دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال هجدهم، شماره‌ی ۶۴
زمستان ۱۳۹۷، صفحات ۲۴۹-۲۳۵

*علیرضا حبیبی [۱]
محمدرضا غریب رضا [۲]

کاربرد مدل ریاضی در شبیه‌سازی و اولویت‌بندی سازندهای حساس در اقلیم نیمه‌خشک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۸

چکیده

فرسایش خاک از چالش‌های پیش‌روی مدیران و برنامه‌ریزان در سطح حوضه‌های آبخیزاست. استفاده از مدل‌سازی همواره به‌عنوان راهکار مناسب اقتصادی، ابزاری توانمند در شناسایی مناطق حساس به فرسایش است. این مطالعه باهدف شبیه‌سازی و اولویت‌بندی زیر حوضه‌های حساس به فرسایش با استفاده از مدل ریاضی سوات در سازندهای حساس البرز مرکزی در شمال گرمسار (حوضه حبله رود) اجرا گردیده است. پس از بازدید میدانی و تهیه اطلاعات پایه اقدام به شبیه‌سازی رسوب با استفاده از مدل سوات برای یک دوره سی‌ساله (۲۰۱۱-۱۹۸۱) گردید. سپس در محیط سوات-کاپ اقدام به کالیبراسیون مدل برای یک دوره ده‌ساله و صحت سنجی سه‌ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۸) گردیده است. برای ارزیابی مدل از معیارهای آماری ضریب تعیین، ضریب کارایی ناش ساتکلیف استفاده گردیده است. شاخص ناش ساتکلیف برای تخمین دبی رسوب در مرحله واسنجی ۰/۵۸ و صحت سنجی ۰/۵۱ بوده که نشان از دقت قابل‌پذیرش مدل بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی است. پس از اجرای مجدد مدل با پارامترهای حساس محاسبه شده، مقدار میانگین سالانه رسوب ویژه زیر حوضه‌ها تعیین گردید. سپس به‌منظور ارزیابی، از دستگاه شبیه‌ساز باران برای ایجاد تک واقعه بارش بر روی سازندهای حساس در زیر حوضه بحرانی استفاده شده است. در نهایت زیر حوضه های بحرانی ۱۹، ۲۰ و ۲۱ با رسوب ویژه ۱۵،۱۷ و ۲۳ تن در هکتار به‌عنوان زیر حوضه بحرانی برای عملیات آبخیزداری و مدیریتی معرفی گردید.

کلید واژه‌ها: اقلیم نیمه‌خشک، سازندهای حساس، شبیه‌سازی، رسوب، مدل سوات.

*۱- دکتری ژئومورفولوژی و محقق پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.(نویسنده مسئول). E-mail: Habibi1354@yahoo.com
۲- گروه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

مقدمه

پژوهش در زمینه روش‌های مدیریت منابع آب‌وخاک نیازمند فنونی است که توان و امکان دورنگری، پیش‌بینی و نیز درک و بیان فرآیندهای پیچیده و پویا را فراهم نماید. ناکارآمد بودن نگرش تک‌بعدی و لزوم جامع‌نگری در اتخاذ بهترین تصمیم‌ها و شیوه‌های مدیریتی از یک طرف وناهمگنی موجود در حوضه‌های آبریز و غیرخطی بودن رفتارهای هیدرولوژیکی و فرسایشی از طرف دیگر، شناخت کامل روابط موجود در حوضه‌ها را، بسیار پیچیده و مشکل می‌سازد (Khalifehi Sigaraudi et al, 2009: 180). در ارزیابی و بررسی این سامانه‌ها، اندازه‌گیری که قابل اعتمادترین وسیله است به‌تنهایی قادر به کشف روابط پیچیده موجود در سیستم آبریزها نیست، در نتیجه مدل‌سازی صورت می‌گیرد. لذا، فنون و روش‌های "شبیه‌سازی این سامانه‌ها با بهره‌گیری از مدل‌ها در محیط توانمند GIS" اهمیت خاصی می‌یابند (Buther et al, 1998: 32). تاکنون تحقیقات بسیاری توسط دانشمندان در زمینه فرسایش انجام شده که از آن جمله، می‌توان به مدل‌های تجربی در برآورد شدت و میزان فرسایش آبی اشاره نمود (Habibi, 2017: 30). مدل SWAT برای پیش‌بینی اثرات فعالیت‌های مدیریتی بر ایجاد و میزان رسوب در مقیاس حوضه آبخیز با تنوع خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی در بازه زمانی طولانی توسعه یافته است (Neitsch et al, 2005: 352) . این مدل اطلاعات ویژه‌ای راجع به هوا، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی در حوضه دریافت می‌کند و در آن فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوب، رشد گیاه و ... مستقیماً با استفاده از داده‌های ورودی شبیه سازی می‌گردد. این مدل از نظر محاسباتی کارآمدی مناسبی دارد و کاربران را قادر به شبیه‌سازی طولانی‌مدت می‌نماید. Gholami et al (2003: 29) گزارش داد که تخمین ماهانه و سالانه رسوب به‌وسیله مدل SWAT بهتر از مقیاس روزانه است و به عقیده ایشان، وجود داده‌های بلندمدت و با کیفیت بالای بار معلق در شرایط کم‌آبی و طغیانی می‌تواند باعث بهبود کارایی مدل در مقیاس روزانه شود (Tripathi et al, 2004: 1811). در مطالعه‌ای که در شرق هند برای اندازه گیری مقدار رواناب و رسوب در حوزه کوچک کشاورزی انجام دادند از مدل SWAT استفاده شده است. برای ارزیابی کارایی مدل از ضریب R^2 استفاده شده و مقدار این ضریب در شبیه‌سازی باران ۰/۹٤، برای رواناب ۰/۷۹۷ برای رسوب ۰/۸۰۷ به‌دست آمد. برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب دو حوضه آبخیز بهشت‌آباد و ونک در شمال حوزه کارون مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها برای واسنجی وآنالیزحساسیت مدل از برنامه SUFI-2 که یک رابط برای مدل SWAT است استفاده کردند. در این بررسی یک واسنجی و بررسی عدم قطعیت خوب ارائه شد، مقادیر رواناب برآورد شده کاملاً به مقادیر مشاهده شده شبیه بودند (Rostamian et al, 2008: 977). باهدف مقایسه مدل SWAT و شبکه عصبی در شبیه‌سازی رسوب، مطالعه‌ای را در حوضه آبخیز کسلیان انجام دادند که نتایج آن‌ها حاکی از دقت بالای مدل نسبت به شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی رسوب بود (Talebizadeh et al, 2008: 1747).

