



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی

نشریه فنی

**ارزیابی کارایی مدل تجربی FSM در
حوزه‌های آبخیز کوچک استان مرکزی**

نویسندگان:

علی اکبر داودی‌راد، سعید نبی‌پی لشکریان

شماره ثبت: ۶۸۲۴۲

۱۴۰۴

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی

نشریه فنی:

ارزیابی کارایی مدل تجربی FSM در حوزه‌های آبخیز کوچک استان مرکزی

نویسندگان:

علی‌اکبر داودی‌راد، سعید نبی‌پی لشکریان

شماره ثبت: ۶۸۲۴۲

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی

عنوان: ارزیابی کارایی مدل تجربی FSM در حوزه‌های آبخیز کوچک استان مرکزی

نویسندگان: علی‌اکبر داودی‌راد، سعید نبی‌پی لشکریان

ویراستار: سعید نبی‌پی لشکریان

طرح جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴

این اثر در مورخه ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ با شماره ۶۸۲۴۲ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطالب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده:.....	۱
فصل اول - کلیات.....	۲
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- سابقه تحقیق.....	۳
فصل دوم- مواد و روش‌ها.....	۹
۲-۱- حوضه‌های مورد مطالعه.....	۹
فیزیوگرافی.....	۹
۲-۲- اندازه‌گیری رسوب مخازن بندها.....	۱۵
۲-۳- برآورد رسوبدهی با استفاده از مدل FSM.....	۱۵
۱-۲-۳- تعیین امتیاز عوامل پنج‌گانه.....	۲۰
عامل توپوگرافی.....	۲۱
عامل پوشش گیاهی.....	۲۱
عامل خندق.....	۲۱
عامل زمین‌شناسی.....	۲۲
عامل شکل حوضه.....	۲۲
۲-۳-۲- نرمال‌سازی داده‌ها.....	۲۳
۲-۳-۳- برآورد رسوبدهی ویژه با مدل اولیه FSM.....	۲۳
۲-۳-۴- برآورد رسوبدهی ویژه با مدل اصلاح‌شده FSM.....	۲۳
۲-۴- ارزیابی مدل FSM.....	۲۴
فصل سوم- نتایج.....	۲۵
فصل چهارم- بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۳۶
۴-۱- بررسی وضعیت رسوبدهی حوضه‌های مطالعاتی.....	۳۶
۴-۲- بررسی کارایی مدل FSM.....	۳۶
۴-۳- نتیجه‌گیری.....	۳۷
۴-۴- پیشنهادها.....	۳۹
منابع.....	۴۰
Abstract:.....	۴۳

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲): پراکنش بندهای خاکی اندازه‌گیری شده در استان مرکزی	۱۱
شکل (۲-۲): حوضه شماره یک کاظم‌آباد خمین	۱۲
شکل (۳-۲): حوضه شماره دو کاظم‌آباد خمین	۱۲
شکل (۴-۲): حوضه کلا تفرش	۱۲
شکل (۵-۲): حوضه معین‌آباد تفرش	۱۲
شکل (۶-۲): حوضه قشلاق اراک	۱۳
شکل (۷-۲): حوضه شماره یک قالیباف خنداب	۱۳
شکل (۸-۲): حوضه شماره دو قالیباف خنداب	۱۳
شکل (۹-۲): حوضه شماره سه قالیباف خنداب	۱۳
شکل (۱۰-۲): حوضه سعادت‌آباد محلات	۱۴
شکل (۱۱-۲): حوضه دربند اراک	۱۴
شکل (۱۲-۲): حوضه گوشه اراک	۱۴
شکل (۱۳-۲): بند خاکی حوضه شماره یک کاظم‌آباد	۱۶
شکل (۱۴-۲): بند خاکی حوضه شماره دو کاظم‌آباد	۱۶
شکل (۱۵-۲): بند خاکی حوضه کلا تفرش	۱۶
شکل (۱۶-۲): بند خاکی حوضه معین‌آباد تفرش	۱۶
شکل (۱۷-۲): بند خاکی حوضه قشلاق گوار	۱۷
شکل (۱۸-۲): بند خاکی حوضه یک قالیباف	۱۷
شکل (۱۹-۲): بند خاکی حوضه دو قالیباف	۱۷
شکل (۲۰-۲): بند خاکی حوضه سه قالیباف	۱۷
شکل (۲۱-۲): بند خاکی حوضه سعادت‌آباد محلات	۱۸
شکل (۲۲-۲): حوضه دربند اراک	۱۸
شکل (۲۳-۲): حوضه گوشه اراک	۱۸
شکل (۲۴-۲): مراحل مختلف شبکه‌بندی و حفر پروفیل مخزن بندها و نمونه‌برداری رسوب برای اندازه‌گیری خصوصیات آن در آزمایشگاه	۱۹

- شکل (۳-۱): رابطه مساحت با رسوب اندازه‌گیری شده از ۱۱ حوضه مطالعاتی ۳۲
- شکل (۳-۲): رابطه مساحت با رسوب اندازه‌گیری شده از هشت حوضه ۳۳
- شکل (۳-۳): رابطه شاخص FSM با باقیمانده رسوب از هشت بند مطالعاتی ۳۳
- شکل (۳-۴): برازش رسوب برآوردی و مشاهده‌ای در هشت حوضه مطالعاتی ۳۵

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۹	جدول (۲-۱): مشخصات حوضه‌های مطالعاتی ۹
۲۰	جدول (۲-۲): نحوه امتیازبندی عوامل مدل FSM (VERSTRAETEN و همکاران، ۲۰۰۳) ۲۰
۲۵	جدول (۳-۱): مشخصات رسوبات دریاچه‌ای در بندهای حوزه‌های آبخیز ۲۵
۲۶	جدول (۳-۲): مشخصات رسوبات دلتا در بندها ۲۶
۲۶	جدول (۳-۳): حجم رسوبات نهشته شده در مخازن بندهای موردبررسی ۲۶
۲۷	جدول (۳-۴): تعیین وزن رسوبات نهشته شده در مخازن بندهای موردبررسی ۲۷
۲۸	جدول (۳-۵): امتیاز عامل توپوگرافی در حوضه‌های مطالعاتی ۲۸
۲۸	جدول (۳-۶): امتیاز عامل پوشش در حوضه‌های مطالعاتی ۲۸
۲۹	جدول (۳-۷): امتیاز عامل خندق در حوضه‌های مطالعاتی ۲۹
۳۰	جدول (۳-۸): امتیاز عامل زمین‌شناسی در حوضه‌های مطالعاتی ۳۰
۳۰	جدول (۳-۹): امتیاز عامل شکل در حوضه‌های مطالعاتی ۳۰
۳۱	جدول (۳-۱۰): امتیاز شاخص FSM در حوضه‌های مطالعاتی استان مرکزی ۳۱
۳۲	جدول (۳-۱۱): آزمون نرمالیت برای ۱۱ حوضه ۳۲
۳۲	جدول (۳-۱۲): آزمون نرمالیت برای هشت حوضه ۳۲
۳۴	جدول (۳-۱۳): مقادیر رسوب برآوردی با استفاده از مدل FSM و تعیین خطای نسبی ۳۴
۳۵	جدول (۳-۱۴): آزمون نرمالیت داده‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردی ۳۵

چکیده:

فرسایش تشدیدی خاک و انتقال مقادیر زیاد رسوب از معضلات مهم بسیاری از مناطق کشور ایران است. برای کاهش اثرات سوء این معضل از طریق اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری، اطلاع از میزان فرسایش خاک و تولید رسوب ضرورت دارد. با توجه به فقدان ایستگاه اندازه‌گیری در خروجی آبخیزهای کوچک، مدل‌های تجربی ابزار مناسبی برای تخمین فرسایش و رسوبدهی هستند. یکی از این روش‌ها که براساس داده‌های رسوب مناطق مدیترانه‌ای ابداع شده، مدل تجربی FSM است. براین اساس، در این پژوهش واسنجی مدل FSM، از طریق رسوب‌سنجی ۱۱ بند خاکی از استان مرکزی با عمر حداقل ده سال که سرریز رسوب نداشتند، انجام شد. ابتدا با تعیین سطح رسوب‌گذاری هر بند خاکی با استفاده از GPS و تعیین ضخامت سطح رسوب‌گذاری براساس حفر پروفیل به‌صورت سطح شبکه‌بندی‌شده، وزن رسوب‌گذاری و رسوبدهی ویژه آبخیز بالادست هر بند تعیین شد. سپس با استفاده از GIS و جدول امتیازدهی، شاخص مدل FSM هر حوضه تعیین شد. به‌منظور واسنجی ضرایب مدل، از روابط رگرسیونی توانی و خطی استفاده شد. همچنین با استفاده از خطای نسبی، ارزیابی مدل انجام شد. طبق نتایج، میانگین خطای نسبی قبل از واسنجی برابر ۳۵۸۱۴ بدست آمد که مقدار بالایی است. اما پس از واسنجی مدل، این خطا به مقدار ۳۹۱ کاهش یافت که افزایش دقت و صحت مدل واسنجی‌شده نسبت به حالت اولیه مدل را نشان می‌دهد؛ اما برازش بین رسوب مشاهده‌ای و برآوردی همبستگی ۰/۲۴۸ را نشان داد که از این حیث، مدل FSM برای برآورد رسوبدهی یک حوضه منفرد از کارایی قابل‌قبولی برخوردار نبود. بنابر این در کارهای مطالعاتی و اجرایی آبخیزداری و منابع آب لازم است کارشناسان از مدل‌های واسنجی‌شده و توجه به شرایط منطقه‌ای استفاده کنند.

کلمات کلیدی: استان مرکزی، رسوبدهی، فرسایش خاک، مدل FSM، معیارهای ارزیابی.

فصل اول - کلیات

۱-۱- مقدمه

فرسایش خاک یکی از شاخص‌های مهم تغییر کیفیت محیط زیست و از مهم‌ترین مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی بسیاری از کشورهای در حال توسعه است. فرسایش خاک و کاهش حاصلخیزی، پیامدهای مهمی برای امنیت غذایی و معیشت خانوارهای کشاورزان به‌خصوص خرده پا ایجاد و توسعه پایدار را به شدت متأثر می‌کند (عبدالله‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). بنابر گزارش اتحادیه اروپا، سالانه حدود ۰/۴۳ درصد از بهره‌وری محصولات کشاورزی بدلیل فرسایش شدید ۱۲ میلیون هکتاری اراضی کشاورزی بوده که حدود ۱/۲۵ میلیارد یورو هزینه این خسارت برآورد می‌شود (Amini و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین سیلاب‌های مکرر و ازبین‌بردن و شستن جاده‌ها و زمین‌های کشاورزی و آلوده کردن آب شرب، ضررهای جبران‌ناپذیری به انسان و اکوسیستم وارد می‌کند که فعالیت‌های بشری می‌تواند آن را کاهش و یا افزایش دهد (محمدی‌ها و همکاران، ۱۳۹۰).

برای کاهش اثرات سوء پدیده فرسایش، لازم است که اقدامات حفاظت خاک صورت گیرد. ازطرفی به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت خاک، تعیین روش‌های مبارزه با فرسایش و کاهش رسوب‌زایی و نیز محاسبه دقیق حجم سد در احداث سدهای مخزنی، می‌بایست حجم کل رسوب تولیدی سالانه در حوزه آبخیز ارزیابی و برآورد شود. چنانچه در یک حوزه آبخیز داده‌های مربوط به دبی آب و رسوب به‌اندازه کافی موجود باشد، محاسبه حجم کل رسوبدهی سالانه آن با به‌کارگیری روش‌های آماری متداول امکان‌پذیر هست. ولی فقدان یا کمبود داده‌ها درزمینه‌ی فرسایش خاک و تولید رسوب در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور، کاربرد روش‌های تجربی مناسب برای برآورد فرسایش خاک و رسوب‌زایی را الزامی می‌کند که استفاده از این مدل‌ها ملزم به واسنجی منطقه‌ای ضرایب آن‌ها هست؛ زیرا تمام این مدل‌ها دارای ضرایب و ثابت‌های تجربی هستند که ممکن است برای سایر مناطق و نشان دادن تغییرات ناشی از بهره‌برداری از زمین مناسب نباشند (Hadley و همکاران، ۱۹۸۵).

با توجه به نبود ایستگاه‌های رسوب‌سنجی در اکثر خروجی‌های حوزه‌های آبخیز کشور و عدم کفایت داده‌ها، مدل‌های تجربی ابزارهای مناسبی برای تولید لایه‌های اطلاعاتی مهم هستند. از پرکاربردترین این مدل‌ها می‌توان به FAO، BLM، MPSIAC، EPM و مدل‌های خانواده USLE اشاره داشت. در این رابطه مدل‌های تجربی نیمه‌کمی مانند مدل امتیازدهی عاملی (FSM¹)، با توجه به سادگی، سرعت کاربرد و کمینه داده‌های ورودی مورد نیاز، برجسته هستند و این مدل‌های نیمه‌کمی برای پیش‌بینی میزان رسوب حوزه آبخیز براساس ویژگی‌های آن استفاده شدند (Valero و همکاران، ۲۰۱۷؛ Karalis و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bachiller Rodríguez و همکاران، ۲۰۱۹؛ Das و همکاران، ۲۰۲۰؛ Berihum و همکاران، ۲۰۲۵). Zoboli و همکاران در سال ۲۰۲۰ معتقدند رویکردهای تجربی و مفهومی ساده‌تر برای تخمین رسوبدهی آبخیز مناسب‌تر از مدل‌های مفهومی مبتنی بر فیزیک یا پیچیده‌تر هستند، زیرا این مدل‌ها به دلیل فقدان داده‌های توزیع‌شده مکانی کافی، وابستگی بیش‌ازحد نتایج به تجربه مدل‌ساز و الزامات محاسباتی بالا، محدود بودند. بنابراین ضرورت دارد کاربرد FSM و قابلیت آن مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۲- سابقه تحقیق

Verstraeten و همکاران (۲۰۰۳) مدل کمی FSM را برای اولین بار در اسپانیا ارائه کرده و برای محاسبه رسوبدهی حوضه‌ها از پنج عامل توپوگرافی، لیتولوژی، شکل حوضه، خندق و پوشش گیاهی استفاده کرد. آن‌ها این مطالعه را در ۶۰ حوضه انجام داده و مشاهده کرده‌اند که میزان رسوب برآوردشده با این مدل در تعدادی از زیرحوضه‌ها تطابق خوبی با رسوبدهی مشاهده‌ای حوضه دارد.

