی این مدل، انتخاب و به‌کار گرفته شد، زیرا که این مدل دارای روش اصلاح شده‌ای (مدل MPSIAC) نیز بوده و از دقت و کارایی بیشتری می‌تواند برخوردار باشد، اما در این جا هدف ارزیابی مدل PSIAC بوده و مدل اصلاح‌شده آن ملاک بررسی و ارزیابی نبوده است. نتایج تحقیق حاضر، در رابطه با اثبات کارایی مدل EPM نسبت به دیگر مدل‌ها، در مطالعات زیادی تأیید و گزارش شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

دیونت و پوئسن^{۱۲} (۲۰۰۵)، در مطالعه‌ای دریافتند که مدل EPM کاربرد بیشتری در نواحی مختلف اقلیمی دارد و نیاز به کالیبره کردن مدل نمی‌باشد. رفاهی و نعمتی (۱۳۷۴)، روش EPM را در مطالعه فرسایش‌پذیری و تولید رسوب حوضه آبخیز الموت رود به کار گرفتند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش EPM می‌تواند در مطالعات اجمالی فرسایش خاک موفقیت‌آمیز باشد. دادخواه و نجفی‌نژاد (۱۳۷۶)، کارایی مدل EPM در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز لتیان را بررسی کردند و نتایج مدل EPM را بر اساس رسوب‌سنجی مخزن لتیان مورد تأیید قرار دادند. محمدیان شوئیلی و سرور (۱۳۸۶)، در مطالعات خود کارایی سه مدل EPM، PSIAC و MPSIAC را در حوضه آبخیز گوهررود گیلان مورد بررسی قرار دادند و از مقایسه مقادیر به‌دست آمده از مدل‌های مذکور با مقدار واقعی رسوب ایستگاه لاکان دریافتند که مقادیر حاصل از مدل EPM با مقدار رسوب واقعی حوضه بسیار نزدیک و همسان می‌باشد. کارایی بالای این مدل در حوضه‌های آبخیز کشور، با نتایج بسیاری از محققان از جمله خالدیان (۱۳۷۴)، مصباح (۱۳۷۴)، زنجانی‌جم (۱۳۷۵) مطابقت و با نتایج برخی دیگر از محققان نظیر تنگستانی (۲۰۰۶)، صفامنش و همکاران (۲۰۰۶)، پاک‌پرور (۱۳۷۴)، راستگو و همکاران (۱۳۸۵)، هاشمی و عرب‌خدیری (۱۳۸۵)، بهرامی و رحیمی (۱۳۸۷)، برزو و همکاران (۱۳۸۷)، خدابخش و همکاران (۱۳۸۸)، احمدی و محمدی (۱۳۸۹)، محسنی و همکاران (۱۳۹۰) و کاویان و صفری (۱۳۹۲) مغایرت دارد.

بررسی انجام شده در مورد اختلاف‌های موجود در مدل‌های متفاوت بیانگر این امر است که در اکثر حوضه‌های آبخیز کشور، به دلیل عدم وجود یا کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری و در نتیجه عدم وجود آمار مورد نیاز، از روش‌های تجربی برای برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب استفاده می‌شود و اکثر روش‌های تجربی در کشور ما نیاز به کالیبراسیون و تطبیق آن‌ها با شرایط منطقه‌ای دارند، بدیهی است نتیجه به‌دست آمده را نمی‌توان به سادگی و با اطمینان به مفهوم رد یا تأیید دقت یا عدم دقت کاربرد مدل‌های مورد بحث قلمداد نمود؛ زیرا همان‌طور که بیان شد، با توجه به اصول و مبانی مدل‌های تجربی که پایه و اساس برآورد رسوب را به صورت عددی مدنظر قرار می‌دهد و نمره‌دهی به هر یک از عوامل در آن‌ها متکی بر روابط رگرسیونی است، می‌توان نتیجه گرفت که اطمینان به نتایج آن‌ها مستلزم تطابق شرایط منطقه مورد مطالعه با محل ابداع آن‌ها است؛ یعنی اگر مدل‌های مورد بحث در مناطقی استفاده گردند که تطبیق و هم‌خوانی با شرایط ابداع مدل را نداشته باشند، نمی‌توان انتظار دست‌یابی به برآورد دقیقی از تولید رسوب را داشت. در این مطالعه، مدل EPM به عنوان مدل مناسب‌تر نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر، با توجه به داده‌های مشاهده‌ای موجود تعیین و مقدار خطای مدل ۲۲٪ به‌دست آمده است.

