Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 5, Issue 1, 2013, Pages 51-58

نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۵، شماره ۱، ۱۳۹۲، صفحات ۵۸-۵۱

بررسی کارایی مدل FSM برای برآورد رسوب‌دهی کل در استان سمنان

سعید نبی‌پی لشکریان[۱]، کارشناس ارشد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
سید علی‌اصغر هاشمی، مربی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سمنان
صمد شادفر، استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۲

چکیده

یکی از معضلات مهم کشور ایران که باعث کاهش کیفی و کمی خاک می‌شود، فرسایش خاک و تولید رسوب می‌باشد. برای کاهش اثرات سوء این پدیده لازم است که اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری صورت گیرد. بنابراین ضرورت اطلاع از میزان فرسایش خاک و تولید رسوب در مناطق مختلف وجود دارد و باید مناطق بحرانی را شناسایی نمود. با توجه به نبود ایستگاه‌های رسوب‌سنجی در اکثر خروجی‌های حوزه‌های آبخیز کشور و عدم کفایت داده‌ها، مدل‌های تجربی، از ابزارهای مناسب برای تولید این لایه اطلاعاتی مهم می‌باشند. یکی از این مدل‌ها که اخیرا در خارج از ایران طراحی و ابداع شده، مدل تجربی FSM است. هدف اصلی از اجرای این پژوهش، بررسی میزان همخوانی نتایج حاصل از رسوب برآوردی مدل FSM و میزان واقعی می‌باشد. لذا به‌منظور ارزیابی این مدل، نه سد کوتاه با عمر ۱۰ سال بدون سرریز در استان سمنان انتخاب شد. سپس برای محاسبه رسوبدهی حوضه‌ها، لایه‌های اطلاعاتی لازم برای مدل تجربی FSM (توپوگرافی، زمین‌شناسی، خندق، شکل حوضه و پوشش گیاهی) بررسی و امتیازهای مربوطه داده شد و مدل واسنجی شده برای حوضه‌های منتخب استان ارائه شد. مقادیر برآوردی از مدل با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در بندها ارزیابی شد. نتایج حاصله بیانگر آن است که کاربرد معادله اصلی مدل کارایی ندارد. همچنین، نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که نتایج برآورد شده به‌وسیله مدل FSM واسنجی شده با مقادیر حاصل از رسوب‌سنجی بندها ۸۴ درصد مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: تولید رسوب، حفاظت خاک، رسوب‌سنجی، سد کوتاه، فرسایش خاک

مقدمه

فرسایش و رسوب‌دهی را می‌توان با استفاده از خط‌کش، کرت‌های فرسایشی، رادیوایزوتوپ‌ها (مانند سزیم ۱۳۷)، ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی اندازه‌گیری نمود. اندازه‌گیری فرسایش و رسوب از طریق خط‌کش و کرت فرسایش، کاری مشکل و در عین حال پرهزینه و زمان‌بر است. تعداد ایستگاه‌های رسوب‌سنجی موجود در سطح کشور نیز محدود بوده و بسیاری از آن‌ها دارای آمار کافی نیستند. همچنین، تردیدهایی در مورد دقت و صحت نمونه‌برداری‌ها، معرف بودن مواقع سیلابی و روش‌های برآورد بار معلق از این نمونه‌ها وجود دارد (Hakimkhani و Feiznia، ۲۰۰۳). بنابراین در شرایط فعلی ایران، روش‌های مستقیم اندازه‌گیری فرسایش و تولید رسوب جوابگوی نیازهای برنامه‌های حفاظت خاک و آبخیزداری نبوده و تنها راه عملی اندازه‌گیری و برآورد فرسایش خاک و رسوب که در مدت زمان کوتاهی به نتیجه برسد و هزینه زیادی طلب نکند، کاربرد مدل‌های تجربی می‌باشد. یکی از این روش‌ها، مدل FSM است که با هدف برآورد فرسایش و رسوب در کشور اسپانیا طراحی شده و ممکن است برای شرایط ایران با خصوصیات اقلیمی و اکولوژیکی متفاوت مناسب باشد. از این‌رو لازم است صحت‌سنجی این مدل در مناطق مختلف کشور بررسی شود. در این پژوهش، میزان

[۱] نویسنده مسئول: nabipay-s@scwmri.ac.ir

همخوانی رسوب برآورد شده به‌وسیله مدل FSM[1] با رسوب اندازه‌گیری شده در مخازن بندهای استان سمنان مورد بررسی قرار گرفت.