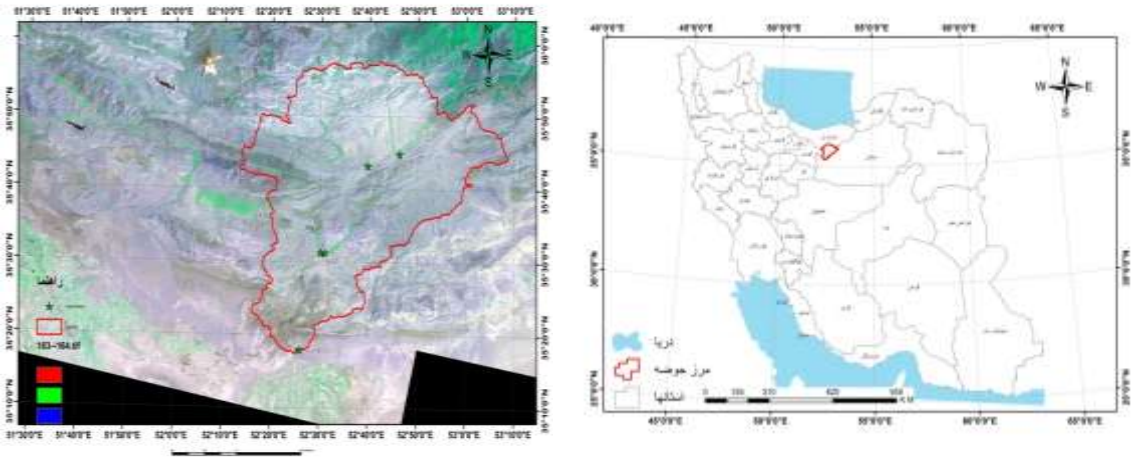
جمع‌بندی تحقیقات انجام شده در داخل و خارج ایران نشان می‌دهد که مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی رسوب حوزه‌های آبخیز کوچک و بزرگ از کارایی مختلفی در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه برخوردار است. برآورد فرسایش و رسوب در این مدل برای هر HRU با معادله جهانی اصلاح شده برای تخمین هدر رفت خاک (MUSLE)

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

برآورد می‌شود. مزیت‌های MUSLE نسبت به USLE افزایش صحت برآورد، برطرف شدن نیاز به نسبت رسوب‌گذاری و میسر شدن برآورد تولید رسوب برای تک رگبارها است. در این پژوهش، فرض بر این است که کاربرد مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رسوب، بر اساس شناسایی پارامترهای حساس مدل از طریق آنالیز حساسیت و شبیه‌سازی دبی رسوب با استفاده از الگوریتم SUFI2 و مشخص کردن زیرحوضه‌های بحرانی ازنظر میانگین سالانه رسوب ویژه در حوضه آبخیز حیله رود اولویت‌بندی آن‌ها برای انجام اقدامات مدیریتی و حفاظت خاک در آینده است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه حیله رود در حاشیه جنوبی البرز مرکزی بین ۵۲ درجه ۱۲ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. از نظر تقسیمات کشوری در استان تهران و شهرستان‌های فیروزکوه و نمرود قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت حوضه مورد مطالعه در ایران

Figure 1: Location of the study basin in Iran

مساحت حوضه مورد مطالعه ۳۲۳۵ کیلومترمربع است. بلندترین نقطه ارتفاعی این حوضه ٤۰۰۰ متر و حداقل ارتفاعی آن ۱۰۰۰ متر از سطح دریا است. حوزه آبخیز حبله‌رود به لحاظ برخورداری از دو اقلیم متفاوت به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم‌بندی گردیده است. حوضه آبخیز حبله‌رود شمالی در محدوده مورد مطالعه قرارگرفته است. از نظر فرسایش آبراهه‌ای دارای فرسایش با شدت زیاد و خیلی زیاد است. حوضه حیله رود دارای ٤ ایستگاه رسوب سنجی مهم شامل دلیچای، سیمین دشت، فیروزکوه و نمرود است. مهم‌ترین ایستگاه رسوب سنجی در خروجی حوضه با دوره آمار بلندمدت دبی (۱۳۹۰-۱۳۲۷)، ایستگاه بنکوه است. حداکثر دمای میانگین ۲٤/۷ درجه و حداقل مطلق دما ۹/٦- در ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه ثبت گردیده است. واحدهای زمین‌شناسی این حوضه در محدوده زمانی کامبرین تا کواترنری قرار دارند و مربوط به سازندهای لالون، زایگون، بایندر، کهر، مبارک، الیکا، پالند، شمشک، لار، دلیچای،

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

تیزکوه، کند، کرج، فاجان، زیارت، قرمز تحتانی، قم، قرمز فوقانی، کهریزک، آبرفت تهران و ولکانیک‌های دماوند می‌باشند. سنگ‌شناسی غالب عبارت است از آهک، مارن، شیل و ماسه‌سنگ، توف و آبرفت است.

در حوضه حیله رود شاهد حضور اشکال فرسایش (شکل ۲) و تغییرات کاربری‌ها به‌صورت چشمگیری هستیم همچنین حضور مارن‌ها در قسمت جنوبی حوضه خودنمایی می‌کنند. در این تحقیق بایستی زیر حوضه‌های حساس و میزان رسوب هر زیر حوضه با استفاده از مدل سوات مشخص گردد. تا برنامه‌ریزان در اولویت‌بندی زیر حوضه از نتایج این تحقیقات استفاده کنند.



شکل ۲: اشکال فرسایشی در جنوب حوضه بر روی سازند مارنی

Figure 2: The erosion forms in the south of the basin on Marne Formation

مواد و روش‌ها

روش کار در این تحقیق بر پایه روش تحلیلی محاسباتی مبنی بر مدل کامپیوتری و بررسی‌های میدانی همراه با استفاده از شبیه‌ساز باران صحرایی استوار است. بر این اساس ابتدا نقشه‌های پایه شامل کاربری اراضی، خاک‌شناسی و طبقات ارتفاعی[۳] (DEM) به همراه آمار بارش و دمای بلندمدت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه حبله رود تهیه گردید. سپس کدها دیتابیس‌های مورد نیاز مدل آماده می‌گردد. در محیط آرک سوات[۴] زیر حوضه ها با دستور جدا سازی زیرحوضه‌ها[۵] تعیین گردید. اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک و داده‌های بارش و دما اندازه‌گیری شده به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. در ادامه با در نظر گرفتن سه سال اولیه به‌منظور گرم کردن[۶] مدل، اقدام به شبیه‌سازی مدل برای سال‌های (۲۰۱۱-۱۹۸۱) گردید. خروجی شبیه‌سازی به محیط نرم‌افزار سوات-کاپ برده و مراحل واسنجی و صحت سنجی بر اساس پارامترهای حساس انجام گردیده است. از شاخص‌های آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده‌شده