De Vente و همکاران (۲۰۰۵) مدل FSM را برای همان زیرحوضه‌ها واسنجی کرده و اشکالاتی را که در بیشتر زیرحوضه‌ها برای محاسبه رسوب با استفاده از این روش وجود داشت، مرتفع کردند.

¹ -Factorial Scoring Model

Haregeweyn و همکاران (۲۰۰۵) طی مطالعه‌ای در منطقه تیگری^۱ اتیوپی با افزودن دو عامل عملیات حفاظتی و اقلیم به عنوان عوامل مؤثر در فرسایش به مدل FSM این مدل را تکمیل کردند و سپس با ارزیابی مدل‌های PSIAC و FSM از طریق رسوب‌سنجی مخازن هشت سد، نتیجه‌گیری کردند که مدل FSM تطابق نامناسب‌تری نسبت به مدل PSIAC در مقایسه با مقادیر مشاهداتی دارد. آن‌ها این مسأله را ناشی از تعدد عوامل مؤثر در رسوبدهی در روش PSIAC دانستند.

در سال ۱۳۸۴ برای اولین بار در ایران از مدل FSM برای برآورد رسوبدهی حوزه آبخیز لاتشور استفاده شد. در این بین مدل FSM نتایج نزدیک‌تری را نسبت به مدل PSIAC ارائه و استفاده از آن برای دیگر حوضه‌های مورد مطالعه در ایران پیشنهاد شد.

محمدی‌ها و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی میزان فرسایش و تولید رسوب حوزه آبخیز ایوانکی با استفاده از مدل‌های FSM، MPSIAC و ایستگاه رسوب‌سنجی پرداختند. طبق نتایج میزان رسوب‌زایی برای مدل FSM برابر ۰/۹۱ تن در هکتار در سال و برای مدل MPSIAC به میزان ۳/۲۱ تن در هکتار در سال برای کل حوضه برآورد شده که در کلاس فرسایشی متوسط قرار گرفته. در نهایت ارقام برآوردی با میزان بار رسوب محاسباتی ۲۲ ساله اخیر ایستگاه رسوب‌سنجی مقایسه و مشخص شد مدل FSM نتیجه نزدیک‌تری با برآورد رسوب از ایستگاه رسوب‌سنجی نسبت به مدل MPSIAC دارد.

هروی و نظری سامانی (۱۳۹۱) به کاربرد مدل FSM در برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوزه آبخیز کن پرداختند. نتایج نشان داد که مدل مذکور نمی‌تواند مدل مناسبی برای پیش‌بینی فرسایش حوزه آبخیز کن باشد. مهم‌ترین دلیل این امر مربوط به عدم واسنجی فاکتورها و ضرایب مدل عنوان شد که واسنجی صحیح نیز نیازمند رسوب‌سنجی از مخازن بندها هست. به گونه‌ای که عرب‌خدری (۱۳۸۰) با تأکید بر عدم کفایت اطلاعات جمع‌آوری‌شده از ایستگاه‌های رسوب‌سنجی برای

¹ Tigray

تحلیل کامل، استفاده از رسوبات نهشته شده در بندها، سدها و سایر مخازن را دقیق‌تر از سایر روش‌ها دانسته؛ مشروط بر این‌که بخش بیشتر رسوبات براساس شواهد موجود تله‌اندازی جمع‌آوری شده باشند.

براین‌اساس چندین مورد تحقیق به‌منظور واسنجی مدل FSM براساس رسوب‌سنجی مخازن انجام شده است. در تحقیقی نبی‌پی لشکریان و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی کارایی مدل FSM برای برآورد رسوبدهی کل در استان سمنان پرداختند. به‌منظور ارزیابی این مدل، نه سد کوتاه با عمر ۱۰ سال بدون سرریز 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 بود که کاربرد معادله اصلی مدل کارایی ندارد. همچنین، نتیجه‌گیری نشان داد که نتایج برآورد شده به‌وسیله مدل FSM واسنجی شده با مقادیر حاصل از رسوب‌سنجی بندها ۸۴ درصد مطابقت دارد.

Meshesha و همکاران (۲۰۱۱) به لزوم به‌کارگیری مشاهدات صحرایی در ارزیابی مدل‌های برآوردی تأکید دارند. بدین منظور آن‌ها برای مدل‌سازی رسوبدهی ویژه در هفت آبخیز از کشور اتیوپی، از مشاهدات صحرایی و مدل FSM استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که مورفولوژی خندق‌ها عامل اصلی در کنترل رسوبدهی ویژه است. آن‌ها با اضافه کردن عامل اقلیم به مدل FSM برای تعیین اثر بارش باران در رسوبدهی ویژه، دریافتند که به دلیل تفاوت‌های قابل‌توجه در میزان بارش بین حوضه‌های مطالعاتی، مدل اصلاح‌شده FSM از همبستگی آماری بهتری بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی برخوردار است.

Atapourfard و همکاران (۲۰۱۲) به واسنجی مدل FSM در پیش‌بینی بار رسوب در نه ایستگاه رسوب‌سنجی در آبخیزهای حومه تهران پرداختند. نتایج نشان داد که R^2 بین رسوب برآوردی از مدل

واسنجی شده و رسوب مشاهده‌ای از طریق نسبت تحویل رسوب در حدود ۰/۸، ضریب کارایی (ناش و ساتکلیف) برابر ۰/۶۲ و RMSE برابر ۰/۲۷ است که بر این اساس بر عملکرد قابل قبول مدل اشاره دارد.

De Vente و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی نرخ فرسایش و بار رسوب ویژه در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف نتیجه گرفتند که در حوضه‌های متوسط مقیاس، مدل‌های نمره‌دهی فاکتوریل نظیر PSIAC و FSM نتیجه بهتری ارائه می‌دهند. علاوه بر این پیش‌بینی تأثیر تغییرات جهانی بر نرخ فرسایش و بار رسوب ویژه در حوضه‌های متوسط مقیاس یکی از چالش‌های اصلی در توسعه مدل‌های آتی معرفی شد. طبق نتایج هرچند نمی‌توان الگوی واحدی را به‌منظور برآورد اهداف مدل‌سازی تعریف کرد، اما مشاهدات و اندازه‌گیری‌های میدانی در تقویت مفاهیم مدل برای پیش‌بینی دقیق‌تر و صحیح‌تر برآوردهای نرخ فرسایش و بار رسوب ویژه مورد نیاز است.

Valero و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای تأثیر تولید رسوب بر جوامع ماهی را در ۱۰۴ محل رودخانه واقع در دو زیرحوضه مختلف - رودخانه‌های بمبزار و گواداجوز - که هر دو دارای ترکیب سنگ‌شناسی و نرخ فرسایش متفاوتی هستند، ارزیابی کردند. ایشان برای برآورد تولید رسوب از یک مدل نیمه‌کمی امتیاز فاکتوریل (FSM) که به‌طور خاص برای رودخانه‌های اسپانیا توسعه داده شده است استفاده کردند.

Karalis و همکاران (۲۰۱۸) بنا بر بررسی که روی مدل‌های برآورد رسوبدهی چند حوضه کوهستانی در یونان انجام دادند، FSM را به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی میزان رسوب معلق معرفی کردند و ضمن اشاره به عوامل پنج‌گانه آن، تأکید دارند که در اسپانیا کاملاً موفق بود.

Bachiller Rodríguez و همکاران (۲۰۱۹) با تأکید بر قابلیت مدل FSM معتقدند، مدل امتیازدهی عاملی (FSM) ۶۹ درصد از تغییرپذیری موجود در نرخ رسوب‌گذاری مخازن سدها را

توضیح می‌دهد، درحالی‌که مدل PSIAC، ۶۱ درصد، مدل WATEM-SEDEM ۴۸ درصد و مدل SPADS ۶۷ درصد که البته دو رویکرد آماری ۵۸ درصد و ۳۹ درصد نیز گزارش شده است.

Amini و همکاران (۲۰۲۱) معتقدند در بیشتر حوضه‌ها، به‌دلیل کمبود ایستگاه‌های رسوب‌گذاری، اطلاعات دقیقی در مورد رسوب‌گذاری و فرسایش خاک وجود ندارد. در چنین حوضه‌هایی، از مدل‌های تجربی برای تخمین میزان رسوب استفاده می‌شود. لذا در مطالعه‌ای با هدف تعیین وضعیت فرسایش حوضه دریاچه زریوار و ارزیابی کارایی مدل امتیازدهی عاملی، FSM، در تخمین میزان رسوب، ویژگی‌های فیزیولوژیکی و هیدرولوژیکی ۱۰ زیرحوضه دریاچه زریوار با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و داده‌های هوایی در محیط GIS به دست آوردند. وزن مخصوص رسوبات در آزمایشگاه محاسبه و برای تعیین وزن رسوبات استفاده شد. میزان رسوب در زیرحوضه‌ها در محل اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، با تعیین پارامترهای مؤثر، میزان رسوب برای هر زیرحوضه با استفاده از FSM به دست آمد و نتایج با میزان اندازه‌گیری شده مقایسه شد. برای کل حوضه، میانگین، کمینه و بیشینه میزان رسوب مشاهده‌شده به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۰۰۷ و ۱/۱۷ مترمکعب در هکتار در سال بود. با این حال، این مقادیر توسط FSM به ترتیب ۱۰۳/۷، ۲۰/۹ و ۳۶۵ مترمکعب در هکتار در سال بدست آمد که با مقادیر مشاهده‌شده متفاوت بود. براساس نتایج، این مدل برای ارزیابی میزان رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه به اندازه کافی کارآمد نیست.

Berihun و همکاران (۲۰۲۵) با اشاره به چالش‌ها و مشکلات موجود به‌علت کمبود داده در پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی، از یک رویکرد مدل‌سازی نیمه‌کمی که داده‌های میدانی و ده عامل کنترل‌کننده را در حوزه آبخیز چموگا در حوضه نیل آبی علیا در اتیوپی ادغام می‌کند، استفاده کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که رویکرد نیمه کمی در برون‌یابی حساسیت فرسایش خندقی در زمانی که داده‌های دقیق محدود هستند، مؤثر است و یک راه‌حل مقرون به صرفه و کارآمد ارائه می‌دهد. این مطالعه بر کاربرد رویکرد مدل‌سازی نیمه کمی در نقشه‌برداری حساسیت فرسایش

خندقی و پتانسیل آن برای کاربردهای عملی در مدیریت زمین تأکید می‌کند. ایشان معتقدند با توجه به سادگی، سرعت کاربرد و کمینه داده‌های ورودی موردنیاز، مدل‌های تجربی نیمه‌کمی مانند مدل امتیازدهی عاملی FSM و مدل کمیته بین سازمانی جنوب غربی اقیانوس آرام (PSIAC) به عنوان ابزارهای کارآمد در این زمینه برجسته هستند.

از بررسی منابع فوق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که هرچند مدل FSM به‌مانند سایر مدل‌های تجربی از جمله PSIAC، MPSIAC و EPM در کشور ما مورد ارزیابی قرار نگرفته است؛ اما این مدل به دلیل سادگی کاربرد و در نظر گرفتن اغلب پارامترهای مؤثر در فرسایش و رسوبدهی حوزه‌های آبخیز و تطابق نسبی آن با شرایط و ویژگی‌های ایران می‌تواند به عنوان یک روش نسبتاً مناسب مدنظر باشد. از طرفی محدود تحقیقات صورت گرفته در به کارگیری این مدل در کشور، با واسنجی همراه بوده است؛ بنابراین ارزیابی کارایی و واسنجی مدل FSM براساس رسوب‌سنجی مخازن بندهای خاکی، یک ضرورت در توسعه و به کارگیری آن در حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود.

فصل دوم - مواد و روش‌ها

۱-۲- حوضه‌های مورد مطالعه

همان‌گونه که در فصل اول اشاره شد، هدف اصلی این طرح، واسنجی مدل تجربی FSM از طریق بررسی رسوب مخازن بندهای کوچک در استان مرکزی است. لذا در این فصل ابتدا به معرفی حوضه‌های مطالعاتی پرداخته خواهد شد و سپس روش کار با مدل FSM تشریح می‌شود.

