کاربرد مدل SWAT2000 در تخمین رواناب و رسوب حوضه بهشت‌آباد از زیرحوضه‌های کارون شمالی

رخساره رستمیان[۱]، سید فرهاد موسوی[۱]، منوچهر حیدرپور[۱*]، مجید افیونی[۲] و کریم عباسپور[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۴/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱/۱۷)

چکیده

فرسایش خاک از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی اهمیت دارد که برای کنترل آن نیاز به مدیریت صحیح حوضه آبخیز می‌باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌سازی به‌عنوان راه‌کار ارزیابی اقدامات کاهش فرسایش مطرح شده است. به هر حال، به‌دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های هیدرولوژیک کافی در مناطق کوهستانی، مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز دارای عدم قطعیت‌هایی می‌باشد. در مطالعه حاضر، توانایی مدل SWAT2000 در شبیه‌سازی دبی جریان و غلظت رسوب حوضه بهشت‌آباد (از زیرحوضه‌های کارون شمالی) با مساحت ۳۸۶۰ کیلومتر مربع بررسی شد. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل با استفاده از برنامه SUFI-2 انجام پذیرفت. شاخص‌های p-factor، d-factor، R^2 و ناش- ساتکلیف (NS) به‌منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب به‌کار برده شد. آمار رواناب شش ایستگاه هیدرومتری در سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۰۴ برای واسنجی و اعتبارسنجی این حوضه به‌کار برده شد. نتایج نشان داد که در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، ضرایب p-factor، d-factor، R^2 و NS در خروجی حوضه به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۴۸، ۰/۸۵ و ۰/۷۵ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۵۳، ۰/۳۸، ۰/۸۵ و ۰/۵۷ به‌دست آمد. این ضرایب در مرحله واسنجی غلظت رسوب روزانه در خروجی حوضه ۰/۵۵، ۰/۴۱، ۰/۵۵ و ۰/۵۲ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۶۹، ۰/۲۹، ۰/۶۰ و ۰/۲۷ به‌دست آمد. در مجموع، نتایج مطالعه نشان داد که SWAT رواناب را بهتر از رسوب شبیه‌سازی کرد. از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب در بعضی از ماه‌های سال می‌توان به شبیه‌سازی ضعیف ذوب برف برای این حوضه کوهستانی، عدم سازگاری فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخزده و اشباع و تعداد کم داده‌ها اشاره کرد. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی بار رسوب می‌توان به شبیه‌سازی ضعیف جریان، تعداد کم داده‌ها و هم‌چنین عدم پیوستگی اطلاعات رسوب استفاده شده اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، تحلیل عدم قطعیت، رسوب، رواناب، مدل‌سازی، واسنجی

مقدمه

اراضی ایران کشوری پهناور، با اقلیمی خشک و کم باران است که همواره کمبود آب در آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده توسعه مورد توجه بوده است. این سرزمین، هر ساله شاهد خسارات جبران ناپذیر ناشی از عدم کنترل آب‌های سطحی در بخش‌های نسبتاً وسیعی می‌باشد. رواناب ناشی

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استاد و استادیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانشیار پژوهشی مؤسسه EAWAG، سوئیس

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: heidar@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

از بارندگی در حوضه‌های آبخیز علاوه بر خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیل، باعث فرسایش و از بین رفتن خاک حاصل‌خیز سطحی شده و رسوب‌گذاری در مسیل‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها را به‌دنبال دارد.

فرسایش خاک یکی از مسائل مهم اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی جهان است. بنابر آمار و اطلاعات موجود، قاره آسیا بیشتر از هر قاره دیگر مشکل فرسایش دارد و در میان کشورهای آسیایی، ایران دارای میزان فرسایش خاک بالایی است (۹). طبق تحقیقی که توسط جلالیان و همکاران (۱) صورت گرفته است، متوسط فرسایش خاک در ایران ۲۵ تن بر هکتار در سال براورد شده است که حدوداً ۳/۴ برابر متوسط فرسایش جهانی است.

مدیریت صحیح حوضه‌های آبخیز یکی از مهم‌ترین روش‌های استفاده بهینه از منابع آب و خاک می‌باشد. برای این کار ، نیاز به اطلاعات جامع و کاملی از روش‌های مدیریتی و اجرایی متفاوت است. در کشور ما اکثر حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه حوضه‌های آبخیز کوهستانی، فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری به تعداد کافی می‌باشند و هرگونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی را با مشکل مواجه می‌سازند. برای مقابله با این معضل، متخصصین علم آبخیزداری، هیدرولوژیست‌ها و محققین منابع آب راه‌حل‌های مختلفی مانند فرمول‌های تجربی و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری عرضه کرده‌اند که تاکنون هیچ‌یک نتوانسته‌اند راه‌حل مطلوبی ارائه دهند. عقیده بر این است که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی در حوضه‌های آبخیز می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای برای آنها باشد.

هدف تحقیق، کاربرد مدل SWAT (Soil and Water Assessment Tool) برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه و رسوب روزانه حوضه بهشت‌آباد (از زیرحوضه‌های کارون شمالی) می‌باشد. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از پارامترها در مقیاس حوضه‌ای مشکل است و یا حتی امکان‌پذیر نمی‌باشد، لازم است مدل برای حوضه مورد نظر واسنجی گردد. در این مطالعه از برنامه SUFI-2 برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شد.

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوضه‌ای می‌باشد که توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا (Agricultural Research Service) برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است (۱۱). مدل SWAT برای شبیه‌سازی وقایع منفرد با جزئیات زیاد طراحی نشده است. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاهان، عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد.

شفرد و همکاران (۱۴) توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیک و کیفیت آب در یک حوضه کشاورزی در ناحیه‌ای از مریلند مورد بررسی قرار دادند. آنها بزرگ مقیاس بودن، توزیعی بودن و هم‌آهنگ بودن مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) را از مزیت‌های این مدل معرفی کردند.

تولسون و شومیکر (۱۵) گزارش کردند که مدل SWAT می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی اثرات دراز مدت روش‌های مدیریتی متفاوت برای کاهش بار فسفر در مخزن کانونزویل شهر نیویورک استفاده شود. آنها مدل را برای تعیین فسفر محلول، جریان آب و رسوب با استفاده از تصحیح تعدادی از روابط مدل، واسنجی و اعتبارسنجی کردند.