مدل تجربی FSM یک مدل نیمه‌کمی است که اولین بار توسط Verstraeten و همکاران (۲۰۰۳) برای بررسی میزان رسوب در اسپانیا ارائه شد. آن‌ها برای محاسبه رسوب‌دهی حوضه‌ها از پنج عامل توپوگرافی، زمین‌شناسی، شکل حوضه، خندق و پوشش گیاهی استفاده کردند و با تعیین میزان رسوب ۲۲ مخزن پشت سد در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که عامل مساحت در بعضی موارد، به‌تنهایی ۱۷ درصد تغییرات بار رسوب حوضه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. آن‌ها همچنین، این مطالعه را در ۶۰ حوضه انجام داده و مشاهده کردند که میزان رسوب برآورد شده با این مدل در تعدادی از زیرحوضه‌ها تطابق خوبی با رسوب‌دهی حوضه دارد. به‌دنبال آن De Vente و همکاران (۲۰۰۴) مدل فوق را برای همان زیرحوضه‌ها واسنجی نموده و اشکالاتی را که در بیشتر زیرحوضه‌ها برای محاسبه رسوب با استفاده از این روش وجود داشت، رفع نمودند. Haregeweyn و همکاران (۲۰۰۵) طی مطالعه‌ای در منطقه تیگری اتیوپی با ارزیابی مدل‌های PSIAC و FSM با استفاده از رسوب‌سنجی مخازن هشت سد نتیجه‌گیری نمودند که رسوب حاصل از مدل FSM با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی دارد، اما میزان تطابق این مدل نسبت به مدل PSIAC کمتر است. آن‌ها این مسأله را ناشی از تعدد عوامل موثر در رسوب‌دهی در روش PSIAC دانستند. De Vente و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه دیگری در ایتالیا زمین‌لغزش را به‌عنوان عامل ششم به مدل FSM اضافه نمودند و با مقایسه نتایج حاصله از این مطالعه استنتاج نمودند که رسوب‌دهی برآورد شده با این روش نسبت به روش قبلی که در آن تنها پنج عامل زمین‌شناسی، توپوگرافی، پوشش گیاهی، شکل حوضه و فرسایش خندقی در نظر گرفته می‌شد، تطابق بیشتری با مقدار رسوب اندازه‌گیری شده ندارد. Mohamadiha و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی دیگر در این حوضه بدون واسنجی معادله اصلی نتیجه‌گیری نمودند که میزان رسوب اندازه‌گیری شده به‌وسیله مدل FSM از تطابق بیشتری نسبت به مدل PSIAC برخوردار است. Atapour Fard و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی در شمال و شمال‌غربی استان تهران مدل FSM را به‌کار بردند و نتایج حاصله را با مقدار رسوب اندازه‌گیری شده در نه ایستگاه اندازه‌گیری رسوب مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که مقادیر رسوب برآورد شده به‌وسیله مدل FSM با مقادیر اندازه‌گیری شده، از همخوانی بالایی برخوردار است.

Khoddami (۲۰۰۵) برای اولین بار این مدل را در ایران به‌کار برد و بدون واسنجی معادله اصلی، نتیجه‌گیری نمود که مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل FSM، با مقادیر اندازه‌گیری شده در مخزن بند لاتشور در محل خروجی حوضه نسبت به روش PSIAC، از تطابق مناسب‌تری برخوردار است. Mohamadiha و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی دیگر با برآورد مقادیر رسوب حاصله از مدل FSM (با به کارگیری معادله استفاده شده در اسپانیا) و شبیه‌ساز باران در حوضه ایوانکی و زیرحوضه‌های آن گزارش نمودند که میزان رسوب‌دهی کل حوضه برابر با ۰/۹ تن در هکتار در سال است. آن‌ها در مقایسه مقادیر به‌دست آمده برای زیرحوضه‌ها نتیجه‌گیری نمودند که میزان رسوب سالانه، نسبت معکوس با مساحت حوضه و نسبت مستقیم با شیب و فرسایش خندقی دارد.

بررسی سوابق پژوهشی حاکی از آن است که در بیشتر تحقیقات انجام شده به‌وسیله این مدل تخمین مناسبی از رسوب منطقه به‌دست آمده است، در ضمن در تمامی پژوهش‌های انجام شده با استفاده از این مدل در خارج از کشور، مدل مورد واسنجی قرار گرفته و مقادیر برآورد شده با مقادیر رسوب اندازه‌گیری شده در بندها مقایسه شده‌اند و همچنین، در بیشتر مطالعات صورت گرفته در ایران، از رابطه اصلی به‌کار رفته در اسپانیا استفاده شده است. بدین‌ترتیب مشخص می‌شود که با این‌که مدل مذکور در کشور ما استفاده شده، ولی هنوز اطلاع از میزان تطابق آن با شرایط حاکم بر کشور کافی نیست و لازم است پژوهش‌های بیشتری در خصوص استفاده از مدل FSM در ایران انجام شود. بنابراین هدف اصلی در این پژوهش، تعیین میزان کارایی مدل FSM در برآورد