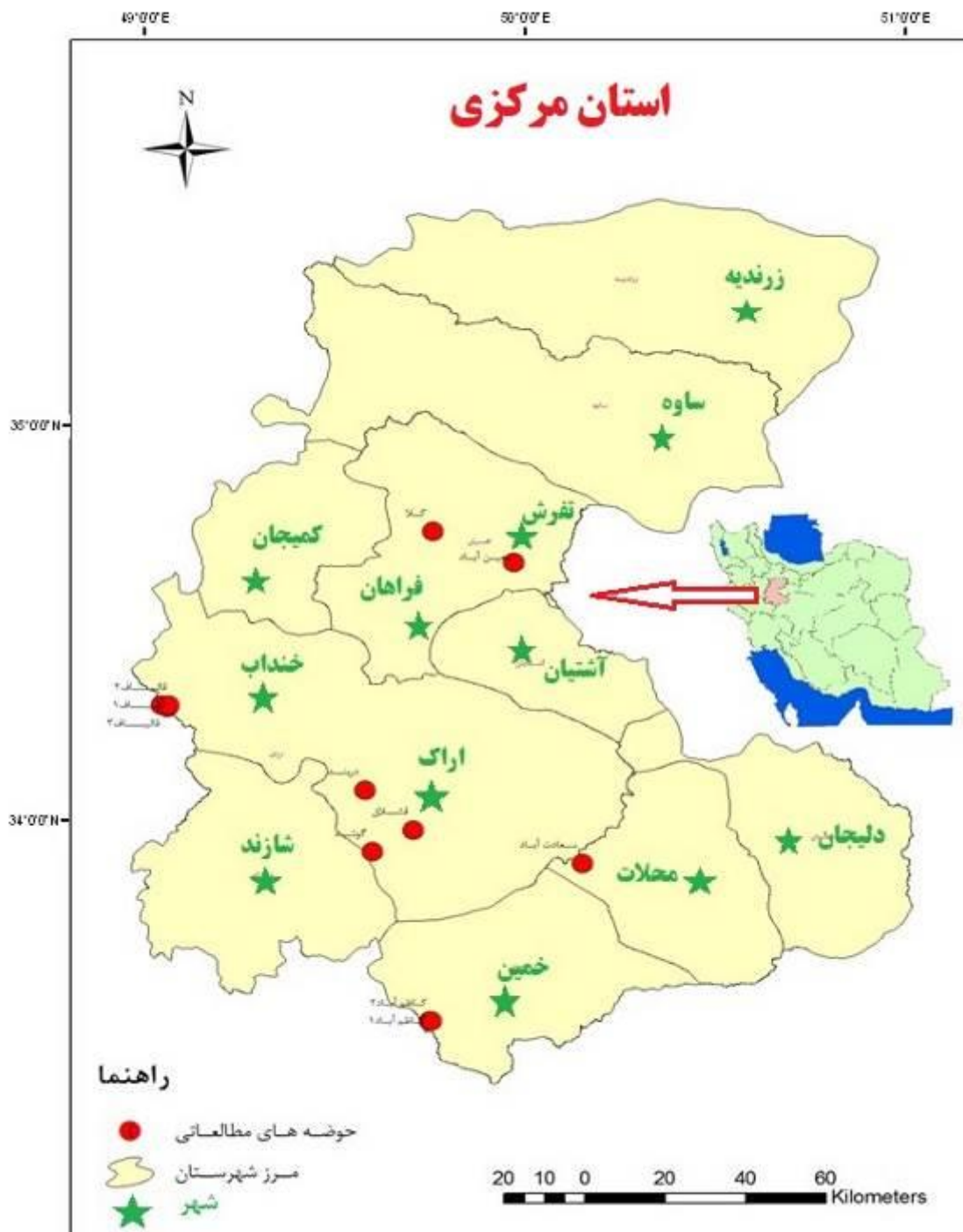
فیزیوگرافی

قبل از انجام عملیات میدانی با مشورت کارشناسان بخش آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مرکزی، اطلاعات لازم در مورد بندهای خاکی احداث شده در حوزه‌های آبخیز استان کسب شد. سپس ۱۱ حوضه با بند خاکی دارای عمر حدود ده سال، بدون سرریز و هیچ‌گونه عملیات مکانیکی در مسیر آبراهه بالادست انتخاب شد و با انجام مطالعات میدانی، ضمن برداشت مختصات سدهای خروجی به‌وسیله دستگاه GPS، با استفاده از مشاهدات عینی شناخت کلی از حوضه‌ها به دست آمد. جدول (۱-۲) و شکل (۱-۲) موقعیت و مشخصات ۱۱ حوضه مطالعاتی را بیان می‌کند. همچنین شکل‌های (۲-۲) تا (۱۰-۲) موقعیت حوضه‌های مطالعاتی را به تفکیک شهرستان نشان می‌دهند.

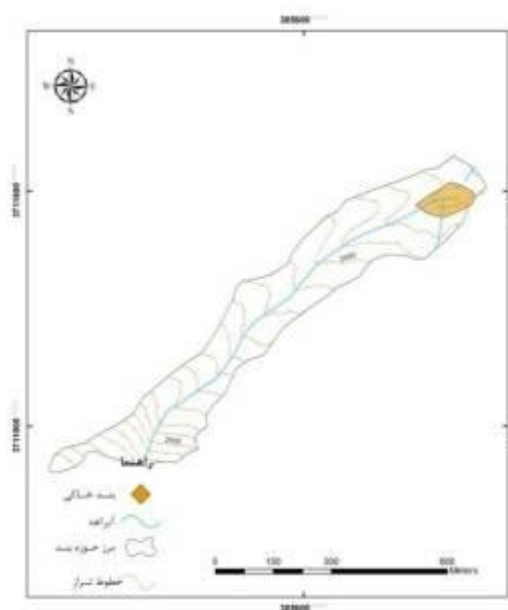
جدول (۱-۲): مشخصات حوضه‌های مطالعاتی

ردیف	نام حوضه	شهرستان	طول	عرض	مساحت (هکتار)	ارتفاع متوسط (متر)	بارش متوسط سالانه (میلی‌متر)	سال احداث بند
۱	کاظم‌آباد ۱	خمین	۳۸۵۹۹۰- ۳۸۴۶۱۸	۳۷۱۱۹۲۰- ۳۷۱۰۸۷۷	۶۲/۴۲	۲۳۳۳	۳۸۰	۱۳۷۹
۲	کاظم‌آباد ۲	خمین	۳۸۶۰۷۰- ۳۸۴۹۴۲-	۳۷۱۱۶۹۰- ۳۷۱۰۸۸۲	۱۸/۴۵	۲۳۱۵	۳۸۰	۱۳۷۹

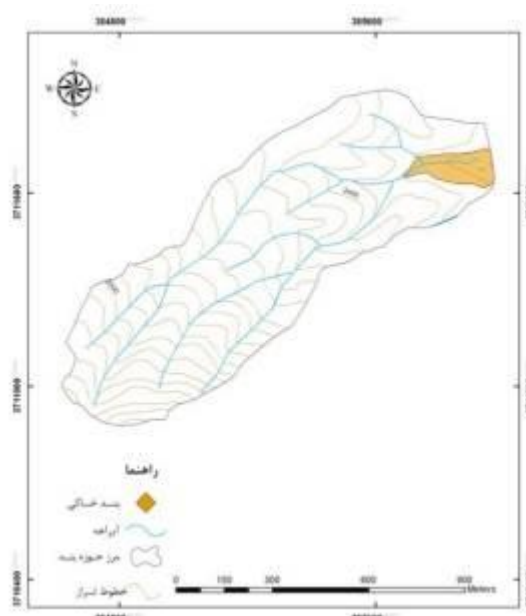
ردیف	نام حوضه	شهرستان	طول	عرض	مساحت (هکتار)	ارتفاع متوسط (متر)	بارش متوسط سالانه (میلی‌متر)	سال احداث بند
۳	کلا	تفرش	۳۸۵۰۵۸- ۳۸۶۷۰۲	۳۸۴۴۷۰۳- ۳۸۴۶۸۵۶	۲۵۰/۹۶	۲۲۸۴	۴۴۳	۱۳۷۲
۴	معین‌آباد	تفرش	۴۰۶۷۲۱- ۴۰۵۸۱۹	۳۸۳۷۹۵۵- ۳۸۳۶۷۲۳	۵۸/۲۵	۲۰۷۶	۲۹۴	۱۳۷۸
۵	قشلاق	اراک	۳۸۲۷۱۳- ۳۸۰۱۵۵	۳۷۶۵۱۴۶- ۳۷۶۲۱۱۸	۴۲۸/۷۰	۲۳۷۱	۳۵۶	۱۳۸۱
۶	قالیباف ۱	خنداب	۳۲۰۲۲۵- ۳۱۹۵۸۳	۳۷۹۷۸۵۱- ۳۷۹۷۲۱۴	۲۴/۶۹	۲۲۳۴	۳۲۰	۱۳۸۲
۷	قالیباف ۲	خنداب	۳۲۰۷۹۴- ۳۲۰۰۰۹	۳۷۹۸۵۵۵- ۳۷۹۷۶۳۷	۴۰/۲۲	۲۱۴۱	۳۲۰	۱۳۸۲
۸	قالیباف ۳	خنداب	۳۱۹۲۴۵- ۳۱۷۷۵۴	۳۷۹۸۶۹۰- ۳۷۹۷۳۲۸	۱۰۹/۹۲	۲۲۴۵	۳۲۰	۱۳۸۲
۹	سعادت‌آباد	محلات	۴۲۵۰۰۴- ۴۲۱۷۲۴	۳۷۵۵۵۱۱- ۳۷۵۴۱۲۱	۱۱۰/۳۷	۲۴۵۸	۲۲۹	۱۳۷۴
۱۰	دریند	اراک	۳۶۹۷۸۲- ۳۶۸۴۴۰	۳۷۷۷۵۵۱۳- ۳۷۷۴۳۱۰	۱۰۱/۴۶	۲۰۰۷	۳۳۴	۱۳۷۵
۱۱	گوشه	اراک	۳۷۴۲۱۶- ۳۶۸۸۵۶	۳۷۵۹۱۸۴- ۳۷۵۶۷۵۱	۵۴۳/۹۷	۲۴۰۴	۳۵۶	۱۳۷۵



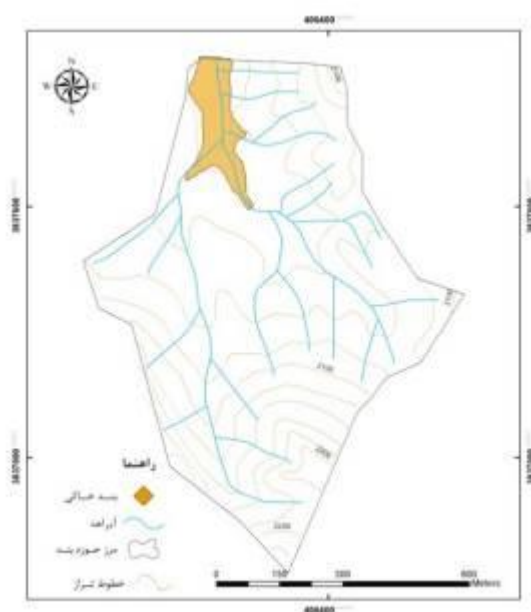
شکل (۱-۲): پراکنش بندهای خاکی اندازه گیری شده در استان مرکزی