3- Digital Elevation Models (DEM)
4- Arc_Swat
5- Watershed Delineator
6-Warm-up (NYSKIP)

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

است. مقادیر بهینه مجدد وارد مدل گردیده و میزان رسوب ویژه هر زیر حوضه تعیین شده است. سپس با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز باران صحرایی به زیر حوضه بحرانی مراجعه نموده و با ایجاد باران مصنوعی میزان رواناب و رسوب سازندهای حساس، در بطری‌های نمونه جمع‌آوری گردیده است. سپس نمونه به آزمایشگاه حفاظت خاک و آبخیزداری انتقال داده شده تا میزان دقیق رواناب و رسوب تعیین شود. سرانجام با استفاده از فن روی‌هم گذاری لایه‌ها مقدار رسوب در زیر حوضه بحرانی مورد تحلیل قرار گرفت تا نتایج یک مدل ریاضی با کارهای میدانی و آزمایشگاهی مورد آزمون مجدد قرار گیرد. تا صحت اولویت‌بندی مورد تایید مجدد واقع گردد. نقشه اولویت‌بندی در هر زیر حوضه از لحاظ رسوب ویژه در ادامه آورده شده است.

الف – نرم‌افزار فیزیکی پایه SWAT

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی از مدل سوات، یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوضه‌ای بوده که به‌منظور پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی، مواد شیمیایی و بیلان آبی در حوضه‌هایی با خاک و کاربری اراضی متفاوت، برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است. این مدل، به‌صورت گسترده، در کشورهای آمریکایی و اروپایی به‌کار می‌رود و کارایی آن به اثبات رسیده است. مدل سوات، برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز پیچیده و وسیع، با توجه به تغییرات خاک، کاربری اراضی و شرایط آب و هوایی مختلف، در دوره‌های طولانی‌مدت به کاربرمی رود. این مدل، ازنظر محاسباتی کارآمدی مناسبی دارد و دارای قابلیت اتصال به سامانه‌های GIS است. مدل سوات، با دریافت داده‌های ورودی، نظیر هواشناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک، به‌صورت لایه‌های اطلاعاتی، فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز را به شکل پیوسته شبیه‌سازی می‌کند. یکی از مزایای مدل سوات، قابلیت شبیه‌سازی آن در حوضه‌های فاقد داده‌های برداشت شده است؛ همچنین، شبیه‌سازی در حوضه‌های بزرگ و پیچیده و با راهکارهای مختلف مدیریتی، بدون صرف زمان زیادی یکی دیگر از قابلیت‌های این مدل محسوب می‌شود. (Abbas Pour et al, 2007: 413)، به دلیل وجود خطاهای اندازه‌گیری در ورودی مدل و تأثیر آن در خروجی‌اش، همچنین وجود خطا در ساختار مدل و حجم بسیار زیاد پارامترها که در مدل‌های توزیعی وجود دارد (که معمولاً قابل شناسایی نیستند)، واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک بسیار مشکل است. معمولاً برای واسنجی مدل‌ها، از روش مدل‌سازی معکوس استفاده می‌شود. مدل سوات با برنامه سوات _ کاپ، روش SUFI-2 را برای ارزیابی مدل در اختیار گذاشته است. روش SUFI-2، تمام عدم قطعیت‌ها را در مدل‌سازی، شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرد.

– معیارهای ارزیابی مدل

فرآیند ارزیابی کارایی مدل نه‌تنها در جریان توسعه مدل و فرآیند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققان نیز از اهمیت اساسی برخوردار است (Schaefli & Gupta, 2007: 2075). شاخص‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

برای ارزیابی کمی عملکرد مدل نتایج مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، در این تحقیق با استفاده از پارامترهای آماری R^2 (ضریب همبستگی)، bR^2 (ضریب همبستگی وزنی)، NS (نش-ساتکلیف) مورد ارزیابی قرار گرفت.

- ضریب همبستگی (R^2):

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\overline{O})(Pi-\overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\overline{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Pi-\overline{P})^2}}\right)$$

که n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشند، $\overline{O}$ و $\overline{P}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشند. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند.

- ضریب همبستگی وزنی (br^2)

شاخص R^2 به تنهایی نمی‌تواند تطابق داده‌های محاسباتی و مشاهداتی را به‌درستی نشان دهد. اگر همراه با R^2 معادله خط همبستگی (y=bx+a) نیز مدنظر قرار گیرد، تطابق بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بهتر نشان داده خواهد شد. یک تطابق ۱۰۰٪ فقط زمانی وجود دارد که مقدار عرض از مبدأ خط همبستگی صفر و مقدار شیب آن نیز یک باشد (یعنی خط y=x). شاخص br^2 یا ضریب همبستگی وزنی این مسئله یعنی شیب‌خط همبستگی را نیز مد نظر قرار می‌دهد.

- ضریب نش_ساتکلیف (NS): مقدار NS از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱ (خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد. رابطه NS به‌قرار زیر است (Neitsch et al, 2005: 352).

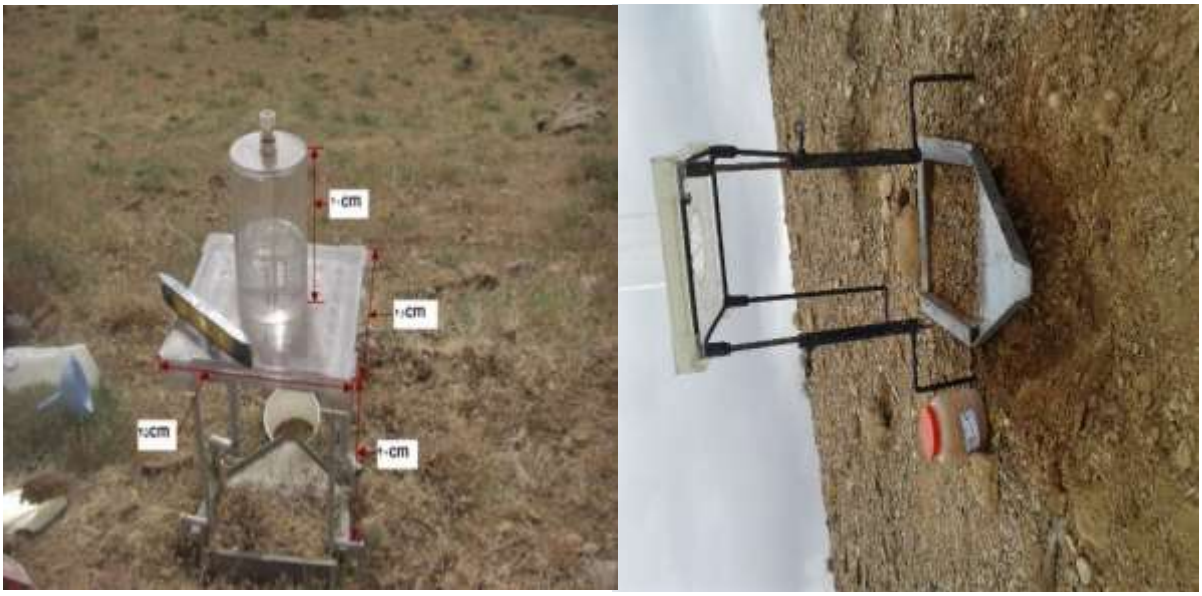
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2}$$

در این رابطه O مقدار دبی اندازه‌گیری شده و P مقدار دبی شبیه‌سازی شده می‌باشد.