بافوت و همکاران (۶) امکان استفاده از مدل SWAT را برای ارزیابی برنامه‌های زیست‌محیطی و حفاظتی وقتی که داده‌های واسنجی شده در دسترس نباشد، برای حوضه‌های میامی و لانگ برنچ در ایالت فلوریدا در آمریکا بررسی کردند. نتایج مدل، تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده (در حالت واسنجی و یا بدون واسنجی) نشان داد.

عباسپور و همکاران (۴) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

تمام فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی حوضه رودخانه تور، در شمال شرقی کشور سوئیس، با مساحتی حدود ۱۷۰۰ کیلومتر مربع، استفاده کردند. این مطالعه نتایج بسیار خوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نیترات و نتایج نسبتاً خوبی برای شبیه‌سازی دو هفته یک‌بار غلظت رسوب و کل فسفر داشت (یعنی، مدل توانست هیدروگراف‌های رواناب و نیترات را به خوبی شبیه سازی کند ولی در مورد رسوب تا حدودی ضعیف عمل کرد).

شول و همکاران (۱۳) در راستای طرح محاسبه توزیع زمانی و مکانی مقدار آب قابل دسترس جهانی، از مدل SWAT برای تخمین کل آب قابل استفاده غرب آفریقا در سطح چهار میلیون کیلومتر مربع استفاده کردند. محققین یاد شده علت استفاده از مدل SWAT را توانایی مدل در شبیه‌سازی بیلان هیدرولوژی به‌صورت ساده و واقع‌بینانه معرفی کردند.

غلامی (۲) مدل SWAT را برای شبیه‌سازی دبی و رسوب متوسط ماهانه حوضه آبخیز امامه (از زیرحوضه‌های رودخانه جاجرود) به‌کار برد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل نسبت به پارامترهای k (حساسیت فرسایش‌پذیری خاک) و n (ضریب زبری سطح) حساسیت بیشتری در مقایسه با بقیه پارامترهای حوضه آبخیز دارد. هم‌چنین ضریب تبیین (R^2) برای شبیه‌سازی رسوب روزانه در سطح ۹۵ درصد معادل ۰/۷۴ به‌دست آمد.

بخش هیدرولوژیک مدل

در مدل SWAT هر حوضه به چند زیرحوضه و هر زیرحوضه به چند واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU، Hydrologic Response Units) که از نظر کاربری اراضی و خصوصیات خاک همگن هستند، تقسیم می‌شود. در ابتدا آب موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر غذایی، رسوب، رشد گیاهان و روش‌های مدیریتی برای هر HRU و سپس برای هر زیرحوضه به‌صورت متوسط وزنی محاسبه می‌شود.

چرخه هیدرولوژی

چرخه هیدرولوژی که به‌وسیله SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه رابطه بیلان آبی است (۱۰):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}\right) \quad [۱]$$

که در آن: SW_t مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر) است.

رواناب سطحی

در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد: الف) روش شماره منحنی و ب) رابطه نفوذ گرین- امپت. روش شماره منحنی، تجربی است و به‌وسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) برای تخمین مقدار رواناب در حوضه با کاربری اراضی و خاک‌های مختلف توسعه پیدا کرده است. در روش گرین- امپت، نفوذ به‌صورت تابعی از پتانسیل ماتریک جبهه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی محاسبه می‌شود. در این رابطه فرض بر این است که پروفیل خاک همگن و رطوبت به‌طور یک‌نواخت در خاک توزیع می‌شود. در این تحقیق از روش شماره منحنی استفاده شد.

حداکثر رواناب

حداکثر رواناب شاخصی برای توانایی فرسایش سیلاب است و برای پیش‌بینی دبی رسوب استفاده می‌شود. SWAT حداکثر رواناب را با استفاده از روش منطقی (استدلالی) محاسبه می‌کند:

$$q_{peak} = \frac{CiA}{3/6} \quad [۲]$$

که در آن: q_{peak} حداکثر سیلاب (مترمکعب بر ثانیه)، C

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

ضریب رواناب، i شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت) و A مساحت زیرحوضه (کیلومتر مربع) است.

پتانسیل تبخیر و تعرق

در مدل SWAT سه روش برای محاسبه تبخیر و تعرق وجود دارد: روش پنمن- مانتیس، پریستلی- تیلور و هارگریوز- سامانی. پارامترهای مورد نیاز روش پنمن- مانتیس شامل دمای هوا، تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد می‌باشد. روش پریستلی- تیلور به دمای هوا، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی و روش هارگریوز- سامانی تنها به دمای هوا نیاز دارد.

رسوب

در مدل SWAT، فرسایشی که به‌وسیله بارش و رواناب ایجاد می‌شود از رابطه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش (MUSLE) محاسبه می‌شود.

روندیابی جریان

جریان آب در کانال باز، دارای سطح آزاد می‌باشد. SWAT از رابطه مانینگ برای تعیین سرعت جریان استفاده می‌کند. در این مدل، دو روش برای روندیابی جریان در آبراهه وجود دارد: ذخیره متغیر و ماسکینگام.

روندیابی رسوب

مدل روندیابی رسوب شامل دو جزء تجزیه و ته نشست می‌باشد که به‌طور هم‌زمان عمل می‌کند. در این مدل، حداکثر رسوبی که می‌تواند در مسیر منتقل شود تابعی از حداکثر سرعت جریان در نظرگرفته می‌شود.

تحلیل عدم قطعیت

مدل‌های هیدرولوژی و کیفیت آب به پارامترهای ورودی زیادی نیاز دارند که با قطعیت کامل معلوم نیستند (۱۰ و ۱۲). به‌دلیل این عدم قطعیت، مدل‌ها قادر به توصیف دقیق فرایندهای هیدرولوژیک و شیمیایی تحت شرایط طبیعی نمی‌باشند. علی‌رغم توسعه و کاربرد فراوان مدل‌ها، توجه نسبتاً کمی به بررسی اهمیت عدم قطعیت که تغییرپذیری در مقادیر پارامترهای ورودی را پیش‌بینی می‌کند، شده است. بیون (۷) پیشنهاد کرد که عدم قطعیت باید در فعالیت‌های مدل‌سازی وارد شود.