[1] Factorial Scoring Model

رسوب‌دهی و ارائه یک مدل مناسب برای پیش‌بینی میزان رسوب‌دهی در استان سمنان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نه بند با قدمت ده سال و بدون سرریز، مورد استفاده قرار گرفت و ضریب تله‌اندازی رسوب در این بندها ۱۰۰ درصد بود. این بندها در شهرستان‌های سمنان، دامغان و شاهرود واقع شده و همگی آن‌ها از نوع خاکی می‌باشند (Haregeweyn و همکاران، ۲۰۰۵). در جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های نه بند مورد مطالعه و در جدول ۲ میزان رسوب اندازه‌گیری شده در آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی بندهای مورد پژوهش در استان سمنان (Hashemi و Arabkhedri، ۲۰۰۸)

بندهای مورد مطالعه	شیب متوسط حوضه (درصد)	پوشش گیاهی (درصد)	وضعیت خندق	ضریب گراولیوس	لیتولوژی غالب	
					دوران	توصیف
سولدره شرقی	۳۱/۵	۲۷/۹	ندارد	۱/۲۵	سنوزوئیک مزوزوئیک	میکرودیوریت سنگ آهک دولومیتی
سولدره غربی	۳۸/۵	۲۹/۹	ندارد	۱/۳۲	مزوزوئیک پالئوزوئیک	سنگ آهک دولومیتی سنگ آهک
عطاری	۱۵/۹	۴۴/۵	ندارد	۱/۳۷	سنوزوئیک	سنگ آذرین و شیل سازند کرج و کنگلومرا، ماسه‌سنگ و رس
ابراهیم‌آباد	۲۹/۳	۲۳/۲	ندارد	۱/۳۶	سنوزوئیک	نهشته‌های آبرفتی قدیمی
رویان	۲۳/۹	۲۵/۹	ندارد	۱/۲۹	سنوزوئیک	توف و نهشته‌های آبرفتی قدیمی
علی‌آباد	۱۶/۲	۷/۱	ندارد	۱/۴۴	سنوزوئیک	کنگلومرای قرمز رنگ و ماسه‌سنگ آهکی
عمروان	۱۱/۴	۲۷/۲	خندق به تعداد کم	۱/۲۹	سنوزوئیک	کنگلومرا و ماسه‌سنگ و رس و کنگلومرا و مارن گچ‌دار
مارچشمه	۲۲/۱	۴۷/۵	ندارد	۱/۴۶	سنوزوئیک	نهشته‌های آبرفتی قدیمی
ارمیان	۱۹/۸	۵۶	خندق به تعداد کم	۱/۳۴	سنوزوئیک	مارن گچی و کنگلومرا و ماسه‌سنگ

جدول ۲- میزان رسوب اندازه‌گیری شده در بندهای مورد تحقیق استان سمنان (Hashemi و Arabkhedri، ۲۰۰۸)

بند	مساحت حوضه (ha)	وزن رسوب (ton)	رسوب‌دهی ویژه ($t.ha^{-1}$)
سولدره شرقی	۹۳/۵	۱۶۶۱/۱	۱/۷۸
سولدره غربی	۹۲/۲	۸۹۸/۹	۰/۹۷
عطاری	۶۲۷/۹	۳۷۷۸/۶	۰/۶
ابراهیم‌آباد	۵۰۷/۸	۱۷۸۷	۰/۳۵
رویان	۵۳۸/۸	۳۲۷۳/۲	۰/۶۱
علی‌آباد	۱۲۹/۲	۱۳۹۵/۲	۱/۰۸
عمروان	۱۰۲/۳	۳۶۵۱	۳/۵۷
مارچشمه	۲۴۱۷/۵	۴۸۱۲/۴	۰/۲
ارمیان	۱۱۱۶/۴	۱۸۱۶۸/۳	۱/۶۳

در مدل FSM از پنج عامل زمین‌شناسی، توپوگرافی، پوشش گیاهی، فرسایش خندقی و شکل حوضه برای محاسبه رسوب‌دهی حوضه استفاده شد. امتیاز هر عامل به‌صورت کم، متوسط و زیاد به‌ترتیب با اعداد ۱ و ۲ و ۳ بوده که با استفاده از پیمایش صحرایی و استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و غیره داده شد (Verstraeten و همکاران، ۲۰۰۳). نحوه امتیازبندی عوامل مدل FSM در جدول ۳ ارائه شده است.