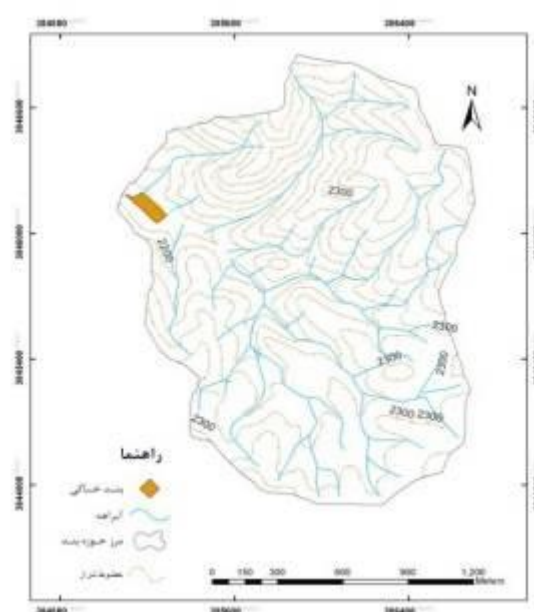
شکل (۲-۳): حوضه شماره دو کاظم آباد خمین



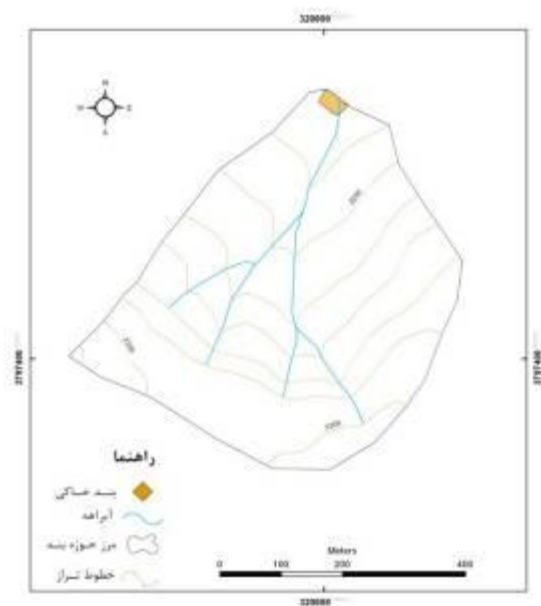
شکل (۲-۲): حوضه شماره یک کاظم آباد خمین



شکل (۲-۵): حوضه معین آباد تفرش



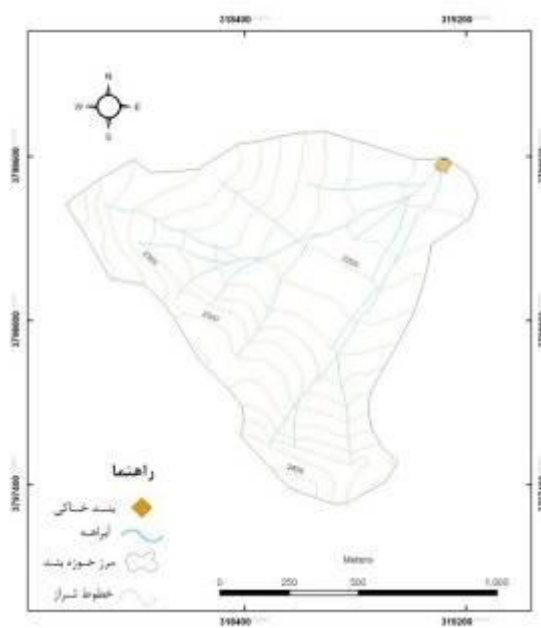
شکل (۲-۴): حوضه کلا تفرش



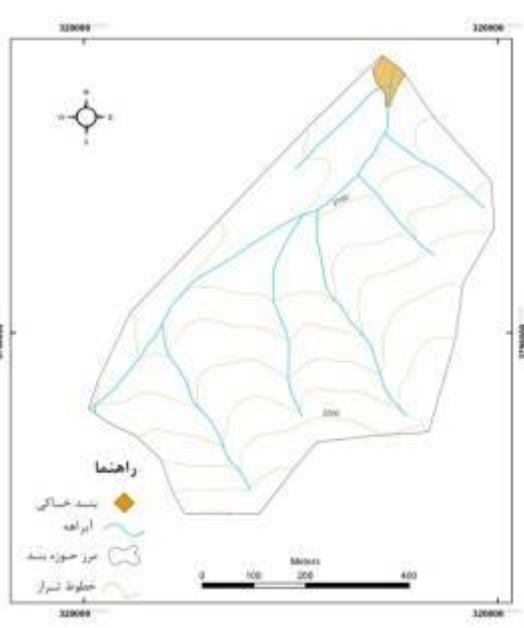
شکل (۲-۷): حوضه شماره یک قالیباف خنداب



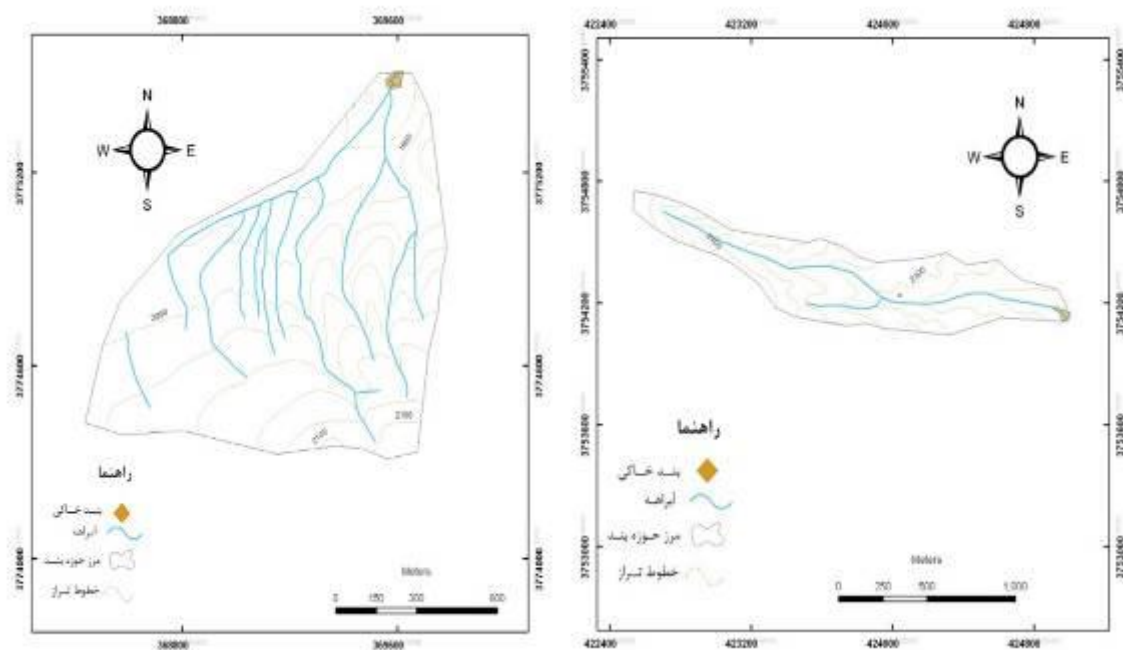
شکل (۲-۶): حوضه قشلاق اراک



شکل (۲-۹): حوضه شماره سه قالیباف خنداب

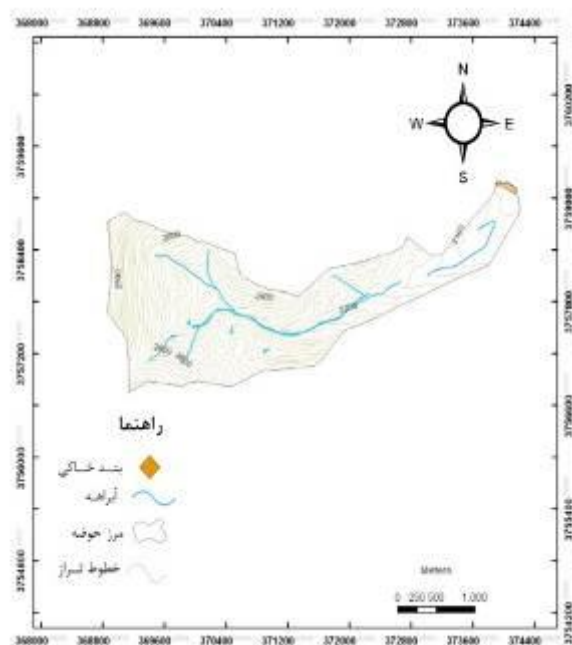


شکل (۲-۸): حوضه شماره دو قالیباف خنداب



شکل (۲-۱۱): حوضه دربند اراک

شکل (۲-۱۰): حوضه سعادت آباد محلات



شکل (۲-۱۲): حوضه گوشه اراک

۲-۲- اندازه‌گیری رسوب مخازن بندها

پس از انتخاب بندهای خاکی با ضریب تله اندازی ۱۰۰ درصد، در مرحله بعد اقدام به تعیین حجم و وزن رسوب مخازن بندها شد. به دلیل نبود نقشه‌های اولیه از پروفیل مخازن بندها، با استفاده از دستگاه GPS مساحت سطح مخازن بندها در دو بخش رسوبات دریاچه‌ای و رسوبات دلتایی بدست آمد. لازم به ذکر است رسوبات دریاچه‌ای به علت نرم‌وریزبودن جریان آب، به صورت تعلیق در سطح دریاچه مخزن پخش می‌شوند؛ اما رسوبات دلتایی قسمت ورودی و ابتدای مخزن بند خاکی را شامل می‌شوند که رسوبات درشت‌دانه در این قسمت ته‌نشین می‌شوند. شکل‌های ۲-۱۳ تا ۲-۲۳ نمایی از مخزن و یا رسوبات هر منطقه را نشان می‌دهند.

متناسب با ابعاد مخازن، با حفر پروفیل به صورت شبکه‌های ۵ در ۵ متر، عمق رسوب‌گذاری مشخص شد. سپس با ترسیم پروفیل رسوب‌گذاری و سطح رسوب‌گذاری، حجم رسوب بندها بدست آمد. به منظور تبدیل واحد حجم به وزن، با نمونه‌برداری از رسوب و انتقال به آزمایشگاه، وزن مخصوص رسوب مخازن به دست آمد (شکل ۲-۲۴). در نهایت با داشت پارامترهای حجم و وزن مخصوص رسوب، وزن رسوب هر یک از مخازن برحسب تن به دست آمد. همچنین با توجه به عامل مساحت آبخیز بندها، رسوبدهی ویژه هر حوضه برحسب تن در هکتار در سال محاسبه شد.

۳-۲- برآورد رسوبدهی با استفاده از مدل FSM

به منظور برآورد رسوبدهی با استفاده از مدل FSM، ابتدا اقدام به تعیین امتیاز عوامل پنج‌گانه مدل شد و سپس ضرایب مدل نرخ فرسایش‌پذیری بدست آمد.



شکل (۲-۱۴): بند خاکی حوضه شماره دو کاظم آباد



شکل (۲-۱۳): بند خاکی حوضه شماره یک کاظم آباد



شکل (۲-۱۶): بند خاکی حوضه معین آباد تفرش



شکل (۲-۱۵): بند خاکی حوضه کلا تفرش



شکل (۲-۱۸): بند خاکی حوضه یک قالیباف



شکل (۲-۱۷): بند خاکی حوضه قشلاق گوار



شکل (۲-۲۰): بند خاکی حوضه سه قالیباف



شکل (۲-۱۹): بند خاکی حوضه دو قالیباف



شکل (۲-۲۲): حوضه دربند اراک



شکل (۲-۲۱): بند خاکی حوضه سعادت آباد محلات



شکل (۲-۲۳): حوضه گوشه اراک



اندازه‌گیری عمق پروفیل



شبکه حفر پروفیل



نمونه‌برداری رسوب



شاخص‌های مساحی سطح مخزن بند

شکل (۲-۲۴): مراحل مختلف شبکه‌بندی و حفر پروفیل مخزن بندها و نمونه‌برداری رسوب برای

اندازه‌گیری خصوصیات آن در آزمایشگاه

۲-۳-۱- تعیین امتیاز عوامل پنج‌گانه

طبق رابطه ۱-۲، در مدل نمره دهی فاکتوریل یا FSM، پنج عامل مؤثر در فرسایش شامل توپوگرافی (T)، میزان خندق‌ها (G)، پوشش گیاهی (V)، سنگ‌شناسی (L) و شکل حوزه آبخیز (S) برای تعیین امتیاز شاخص مدل (I_{FSM}) به کار می‌روند (Das و همکاران، ۲۰۲۰) که نحوه امتیازبندی عوامل در جدول ۲-۲ آمده است.

$$I_{FSM} = T.G.V.L.S \quad (۲-۱)$$

جدول (۲-۲): نحوه امتیازبندی عوامل مدل FSM (Verstraeten و همکاران، ۲۰۰۳)

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

عامل توپوگرافی

در مدل FSM، براساس شیب دامنه‌ها و اختلاف ارتفاع بین پست‌ترین و مرتفع‌ترین نقطه حوضه، امتیازدهی انجام می‌شود. برای امتیازدهی به عامل توپوگرافی در این مدل، علاوه بر پیمایش صحرایی، نیاز به درصد شیب حوضه‌های مطالعاتی بود. بدین منظور با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، لایه درصد شیب حوضه‌ها تهیه شد. براساس تقسیم‌بندی شیب در جدول مذکور، لایه درصد شیب در سه کلاس کمتر از ۴ درصد (امتیاز ۱)، ۴ تا ۱۰ درصد (امتیاز ۲) و بیشتر از ۱۰ درصد (امتیاز ۳) تهیه شد (De Vente و همکاران، ۲۰۰۶ و Haregeweyn و همکاران، ۲۰۰۵).

عامل پوشش گیاهی

عامل پوشش گیاهی نیز ازجمله عواملی است که بر میزان فرسایش‌پذیری حوضه تأثیر بسزایی دارد. برای امتیازدهی به عامل پوشش گیاهی در مدل FSM از لایه پوشش گیاهی استفاده شد. بدین‌منظور در بازدیدهای صحرایی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای و با استناد لایه وضعیت پوشش گیاهی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مرکزی، امتیازدهی این عامل تعیین شد. لازم به ذکر است در لایه پوشش گیاهی مذکور، وضعیت در سه حالت پوشش متراکم، پوشش متوسط و پوشش ضعیف تعریف شده بود (De Vente و همکاران، ۲۰۰۶؛ Haregeweyn و همکاران، ۲۰۰۵).

عامل خندق

در بین انواع فرسایش‌های شیاری، بین شیاری، بدلدن و خندقی که در یک حوضه شکل می‌گیرد، فرسایش خندقی درمجموع مقدار رسوب بیشتری تولید می‌کند. این نوع فرسایش بیشتر در بین واحدهای مارنی و واحدهای به سن نئوژن ایجاد می‌شود (محمدی‌ها و همکاران، ۱۳۹۰). با بازدیدهای صحرایی و با توجه به طرح طبقه‌بندی مورفوکلیماتیک آبکندهای استان مرکزی (داودی‌راد و همکاران، ۱۳۸۷) و نیز تصاویر ماهواره‌ای امتیاز این عامل در هر یک از حوضه‌های مطالعاتی تعیین شد.

عامل زمین‌شناسی

توصیف و بررسی واحدهای سنگی سازندهای موجود در حوزه آبخیز را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در فرسایش معرفی کرد. این عامل به نحوی با سایر عوامل در ارتباط است. عامل زمین‌شناسی براساس جنس و ترکیب واحدهای سنگی یک حوضه تقسیم و امتیازبندی می‌شود. در مدل FSM امتیاز ۱ برای حوضه‌هایی که از سنگ‌های آهکی، کنگلومرا و ماسه سنگ تشکیل شده‌اند و دارای مقاومت بیشتری در برابر فرسایش و هوازدگی هستند در نظر گرفته می‌شود. در حوضه‌های پوشیده از واحدهای نئوژن، امتیاز ۲ و حوضه‌هایی که دارای واحدهای سست و رسوبات شامل سیلت و رسوبات شامل سیلت و رس (مارن) فراوان هستند امتیاز ۳ داده می‌شود. مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که حوضه‌های با زمین‌شناسی مارن، دارای بار رسوبی بیشتری نسبت به شیست، سنگ آهک و ماسه‌سنگ هستند (Woodward, ۱۹۹۵). در این تحقیق از نقشه رقومی زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای تعیین امتیاز عامل زمین‌شناسی حوضه‌های مطالعاتی استفاده شد.