در این مطالعه، پارامترهای متفاوتی که در مدل به‌کار برده می‌شوند نظیر جریان و رسوب، با استفاده از روش معکوس و با استفاده از برنامه SUFI-2 (Sequential uncertainty fitting ver. 2) تعیین شدند. برنامه SUFI-2 واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب می‌کند و سعی می‌کند پارامترهای عدم قطعیت را به نحوی پیدا کند که اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه عدم قطعیت تخمین قرار گیرند، در حالی که کوچک‌ترین طیف عدم قطعیت تخمین ممکن را ایجاد می‌کند. عدم قطعیت خروجی مدل به‌وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصدکه در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع متغیر خروجی که به روش لاتین هایپرکیوب (Latin Hypercube) از دامنه مذکور نمونه‌برداری می‌شود، محاسبه می‌گردد (۳ و ۵).

در برنامه SUFI-2 یک دامنه بزرگ عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح ۹۵ پی‌پی‌یو (95 Percent prediction uncertainty) قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی کاهش می‌یابد تا دو شرط زیر برقرار شود:

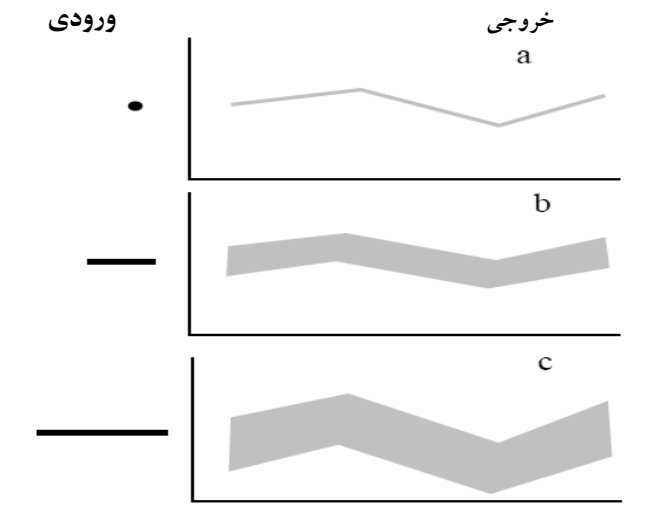
۱- اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ppu ۹۵ واقع شوند (p-factor)

۲- فاصله متوسط بین حد بالا و حد پایین ۹۵ درصد تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (d-factor).

مفهوم عدم قطعیت الگوریتم SUFI-2 در شکل ۱ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که پارامتر با مقدار واحد باعث ایجاد یک نتیجه واحد برای مدل می‌شود (شکل a۱). در

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]



شکل ۱. مفهوم عدم قطعیت برنامه SUFI-2 (۱۴)

صورتی که انتشار عدم قطعیت در پارامتر باعث ایجاد ناحیه‌ای از جواب می‌شود (شکل b۱). هنگامی که عدم قطعیت پارامترهای ورودی افزایش می‌یابد، عدم قطعیت خروجی نیز افزایش می‌یابد (شکل c۱).

برنامه I- SWAT

مدل‌ها در مقیاس حوضه‌ای به پارامترهای ورودی زیادی نیاز دارند. از آنجایی که عمل واسنجی احتیاج به تغییر مکرر مقدار پارامترها و اجرای برنامه دارد، استفاده از یک برنامه واسطه برای انجام خودکار این مراحل ضروری است. در این تحقیق، از برنامه واسطه I- SWAT به‌منظور اتصال برنامه‌های SWAT و SUFI-2 استفاده شد.

مواد و روش‌ها

حوضه بهشت‌آباد با مساحت ۳۸۶۰ کیلومتر مربع در شمال و شمال شرقی حوضه آبخیز کارون شمالی در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ′23 °50 تا ′25 °51 شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′49 °31 تا ′34 °32 شمالی واقع شده است. این حوضه تمام یا قسمتی از مناطق بن، تنگ‌گزی، قهفرخ، چغاخور، حومه بروجن، شلمزار، دستگرد، فارسان، جونقان، حومه شهرکرد، هفشجان و پشتکوه را در بر می‌گیرد و شامل ۲۷ درصد حوضه آبخیز شمالی رودخانه کارون می‌شود. از کل مساحت حوضه بهشت‌آباد، ۷۹ درصد در ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. کمترین ارتفاع این حوضه ۱۶۶۰ متر در محل خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع آن ۳۶۲۰ متر در کوه سالداران می‌باشد. میانگین شیب حوضه ۲۷ درصد براورد شده است. متوسط بارش درازمدت سالانه در این حوضه ۴۷۱ میلی‌متر است. خطوط هم‌دمای میانگین سالانه بین ۸/۵ تا ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد است که در دشت‌های حوضه بین ۱۰ تا ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

ضدر این حوضه ۴۲ درصد اراضی را مرتع، ۴۶ درصد را زراعت و ۱۲ درصد را رخنمون سنگی در بر گرفته است. کشت غالب حوضه گندم و یونجه می‌باشد. پانزده تیپ گیاهی در سراسر حوضه بهشت‌آباد گسترش دارد. گون به‌عنوان گونه غالب مراتع طبیعی در ارتفاعات ۱۹۰۰ تا ۳۵۰۰ متر پراکنش دارد. چهل و چهار کلاس خاک برای حوضه بهشت‌آباد تعریف شده است.

حوضه بهشت‌آباد به ۳۲ زیرحوضه و ۴۵۱ واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) تقسیم شد. برای اجرای مدل، از داده‌های روزانه بارندگی ۱۰ ایستگاه هواشناسی شامل ایستگاه‌های

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و طول دوره آماری داده‌های دبی جریان

ایستگاه	رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول دوره آماری
تنگه دهنو	کیار	۵۱ ° ۵′	۳۲ ° ۲′	۲۱۳۴	۱۳۸۰-۸۳
تنگه درکش ورکش	جونقان	۵۰ ° ۳۸′	۳۲ ° ۶′	۱۹۹۶	۱۳۶۴-۷۳ و ۱۳۷۴-۸۳
کوه سوخته	کیار	۵۰ ° ۴۰′	۳۲ ° ۵′	۱۹۹۷	۱۳۶۴-۷۴ و ۱۳۷۶-۸۳
بهشت‌آباد	بهشت‌آباد	۵۰ ° ۳۷′	۳۲ ° ۱′	۱۶۸۰	۱۳۶۴-۶۸ و ۱۳۷۷-۸۳
پل خراجی	کیار	۵۰ ° ۵۰′	۳۲ ° ۵′	۱۹۹۸	۱۳۷۷-۸۳
جونقان	گرگک	۵۰ ° ۳۷′	۳۲ ° ۱۵′	۲۰۴۹	۱۳۷۶-۸۳