منابع

- احمدی، ح (۱۳۸۷)، «ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)»، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۱۸ ص.
- احمدی، ح؛ محمدی، ع.ا (۱۳۸۹)، «بررسی تخمین رسوب با استفاده از مدل‌های PSIAC و EPM با تأثیر عوامل ژئومورفولوژی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ده‌نمک)»، *فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، شماره ۱۷ (۳)، صص ۳۵۲-۳۴۰.
- آزموده، ع (۱۳۸۹)، «بررسی رواناب و فرسایش خاک در مناطق تحت تغییر کاربری اراضی با استفاده از شبیه‌ساز باران»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی ساری.
- بیات، ر؛ رفاهی، ح؛ درویش‌صفت، ع.ا؛ سرمیدیان، ف (۱۳۸۰)، «بررسی کارایی مدل‌های EPM و MPSIAC در برآورد رسوب حوضه طالقان به کمک GIS»، *مجله علوم کشاورزی ایران*، شماره ۳۲ (۱)، صص ۲۱۷-۲۰۳.
- برزو، آ؛ ممیزی، م؛ نیک‌اندیش، ع (۱۳۸۷)، «مقایسه سه روش EPM، MPSIAC و PSIAC در برآورد میزان فرسایش و رسوب در حوضه چهل چشمه استان فارس»، *فصلنامه دانش کشاورزی ایران*، شماره ۵ (۱)، صص ۱۹-۲۹.
- بهرامی، م؛ رحیمی، ع (۱۳۸۷)، «برآورد حجم رسوب ناشی از فرسایش در حوضه آبریز رودخانه کرد شیخ به روش‌های تجربی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی»، *فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی*، شماره ۲، صص ۸۲-۸۹.
- پاک‌پرور، م (۱۳۷۴)، «ارزیابی روش‌های EPM و PSIAC در برآورد رسوب و تعیین پراکنش فرسایش در قسمتی از حوضه سد لتیان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- پارساخو، آ (۱۳۹۱)، «بررسی میزان هدررفت خاک و رواناب بخش‌های مختلف ساختمان جاده جنگلی با استفاده از شبیه‌ساز باران»، رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی ساری.
- خالدیان، ح (۱۳۷۴)، «بررسی فرسایش و رسوب حوضه سد قشلاق سنندج با استفاده از مدل EPM و روش سزیم و آمار رسوب»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- خدابخش، س؛ محمدی، ا؛ رفیعی، ب؛ بزرگ‌زاده، ع (۱۳۸۸)، «مقایسه برآورد میزان فرسایش و رسوب‌زایی در زیرحوضه سزار (حوضه آبریز سد دز) با استفاده از مدل‌های تجربی EPM و MPSIAC با کمک دانش فازی»، *فصلنامه زمین‌شناسی ایران*، شماره ۳ (۱۲)، صص ۶۱-۵۱.

- دادخواه، م؛ نجفی نژاد، ع (۱۳۷۶)، «کارایی مدل EPM در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز لتیان»، *مجله منابع طبیعی ایران*، شماره ۵۰ (۱)، صص ۶۰-۴۹.
- دهزاد، ب؛ شکیبایحسینی اصل، ع.ر.ا؛ مشکین، خ (۱۳۸۷)، «پهنه‌بندی فرسایش در استان گلستان با مدل EPM در محیط GIS»، *فصلنامه چشم‌انداز جغرافیایی*، شماره ۷، صص ۲۶-۱۳.
- رفاهی، ح؛ نعمتی، م.ر (۱۳۷۴)، «به کارگیری روش EPM در مطالعه فرسایش‌پذیری و تولید رسوب حوضه آبخیز الموت رود»، *مجله علوم کشاورزی ایران*، شماره ۲۶ (۱)، صص ۴۵-۳۳.
- رفاهی، ح (۱۳۸۵)، «فرسایش آبی و کنترل آن»، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۱ ص.
- راستگو، س؛ قهرمان، ب؛ ثنایی نژاد، س.ح؛ داوری، ک؛ خدائشناس، س.ر (۱۳۸۵)، «برآورد فرسایش و رسوب حوضه آبخیز تنگ‌کنشت با مدل‌های تجربی MPSIAC و EPM به کمک GIS»، *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، شماره ۱۰، صص ۱۰۴-۱۰۱.
- رنجبر، م؛ راز، ص (۱۳۸۸)، «برآورد حجم رسوب‌دهی حوضه رودخانه سبزوکه چهارمحال و بختیاری با استفاده از MPSIAC»، *فصلنامه جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس*، شماره ۱ (۱)، صص ۱۱۰-۱۰۱.
- زنجانی جم، م (۱۳۷۵)، «بررسی مدل EPM در برآورد فرسایش حوضه آبخیز زنجان رود»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- صادقی، س.ح.ر؛ یثربی، ب (۱۳۸۷)، «حفاظت خاک و آب در آبخیزهای جنگلی»، انتشارات راه سبحان به سفارش انجمن آبخیزداری ایران، کمیسیون ملی یونسکو در ایران، معاونت آبخیزداری سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی و کمیته تخصصی فرسایش و رسوب، ۱۰۷ ص.
- کاویان ع.ا؛ آزموده، ع؛ سلیمانی، ک؛ وهاب‌زاده، ق (۱۳۸۹)، «تأثیر ویژگی‌های خاک بر رواناب و فرسایش خاک در اراضی جنگلی»، نشریه مرتع و آبخیزداری، *مجله منابع طبیعی ایران*، شماره ۶۳ (۱)، صص ۱۰۴-۸۹.
- کاویان، ع.ا؛ صفری، ع (۱۳۹۲)، «تعیین مدل مناسب جهت برآورد رسوبدهی با استفاده از روش‌های آماری (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بابلرود)»، *فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، شماره ۱۳ (۳۰)، صص ۱۱۱-۱۳۰.
- فیض‌نیا، س (۱۳۸۷)، «رسوب شناسی کاربردی با تأکید بر فرسایش خاک و تولید رسوب»، گرگان، انتشارات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۳۵۶ ص.