عامل توپوگرافی در این مدل، براساس شیب دامنه‌ها و اختلاف ارتفاع بین پست‌ترین و مرتفع‌ترین نقطه موجود در منطقه، ارزیابی شد. نحوه امتیازبندی به این صورت بود که، امتیاز ۱ مربوط به دامنه‌های کم شیب (شیب کمتر از چهار درصد)، امتیاز ۲ برای حوضه‌های با توپوگرافی تپه‌ماهوری (شیب مابین چهار

و ۱۰ درصد) و امتیاز ۳ برای حوضه‌های با شیب زیاد و توپوگرافی مرتفع (شیب بیشتر از ۱۰ درصد) در نظر گرفته شد (De Vente و همکاران، ۲۰۰۴ و Haregeweyn و همکاران، ۲۰۰۵).

جدول ۳- نحوه امتیازبندی عوامل مدل FSM (Verstraeten و همکاران، ۲۰۰۳)

ردیف	عامل	امتیاز	تشریح عوامل
		۱	دامنه‌های با شیب بسیار ملایم و نزدیک به رودخانه اصلی با اختلاف ارتفاع ۲۰۰ متر در هر پنج کیلومتر
۱	توپوگرافی	۲	دامنه‌های با شیب ملایم و نزدیک به رودخانه اصلی با اختلاف ارتفاع ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر در هر پنج کیلومتر
		۳	دامنه‌های با شیب تند و نزدیک به رودخانه اصلی با اختلاف ارتفاع بیشتر از ۵۰۰ متر در هر پنج کیلومتر
		۱	پوشش اتصال خوب با خاک (۷۵ درصد سطح حوضه دارای پوشش گیاهی)
۲	پوشش گیاهی	۲	پوشش اتصال متوسط با خاک (۲۵ تا ۷۵ درصد سطح حوضه دارای پوشش گیاهی)
		۳	پوشش اتصال فقیر با خاک (کمتر از ۲۵ درصد سطح حوضه دارای پوشش گیاهی)
		۱	تعداد خندق‌ها بسیار کم یا بدون خندق
۳	خندق‌ها	۲	تعداد خندق‌ها کم و عمق آن‌ها قابل مشاهده است
		۳	تعداد خندق‌ها زیاد و عمق آن‌ها قابل مشاهده است
		۱	آهک، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (درجه هوازدگی پایین)
۴	زمین‌شناسی	۲	نهشته‌های رسوبی نئوژن (گراول و غیره)
		۳	مواد با درجه‌ی هوازدگی بالا (لس یا مارن)
		۱	حوضه‌های کشیده با یک رودخانه اصلی
۵	شکل حوضه	۲	حوضه‌های با شکلی بین دایره‌ای و کشیده
		۳	حوضه‌های دایره‌ای شکل با چندین رودخانه اصلی

در مدل FSM برای تشریح پوشش خاک و مقاومت آن در برابر فرسایندگی باران از عامل پوشش گیاهی استفاده شد. عامل زمین‌شناسی براساس جنس و ترکیب واحدهای سنگی حوضه است و پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که زمین‌شناسی، نقش مهمی در تولید رسوب حوضه دارد. در مدل FSM فرسایش خندقی به‌عنوان یک عامل در نظر گرفته شد و نحوه امتیازبندی به این صورت بود که به حوضه‌های بدون خندق یا حوضه‌هایی که به‌ندرت در آن خندقی یافت می‌شود امتیاز ۱، در حوضه‌هایی که تعدادی خندق در آن دیده می‌شود امتیاز ۲ و در حوضه‌های خندقی امتیاز ۳ در نظر گرفته شد (De Vente و همکاران، ۲۰۰۴). بعد از امتیازدهی عوامل پنج‌گانه، مقدار ضریب FSM با ضرب عوامل به‌دست آمد و با استفاده از این ضریب در رابطه (۱)، نرخ فرسایش‌پذیری حوضه به‌دست آمد. پس از تعیین نرخ فرسایش‌پذیری، برای ارزیابی کارایی مدل از روش Nash و Sutcliffe (۱۹۷۰) استفاده شد (رابطه ۲) و میانگین نسبی مربعات خطا (رابطه ۳) نیز محاسبه شد.

$$SSY = 4193A^{-0.44} + 7.77(FSMI) - 310.99 \quad (۱)$$

$$ME = 1 - \left[\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n} (O_i - O_m)^2 \right] \quad (۲)$$

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2} \Big/ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} O_i \quad (۳)$$

که در آن‌ها، SSY نرخ فرسایش‌پذیری حوضه (تن در کیلومتر مربع)، A مساحت حوضه (کیلومتر مربع)، $FSMI$ حاصل‌ضرب امتیازات عوامل پنج‌گانه، ME شاخص ارزیابی کارایی، $RRMSE$ میانگین نسبی مربعات خطا، O_i اندازه‌گیری مربوط به رسوب هر بند، O_m میانگین مقادیر مربوط به اندازه‌گیری رسوب و P_i داده مربوط به برآورد رسوب مدل FSM واسنجی شده است.