سینوپتیک شهرکرد و بروجن، تبخیرسنجی بهشت‌آباد و باران‌سنجی سورشجان، جونقان، چالشتر، شلمزار، فارسان، بن و پل خراجی استفاده شد. از روش هارگریوز- سامانی برای محاسبه پتانسیل تبخیر و تعرق و از روش ماسکینگام برای روندیابی جریان استفاده گردید. مدل برای دوره زمانی ۲۰۰۴-۱۹۹۶ اجرا شد و از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری بهشت‌آباد، درکش‌ورکش، کوه سوخته، پل‌خراجی، جونقان و دهنو برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شد. سه چهارم از کل داده‌های موجود برای هر ایستگاه در مرحله واسنجی و یک چهارم داده‌ها در مرحله اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه بهشت‌آباد در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب و غلظت رسوب، شاخص‌های p-factor، d-factor، R^2 و ناش- ساتکلیف (Nash-Sutcliffe, NS) به‌کار برده شد. در این تحقیق، p-factor بزرگ‌تر از ۵۰ درصد و d-factor کمتر از ۱/۳۵ به‌عنوان مقادیر رضایت‌بخش انتخاب شدند. دامنه R^2 بین صفر تا یک است و ضریب NS بین صفر تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌کند.

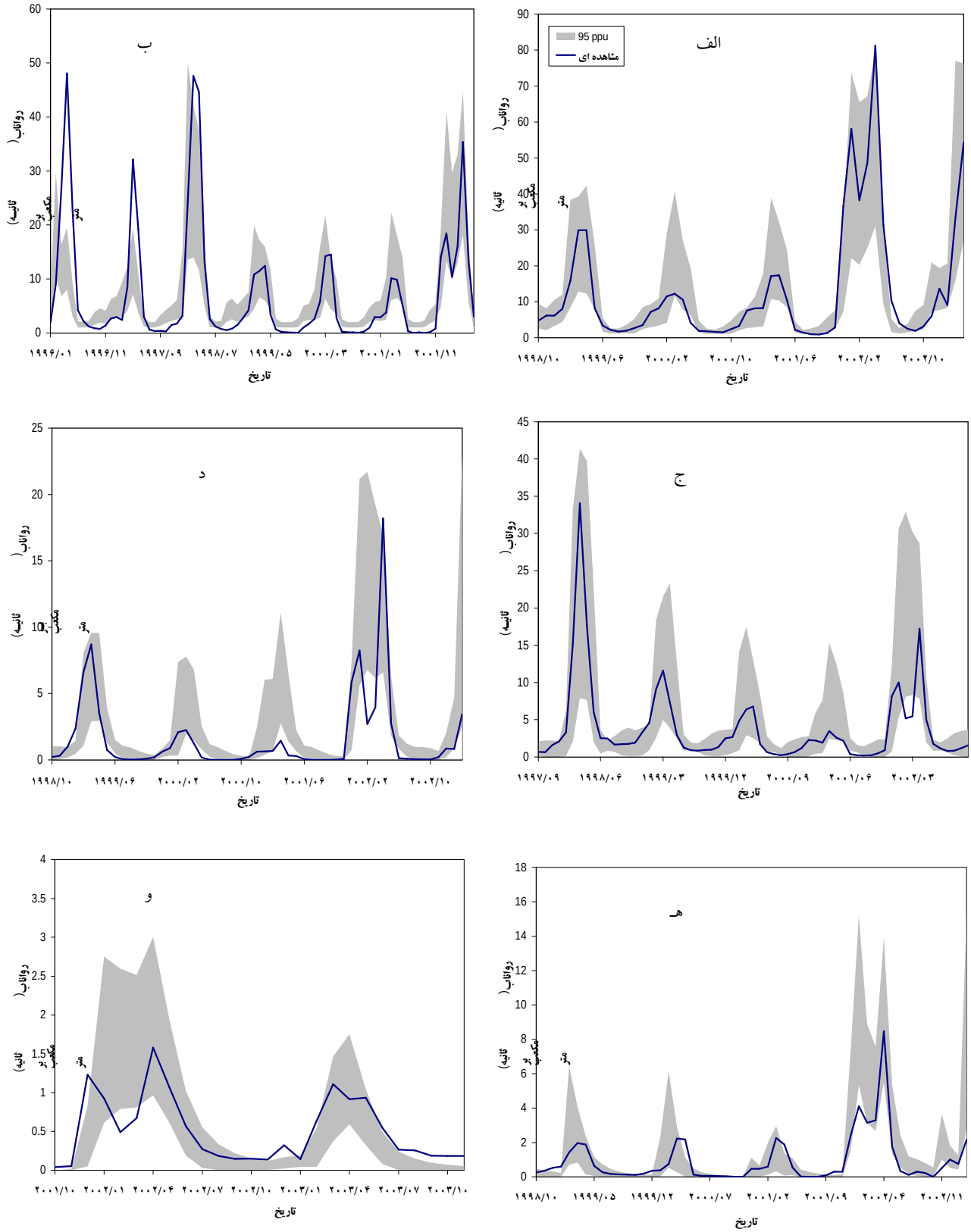
پس از جمع‌اوری داده‌های هیدرومتئورولوژی، ژئومورفولوژی، کشاورزی، خاک‌شناسی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی منطقه، ابتدا مدل به‌صورت ماهانه اجرا شد و سپس واسنجی انجام گردید. برای مرحله واسنجی رواناب ماهانه، سه چهارم از کل داده‌های رواناب هر یک از ایستگاه‌ها انتخاب شدند. ضریب ناش- ساتکلیف (NS) به‌عنوان تابع هدف و ۲۵ پارامتر مؤثر بر میزان رواناب انتخاب شدند. پس از آن ۲۰۰۰ مرحله شبیه‌سازی در چهار مرحله تکرار انجام پذیرفت. دامنه پارامترها پس از هر تکرار اصلاح شد و عدم قطعیت پارامترها در هر مرحله کاهش یافت. بعد از این که دامنه پارامترها تا حدودی کاهش یافت، تحلیل حساسیت مطلق (تغییر یک پارامتر به شرط ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها) انجام گردید و به این ترتیب تأثیر هر پارامتر در میزان رواناب شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل سنجیده شد. پس از آن مدل با مجموعه جدید پارامترها مجدداً در ۲۰۰۰ مرحله شبیه‌سازی در سه تکرار اجرا شد و در هر تکرار دامنه پارامترها تعدیل گردید.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی رواناب ماهانه در شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شده