عامل شکل حوضه

ازجمله عواملی که بر روی زمان تمرکز رواناب و تولید رسوب حوضه تأثیر می‌گذارد، شکل حوضه هست. در حوضه‌های کشیده مسافت حمل و نقل طولانی‌تر است و تأخیر در وقوع سیلاب در خروجی به وجود می‌آید که درنهایت شدت رسوبدهی نیز کاهش می‌یابد. در این تحقیق برای امتیازدهی به عامل شکل حوضه از ضریب فشردگی (CC^1) طبق رابطه ۲-۲ استفاده شد.

$$CC = \frac{0.282 P}{\sqrt{A}} \quad (2-2)$$

که در آن P محیط حوضه به کیلومتر و A مساحت حوضه به کیلومترمربع است. در این تحقیق ضریب فشردگی برای کلیه حوضه‌ها محاسبه شد.

¹ - Comactness Coefficient

پس از تهیه لایه رقومی هر یک از عامل‌های مدل FSM، طبق رابطه ۲-۱ عوامل پنج‌گانه در هم ضرب شدند و امتیاز شاخص مدل (I_{FSM}) با توجه به مساحت واحدهای همگن به صورت وزنی برای هر حوضه بدست آمد.

۲-۳-۲- نرمال سازی داده‌ها

قبل از پردازش داده‌ها به منظور برآورد رسوبدهی با استفاده از مدل FSM و همچنین واسنجی مدل، با حذف داده‌های پرت، نرمال سازی داده‌ها انجام شد. به منظور انجام آزمون نرمالیت براساس شاخص‌های توصیفی داده‌ها از معیارهای چولگی و کشیدگی (در محدوده +۲ و -۲) استفاده شد.

۲-۳-۳- برآورد رسوبدهی ویژه با مدل اولیه FSM

به منظور برآورد رسوبدهی ویژه، از رابطه اولیه مدل FSM استفاده شد (De Vente و همکاران، ۲۰۰۵ و Haregeweyn و همکاران، ۲۰۰۵؛ Zoboli و همکاران، ۲۰۲۰):

$$SSY = 4139 A^{-0.44} + 7.77 * I_{FSM} - 310.99 \quad (2-3)$$

که در آن SSY نرخ رسوب دهی برحسب تن در کیلومتر مربع در سال، A عامل مساحت حوضه (برحسب کیلومتر مربع) و I_{FSM} امتیاز شاخص مدل هست.

۲-۳-۴- برآورد رسوبدهی ویژه با مدل اصلاح شده FSM

به منظور اصلاح ضرایب معادله میزان رسوبدهی، از روابط رگرسیونی استفاده شد. لزوم اصلاح ضرایب مدل FSM به این دلیل است که ضرایب اولیه طبق رابطه ۲-۳ برای کشور اسپانیا توسعه یافته است (De Vente و Poesen، ۲۰۰۵) و استفاده از آن در سایر مناطق جهان مستلزم جایگزینی ضرایب دیگری هست. بر این اساس و در ادامه به نحوه برقراری روابط رگرسیونی پرداخته می‌شود.

- رابطه مساحت با رسوبدهی اندازه‌گیری شده از بندهای خروجی

در رابطه اول، بین عامل مساحت و رسوبدهی اندازه‌گیری شده از بندها، معادله توانی رگرسیونی برقرار شد تا ضرایب a و b رابطه بدست آمده، جایگزین اعداد ۴۱۳۹ و ۰/۴۴- رابطه اولیه شوند.

- رابطه شاخص FSM با باقیمانده رسوب بندها:

در رابطه دوم، بین امتیاز شاخص مدل (I_{FSM}) و باقیمانده رسوب بندها، معادله خطی رگرسیونی برقرار شد تا ضرایب c و d رابطه بدست آمده، جایگزین اعداد ۷/۷۷ و ۳۱۰/۹۹- رابطه اولیه شوند. برای محاسبه باقیمانده رسوب بندها، با برقراری رابطه مساحت با رسوب داخل بندها، رسوبدهی ویژه محاسباتی بدست آمد و با کسر مقدار رسوب ویژه اندازه‌گیری شده از آن، باقیمانده رسوب تعیین شد.

۲-۴- ارزیابی مدل FSM

پس از برآورد نرخ رسوبدهی با استفاده از رابطه اصلاح شده مدل FSM، برای تعیین خطای نسبی از رابطه (۲-۴) محاسبه شد (نوحه گر و همکاران، ۱۳۹۵):

$$RE = ((P_i - O_i) * 100) / O_i \quad (2-4)$$

که O_i رسوب اندازه‌گیری شده از هر بند خاکی، P_i رسوب برآوردی از مدل FSM، O_m متوسط رسوب اندازه‌گیری شده از بندهای خاکی و N تعداد بندهای خاکی و RE خطای نسبی برحسب درصد است. در مرحله آخر، با انجام آزمون نرمالیت براساس شاخص‌های چولگی و کشیدگی، نتایج تحلیل آماری مقایسه رسوب برآورد شده توسط مدل FSM با مقدار رسوب اندازه‌گیری شده در بندها با استفاده از روش t-student به کمک نرم افزار SPSS انجام شد و معنی داری مقادیر رسوبدهی برآوردی در مقایسه با مقادیر رسوب اندازه‌گیری شده در بندها تعیین شد.

فصل سوم - نتایج

در این پژوهش با بررسی بندهای خاکی احداث شده در حوزه‌های آبخیز استان، متناسب با روش تحقیق، ۱۱ حوضه با بند خاکی دارای عمر حدود ده سال، بدون سرریز و هیچ‌گونه عملیات مکانیکی در مسیر آبراهه بالادست انتخاب شد. در ادامه با انجام مطالعات میدانی، ضمن برداشت مختصات و مشخصات هر بند خاکی، متناسب با ابعاد مخازن، با حفر پروفیل به صورت شبکه‌های ۵ در ۵ متر، عمق رسوب‌گذاری مشخص شده و سپس با ترسیم پروفیل رسوب‌گذاری و سطح رسوب‌گذاری، حجم رسوب بندها به دست آمد. در جدول ۳-۱ مقادیر هندسی و حجم و وزن رسوب حاصل از برداشت‌های عملیات صحرایی آمده است.

جدول (۳-۱): مشخصات رسوبات دریاچه‌ای در بندهای حوزه‌های آبخیز

حوزه آبخیز	مساحت دریاچه (داغاب) (m ²)	عمق دریاچه (m)	حجم دریاچه (m ³)	عمق رسوب دریاچه (m)	مساحت رسوب دریاچه‌ای (m ²)	حجم رسوب (m ³)	وزن مخصوص رسوبات دریاچه‌ای (t.m ⁻³)	وزن رسوبات دریاچه‌ای (t)
دربند	۲۵۲۰	۲/۵	۶۳۰۰	۰/۷۰	۷۱۷	۵۰۱/۹	۱/۵۱	۷۵۷/۹
سعادت‌آباد	۲۱۱۱	۴	۸۴۴۴	۱/۴۰	۴۵۵	۶۳۷	۱/۳۵	۸۵۹/۹
قالیباغ ۱	۱۰۷۷	۳	۳۲۳۱	۰/۲۴	۲۶۶	۶۳/۸	۱/۲۰	۷۶/۶
قالیباغ ۲	۳۱۳۵	۳	۹۴۰۵	۰/۱۰	۲۸۸	۲۸/۸	۱/۳۴	۳۸/۶
قالیباغ ۳	۲۱۱۲	۳	۶۳۳۶	۰/۴۵	۷۱۶	۳۲۲/۲	۱/۲۲	۳۹۳/۱
قشلاق	۳۳۲۵	۵	۱۶۶۲۵	۰/۰۵	۳۳۶	۱۶/۸	۱/۲۸	۲۱/۵
کاظم‌آباد ۱	۱۷۵۰۰	۳	۵۲۵۰۰	۰/۳۹	۲۱۰۰	۸۱۹	۱/۲۰	۹۸۲/۸
کاظم‌آباد ۲	۹۹۳	۳	۲۹۷۹	۰/۴۶	۵۵۳	۲۵۴/۴	۱/۲۰	۳۰۵/۳
کلا	۶۷۰۰	۳	۲۰۱۰۰	۰/۲۷	۱۸۱۰	۴۸۸/۷	۱/۱۷	۵۷۱/۸
گوشه	۱۶۹۷۵	۳	۵۰۹۲۵	۰/۷۱	۵۶۶۳	۴۰۲۰/۷	۱/۲۲	۴۹۰۵/۳
معین‌آباد	۵۸۵۹	۵	۲۹۲۹۵	۰/۵۰	۱۷۶۸	۸۸۴	۱/۲۰	۱۰۶۰/۸

جدول (۳-۲): مشخصات رسوبات دلتا در بندها

حوزه آبخیز	مساحت دلتا (m ²)	عمق رسوبات دلتا (m)	حجم رسوبات دلتا (m ³)	وزن مخصوص رسوبات دلتایی (t.m ⁻³)	وزن رسوبات دلتا (t)
دربند	۲۸۲	۰/۸۰	۲۲۵/۶	۱/۷۱	۳۸۵/۸
سعادت‌آباد	۱۳۲۱	۱/۲۵	۱۶۵۱/۲	۱/۸۰	۲۹۷۲/۲
قالیباف ۱	۷۲	۰/۲۰	۱۴/۴	۱/۵۳	۲۲
قالیباف ۲	۱۰۲	۰/۱۸	۱۸/۴	۱/۶۲	۲۹/۸
قالیباف ۳	۳۵۸	۰/۵۶	۲۰۰/۵	۱/۵۳	۳۰۶/۷
قشلاق	۱۳۸	۰/۱۱	۱۵/۲	۱/۵۰	۲۲/۸
کاظم‌آباد ۱	۱۵۰	۰/۵۵	۸۲/۵	۱/۴۰	۱۱۵/۵
کاظم‌آباد ۲	۶۰	۰/۴۰	۲۴	۱/۴۰	۳۳/۶
کلا	۷۶۲	۰/۶۰	۴۵۷/۲	۱/۴۱	۶۴۴/۶
گوشه	۱۱۰۰	۰/۸۰	۸۸۰	۱/۶۵	۱۴۵۲
معین‌آباد	۱۰۹۳	۱	۱۰۹۳	۱/۵۵	۱۶۹۴/۱

جدول (۳-۳): حجم رسوبات نهشته‌شده در مخازن بندهای موردبررسی

حوزه آبخیز	حجم رسوبات دریاچه (m ³)	حجم رسوبات دلتا (m ³)	مجموع حجم رسوبات بند (m ³)	مساحت حوضه آبخیز (km ²)	عمر بند (y)	حجم رسوبدهی ویژه (m ³ .km ⁻² .y ⁻¹)
	(۱)	(۲)	(۳)=(۱)+(۲)	(۴)	(۵)	(۶)=(۳)/(۴)/(۵)
دربند	۵۰۱/۹	۲۲۵/۶	۷۲۷/۵	۱/۰۱۴۶	۱۷	۴۲/۲
سعادت‌آباد	۶۳۷	۱۶۵۱/۲	۲۲۸۸/۲	۱/۱۰۳۷	۱۸	۱۱۵/۲
قالیباف ۱	۶۳/۸	۱۴/۴	۷۸/۲	۰/۲۴۶۹	۱۰	۳۱/۶
قالیباف ۲	۲۸/۸	۱۸/۴	۴۷/۲	۰/۴۰۲۲	۱۰	۱۱/۷
قالیباف ۳	۳۲۲/۲	۲۰۰/۵	۵۲۲/۷	۱/۰۹۹۲	۱۰	۴۷/۵
قشلاق	۱۶/۸	۱۵/۲	۳۲	۴/۲۸۷	۱۱	۰/۷
کاظم‌آباد ۱	۸۱۹	۸۲/۵	۹۰۱/۵	۰/۶۲۴۲	۱۲	۱۲۰/۳
کاظم‌آباد ۲	۲۵۴/۴	۲۴	۲۷۸/۴	۰/۱۸۴۵	۱۲	۱۲۵/۷
کلا	۴۸۸/۷	۴۵۷/۲	۹۴۵/۹	۲/۵۰۹۶	۲۰	۱۸/۸
گوشه	۴۰۲۰/۷	۸۸۰	۴۹۰۰/۷	۵/۴۳۹۷	۱۷	۵۳
معین‌آباد	۸۸۴	۱۰۹۳	۱۹۷۷	۰/۵۸۲۵	۱۴	۲۴۲/۴

جدول (۳-۴): تعیین وزن رسوبات نهشته شده در مخازن بندهای مورد بررسی

حوزه آبخیز	وزن رسوبات دریاچه (t)	وزن رسوبات دلتا (t)	مجموع وزن رسوبات (t)	مساحت حوزه آبخیز (h)	عمر بند (y)	رسوبدهی ویژه (t.h ⁻¹ .y ⁻¹)
	(۱)	(۲)	(۳)=(۱)*(۲)	(۴)	(۵)	(۶)=(۳)/(۴)/(۵)
دربند	۷۵۷/۹	۳۸۵/۸	۱۱۴۳/۶	۱۰۱/۴۶	۱۷	۰/۶۶
سعادت آباد	۸۵۹/۹	۲۹۷۲/۲	۳۸۳۲/۲	۱۱۰/۳۷	۱۸	۱/۹۳
قالیاف ۱	۷۶/۶	۲۲	۹۸/۶	۲۴/۶۹	۱۰	۰/۴۰
قالیاف ۲	۳۸/۶	۲۹/۷	۶۸/۳	۴۰/۲۲	۱۰	۰/۱۷
قالیاف ۳	۳۹۳/۱	۳۰۶/۷	۶۹۹/۸	۱۰۹/۹۲	۱۰	۰/۶۴
قشلاق	۲۱/۵	۲۲/۸	۴۴/۳	۴۲۸/۷	۱۱	۰/۰۱
کاظم آباد ۱	۹۸۲/۸	۱۱۵/۵	۱۰۹۸/۳	۶۲/۴۲	۱۲	۱/۴۷
کاظم آباد ۲	۳۰۵/۳	۳۳/۶	۳۳۸/۹	۱۸/۴۵	۱۲	۱۰/۵
کلا	۵۷۱/۸	۶۴۴/۶	۱۲۱۶/۴	۲۵۰/۹۶	۲۰	۰/۲۴
گوشه	۴۹۰۵/۳	۱۴۵۲	۶۳۵۷/۳	۵۴۳/۹۷	۱۷	۰/۷۰
معین آباد	۱۰۶۰/۸	۱۶۹۴/۱	۲۷۵۴/۹	۵۸/۲۵	۱۴	۳/۴

مطابق با روش کار، در مدل FSM هر یک از پنج عامل در سه کلاس با توجه به جدول ۲-۲ امتیازدهی می شوند. بر این اساس برای هر عامل، یک لایه سه کلاسه تهیه می شود که هر کلاس امتیاز مربوطه را دریافت می کند. سپس با توجه به مساحت کلاس مربوطه و امتیاز آن، میانگین وزنی امتیاز برای کل لایه (عامل) محاسبه می شود که این فرایند در محیط نرم افزار ArcGIS انجام شده است. براین اساس امتیاز هر عامل در جدول ۳-۵ تا ۳-۹ آمده است.