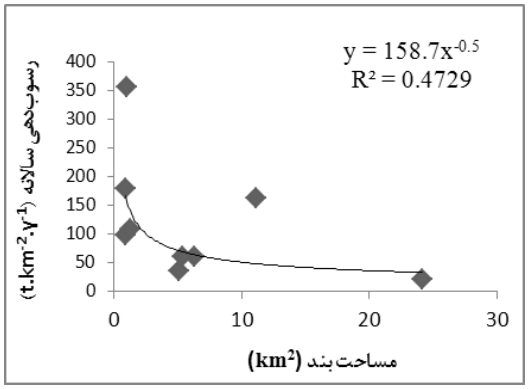
نتایج و بحث

در این مطالعه، برای به‌دست آوردن میزان فرسایش‌پذیری، ابتدا بین مساحت حوضه‌های مورد مطالعه بر حسب کیلومتر مربع و رسوب اندازه‌گیری شده بر حسب تن در کیلومتر مربع در سال در بندهای مورد نظر رابطه رگرسیونی برقرار شد (شکل ۱)، رابطه (۴)، این ارتباط را نشان می‌دهد. پس از این مرحله،

امتیازات عوامل پنج‌گانه مدل در حوضه‌های بندهای مورد نظر محاسبه شد. سپس با حاصل‌ضرب عوامل، مقدار شاخص FSM محاسبه شد (جدول ۴).

$$SSY = 158.7A^{-0.5} \qquad R^2 = 0.4729 \qquad (۴)$$

که در آن، SSY رسوب‌دهی سالانه (تن در کیلومتر مربع) و A مساحت حوضه (کیلومتر مربع) است.



شکل ۱- نمودار رابطه مساحت و رسوب در بندها

جدول ۴- امتیازات عوامل پنج‌گانه حوضه‌های بندهای مورد نظر به‌منظور محاسبه شاخص FSM

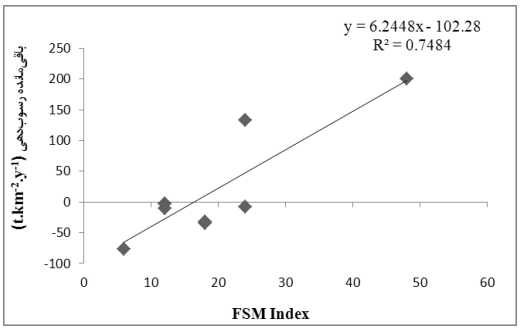
ردیف	زیرحوضه	زمین‌شناسی	توپوگرافی	شکل حوضه	پوشش گیاهی	خندق	شاخص FSM
۱	سولدره شرقی	۱	۳	۲	۲	۱	۱۲
۲	سولدره غربی	۱	۳	۱	۲	۱	۶
۳	عطاری	۲	۳	۱	۲	۱	۱۲
۴	ابراهیم‌آباد	۲	۳	۱	۳	۱	۱۸
۵	رویان	۲	۳	۲	۲	۱	۲۴
۶	علی‌آباد	۲	۳	۱	۳	۱	۱۸
۷	عمروان	۲	۳	۲	۲	۲	۴۸
۸	مارچشمه	۲	۳	۱	۲	۱	۱۲
۹	ارمیان	۲	۳	۱	۲	۲	۲۴

پس از این مرحله، بین شاخص FSM و باقی‌مانده رسوب هر یک از بندها رابطه رگرسیونی برقرار شد که در شکل ۲، نمودار آن نشان داده شده است، رابطه (۵)، این ارتباط را نشان می‌دهد. در مرحله آخر با استفاده از رابطه (۶) که از مجموع دو رابطه قبلی حاصل شده است، مقدار رسوب برآورد شده به‌وسیله مدل به‌دست آمد. جدول ۵، میزان رسوب برآورد شده از مدل و میزان رسوب اندازه‌گیری شده در بندهای حوضه‌های مورد مطالعه را به‌همراه پارامترهای آماری آن‌ها نشان می‌دهد.

$$RSSY = 6.2448(FSMI) - 102.28 \qquad (۵)$$
$$R^2 = 0.7484$$

$$SSY = 158.7A^{-0.5} + 6.2448(FSMI) - 102.28$$
$$R^2 = 0.8401 \qquad (۶)$$

که در آن‌ها، $FSMI$ شاخص مدل، $RSSY$ رسوب‌دهی بند (تن در کیلومتر مربع در سال) پس از کسر رسوب محاسبه شده از طریق رابطه (۴)، A مساحت حوضه (کیلومتر مربع) و SSY میزان فرسایش‌پذیری برآورد شده به‌وسیله مدل FSM (تن در کیلومتر مربع در سال) است.