ب- شبیه‌ساز باران صحرایی

برای اندازه‌گیری رواناب رسوب از دستگاه باران ساز قابل‌حمل صحرایی ساخته شده در دانشگاه کشاورزی واگنی گن هلند استفاده شده است. شکل زیر استفاده از باران ساز را در صحرا را نشان می‌دهد. این باران‌ساز در هر دو شرایط آزمایشگاهی و صحرایی برای مطالعات فرسایش خاک قابل استفاده است. در روش آزمایشگاهی نمونه خاک از منطقه به آزمایشگاه منتقل شده و بعد از کوبیده شدن و رسیدن وزن مخصوص هر نمونه به شرایط طبیعی، باران شبیه‌سازی می‌گردد. باران ساز پرتابل که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای مزیت قابل‌حمل بودن است که امکان استفاده از آن را در طبیعت و بر روی خاک دست‌نخورده ممکن می‌سازد. این دستگاه شامل قسمت‌های مختلفی که در (شکل ۳) مشخص است.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]



شکل ۳: دستگاه شبیه‌ساز باران در محل اجرای آزمایش با فرسایش خندقی در مارن M1

Figure 3: Rain simulator at the test site with gully erosion in Marl M1

پس از تفکیک سازندهای زمین‌شناسی بر اساس ترکیب سنگی، ۱۲ گروه لیتولوژیکی مشخص شده است. در بازدید میدانی اولیه از سطح حوضه مشخص گردیده که سازندهای حساس مارنی در جنوب حوضه و سازندهای سخت در شمال حوضه قرار گرفته‌اند. واحدهای کاری بر اساس تلفیق نقشه شیب ولیتولوژی بر روی دامنه فاقد پوشش گیاهی انجام شده است. در این تحقیق در دو مرحله جداگانه اقدام به برداشت میدانی در جنوب حوزه (واحدهای مارنی و حساس) با مراجعه به سمت شمال حوضه درروستاهای آرو و سیدآباد اقدام به انجام آزمایش میدانی (سازندهای سخت و غیر مارنی) با دستگاه شبیه‌ساز باران نوع کامفورست با شدت بارش ٤ میلی‌متر در دقیقه با تداوم بارش متوسط ۱۰ دقیقه در سه تکرار بر سطح دامنه انجام شده است. میزان رواناب و رسوب‌دهی در بطری‌های جمع‌آوری گردیده و نمونه‌ها جهت توزین میزان رسوب و رواناب به آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری منتقل شده است. لازم به ذکر است در محل اجرای آزمایش در واحد کاری ۱۵ گا نه فرم BLM و امتیازدهی انجام گردیده است.

روش توزین در آزمایشگاه با استفاده از وزن تین‌ها اولیه و خشک‌کردن نمونه رسوب در اتوکلاو بادمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد است. بعد از توزین مجدد، وزن رسوب برحسب گرم محاسبه شده است. سپس با توجه به مشخص بودن سطح پلات میزان رسوب ویژه برحسب تن در هکتار محاسبه شده که همان رسوب ویژه است. برای بررسی تعداد دیگر از سازندها مانند سازندهای کند، تیز کوه، توف‌های سازند کرج از تحقیقات مشابه در قالب پایان‌نامه‌ها و گزارش‌ها در البرز مرکزی با استفاده از همین دستگاه شبیه‌ساز باران انجام شده، استفاده گردیده است. نتایج حاصل به دیگر رخنمون این سازندها در کل حوضه تعمیم داده و پتانسیل تولید رسوب هر سازند در کل حوضه مشخص شده است. با ورود اطلاعات رسوب هر سازند در محیط ARC_GIS10.2 نقشه پتانسیل تولید رسوب ویژه برای کل حوضه تهیه شده است.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

جدول ۱- نمونه جدول آزمایشگاهی نتایج آزمایش شبیه‌ساز باران بر روی سازندهای حوضه

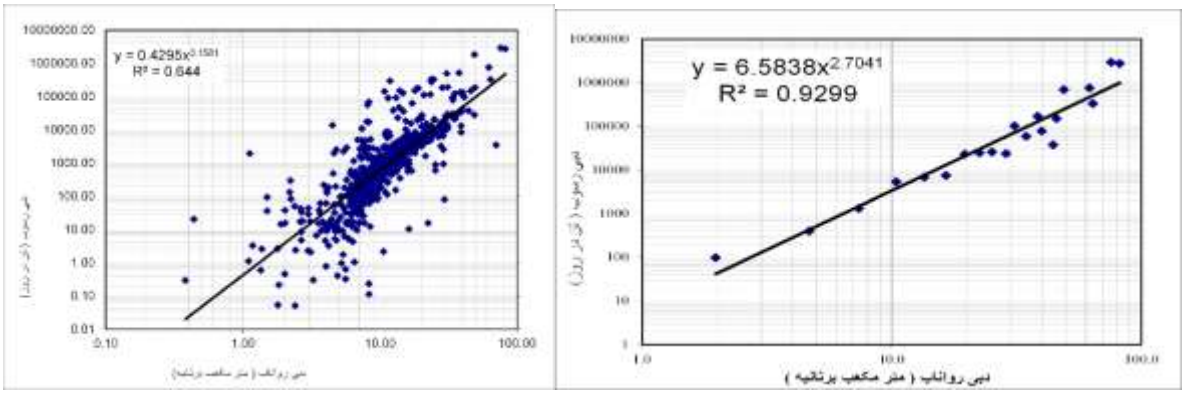
Table 1- The laboratory results of the simulator rain test on the basin formations