جدول (۳-۵): امتیاز عامل توپوگرافی در حوضه‌های مطالعاتی

نام حوضه	شیب متوسط (درصد)	امتیاز در مدل FSM
دربند	۱۴/۰۴	۳
سعادت‌آباد	۱۹/۵۸	۳
قالیباف ۱	۲۲/۵۲	۳
قالیباف ۲	۱۶/۷۷	۳
قالیباف ۳	۱۸/۶۸	۳
قشلاق	۲۴/۷۲	۳
کاظم‌آباد ۱	۱۲/۳۶	۳
کاظم‌آباد ۲	۱۳/۴۸	۳
کلا	۱۳/۸۶	۳
گوشه	۲۶/۰۳	۳
معین‌آباد	۱۷/۳۱	۳

جدول (۳-۶): امتیاز عامل پوشش در حوضه‌های مطالعاتی

نام حوضه	کاربری	پوشش	درصد پوشش گیاهی	امتیاز در مدل FSM
دربند	۸۹٪ مرتع، ۸٪ دیمزار، ۳٪ باغ	عمدتاً مراتع ضعیف با پوشش سنگی کم	۲۵	۲
سعادت‌آباد	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی کم	۲۰	۳
قالیباف ۱	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی کم	۳۰	۲
قالیباف ۲	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی کم	۳۰	۲
قالیباف ۳	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی کم	۳۰	۲
قشلاق	۴۵٪ مرتع، ۵۵٪ برونزد سنگی	مراتع ضعیف با پوشش سنگی بالا	۱۵	۳
کاظم‌آباد ۱	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی کم	۲۵	۲
کاظم‌آباد ۲	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی کم	۲۵	۲
کلا	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی بالا	۳۵	۲
گوشه	۷۶٪ مرتع، ۱۴٪ دیمزار، ۵٪ باغ، ۵٪ برونزد سنگی	عمدتاً مراتع ضعیف با پوشش سنگی بالا	۲۰	۳
معین‌آباد	مرتع	مراتع ضعیف با پوشش سنگی متوسط	۳۰	۲

جدول (۳-۷): امتیاز عامل خندق در حوضه‌های مطالعاتی

نام حوضه	وضعیت فرسایش	شرایط فرسایش	امتیاز در مدل FSM
دریوند	کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش عمیق	بدون خندق یا کم	۱
سعادت‌آباد	در حدود ۸۰ درصد منطقه دارای فرسایش شیاری بدون آثار فرسایش عمیق	تعداد خندق کم و عمق آنها قابل مشاهده	۲
قالیباغ ۱	در حدود ۵۰ درصد منطقه دارای فرسایش شیاری بدون آثار فرسایش عمیق	بدون خندق یا کم خندقی و توده‌ای	۱
قالیباغ ۲	در حدود ۵۰ درصد منطقه دارای فرسایش شیاری بدون آثار فرسایش عمیق	بدون خندق یا کم	۱
قالیباغ ۳	در حدود ۵۰ درصد منطقه دارای فرسایش شیاری بدون آثار فرسایش عمیق	بدون خندق یا کم	۱
قشلاق	سطح زمین فاقد فرسایش قابل‌رؤیت بوده ولی در کنار آبراهه‌ها واریزه وجود دارد.	بدون خندق یا کم	۱
کاظم‌آباد ۱	کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش شیاری	تعداد خندق کم و عمق آنها قابل مشاهده	۱
کاظم‌آباد ۲	کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش شیاری	تعداد خندق کم و عمق آنها قابل مشاهده	۱
کلا	کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش شیاری	تعداد خندق کم و عمق آنها قابل مشاهده	۱
گوشه	کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش شیاری	بدون خندق یا کم	۱
معین‌آباد	۵۰ درصد منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش شیاری	بدون خندق یا کم	۱

جدول (۳-۸): امتیاز عامل زمین‌شناسی در حوضه‌های مطالعاتی

نام حوضه	وضعیت فرسایش	وضعیت فرسایش سنگ	امتیاز در مدل FSM
دریوند	۳۲ درصد اسلیت و سنگ‌آهک کریستالین، ۶۸ درصد پادگانه‌های آبرفتی قدیمی	آهک، ماسه سنگ و گنگلو مرا	۱
سعادت‌آباد	۹۷ درصد شیل و ماسه سنگ ژوراسیک، ۳ درصد سنگ آهک اوریتولین دار	نهشته‌های رسوبی	۲
قالیباف ۱	شیل - اسلیت - شیست	نهشته‌های رسوبی	۲
قالیباف ۲	شیل - اسلیت - شیست	نهشته‌های رسوبی	۲
قالیباف ۳	۷۷ درصد شیل - اسلیت - شیست، ۲۳ درصد پادگانه‌های آبرفتی قدیمی	نهشته‌های رسوبی	۲
قشلاق	۷۸ درصد اسلیت و سنگ‌آهک کریستالین، ۲۲ درصد سنگ‌آهک اوریتولین دار	آهک، ماسه سنگ و گنگلو مرا	۱
کاظم‌آباد ۱	شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک	نهشته‌های رسوبی	۲
کاظم‌آباد ۲	شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک	نهشته‌های رسوبی	۲
کلا	ایگنمبریت - ریولیت	نهشته‌های رسوبی	۱
گوشه	۴۳ درصد شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک، ۱۹ درصد پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، ۳۸ درصد سنگ‌آهک اوریتولین دار	نهشته‌های رسوبی	۲
معین‌آباد	۸۴ درصد شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک، ۱۶ درصد پادگانه‌های آبرفتی قدیمی	نهشته‌های رسوبی	۲

جدول (۳-۹): امتیاز عامل شکل در حوضه‌های مطالعاتی

نام حوضه	محیط حوضه (کیلومتر)	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	ضریب شکل حوضه	امتیاز در مدل FSM
دریوند	۴/۲	۱/۰۱۴۶	۱/۲	۲
سعادت‌آباد	۷/۶	۱/۱۰۳۷	۲	۱
قالیباف ۱	۱/۹	۰/۲۴۶۹	۱/۱	۳
قالیباف ۲	۲/۶	۰/۴۰۲۲	۱/۲	۲
قالیباف ۳	۴/۷	۱/۰۹۹۲	۱/۳	۲
قشلاق	۸/۷	۴/۲۸۷	۱/۲	۲
کاظم‌آباد ۱	۳/۸	۰/۶۲۴۲	۱/۴	۲
کاظم‌آباد ۲	۳	۰/۱۸۴۵	۲	۱
کلا	۶/۵۴	۲/۵۰۹۶	۱/۲	۲
گوشه	۱۴/۶	۵۴۳/۹۷	۱/۸	۱
معین‌آباد	۳/۴	۰/۵۸۲۸	۱/۲	۲

با توجه به امتیاز عامل‌های پنج‌گانه، امتیاز شاخص FSM در جدول ۳-۱۰ آمده است. براساس رابطه اولیه FSM، مقدار رسوبدهی ویژه حوضه‌های مطالعاتی در این جدول آمده است که با توجه به اختلاف بسیار بالای مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده، اصلاح ضرایب مدل ضروری است.

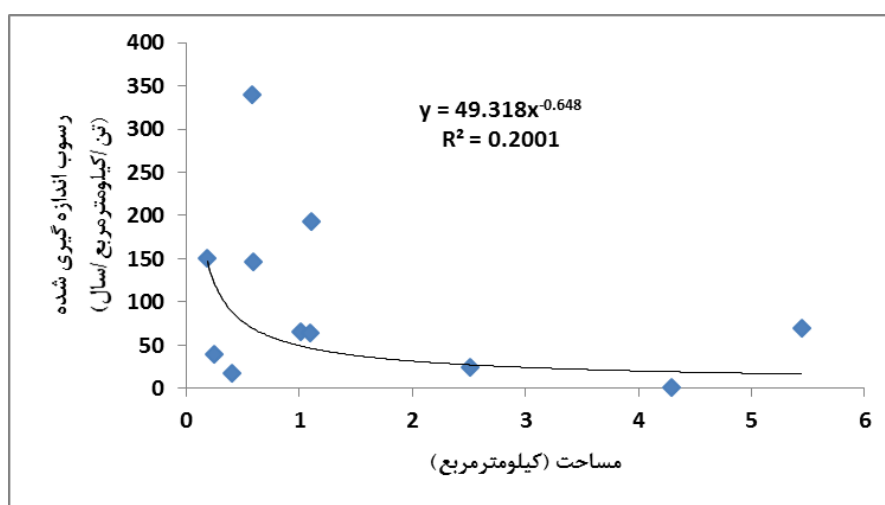
جدول (۳-۱۰): امتیاز شاخص FSM در حوضه‌های مطالعاتی استان مرکزی

نام حوضه	امتیاز شاخص FSM	رسوبدهی ویژه رابطه اولیه مدل FSM (تن در کیلومتر مربع در سال)	رسوبدهی ویژه اندازه‌گیری شده (تن در کیلومتر مربع در سال)
دربند	۱۲	۳۸۹۵	۶۶
سعادت‌آباد	۳۶	۳۹۳۲	۱۹۳
قالیباف ۱	۳۶	۷۶۲۸	۴۰
قالیباف ۲	۲۴	۶۰۵۵	۱۷
قالیباف ۳	۲۴	۳۸۴۶	۶۴
قشلاق	۱۸	۲۰۱۰	۱
کاظم‌آباد ۱	۲۴	۵۰۸۶	۱۴۷
کاظم‌آباد ۲	۱۲	۸۴۸۸	۱۵۰
کلا	۱۲	۲۵۴۳	۲۴
گوشه	۱۸	۱۷۹۳	۷۰
معین‌آباد	۲۴	۵۱۲۶	۳۴۰

همان‌طور که بیان شد، برای تعیین ضرایب اصلاحی a و b معادله نرخ رسوبدهی، از رابطه رگرسیونی توانی استفاده شد. طبق نتایج، در صورت حذف حوضه‌های سعادت‌آباد، گوشه و معین‌آباد، علاوه بر اینکه داده‌ها نرمال خواهند شد، ضریب R^2 رابطه رگرسیونی نیز افزایش می‌یابد (جدول ۳-۱۱ و ۳-۱۲ و شکل‌های ۳-۱ و ۳-۲). لذا در ادامه کار، رابطه باقیمانده رسوب با شاخص FSM برای واسنجی مدل براساس داده‌های هشت حوضه انجام شد (شکل ۳-۳).