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]



شکل ۲. واسنجی رواناب ماهانه ایستگاه‌های: الف) بهشت‌آباد، ب) درکش ورکش، ج) کوه سوخته، د) پل خراجی، هـ) جونقان و و) دهنو

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

جدول ۲. نتایج واسنجی رواناب ماهانه

ایستگاه	تعداد داده	شاخص‌های آماری			
		p-factor (%)	d-factor	R^2 (%)	N-S (%)
بهشت‌آباد	۵۴	۶۱	۰/۴۸	۸۵	۷۵
درکش ورکش	۷۸	۳۱	۰/۳	۶۴	۵۲
کوه سوخته	۶۳	۸۶	۱/۱	۷۴	۷۲
پل خراجی	۵۳	۵۵	۰/۸	۵۲	۴۵
جونقان	۵۳	۶۶	۰/۹۴	۶۷	۶۲
دهنو	۲۶	۴۲	۱/۰۴	۵۷	۴۷

است. برای سه ایستگاه بهشت‌آباد، کوه سوخته و جونقان نتایج رضایت بخشی به‌دست آمد((جدول۲) (p-factor این سه ایستگاه به ترتیب ۶۱، ۸۶ و ۶۶ درصد، R^2 آنها ۸۵، ۷۴ و ۶۷ درصد و NS آنها ۷۵، ۷۲ و ۶۲ درصد بود که مقادیر این پارامترها نسبت به مقادیر سایر ایستگاه‌ها بیشتر بود). مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب بعضی از ماه‌ها (بهمن، اسفند و فروردین ۲۰۰۲ برای ایستگاه بهشت‌آباد، اسفند، فروردین و اردیبهشت ۱۹۹۶، فروردین و اردیبهشت ۱۹۹۷، فروردین و اسفند ۱۹۹۸ و فروردین ۲۰۰۴ برای ایستگاه درکش ورکش، بهمن و اسفند ۲۰۰۲ برای ایستگاه کوه سوخته، بهمن، اسفند و فروردین ۲۰۰۲ برای ایستگاه پل‌خراجی) ضعیف عمل کرده است. با توجه به شکل ۲، مدل SWAT جریان‌های حداکثر را اکثراً کمتر از حد اندازه‌گیری شده تخمین زده است. اکثر جریان‌هایی که مدل قادر به شبیه‌سازی آنها نبوده، در ماه بهار اتفاق افتاده که تقریباً مصادف با فروردین ماه است. در حوضه بهشت‌آباد ریزش برف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و ۵۵ درصد کل بارش حوضه را تشکیل می‌دهد. مدل SWAT، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به‌صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه اسفند، فروردین و اردیبهشت و تقدم جریان شبیه‌سازی شده فروردین در بعضی از سال‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل تهیه شده قادر به شبیه‌سازی کامل ذوب برف در این منطقه نبوده است و مقادیر حداکثر رواناب (که عمدتاً در اوایل بهار رخ می‌دهند) را برای این حوضه کوهستانی خوب شبیه‌سازی نکرده است.

در مدل SWAT2000 هنگامی که رطوبت موجود در هر لایه خاک از گنجایش زراعی بیشتر باشد، مقداری از این آب اضافی باعث ایجاد جریان جانبی می‌شود و قسمتی هم به لایه بعدی نفوذ می‌کند. اما هنگامی که لایه‌ای از خاک یخ‌زده باشد، در این صورت مدل فرض می‌کند که هیچ جریان جانبی اتفاق نمی‌افتد و لایه خاک می‌تواند آب اضافه بر گنجایش زراعی را تا زمانی که اشباع شود، در خود نگه دارد. سپس فرض می‌کند که رطوبت مازاد بر گنجایش زراعی می‌تواند از لایه اشباع یخ‌زده به لایه بعدی نفوذ کند. این فرضیات باعث انتقال بخش زیادی از بارش زمستان به جریان سطحی در اوایل بهار می‌شود. بنابراین، یکی از دلایل شبیه‌سازی جریان بیش از مقدار مشاهده شده به‌وسیله مدل در اوایل بهار می‌تواند فرضیاتی باشد که مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

جدول۳. نتایج اعتبارسنجی رواناب ماهانه

ایستگاه	تعداد داده	شاخص‌های آماری			
		p-factor (%)	d-factor	R^2 (%)	N-S (%)
بهشت‌آباد	۱۷	۵۳	۰/۳۸	۸۵	۵۷
درکش ورکش	۲۶	۳۱	۰/۳۶	۵۷	۵۱
کوه سوخته	۲۱	۸۰	۱/۳۳	۸۰	۶۲
پل خراجی	۱۸	۳۳	۱/۵۲	۹۵	۵۴
جونقان	۱۸	۸۳	۱/۰۱	۵۷	۵۲
دهنو	۹	۱۰۰	۲/۸۹	۶۶	۳۹

اشباع در نظر می‌گیرد.