سازند	زمان (ثانیه)	عمق نفوذ (سانتی‌متر)	وزن تین با رسوب (گرم)	رسوب ویژه (تن بر هکتار)
کنگلومرای پیلوسن	٥٦٠	٥	٤١/٤٨	٠/٣٥٥
مارن گچی قرمز زیرین	٤٩٠	٣/٤	٥٥/٣	٣/٥٣
مارن	٤٨٧	٥/٣	٥٤/٣٥	٢/٩٤
مارن M^2	٤٦٠	٢/٣	٥١/٠٥	١/٧٩
شیل سازند کرج	٤٥٦	٨	٥٣/٥٧	١/٨٤
شیل شمشک	٤٩٣	١٠/٥	٥٨/٠٣	٠/٧٨
ملافیرهای بالای سازند شمشک	٤٧٧	٨	٤٤/٨	٠/٥٨
سازند الیکا	٤٩٤	٧/٨	٤٧/٦٥	١/٣٦
سازند جیرود	٣٨٨	٦/٥	٤٦/٥	١/٥٢
ماسه سنگ لالون	٣٩٨	١٠	٥٥/٢٥	٠/٤٨
سازند شیلی زاگون	٤٢٢	٧/٥	٣٨/٨٧	٠/٢٧
سازند باروت	٤٠٨	٥/٥	٥١/٥	٢/٢٥
کواترنر QT^2	٤٠٢	٥/٤	٣٩/٨	٠/٩٦

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، کالیبراسیون مدل در مقیاس ماهانه بر اساس مقادیر مشاهده‌ای دبی جریان و دبی رسوب به‌ترتیب ۱۰۸ و ١٤٤ ماه طی دوره آماری (۱۹۹۷ تا ۲۰۰۸) و صحت سنجی (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱) با استفاده از نرم‌افزار سوات–کاپ انجام شد. در (شکل‌های ٤ تا ٥) نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دبی رواناب و دبی رسوب برای ایستگاه بنکوه در خروجی حوضه حبله رود و در (جدول ۱) نتایج معیارهای ارزیابی مدل آورده شده است. در بحث مرتبط با دبی رسوب روش منحنی سنجه رسوب (حد وسط دسته‌ها) به‌عنوان مناسب‌ترین روش برآورد بار معلق و تخمین دبی ماهانه رسوب برای مدل سوات توسط (Erfanian & Bayazi, 2011: 11) پیشنهاد شده است. به عقیده آن‌ها با توجه به عدم اندازه‌گیری در دبی‌های طغیانی، استفاده از روش منحنی سنجه رسوب حتی در مقیاس ماهانه می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد، ولی با توجه به شرایط اندازه‌گیری بار معلق در رودخانه‌های ایران، روش منحنی سنجه رسوب را تنها راه برای تولید دبی رسوب ماهانه در حال حاضر دانستند. پژوهش حاضر، از روش حد وسط دسته‌ها در دوره کالیبراسیون و صحت سنجی بر اساس داده‌های رسوب ثبت شده در ایستگاه خروجی حوضه حبله رود (بنکوه) شامل ١٣١٤ نمونه در یک دوره (١٣٨٩–١٣٤٧) است.

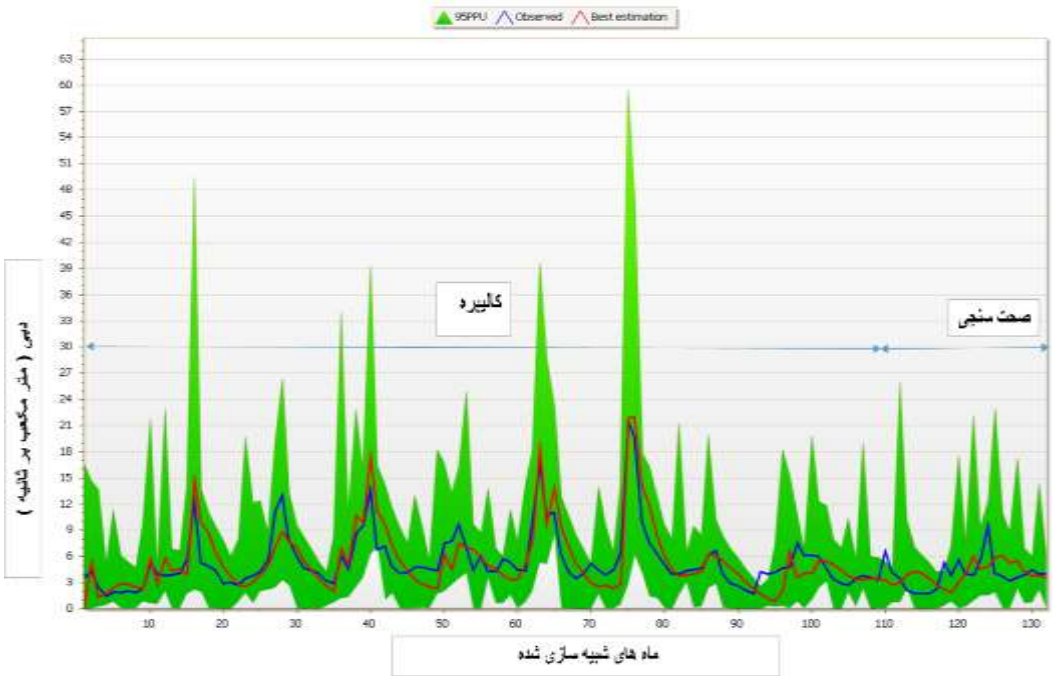
[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]