شکل ۲- نمودار رابطه شاخص FSM و باقی‌مانده رسوب بند

بررسی نتایج جدول ۵ مؤید آن است که میزان رسوب برآوردی مدل FSM واسنجی شده نزدیکی زیادی به نتایج اندازه‌گیری شده در بندها دارد، به‌طوری‌که اندازه‌گیری بندها مابین ۰/۲ تا ۳/۵۷ تن در هکتار در سال تغییر می‌کند، در حالی‌که میزان رسوب برآوردی واسنجی شده مابین ۰/۰۴ تا ۳/۵۴ تن در هکتار در سال متغیر است که نشان‌دهنده تغییرات

بسیار بالای رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه است. ضریب تغییرات رسوب‌دهی بندهای مورد پژوهش و مدل واسنجی شده به‌ترتیب برابر ۸۶/۵۹ و ۸۳/۲۶ درصد محاسبه شده که این مساله را تأیید می‌کند. چولگی داده‌ها در بندهای مورد پژوهش و مدل واسنجی شده مثبت بوده و به‌ترتیب برابر ۱/۶۵ و ۱/۷۸ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده تجمع مقادیر رسوب‌دهی کمتر از مقدار میانگین می‌باشد. این درحالی است که نتایج حاصل از برآورد مدل اصلی (واسنجی نشده) با نتایج حاصله از اندازه‌گیری بندها بسیار متفاوت به‌دست آمد.

پس از این مرحله برای ارزیابی کارایی مدل از روش Nash و Sutcliffe (۱۹۷۰) استفاده شد که در رابطه (۷) نشان داده شده است. هر چه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان از اعتبار بیشتر مدل است و هر چه از یک فاصله داشته باشد، از اعتبار ضعیف‌تری برخوردار می‌باشد. از آن‌جایی‌که شاخص به‌دست آمده برابر ۰/۸۳۸۴ حاصل شده است، نشان می‌دهد که مدل از کارایی بالایی برخوردار می‌باشد. میانگین نسبی مربعات خطای مدل نیز محاسبه شد (رابطه ۸) که هر چه RRMSE به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، حاکی از اعتبار بیشتر مدل است. از آن‌جایی‌که این آماره برابر ۰/۳۲۸۱ به‌دست آمده، نشان می‌دهد که میزان خطا کم بوده و مدل از تناسب خوبی برای تخمین رسوب‌دهی حوضه‌ها برخوردار است.

$$ME = 1 - 1.39214 / 8.614131 = 0.8384 \quad (۷)$$

$$RRMSE = 0.3933 / 1.1984 = 0.3281 \quad (۸)$$

جدول ۵- میزان رسوب برآورد شده به‌وسیله مدل FSM و رسوب اندازه‌گیری شده در بندها و پارامترهای آماری مربوط به آن‌ها

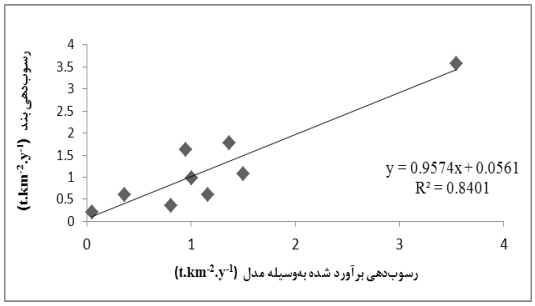
زیرحوضه	رسوب سالانه‌ی اندازه‌گیری شده در بند ($t.ha^{-1}$)	رسوب برآوردی سالانه مدل بعد واسنجی ($t.ha^{-1}$)	رسوب برآوردی سالانه مدل بدون واسنجی ($t.ha^{-1}$)
سولدره شرقی	۱/۷۸	۱/۳۷	۴۱/۰۱
سولدره غربی	۰/۹۷	۱	۴۰/۸۱
عطاری	۰/۶	۰/۳۶	۱۶/۵
ابراهیم‌آباد	۰/۳۵	۰/۸۱	۱۸/۸
رویان	۰/۶۱	۱/۱۶	۱۸/۷۴
علی‌آباد	۱/۰۸	۱/۴۹	۳۵/۷۴
عمروان	۳/۵۷	۳/۵۴	۴۲/۱۲
مارچشمه	۰/۲	۰/۰۴	۸/۱۵
ارمیان	۱/۶۳	۰/۹۵	۱۳/۲۶
حداقل	۰/۲	۰/۰۴	۸/۱۵
حداکثر	۳/۵۷	۳/۵۴	۴۲/۱۲
دامنه	۳/۳۷	۳/۵	۳۳/۹۷
میانگین	۱/۲	۱/۱۹	۲۶/۱۳
میانه	۰/۹۷	۱	۱۸/۸
چولگی داده‌ها	۱/۶۵	۱/۷۸	۰/۱۲
انحراف معیار از میانگین	۱/۰۴	۰/۹۹	۱۳/۵۸
ضریب تغییرات	۸۶/۵۹	۸۳/۲۶	۵۱/۹۸