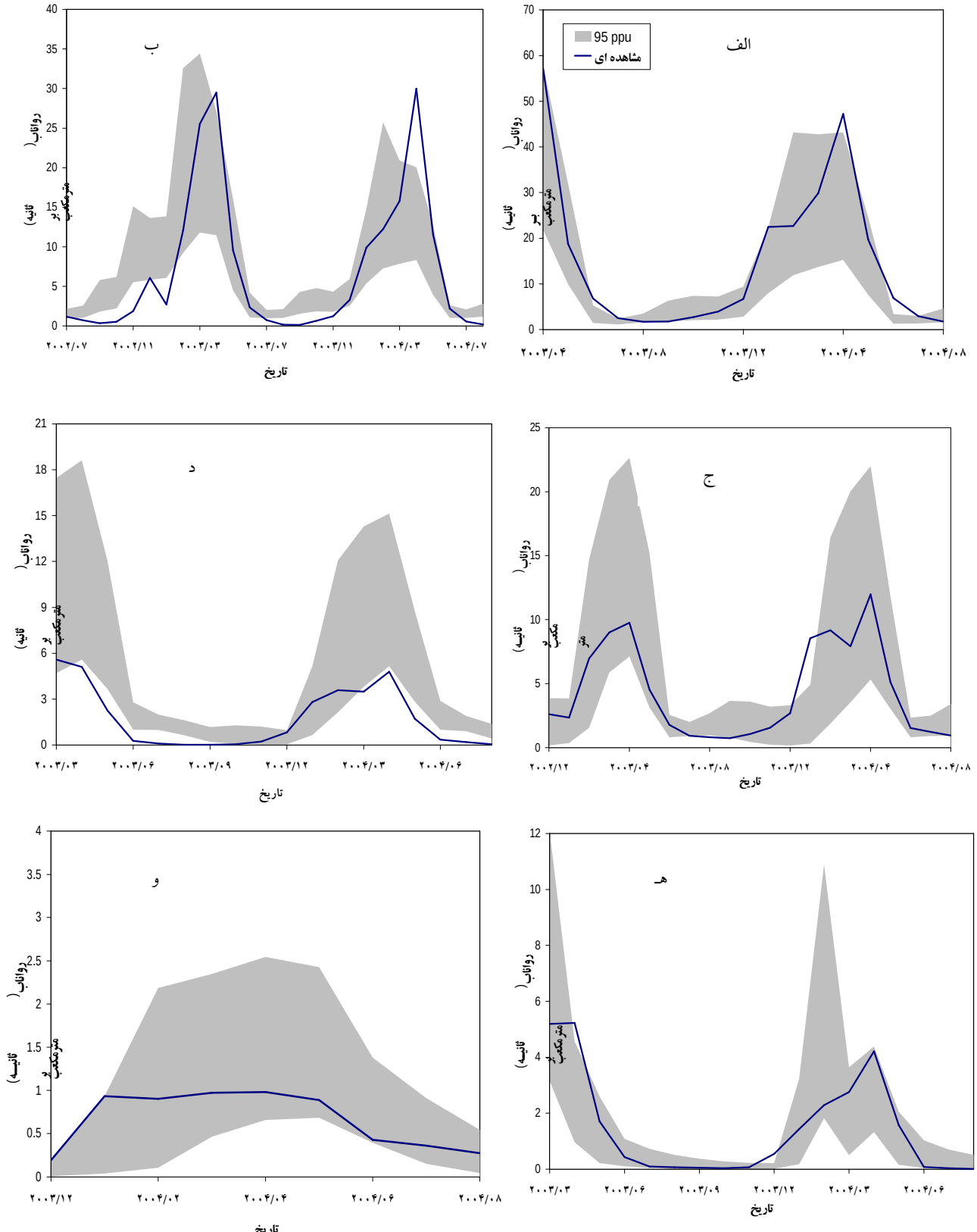
تولسون و شومیکر (۱۵) گزارش کردند که مدل SWAT برای شبیه‌سازی وقایع شدید طراحی نشده است و معمولاً بزرگ‌ترین وقایع جریان را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند. چو و شیرمحمدی (۸) با استفاده از مدلSWAT در یک حوضه آبریز در مریلند نشان دادند که مدل قادر نیست شرایط هیدرولوژیک را در دوران ترسالی شبیه‌سازی کند و ذوب سریع برف نیز در هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده ناهماهنگی ایجاد می‌نماید.

نتایج اعتبارسنجی رواناب ماهانه در شکل ۳ و جدول ۳ ارائه شده است. در این مرحله نیز برای ایستگاه‌های بهشت‌آباد، کوه سوخته و جونقان نتایج رضایت بخشی به‌دست آمد (p-factor این سه ایستگاه به ترتیب ۵۴، ۸۰ و ۸۴ درصد، R^2 آنها ۸۵، ۸۰ و ۵۷ درصد و NS آنها ۵۷، ۶۲ و ۵۲ درصد بود که مقادیر این پارامترها نسبت به مقادیر سایر ایستگاه‌ها در مجموع بهتر بود). در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، جریان ماهانه شبیه‌سازی شده برای ایستگاه دهنو از صحت کمی برخوردار است که از دلایل آن می‌توان به‌طول دوره آماری کوتاه جریان در این ایستگاه (۲۶ مورد برای واسنجی و ۹ مورد برای اعتبارسنجی) اشاره کرد.

برداشت داده‌های رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه بهشت‌آباد به‌صورت نمونه‌برداری تصادفی انجام می‌پذیرد. گاهی در یک ماه دو یا سه مرتبه نمونه‌برداری انجام شده و گاهی برای چندین ماه متوالی هیچ‌گونه برداشتی ثبت نشده است. بنابراین لازم است مدل به‌صورت روزانه اجرا شود تا امکان مقایسه بین داده‌های رسوب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وجود آید. مدل به‌صورت روزانه اجرا شد و واسنجی داده‌های رواناب و رسوب روزانه در ۱۵۰۰ مرحله شبیه‌سازی و در سه تکرار انجام شد. نتایج نهایی واسنجی رواناب و رسوب روزانه در جدول ۴ و شکل ۴ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی رسوب ضعیف بود و در مرحله واسنجی تنها برای دو ایستگاه بهشت‌آباد و کوه‌سوخته نتیجه رضایت‌بخشی (از لحاظ مقایسه p-factor، d-factor، R^2 و NS) به‌دست آمد. از دلایل اصلی ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب می‌توان به ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر، تعداد کم داده‌های روزانه رسوب استفاده شده در مرحله واسنجی و هم‌چنین پیوسته نبودن اطلاعات رسوب اشاره کرد. شاید عدم توجه کامل مدل به فرایندهای

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]



شکل ۳. اعتبارسنجی رواناب ماهانه ایستگاه‌های: الف) بهشت‌آباد، ب) درکش ورکش، ج) کوه سوخته، د) پل خراجی، هـ) جونقان و و) دهنو