- مصباح، س (۱۳۷۴)، «بررسی فرسایش و رسوب‌زایی حوضه آبخیز بردکل با کاربرد EPM و سزیم»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- محمدیان‌شوئیلی، م.ح؛ سرور، ج.ا (۱۳۸۶)، «روش‌های برآورد فرسایش و رسوب بر اساس مدل‌های رایج تجربی (PSIAC و MPSIAC و EPM) در حوضه آبخیز گوهر رود»، چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت حوضه‌های آبخیز)، ۱ الی ۲ اسفندماه ۱۳۸۶، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۱۹ ص.
- محمدی، م.ا (۱۳۹۰)، «آنالیز آماری روابط بین بارش، رواناب و رسوب در مقیاس کرت (مطالعه موردی: حوضه آبخیز معرف خامسان)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی ساری.
- محسنی، ب؛ قدوسی، ج؛ احمدی، ح؛ طهماسبی، ر (۱۳۹۰)، «ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های EPM، MPSIAC، ژئومورفولوژی و هیدروفیزیکی در برآورد فرسایش و رسوب»، *مجله جغرافیا و توسعه*، شماره ۲۲، صص ۱۰۷-۱۲۷.
- هاشمی، س.ع؛ عرب خدری، م (۱۳۸۵)، «ارزیابی مدل EPM از طریق رسوب‌سنجی مخازن سدهای کوچک»، *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، شماره ۱۱ (۴)، صص ۳۴۵-۳۵۵.
- Bagarello, V., Di-Stefano, C., Ferro, V., Kinnell, P.I.A., Pampalone, V., Porto, P., and Todisco, F., (2011), "Predicting soil loss on moderate slopes using an empirical model for sediment concentration", *Journal of Hydrology*, 400: 267-273.
- Castillo, v.m., mosch, w.m., conesaGarcia, c., Barbera, G.G., Navarocano, J.A., and Lopez-Bermudez, F., (2007), "Effectiveness and geomorphological impact of check dams for erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El carcavo (murcia,spain)", *CATENA*, 70: 416-427.
- Devent, J., and Poesen, J., (2005), "Peredictig Soil erosion and sediment yield at the basin scale, Scale issues and and semi-quantitation Model", *Earth Science*, 20: 1-31.
- De-Baets, S., and Poesen, J., (2010), "Empirical models for predicting the erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow erosion", *Geomorphology*, 118: 425-432.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Vente, J.D., Koninckx, X., (2003), "Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates", *Geomorphology*, 50: 312- 327.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Nyssen, J., Verstraeten, G., de Vente, J., Govers, G., Deckers, S., and Moeyersons, J., (2005), "Specific sediment yield in Tigray-Northern Ethiopia: Assessment and semi-quantitative modeling", *Geomorphology*, 118: 315-331.
- Romero-Díaz, A., Alonso-Sarriá, F., Martínez-Lloris, M., (2007), "Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison", *CATENA*, 71: 172-178.

- Saedi, S., Pazira, E., Roohipoor, H., Neishaboori, M.R., Saghafian, B., and Sadeghzadeh, M.E., (2005), "Evaluation of process-based soil erosion model, GUEST, for one sample of soils of Khajeh (Tabriz) region", *J. Agricultural Sciences* 3: 201-214, (In Persian).
- Safamanesh, R.A., Sulaiman, W.N., Ramli, M.F., (2006), "Erosion risk assessment using an empirical model of pacific south west inter Agency committee method for Zarge watershed", *J. of Spatial Hydrology*, 6: 105-120. (In Persian).
- Tangestani, M.H., (2006), "Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province", *Iranian Journal of Asian Earth Sciences* 27: 585-597. (In Persian).