جدول (۱۱-۳): آزمون نرمالیت به برای ۱۱ حوضه

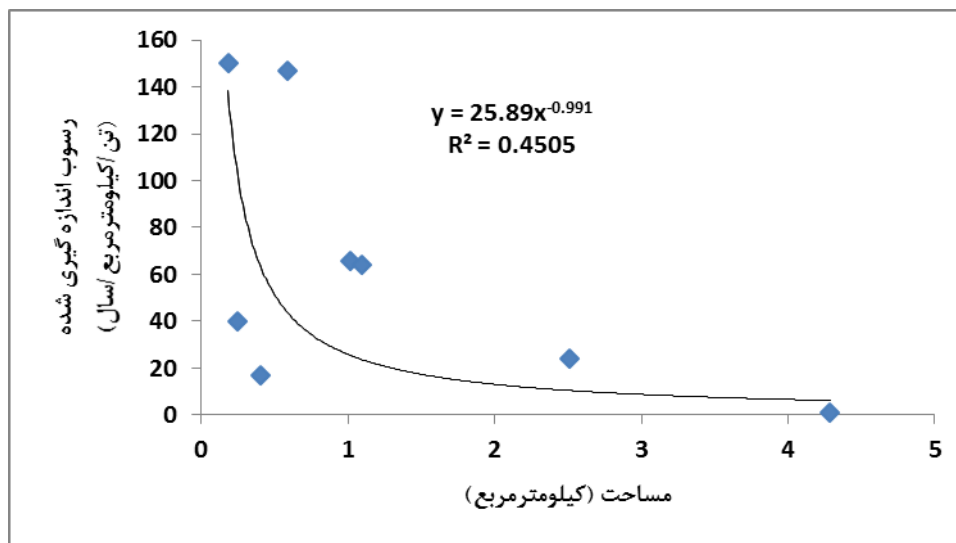
پارامتر	تعداد	کشیدگی		چولگی	
		خطای استاندارد	آماره	خطای استاندارد	آماره
شاخص FSM	۱۱	۱/۲۷۹	۰/۶۲۰	۰/۶۶۱	۰/۸۴۰
مساحت حوضه	۱۱	۱/۲۷۹	۱/۲۹۵	۰/۶۶۱	۱/۵۳۵
رسوب اندازه‌گیری شده	۱۱	۱/۲۷۹	۲/۲۸۳	۰/۶۶۱	۱/۴۸۵
باقیمانده رسوب	۱۱	۱/۲۷۹	۲/۴۱۰	۰/۶۶۱	۱/۶۰۸



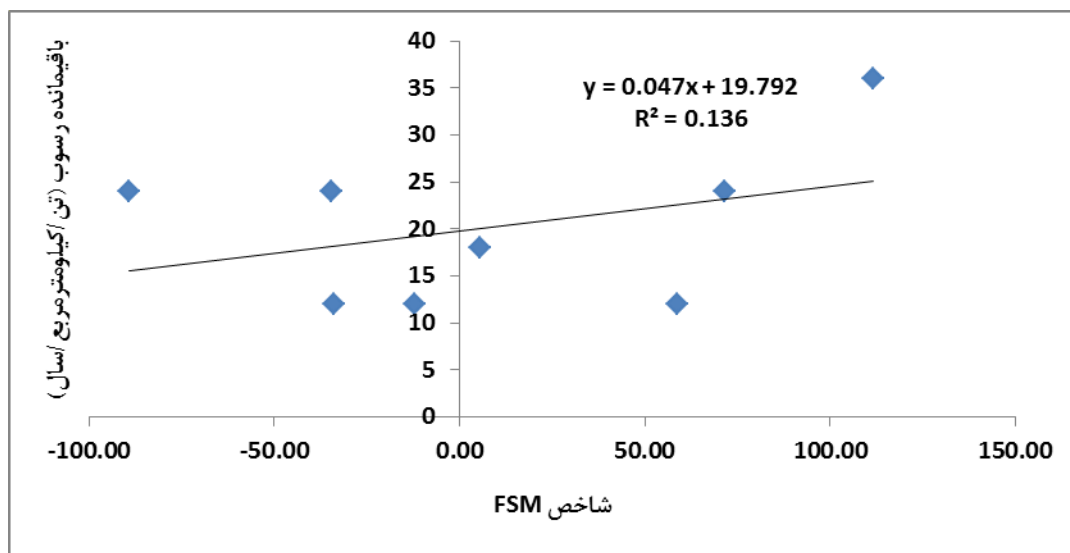
شکل (۱-۳): رابطه مساحت با رسوب اندازه‌گیری شده از ۱۱ حوضه مطالعاتی

جدول (۱۲-۳): آزمون نرمالیت به برای هشت حوضه

پارامتر	تعداد	کشیدگی		چولگی	
		خطای استاندارد	آماره	خطای استاندارد	آماره
شاخص FSM	۸	۱/۴۸۱	۰/۳۴۱	۰/۷۵۲	۱/۰۴۶
مساحت حوضه	۸	۱/۴۸۱	۲/۳۱۸	۰/۷۵۲	۱/۶۶۰
رسوب اندازه‌گیری شده	۸	۱/۴۸۱	-۰/۷۴۲	۰/۷۵۲	۰/۸۳۰
باقیمانده رسوب	۸	۱/۴۸۱	-۲/۲۹۷	۰/۷۵۲	۰/۰۵۳



شکل (۲-۳): رابطه مساحت با رسوب اندازه گیری شده از هشت حوضه



شکل (۳-۳): رابطه شاخص FSM با باقیمانده رسوب از هشت بند مطالعاتی

با توجه به روابط بدست آمده از شکل های (۲-۳) و (۳-۳)، معادله اصلاح شده FSM به صورت رابطه

(۳-۱) است.

$$SSY = 25.89 A^{-0.991} + 0.047 * I_{FSM} + 19.792 \quad (3-1)$$

در این رابطه A مساحت حوضه (کیلومتر مربع)، I_{FSM} شاخص مدل و SSY رسوبدهی ویژه برآوردی مدل FSM (تن در کیلومتر مربع در سال) هست. با استفاده از این رابطه مقادیر رسوب هشت حوضه مطالعاتی محاسبه شد که نتایج در جدول ۳-۱۳ آمده است.

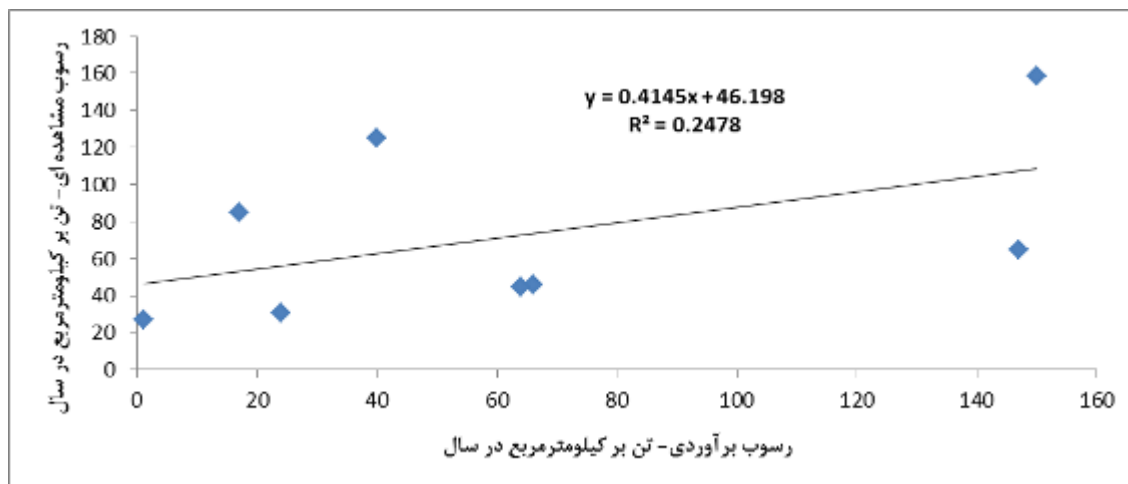
جدول (۳-۱۳): مقادیر رسوب برآوردی با استفاده از مدل FSM و تعیین خطای نسبی

حوضه	رسوب اندازه‌گیری شده (تن/کیلومتر مربع / سال)	رسوب برآوردی قبل از واسنجی مدل (تن/کیلومتر مربع / سال)	خطای نسبی قبل از واسنجی	رسوب برآوردی بعد از واسنجی مدل (تن/کیلومتر مربع / سال)	خطای نسبی بعد از واسنجی
در بند	۶۶	۳۸۹۵	۵۸۰۲	۴۶	-۳۰
قالیبا ۱	۴۰	۷۶۲۸	۱۸۹۷۰	۱۲۵	۲۱۳
قالیبا ۲	۱۷	۶۰۵۵	۳۵۵۱۸	۸۵	۴۰۰
قالیبا ۳	۶۴	۳۸۴۶	۵۹۰۹	۴۴	-۳۱
قشلاق	۱	۲۰۱۰	۲۰۰۹۰۰	۲۷	۲۶۰۰
کاظم آباد ۱	۱۴۷	۵۰۸۶	۳۳۶۰	۶۴	-۵۶
کاظم آباد ۲	۱۵۰	۸۴۸۸	۵۵۵۹	۱۵۹	۶
کلا	۲۴	۲۵۴۳	۱۰۴۹۶	۳۱	۲۹

با توجه به نتایج، قبل از واسنجی، بیشینه خطا با مقدار ۲۰۰۹۰۰ در حوضه قشلاق و کمینه خطا با مقدار ۳۳۶۰ در حوضه کاظم آباد ۱ است. بعد از واسنجی مدل، بیشینه خطا با مقدار ۲۶۰۰ در حوضه قشلاق و کمینه خطا با مقدار ۶ در حوضه کاظم آباد ۲ است. با توجه به نتایج فوق، مدل اصلاح شده FSM، به میزان زیادی از خطای برآورد کاسته است و عملکرد بهتری نسبت به رابطه اولیه داشته است؛ اما اعتماد به مدل واسنجی شده منوط به عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر برآوردی مدل اصلاح شده با مقادیر اندازه‌گیری شده از مخازن بندها هست که طبق نتایج جدول ۳-۱۵، محدوده نرمال (۲+ و ۲-) شاخص‌های چولگی و کشیدگی برای داده‌ها وجود دارد. لذا فرض صفر رد شده و بین مقادیر رسوب مشاهده‌ای و برآوردی اختلاف معنی‌دار وجود ندارد؛ اما برازش برآوردی- مشاهده‌ای داده‌ها بیانگر همبستگی ضعیف است (شکل ۳-۴).

جدول (۳-۱۴): آزمون نرمالیده داده‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردی

معیار	چولگی	کشیدگی
رسوب اندازه‌گیری شده	-۰/۸۳۰	-۰/۷۴۲
رسوب برآوردی بعد از واسنجی مدل	۱/۰۳۰	-۰/۰۵۷



شکل (۳-۴): برازش رسوب برآوردی و مشاهده‌ای در هشت حوضه مطالعاتی

فصل چهارم - بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۴-۱- بررسی وضعیت رسوبدهی حوضه‌های مطالعاتی

مطابق با روش کار، رسوب ۱۱ بند خاکی مورد مطالعه در استان مرکزی با پیمایش‌های صحرایی اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج جدول ۳-۴، کمترین رسوبدهی اندازه‌گیری شده مربوط به حوضه قشلاق با ۱ تن در کیلومترمربع در سال هست. با توجه به بازدهی‌های صحرایی، بیشتر سطح حوضه دارای زمین‌شناسی برونزدهای سنگی و با فرسایش کم هست. علاوه بر این، حاصل ضرب امتیاز عوامل پنج‌گانه مدل FSM در جدول ۳-۱۰ نیز نشان می‌دهد که حوضه قشلاق با امتیاز ۱۸ از امتیاز پایینی در حساسیت به فرسایش برخوردار است.

طبق نتایج جدول ۳-۴، بیشترین رسوبدهی اندازه‌گیری شده مربوط به حوضه معین آباد با ۳۴۰ تن در کیلومترمربع در سال هست؛ اما نتایج جدول ۳-۱۰ نشان می‌دهد که شاخص مدل FSM برای حوضه سعادت‌آباد با مقدار ۳۶ نسبت به سایر حوضه‌ها بالاست. لذا مدل FSM نتوانسته است به‌خوبی رسوبدهی حوضه سعادت‌آباد را که از رسوبدهی بالایی برخوردار است نشان دهد.

۴-۲- بررسی کارایی مدل FSM

مطابق با روش کار، پس از تعیین امتیاز شاخص FSM، رسوب برآوردی ۱۱ حوضه مطالعاتی برآورد شد. آنچه نتایج نشان داد، رابطه اولیه FSM نتوانست در برآورد رسوبدهی عملکرد قابل قبولی داشته باشد. به‌طوری‌که رسوب برآوردی مدل به‌مراتب چندین برابر بیشتر از رسوب اندازه‌گیری شده بود. طبق جدول ۳-۱۴، در این حالت خطای نسبی نشان داد که قبل از واسنجی، بیشینه خطا با مقدار ۲۰۰۹۰۰ در حوضه قشلاق و کمینه خطا با مقدار ۳۳۶۰ در حوضه کاظم آباد ۱ است.

به‌منظور اصلاح ضرایب مدل، از روابط رگرسیونی در دو بخش استفاده شد که با برازش این روابط مشخص شد که داده‌های حوضه سعادت‌آباد، حوضه گوشه و حوضه معین‌آباد بایستی به‌منظور عدم

وجود داده‌های پرت، حذف شوند. رابطه رگرسیونی توانی بین عامل مساحت حوضه با رسوب اندازه‌گیری شده در ۸ بند مورد مطالعه بیانگر همبستگی متوسط ($R^2=0.4505$) بین این دو پارامتر است که نسبت به حالتی که ۱۱ حوضه در نظر گرفته شده بود ($R^2=0.192$)، بهبود یافته است. این رابطه منفی است و بیان می‌کند که مساحت با رسوبدهی ویژه رابطه عکس دارد. در مورد رابطه رگرسیونی خطی بین باقیمانده رسوب با شاخص FSM در هشت بند مورد مطالعه نیز نتایج بیان می‌کند که با افزایش مقادیر شاخص FSM، باقیمانده رسوب نیز افزایش می‌یابد. بر این اساس معادله اصلاح شده FSM واسنجی شد.

در بحث ارزیابی مدل اصلاح شده FSM، طبق نتایج جدول ۳-۱۴، بعد از واسنجی مدل، بیشینه خطا با مقدار ۲۶۰۰ در حوضه قشلاق و کمینه خطا با مقدار ۶ در حوضه کاظم‌آباد ۲ است. اما با برازش داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی به صورت رابطه دودویی (برآوردی - مشاهده‌ای) تک تک حوضه‌ها، عملکرد مدل اصلاح شده FSM پایین بوده است؛ بنابراین کاربرد مدل برای یک حوضه می‌تواند بیش تخمینی و یا کم تخمینی قابل توجهی را به وجود آورد.