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

جدول ۴. نتایج واسنجی رواناب و رسوب روزانه

نوع داده	ایستگاه	تعداد داده‌ها	شاخص آماری			
			(%) p-factor	d-factor	(%) R^2	(%) N-S
رواناب	بهشت‌آباد	۱۶۴۲	۵۴	۰/۴۳	۷۴	۶۸
	درکش ورکش	۲۳۹۰	۲۹	۰/۲۸	۶۲	۵۲
	کوه سوخته	۱۸۹۶	۶۴	۰/۹۸	۶۳	۵۴
	پل خراجی	۱۶۴۳	۳۵	۰/۶۲	۵۲	۵۱
	جونقان	۱۶۴۳	۵۳	۰/۶۴	۵۲	۵۱
	دهنو	۸۲۲	۵۴	۰/۸۵	۳۰	۱۵
رسوب	بهشت‌آباد	۱۰۷	۵۵	۰/۴۱	۵۵	۵۲
	درکش ورکش	۱۲۰	۳۲	۱/۱۳	۸۱	۸۱
	کوه سوخته	۱۲۳	۷۶	۰/۴	۹۱	۸۸
	پل خراجی	۶۲	۵۸	۰/۱۹	۶۶	۲۵
	جونقان	۸۱	۷۰	۰/۹۶	۲	-۴
	دهنو	۲۳	۷۰	۱/۵۵	۰	-۱۳

تولید رسوب نیز در این بین دخیل باشد.

تولسون و شومیکر (۱۵) بزرگ‌ترین خطای مدل در تخمین میزان فسفر و رسوب را ضعف شبیه‌سازی اوج جریان می‌دانند. غلامی (۲) گزارش داد که شبیه‌سازی سالانه و ماهانه رسوب توسط مدل SWAT بهتر از دوره‌های روزانه است ولی برای رسیدن به نتایج رضایت‌بخش رسوب روزانه، آمار طولانی مدت نیاز است.

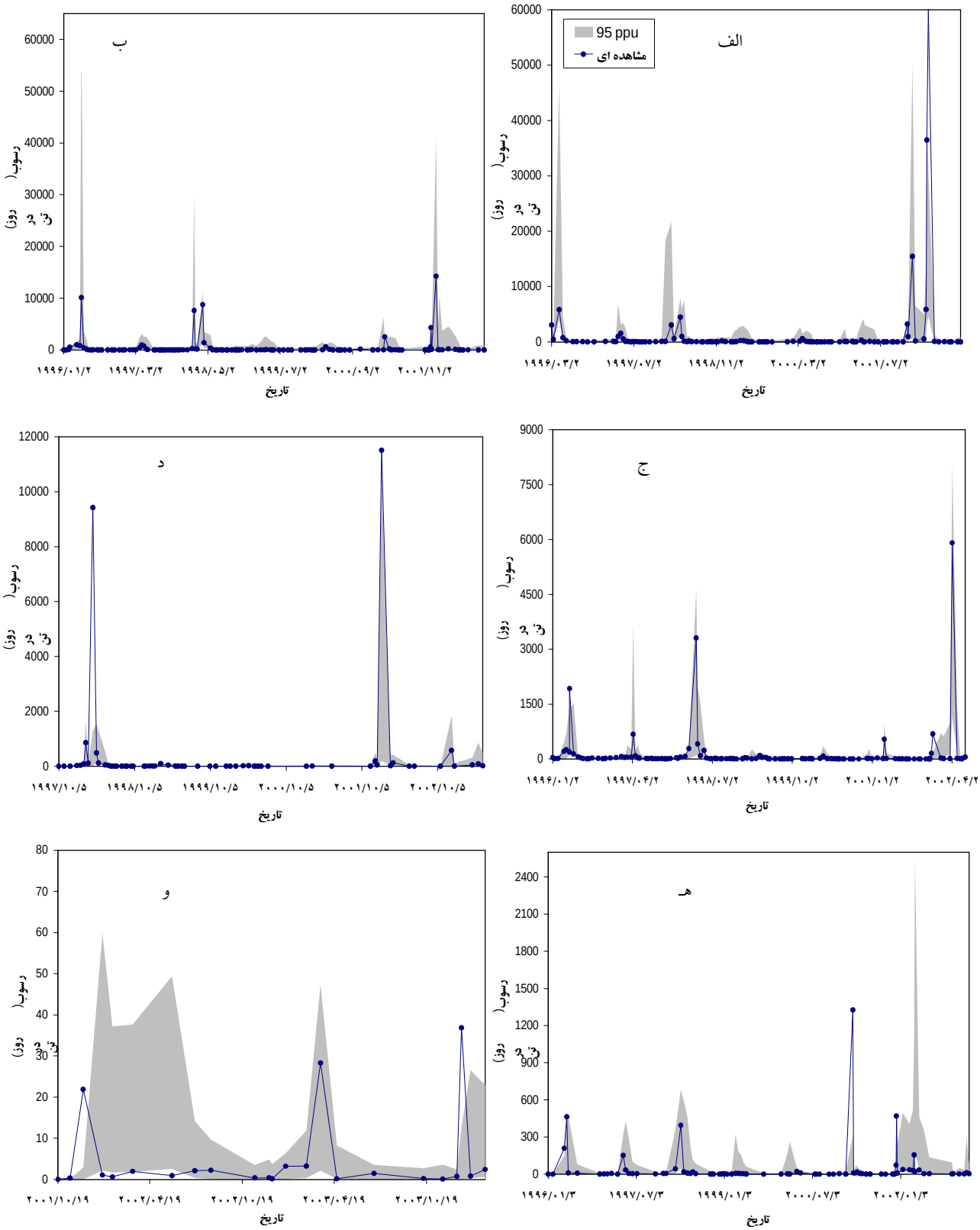
در مرحله اعتبارسنجی، مدل با مجموعه‌ای از پارامترهای به‌دست آمده از آخرین مرحله واسنجی در ۳۰۰ مرحله اجرا شد. نتایج نهایی اعتبارسنجی رواناب و رسوب در شکل ۵ و جدول ۵ ارائه شده است. در این مرحله، تنها برای ایستگاه کوه سوخته نتیجه رضایت بخشی به‌دست آمد (p-factor = %۸۴ ، R^2 = %۷۷ و NS = %۷۴).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل SWAT متوسط رواناب ماهانه را برای سه ایستگاه بهشت‌آباد، کوه سوخته و جونقان در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌صورت رضایت‌بخشی شبیه‌سازی کرد (سه پارامتر p-factor ، R^2 و NS این سه ایستگاه بهتر از سایر ایستگاه‌ها بود). نتایج نشان داد که مدل تهیه شده قادر به شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر نیست. در مرحله واسنجی رواناب روزانه، مدل برای سه ایستگاه بهشت‌آباد، کوه سوخته و جونقان و در مرحله اعتبارسنجی تنها برای دو ایستگاه بهشت‌آباد وجونقان شبیه‌سازی رضایت‌بخشی داشت. مدل برای شبیه‌سازی رسوب ضعیف عمل کرد و در مرحله واسنجی، غلظت رسوب روزانه را برای دو ایستگاه بهشت‌آباد و کوه سوخته و در مرحله اعتبارسنجی فقط برای ایستگاه کوه سوخته