نتیجه‌گیری حاصله بیانگر آن است که مدل نیمه‌کمی FSM با بهره‌گیری از پنج عامل مهم در رسوب‌دهی و تعداد کمی از داده‌ها در مدت زمان کوتاهی، برآورد دقیق و قابل اعتمادی از رسوب‌دهی ارائه می‌نماید. این پنج عامل عبارتند از: توپوگرافی، شکل حوضه، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و عامل خندق، ضمن آن‌که عامل مساحت را نیز در نظر می‌گیرد. De Vente و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهش خود در اسپانیا نتیجه‌گیری نمودند که ۲۲ درصد رسوب‌دهی صرفا مربوط به مساحت حوضه می‌باشد. خصوصیات توپوگرافی از قبیل تندی شیب، شکل شیب و طول شیب از عوامل مؤثر در فرسایش‌پذیری

حوضه می‌باشند. شکل حوضه نیز با توجه به اثری که بر روی زمان تمرکز حوضه دارد، از جمله عواملی است که در فرسایش‌پذیری حوضه مؤثر است.

پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که رابطه مستقیمی بین خصوصیات مورفومتریک حوضه و پاسخ هیدرولوژیکی از قبیل زمان تأخیر و دبی اوج وجود دارد. عامل مهم دیگر، در رسوب‌دهی، زمین‌شناسی است. مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که حوضه‌های با سنگ مارن، دارای بار رسوبی بیشتری نسبت به شیست، سنگ آهک و ماسه‌سنگ می‌باشند (De Vente و همکاران، ۲۰۰۴). عامل پوشش گیاهی به‌طور مستقیم با جلوگیری از برخورد قطرات باران به زمین و به‌طور غیرمستقیم با ممانعت از تولید سیل و همچنین، افزایش ظرفیت نفوذ از جمله عواملی است که بر روی نرخ فرسایش‌پذیری حوضه تأثیر به‌سزایی دارد. در بین انواع فرسایش‌هایی که در یک حوضه شکل می‌گیرد، فرسایش خندقی، مقدار رسوب بیشتری تولید می‌کند. این نوع فرسایش بیشتر در بین واحدهای مارنی و واحدهای به‌سن نئوژن ایجاد می‌شود (De Vente و ۲۰۰۴).

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، با کاربرد مدل اصلی، جوابی دور از واقعیت ارائه شد. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های Khoddami و همکاران، (۲۰۰۵)؛ Mohamadiha و همکاران (۲۰۰۹) و Mohamadiha و همکاران (۲۰۱۱) که مدل اصلی استفاده شده در اسپانیا را بدون واسنجی به‌کار برده‌اند و کارایی مدل را به این صورت مورد تأیید قرار داده‌اند، مغایرت دارد. از طرفی، استفاده صحیح از مدل و واسنجی آن در آبخیزهای مورد مطالعه سمنان جواب بسیار مناسبی (R^2=۰/۸۴) مشاهده شد (شکل ۳).



شکل ۳- رابطه رسوب‌دهی مشاهده و برآورد شده به‌وسیله مدل

این نتیجه با نتیجه‌گیری حاصل از پژوهش‌های De Vente و همکاران (۲۰۰۵)، Haregeweyn و همکاران (۲۰۰۵)، De Vente و همکاران (۲۰۰۶) و Atapour Fard و همکاران (۲۰۱۲) هم‌خوانی دارد. این پژوهشگران مدل اصلی را برای منطقه مورد مطالعه خود واسنجی نموده‌اند (جدول ۶). این مسأله مؤید آن است که کاربرد مدل در خارج از منطقه ابداع، بایستی با دقت بیشتری صورت گیرد. به‌علاوه، نبودن عامل اقلیم در مدل اصلی محدودیتی است که به‌راحتی نمی‌توان آن را در سایر مناطق استفاده نمود. ضمن آن‌که رابطه‌ای قطعی مابین مساحت و رسوب‌دهی وجود نداشته و لازم است در حوضه‌های مورد مطالعه محاسبه شود. به‌همین‌دلیل، ضرایب و نماهای معادله‌های به‌دست آمده در مناطق مختلف توسط پژوهشگرها با هم تفاوت دارد.