شکل ٤: نمودار منحنی سنجه رسوب ایستگاه حوضه حبله رود

Figure 4: Sediment gauge curve diagram of Hableh Roud

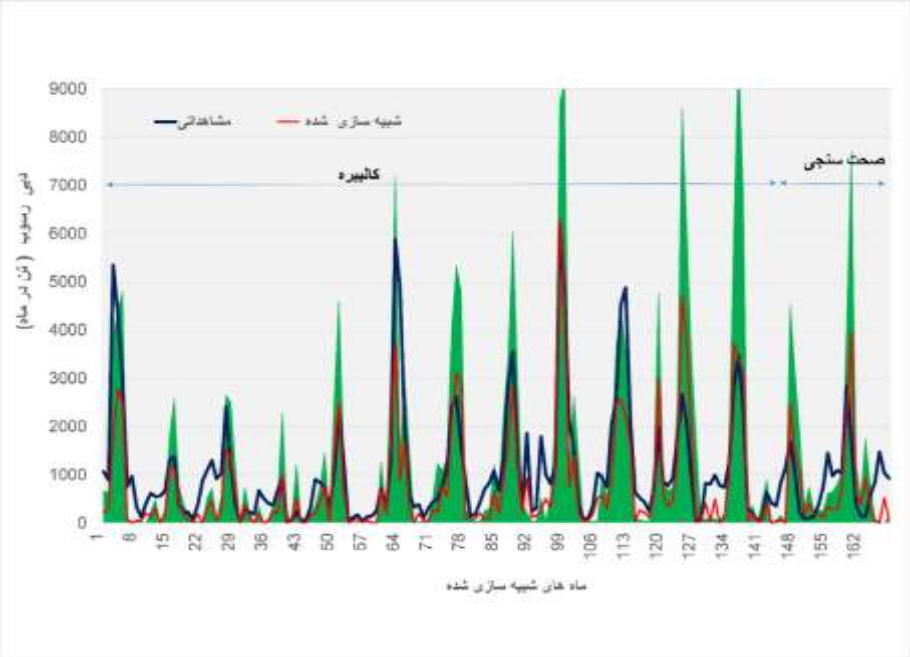
توابع هدف مختلفی برای بهینه‌سازی مدل در این نرم‌افزار وجود دارد. تابع هدف ناش–ساتکلیف از مهم‌ترین توابع بوده که توسط بسیاری از هیدرولوژیست‌ها در مدل‌سازی حوزه‌های آبخیز استفاده می‌گردد و کاربرد آن برای مقایسه هیدرو گراف شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای (به‌ویژه در مقیاس ماهانه و سالانه) نسبت به سایر توابع هدف بیش‌تر توصیه شده است. ضریب ناش–ساتکلیف برای تخمین دبی رسوب در مرحله واسنجی ۰/۵۸ و صحت سنجی ۰/۵۱ بوده که نشان از دقت قابل‌پذیرش مدل است. تاکنون هیچ معیار خاصی به‌طور دقیق در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نگردیده است؛ اما به‌طورکلی اگر شاخص نش_ساتکلیف بیش‌تر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳٦ باشد، رضایت‌بخش و اگر کم‌تر از ۰/۳٦ باشد غیر قابل قبول فرض می‌شود (Xu et al, 2009: 12).



شکل ٥: رواناب شبیه‌سازی شده در ایستگاه بنکوه

Figure 5: Simulated runoff at bonkouh station

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]



شکل ٦: رسوب شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه بنکوه

Figure 6: Simulated sediment at Bonkouh station

جدول ۲-ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی و صحت سنجی

Table 2- Evaluation of the model's performance in calibration and verification

واسنجی				صحت سنجی			
معیار ارزیابی	مشخصه	مقدار (رواناب)	مقدار (رسوب)	معیار ارزیابی	مشخصه	مقدار (رواناب)	مقدار (رسوب)
ضریب ناش- ساتکلیف	NS	۰/۷٤	۰/۵۸	ضریب ناش- ساتکلیف	NS	۰/٦۳	۰/۵۱
ضریب تعیین	R^2	۰/۸۳	۰/٦۸	ضریب تعیین	R^2	۰/۷۲	۰/٦۳
ضریب تعیین وزنی	Br^2	۰/۵۱	۰/۵٤	ضریب تعیین وزنی	Br^2	۰/۷۱	۰/٤۹
میانگین مربعات خطا	MSE	۳/۱۲	٦/۵	میانگین مربعات خطا	MSE	۳/۹	۷/۱

در این تحقیق مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی از بین ۳۲ پارامتر با انجام آنالیز حساسیت در محیط برنامه سوات–کاپ با روش t-stat و p-value حساس‌ترین پارامترهای مدل مشخص‌شده است در (جدول ۳) مقادیر پارامترهای حساس در بهترین حالت واسنجی آورده شده است. بعد از واسنجی مدل سوات، مقدار بهینه پارامترهای مورد استفاده استخراج شد و در دیتابیس مدل وارد و مدل در مرحله اعتبارسنجی اجرا شد (شکل ۷). سپس، مقادیر سالانه رسوب ویژه ۲۱ زیر حوضه آبخیز حبله رود از روی جداول خروجی برنامه سوات، محاسبه شد و نواحی بحرانی که رسوب ویژه آن‌ها بیش‌تر از زیر حوضه‌های دیگر بود، تعیین شد.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

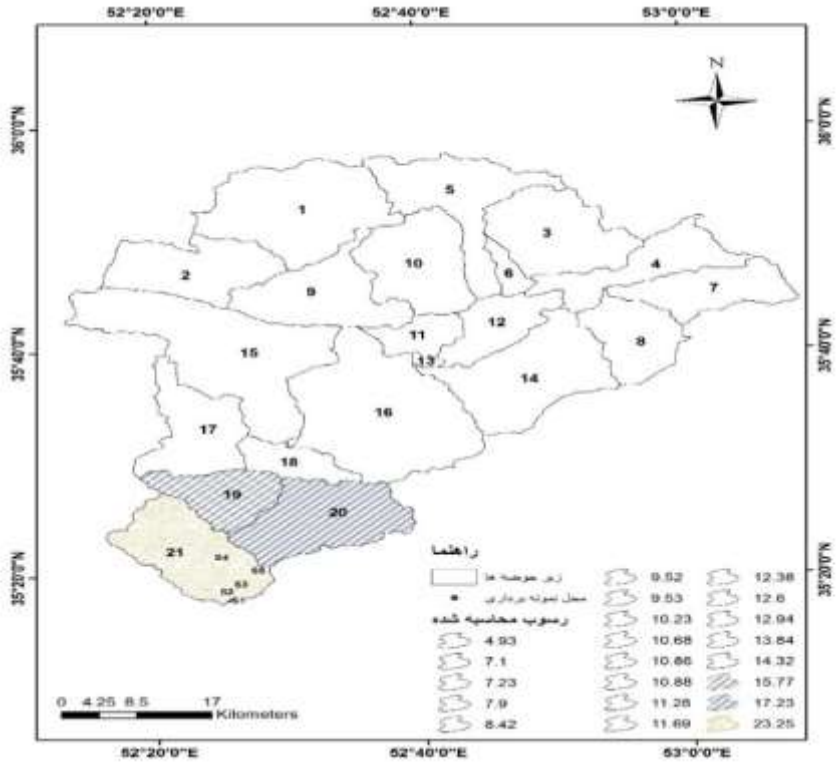
جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای حساس حاصل از اجرای مدل سوات

Table 3- Optimal values of sensitive parameters resulting from the implementation of SWAT model