۴-۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از داده‌های رسوب اندازه‌گیری شده از ۱۱ بند مطالعاتی در استان مرکزی، اقدام به محاسبه رسوبدهی ویژه حوضه‌های بالادست شد. سپس به منظور واسنجی مدل FSM که در مقایسه با سایر مدل‌های تجربی نظیر MPSIAC و EPM روشی جدید است (Verstraeten و همکاران، ۲۰۰۳)، مقادیر رسوبدهی با این مدل در حالت اولیه ضرایب برآورد شد که نتایج معیارهای ارزیابی حاکی از عدم کارایی مدل داشت. بدین منظور با استفاده از روابط رگرسیونی، ضرایب چهارگانه مدل اصلاح شد که به منظور افزایش صحت و دقت روابط رگرسیونی، حوضه‌های سعادت‌آباد، معین آباد و گوشه حذف شدند. لذا مدل براساس داده‌های هشت بند مطالعاتی واسنجی شد و مشکل قبلی برطرف شد. نتایج رسوبدهی برآوردی نیز با این که نشان داد مدل واسنجی شده

عملکرد خیلی بهتری نسبت به قبل از واسنجی دارد، ولی همبستگی ضعیف بین مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای تک‌تک حوضه‌ها دیده شد؛ بنابراین مدل اصلاح‌شده FSM به‌طور میانگین برای چند حوضه کارایی خوبی داشته است ولی در مورد یک حوضه منفرد بیش تخمینی و کم تخمینی وجود دارد. به‌طوری‌که در حوضه قشلاق با رسوب مشاهده‌ای ۱ تن در کیلومترمربع در سال، رسوب برآوردی از مدل اصلاح‌شده FSM برابر ۲۷ تن در هکتار در سال بود که این ضعف مدل را نشان می‌دهد. در این زمینه عواملی نظیر عدم تناسب بین رسوب اندازه‌گیری شده با شاخص FSM نقش دارند. بطوریکه مثلاً حوضه قالیباف ۱ بیشترین شاخص FSM را نشان داد، درحالی‌که رسوب اندازه‌گیری شده این حوضه از بیشتر حوضه‌های مطالعاتی پایین‌تر بود.

به‌منظور واسنجی ضرایب مدل، از روابط رگرسیونی توانی و خطی استفاده شد که به‌منظور افزایش صحت و دقت همبستگی داده‌ها به‌ناچار سه حوضه حذف شدند. همچنین با استفاده از خطای نسبی، به ارزیابی مدل پرداخته شد. طبق نتایج، میانگین خطای نسبی قبل از واسنجی برابر ۳۵۸۱۴ بدست آمد که مقدار بالایی است. اما پس از واسنجی مدل، این خطا به مقدار ۳۹۱ کاهش یافت که افزایش دقت و صحت مدل واسنجی‌شده نسبت به حالت اولیه مدل را نشان می‌دهد؛ اما برآزش بین رسوب مشاهده‌ای و برآوردی همبستگی ۰/۲۴۸ را نشان داد که از این حیث، مدل FSM برای برآورد رسوبدهی یک حوضه منفرد از کارایی قابل‌قبول برخوردار نبود.

با توجه به نتایج بررسی‌ها از خطای نسبی، کارایی مدل اصلاح‌شده FSM تأیید شد که با تحقیقات Verstraeten و همکاران (۲۰۰۳)، De Vente و همکاران (۲۰۰۶)، Atapourfard و همکاران (۲۰۱۲)، محمدی‌ها و همکاران (۱۳۹۰) و نبی‌پی لشکریان و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد؛ اما براساس با مقایسه‌های دودویی، عملکرد مدل FSM در یک حوضه با ضعف روبروست. نتایج تحقیقات Haregeweyn و همکاران (۲۰۰۵) به تطابق نامناسب‌تری مدل FSM نسبت به مدل MPSIAC اشاره داشته‌اند. هرچند عرب‌خداری (۱۳۸۰) و De Vente و همکاران (۲۰۱۳)، استفاده از آمار مشاهده‌ای از

رسوبات نهشته شده در بندها، سدها و سایر مخازن را دقیق تر از سایر روش ها در بررسی رسوبدهی عنوان کرده اند، اما طبق نظر Meshesha و همکاران (۲۰۱۱) به کارگیری پارامترهای بیشتر از جمله بارش می تواند در افزایش همبستگی مقادیر برآوردی و مشاهده ای و در نهایت در افزایش صحت و دقت مدل مؤثر باشد. علی رغم نتایج متفاوت همانگونه بعضی منابع هم اشاره کردن، بعلت سادگی این این مدل نسبت به مدلهای با عوامل زیاد جای بررسی و دقت نظر بیشتر دارند (Rodríguez Bachiller و همکاران، ۲۰۱۹؛ Zoboli و همکاران، ۲۰۲۰؛ Berihum و همکاران، ۲۰۲۵).

۴-۴- پیشنهادها

برای واسنجی مدل های تجربی، اندازه گیری مستقیم رسوب ورودی به مخازن بندها و سدها مبنای واسنجی قرار گیرد و تا حد امکان از کاربرد منحنی سنج رسوب پرهیز شود. در این زمینه تعیین نسبت بارکف به معلق در محاسبات نیز ضروری است.

- در مورد نحوه واسنجی مدل FSM تحقیقات بیشتری صورت گیرد تا بتوان به روش قابل

قبولی در این زمینه دست یافت. در این زمینه به کارگیری پارامترهای بیشتر نظیر دبی

جریان، اقلیم و اقدامات حفاظتی نیز در این زمینه مؤثر است.

به منظور مقایسه بهتر، بهتر است در کنار استفاده از مدل FSM، مدل های تجربی دیگر نظیر

MPSIAC و EPM نیز به کار گرفته شوند تا با تعیین مدل بهینه، اقدام به تصمیم گیری های مدیریتی

داشت.

پیشنهاد می شود برای واسنجی مدل FSM تا حد امکان از حوضه های همگن استفاده کرد. در این

زمینه استفاده از تحلیل های عاملی و خوشه ای می تواند به گروه بندی داده ها براساس تعدد ویژگی های

مختلف حوزه های آبخیز بپردازد.

منابع

- داودی‌راد، ع.ا.، صوفی، م.، ابراهیمی، ن.، عظیمی، ر.، نجیمی، ا. ۱۳۸۷. طبقه‌بندی مورفوکلیماتیک خندق‌های استان مرکزی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران. ۲۳۰ ص.
- عبدالله‌زاده، غ.، جهانگیر، ل.، شریف‌زاده، م.ش. ۱۳۹۷. بررسی آگاهی از پیامدهای فرسایش خاک و راهبردهای حفاظتی در نواحی روستایی حوضه آبخیز چهل‌چای گلستان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۹(۱): ۱-۲۰.
- عرب‌خداری، م. ۱۳۸۰. تعیین نسبت بارکف به معلق از طریق رسوب‌سنجی مخزن و دانه‌بندی رسوبات. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۲(۶): ۸۱-۶۹.
- محمدی‌ها، ش.، پیروان، ح.ر.، موسوی حرمی، ر.، فیض‌نیا، س.، بیات، ر. ۱۳۹۰. بررسی میزان فرسایش و تولید رسوب حوزه آبخیز ایوانکی با استفاده از مدل‌های FSM و MPSIAC و ایستگاه رسوب‌سنجی، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۴۵(۲۷): ۴۸-۳۱.
- نبی‌پی لشکریان، س.، هاشمی، س.ع.ا.، شادفر، ص. ۱۳۹۲. بررسی کارایی مدل FSM برای برآورد رسوبدهی کل در استان سمنان، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۵۱(۱): ۵۸-۵۱.
- نوحه‌گر، ا.، کاظمی، م.، احمدی، س.ج.، غلامی، ح.، مهدوی، ر. ۱۳۹۵. تعیین مناسب‌ترین روش اصلاحی برآورد باررسوب معلق (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تنگ بستانک). اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۷(۳): ۶۷-۸۲.
- هروی، ح. و نظری سامانی، ع.ا. ۱۳۹۱. کاربرد مدل FSM در برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب مطالعه موردی: حوزه آبخیز کن، اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، ۷ص.
- Amini, A., Khaledian, H., & Shafaei, H. 2021. Field evaluation of soil erosion yield and the FSM model efficiency in Zarivar lake basin, Kurdistan, Iran. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(4): 584-594.
- Atapourfard, A., Moradi Sharaf, M. and Shoaie, G. 2012. The application of FSM model for the prediction of sediment yield in Tehran basin, *Nature and Science*, 10(9): 105-112.
- Bachiller, A. R., Rodríguez, J. L. G., Sánchez, J. C. R., & Gómez, D. L. 2019. Specific sediment yield model for reservoirs with medium-sized basins in Spain:

an empirical and statistical approach. *Science of the Total Environment*, 681: 82-101.

- Berihun, M. L., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Bayabil, H. K., Fenta, A. A., Meshesha, T. M., ... & Vanmaercke, M. 2025. Unveiling gully erosion susceptibility: A semi-quantitative modeling approach integrated with field data in contrasting landscapes and climate regions. *Geomorphology*, 468: 109485.
- Das, A., Gupta, A. K., Remesan, R. 2020. Sediment deposition and distribution modelling in reservoirs: current trends and prospects. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 173(4): 172-188.
- De Vente, J., J. Poesen, Verstraeten, G. 2005. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of sediment yield in Spain. *Journal of Hydrology*. 305: 63-86.
- De Vente, J., Poesen, J. 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews* 71: 95–125.
- De Vente, J., J. Poesen., P. Bazzoffi., A. van Rompaey, Verstraeten, G. 2006. Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: the importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins. *Earth Surface Processes and Landforms*. 31. 1017-1034.
- De Ventea, J., Poesenc, J., Verstraetenc, G., Goversc, G., Vanmaerckec, M., Van Rompaeyc, A., Arabkhedrie, M., and Boix-Fayosa, C. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? *Earth-Science Reviews*, 127: 16-29.
- Hadley, R. F., Lal, R., Onstad, C. A., Walling, D. E. and Yair, A. 1985. Recent developments in erosion and sediment yield studies. UNESCO. Paris. 127 p.
- Haregeweyn, N., J. Poesen, J. Nyssen, G. Verstraeten, J. D. Vente, G. Govers, S. Deckers, J. Moeyersons, J. 2005. Specific sediment yield in Tigray-Northern Ethiopia: Assessment and semi-quantitative modeling. *Geomorphology*. 69: 315-331.
- Karalis, S., Karymbalis, E., & Mamassis, N. 2018. Models for sediment yield in mountainous Greek catchments. *Geomorphology*, 322: 76-88.
- Meshesha, D.T., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Haregeweyn, N. 2011. Spatial analysis and semi-quantitative modeling of specific sediment yield in six catchments of the central rift valley of Ethiopia. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9 (3&4):784-792.

- Valero, C., Alonso, C., De Miguel, R. J., Fernandez-Delgado, C., & de Jalon, D. G. 2017. Response of fish communities in rivers subjected to a high sediment load. *Limnologica*, 62: 142-150.
- Verstraeten, G., J. Poesen, J. de Vente Koninckx, X. 2003. Sediment yield variability in Spain: A quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*. 50 (4): 327–348.
- Woodward, J.C., 1995, Patterns of erosion and suspended sediment yield in Mediterranean river basins, In: Foster, I.D.L., A.M Gurnell, and B.W. Webb: 365-389.
- Zoboli, O., Hepp, G., Krampe, J., Zessner, M. 2020. BaHSYM: Parsimonious Bayesian hierarchical model to predict river sediment yield. *Environmental Modelling & Software*, 131: 104738.

Abstract:

Accelerated soil erosion and the transport of large amounts of sediment are important problems in many regions of Iran. To reduce the adverse effects of this problem through soil conservation and watershed management measures, it is necessary to know the rate of soil erosion and sediment production. Given the lack of measuring stations at the outlet of small watersheds, empirical models are a suitable tool for estimating erosion and sedimentation. One of these methods, which was developed based on sediment data from Mediterranean regions, is the FSM empirical model. Accordingly, in this study, the FSM model was calibrated through sediment measurements of 11 small dams of 10 years old with no overflows in Markazi Province. The first, sedimentation of each dam reservoir was measured by GPS and thickness of deposition profiles, specific weight. Then using GIS and scoring table, FSM model parameters were determined for each watershed. For calibration in model coefficients was used the power and linear regression that for increase in correlation accuracy, tree watersheds were removed and calibrated according to 8 watersheds was performed. Finally, using relative error the model was evaluated. As a result, relative error average in base model is high an equal to 35814; but in calibrated model is low as 391. Therefore the accuracy of calibrated model is high then initial state of the model. But based on fitting between observed and estimated sediment, R^2 was 0.248 that showed FSM model to estimate sediment yield in a single watershed is not acceptable. Therefore, it is essential that experts use calibrated models in their studies and implementation of watershed management and water resources, taking into account regional conditions.

Keywords: FSM Model, Markazi Province, Performance criteria, Sediment Yield, Soil Erosion.

Ministry of Jihad- e- Agriculture
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Agricultural & Natural Resources Research and Education Center of
Markazi province

Title: Evaluation of the efficiency of the FSM empirical model in small basins of Markazi Province

Authors: Ali Akbar Davudirad, Saeed Nabipay Lashkarian

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Page Layout: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Institute

Circulation: 10 Copies

Date of Publishing: Autumn 2025

This Scientific work has been registered with the series number of **68242** at the date of **2025-11-01** in the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No Part of this Publication may reproduce or transmitted without the original reference.

**Ministry of Jihad- e- Agriculture
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Agricultural & Natural Resources Research and Education Center of
Markazi province**

Technical Report:

Evaluation of the efficiency of the FSM empirical model in small basins of
Markazi Province

Authors:

Ali Akbar Davudirad, Saeed Nabipei Lashkarian

Series Number: 68242

2025



Ministry of Agriculture - Jihad

Agriculture Research, Education and Extension Organization

Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Agricultural and natural resources research and training center of Markazi province



Technical Report

Evaluation of the efficiency of the FSM empirical model in small basins of Markazi Province

Authors:

Ali Akbar Davudirad, Saeed Nabipei Lashkarian

Series Number: 68242

2025