جدول ۶- مقایسه کارایی مطالعات انجام شده توسط در پژوهش‌های مختلف

محقق	کشور	تعداد مشاهده	ME	RRMSE	ضریب تبیین رسوب‌دهی مشاهده‌ای-برآوردی
Verstraeten و همکاران (۲۰۰۳)	اسپانیا	۲۳	۰/۸۳	۰/۳۳	۰/۶۶
De Vente و همکاران (۲۰۰۴)	اسپانیا	۶۰	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۷۲
Haregeweyn و همکاران (۲۰۰۵)	اتیوپی	۸	۰/۶۸	۰/۲۲	۰/۶۹
De Vente و همکاران (۲۰۰۶)	ایتالیا	۲۸	۰/۶	۰/۵۱	۰/۶۱
Atapour Fard و همکاران (۲۰۱۲)	ایران	۹	۰/۶۲	۰/۲۷	۰/۸

منابع مورد استفاده

1. Atapour Fard, A., M. Moradi Sharaf and G.R. Shoaei. 2012. The application of FSM model for the prediction of sediment yield in Tehran basin. Nature and Science, 10(9): 105-112.

2. De Vente, J., J. Poesen and G. Verstraeten. 2004. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. Journal of Hydrology, 305: 63–86.
3. De Vente, J., J. Poesen., P. Bazzoffi., A. Van Rompaey and G. Verstraeten. 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: 1017-1034.
4. Feiznia, S. 1995. Resistance of rocks to erosion in different climates of Iran. Iranian Journal of Natural Resources, 47: 95-116 (in Persian).
5. Hakimkhani, S. and S. Feiznia. 2003. Investigation of methods of using MPSIAC in studies. Soil Conservation and Watershed Management Institute. Final Report of Research Plan, 120 pages (in Persian).
6. Haregeweyn, N., J. Poesen, J. Nyssen, G. Verstraeten, J.D. Vente, G. Govers, S. Deckers and J. Moeyersons. 2005. Specific sediment yield in Tigray-Northern Ethiopia: assessment and semi-quantitative modeling. Geomorphology, 69: 315-331.
7. Hashemi, A.A. and M. Arabkhedri. 2008. Evaluation of MPSIAC and EPM models using sedimentation survey within some small dam reservoirs in Semnan province. Soil Conservation and Watershed Management Institute. Final Report of Research Plan, 93 pages (in Persian).
8. Khoddami M., A. Mahbubi, R. Herami, S. Feiznia. 2005. Analysis of rock facies and latshour river sediment model. MSc thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 141-163 (in Persian).
9. Mohamadiha, S., H.R. Peyrowan, R. Mousavi Harami, S. Feiznia and R. Bayat. 2009. Evaluation of erosion and sediment rate using FSM model and rainfall simulator in Evanaki basin and its sub-basins. The 6th Iranian Engineering Geology and the Environment. Tarbiat Modares University, 1089-1096 (in Persian).
10. Mohamadiha, S., H.R. Peyrowan, R. Mousavi Harami, S. Feiznia. 2011. Evaluation of soil erosion and sediment yield using semi quantitative models: FSM and MPSIAC in Eivaneki watershed and the sub-basins (Southeast of Tehran/Iran). Journal of American Science, 7(7): 234-239.
11. Nash, J.E. and J.E. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
12. Verstraeten, G., J. Poesen, J. De Vente and X. Koninckx. 2003. Sediment yield variability in Spain: A quantitative and semiqualitative analysis using reservoir sedimentation rates. Geomorphology, 50(4): 327–348.

Saeed Nabipay Lashkarian[1]**,** Msc, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran
Seyed Ali Asghar Hashemi, Scientific Board, Agricultural and Natural Resources Research Center, Semnan, Iran
Samad Shadfar, Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran

Received: 17 February 2013 Accepted: 12 March 2013

Abstract

Erosion and sedimentation are main challenges in Iran, which cause the reduction of soil quality and quantity. Soil conservation and watershed management activities should be implemented to reduce the impact of these phenomena. Therefore, the knowledge of critical area is necessary through the learning the amount of sedimentation and erosion. Because of lack of sediment measurement stations in more watershed outlets in Iran and insufficient data, empirical models are proper tools for data layers generation. Factorial Scoring Model (FSM) is one of the experimental models which has been recently developed out of the country. The main objective of this research is to compare sediment yield estimated by FSM model and observed values. So, in order to evaluate the model, nine small dams of 10 years old with no overflows were selected from in Semnan province. For modeling sediment yield, topography, lithology, gully, catchment shape and vegetation cover of related catchments were studied and required data layers were prepared and scoring indexes were given and finally, the calibrated model was presented. Estimated model values were then compared with measured values. Results showed that main model equation does not have sufficient efficiency. Also, results demonstrated that calibrated FSM model has conformity with observed sediment values at 84 percent.

Key words: Sediment gauge, Sediment yield, Small dam, Soil erosion

[1] Corresponding author: nabipay-s@scwmri.ac.ir