نام پارامتر	شرح پارامتر	مقدار بهینه پارامتر	نام پارامتر	شرح پارامتر	مقدار بهینه پارامتر
SOL_K (1,2)	هدایت هیدرولیکی خاک اشباع	۰/۲۸۷٤٦۹	GW_REVAP	ضریب تبخیر آب زیرزمینی	۰/۰۳٦۰۱۷
SOL_BD(1,2)	چگالی توده خاک	۰/۳۰۷۹٥٤	ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰/٤۱۹٥۱۲
SFTMP	دمای بارش برف	۰/۰٦٥٥۳٥۳	CH_N2	ضریب مانینگ در کانال اصلی	۰/۱۰۲۷۰۹
SPCON	بیشینه مقدار رسوب در کانال	۰/۰۱۰۷۲۳	CH_K2	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	۹٤/۳۰۷۹٦۱
USLE_P	عامل عملیات حفاظتی در USLE	۰/۰۳۲۳۹۸	ALPHA_BNK	ثابت تخلیه جریان از کانال	۰/٥۷۱٥۸۳
GW_REVAP	ضریب تبخیر آب زیرزمینی	۰/۰٤۸٤۲٦	SOL_AWC (1,2)	ظرفیت آب قابل‌دسترس	۰/۳۸٤۸۷۱

مطابق نقشه اولویت‌بندی، زیر حوضه‌های ۲۰،۲۱ و ۱۸ به‌ترتیب بیش‌ترین تولید رسوب ویژه را دارند. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که زیر حوضه ۲۱ با ۲۳/۲ تن در هکتار در سال بیش‌ترین پتانسیل تولید رسوب را در سطح حوضه دارا است. در زیر حوضه ۲۱ ازلحاظ حساسیت سازندها با مساحت ۱۷۷۷۱ هکتار به‌ترتیب ۱٤۹۰۳، ۱۰۷۹ برابر با ۸۹ درصد را سازندهای حساس تشکیل می‌دهد. عمده سازندها شامل مارن‌های (M_1 M_2, M_3)، گچی قرمز زیرین Olg و کنگلومرای پیلوسن است. پس از کالیبره کردن دستگاه شبیه‌ساز باران در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهت اندازه‌گیری میزان رواناب و رسوب به زیر حوضه بحرانی مراجعه و با ایجاد باران مصنوعی با شدّت بارندگی ٤ میلی‌متر در دقیقه با تداوم بارش ۱۰ دقیقه استفاده شده است. در ادامه از هر ۵ واحد کاری، ۲ محل انتخاب و اقدام به آزمایش باران مصنوعی گردید. سپس در شدت مورد نظر، ۱۰ نمونه‌ی روان آب و رسوب جمع‌آوری و برای اندازه‌گیری حجم روان آب و همچنین رسوب معلق به آزمایشگاه منتقل گردید. در (جدول ۱)، میزان حجم رسوب اندازه‌گیری شده، نشان داده شده است. در بررسی مدل‌ها با استفاده از فن روی‌هم اندازی و مقایسه لایه زیر حوضه‌ها با مدل شبیه‌ساز باران، مدل پسیاک، مدل سوات و مدل ای پی ام انجام گردیده است. نتایج نشان داد با توجه به برآورد رسوب حاصل از منحنی سنجه رسوب برای سال‌های (۱۳٤۷-۱۳۸۹) شامل ۱۳۱٤ نمونه برآوردی برابر با ۸۰۲/٥٤ ($T/Km^2/Year$) است که مدل سوات با در نظر گرفتن بار بستر بیش‌ترین تطابق را نشان داده است.

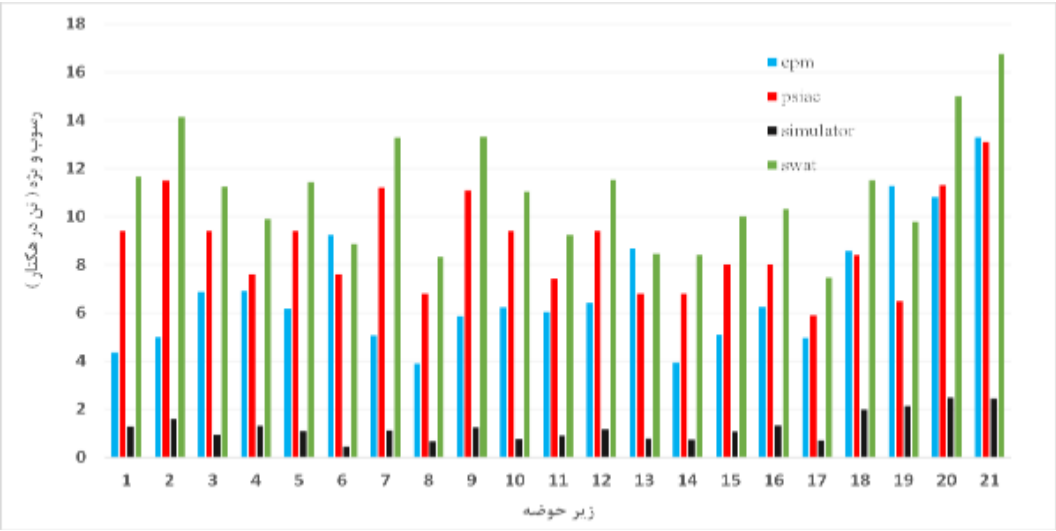
[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]



شکل ۷: اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از لحاظ میانگین سالانه رسوب ویژه با مدل سوات (تن در هکتار در سال)

Figure 7: Prioritization of sub-basins in terms of annual average sediment yield with swat model

با توجه به رسوب ویژه ۸/۰۲ تن در هکتار نشان داد که دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شده در این مطالعه با در نظر گرفتن چند بار بارش در سال و در نظر گرفتن سالیانه بودن رسوب اندازه‌گیری شده می‌توان اظهار داشت که دستگاه شبیه‌ساز باران با واقعیت انطباق قابل قبولی ارائه کرده است (٤/٨٠٨ برابر کم‌تر از واقعیت حاصل از یک واقعه بارش).



شکل ۸: نمودار رسوب ویژه محاسبه شده توسط مدل‌ها

Figure 8: Special sediment chart calculated by models

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

همچنین نتایج رگرسیون بین شبیه‌ساز باران و مدل سوات ارتباط معنی‌داری را نشان داد. بر اساس (جدول ٤) بین مدل سوات و نتایج شبیه‌ساز باران، ضریب همبستگی ۰/۷۲۵ در محدوده اطمینان ۹۹ درصد برقرار بوده و رابطه معنی‌داری مشاهده‌شده و نتایج حاصل قابل‌اطمینان می‌باشند.

جدول ٤- بررسی ارتباط همبستگی رسوب ویژه شبیه‌ساز با سایر مدل‌ها در spss

Table 4- Investigation of correlation between sedimentation relations with different sources in SPSS

		Epm	PSIAC	SWAT	SIMULATOR
EPM	همبستگی پیرسون	۱	۰/۲٦٥	۰/٤۱۰	۰/٦٦۹**
	معنی داربودن، با ۹۹٪ سطح اطمینان		۰/۲٤٦	۰/۰٦٥	۰/۰۰۱
PSIAC	همبستگی پیرسون	۰/۲٦٥	۱	۰/۹۷۰**	۰/٥۳٤*
	معنی داربودن، با ۹۹٪ سطح اطمینان	۰/۲٤٦		۰,۰۰۰	۰/۰۱۳
SWAT	همبستگی پیرسون	۰/٤۱۰	۰/۹۷۰**	۱	۰/۷۲٥**
	معنی داربودن، با ۹۹٪ سطح اطمینان	۰/۰٦٥	۰/۰۰۰		۰/۰۰۰
SIMULATOR	همبستگی پیرسون	۰/٦٦۹**	۰/٥۳٤*	۰/۷۲٥**	۱
	معنی داربودن، با ۹۹٪ سطح اطمینان	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). *. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

با توجه بارش ایجاد شده در دستگاه شبیه‌ساز باران که کم‌تر از بارش سالیانه بوده بین نتایج اجرای هر دو مدل سوات و شبیه‌ساز باران دارای ارتباط معنی‌داری وجود دارد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل سوات نشان می‌دهد که دبی‌های شبیه‌سازی‌شده رواناب و رسوب همخوانی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. شاخص‌های ارزیابی ناش ساتکلیف برای دوره کالیبره و صحت سنجی قابل پذیرش بوده و حکایت از قابلیت خوب مدل در شبیه‌سازی رواناب و رسوب دارد. آنالیز حساسیت صورت گرفته و مقادیر بهینه پارامترها برای حوضه حبله رود معرفی گردیده است. زیر حوضه‌های بحرانی و پتانسیل تولید رسوب مشخص گردید که زیر حوضه ۲۱ بیش‌ترین توان تولید رسوب را از خود نشان داده است. بازدید میدانی و بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی از حضور مارن‌ها و سازندهای با حساسیت پذیری بیش‌تر در این زیر حوضه دارند که در این زیر حوضه شاهد انواع اشکال فرسایش سطحی، شیاری و خندقی هستیم. آزمایش شبیه‌ساز باران بر روی مارن‌ها نشان داد که مارن‌های M_1 ۲۰ گرم رسوب در اجرای یک‌بار آزمایش ایجاد می‌نماید که با توجه به مشخص بودن سطح پلات و تعمیم آن به هکتار برابر با ۳/۲ تن در هکتار بوده که با در نظر گرفتن چند بار بارش در طول سال نشان از میزان بالای پتانسیل تولید رسوب بر روی این سازند در زیر حوضه ۲۱ است. مقدار رسوب حاصل از اجرای آزمایش برای مارن‌های M_3 و M2 به‌ترتیب برابر با ١٤/٤٨ و ١١/١٨ بوده است و کم‌ترین میزان رسوب مربوط به کنگلومرای پیلوسن با ۱/۳٦ گرم است. مقدار پتانسیل رسوب محاسبه‌شده در این زیر حوضه با استفاده از شبیه‌ساز باران برابر با ۷/۵۱ تن در هکتار برآورد گردید که با در نظر گرفتن چند بار بارش

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

این اعداد به میزان رسوب محاسبه شده توسط مدل سوات نزدیک خواهد شد که کارایی و دقت مدل سوات مورد ارزیابی مجدد قرار گرفت و تائید گردیده است. پس می‌توان با این روش برای اولویت‌بندی زیر حوضه حساس ازنظر اجرای عملیات آبخیزداری استفاده گردد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از ریاست و معاونین محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری اعلام می‌نمایند. تشکر ویژه از زحمات و همراهی همکاران در گروه مهندسی رودخانه و سواحل در اجرای هر چه‌بهتر طرح تحقیقاتی "بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت رودخانه حبله رود با استفاده از مدل SWAT" با کد مصوب ۹۶۰۱۰۵-۰۰۱-۲۹-۲۹-۲ ابراز می‌گردد.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]

References

- Abbaspour, K. C., Yang, J. Maximov, I. Siber, R. Bogner, K., Mieleitner, J. Zobrist, J., Srinivasan, R., (2007), Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT, ***Journal of Hydrology***, 333: 413-430. [In Persian].
- Asghari saraskanroud, S., (2017), "Analysis of affecting factors on creating Gully in the eastern shores of Uremia Lake", ***Geographical Space***, 58:285-301. [In Persian].
- Butcher, J., Shoemaker, L., Clements, J. T., Thirolle, E., (1998), "***Watershed modeling online training module***", U. S. Environmental Protection Agency, Watershed Academy Web.
[on line]: http://www.epa.gov/watertrain/modeling/.
- Erfanian, M., Bayazi, M., (2011), "The evaluation of extrapolation methods for the estimation of river suspended loads in the West Azerbaijan Province", ***Final report of the research project of west Azarbaijan regional water corporation***, 58 p. [In Persian].
- Gholami, Sh., (2003), "The simulation of daily sediment yield by using distributed SWAT model in mountainous catchments (Amameh Catchments)", ***Research and construction***, 59: 29-33. [In Persian].
- Habibi A. R., (2017), "Compare and estimate potential erosion (water-wind) with utilize empirical models with emphasis on geomorphology in arid catchments", ***Geographical Space***, 57: 19-30. [In Persian].
- Khalifehi Sigaraudi, Sh., Zanati Shoaa, T., Salajegh, A., Kohn Dell, A., Mortazai, A. Gh., (2009), The semi distributed of rainfall- runoff modeling in low data sub basin (Case study: Latian basin), ***Proceedings of the 5th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering*** (Sustainable Natural Disaster Management), IRAN, Gorgan. Edited by Ali Najafi, pp 180-188. [In Persian].
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., (2005), "***Soil and water assessment tool theoretical documentation***", Version 2005", Texas Water Resources Institute, Texas.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A., Abbaspour, K., (2008), "Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran", ***Hydrological Sciences***, 53: 977-988. [In Persian].
- Schaefli, B., Gupta, H. V., (2007), "Do Nash values have value4", ***Hydrological processes,*** 21: 2075-2080.
- Tripathi, M. P., Panda, R. K., Raghuwanshi, N. S., Singh, R., (2004), "Hydrological modeling of a small watershed using generated rainfall in the soil and water assessment tool model", ***Hydrological Processes*** ,18: 1811-1821.
- Talebizadeh, M., Morid, S., Ayyoubzadeh, S. M., Ghasemzadeh, M., (2010), "Uncertainty analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model", ***Water Resources Management***, 24: 1747-1758. [In Persian].
- Xu, Z. X., Pang, J. P., Liu, C. M., Li, J. Y., (2009), "Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model", ***Hydrological Processes***, 23: 3619-3630.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-28]