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

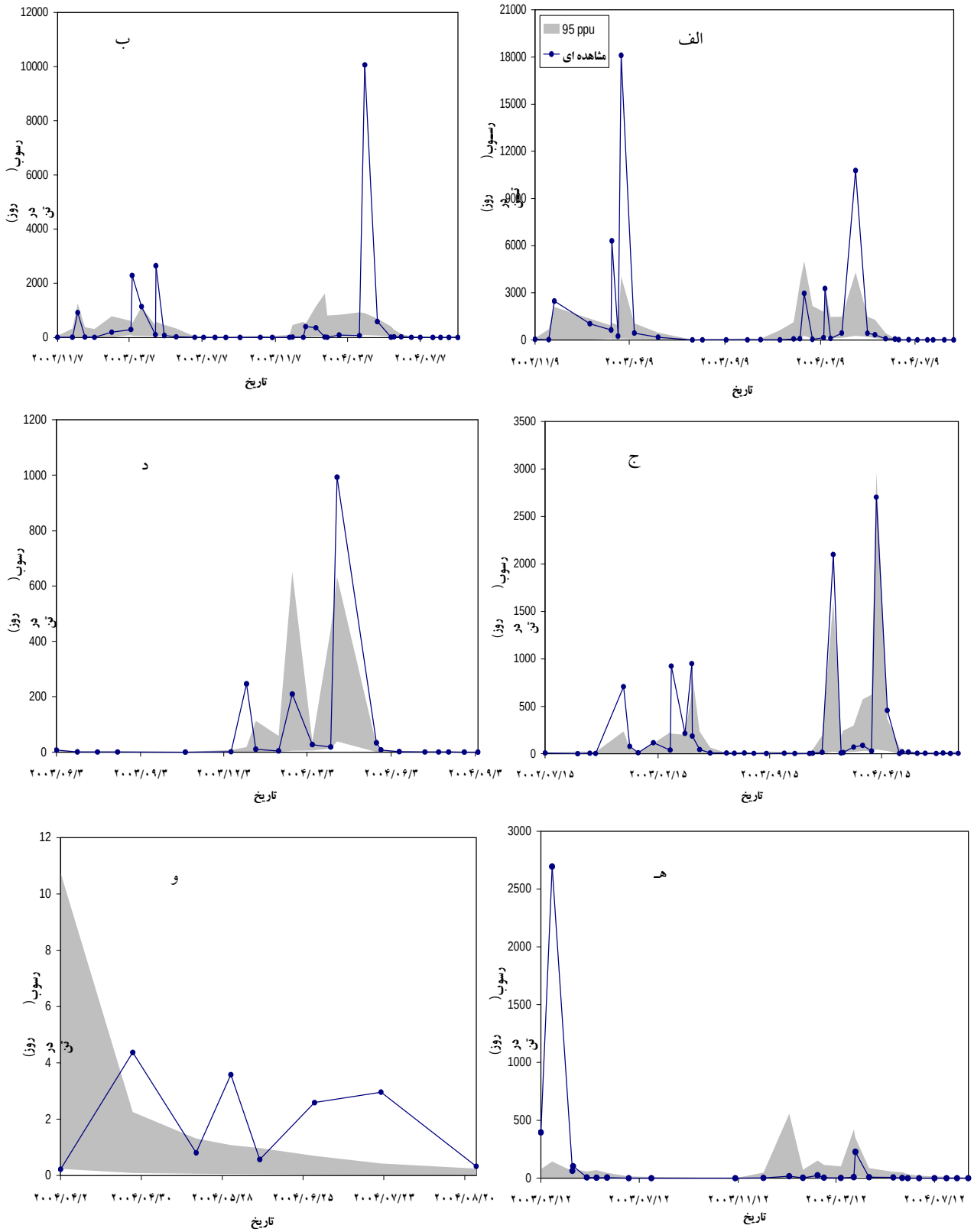
[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]



شکل ۴. واسنجی رسوب روزانه ایستگاه‌های: الف) بهشت‌آباد، ب) درکش ورکش، ج) کوه سوخته، د) پل خراجی، هـ) جونقان و و) دهنو

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]



شکل ۵. اعتبارسنجی رسوب روزانه ایستگاه‌های: الف) بهشت‌آباد، ب) درکش ورکش، ج) کوه سوخته، د) پل خراجی، هـ) جونقان و و) دهنو

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی رواناب و رسوب روزانه

نوع داده	ایستگاه	تعداد داده‌ها	شاخص آماری			
			(%) p-factor	d-factor	(%) R^2	(%) N-S
رواناب	بهشت‌آباد	۵۴۹	۶۸	۰/۶۵	۷۹	۶۹
	درکش ورکش	۷۹۷	۴۶	۰/۷	۶۰	۵۸
	کوه سوخته	۶۳۱	۷۸	۱/۸۲	۷۸	۴۷
	پل خراجی	۵۴۷	۴۳	۱/۰۹	۵۸	۳۱
	جونقان	۵۴۸	۷۵	۱/۳۵	۶۰	۶۰
	دهنو	۲۷۳	۹۵	۱/۹۹	۵۰	۱۷
رسوب	بهشت‌آباد	۳۶	۶۹	۰/۲۹	۶۰	۲۷
	درکش ورکش	۴۰	۴۳	۰/۲۳	۳۳	۹
	کوه سوخته	۴۲	۸۳	۰/۴۳	۷۷	۷۴
	پل خراجی	۲۱	۵۷	۰/۴۲	۴۹	۳۰
	جونقان	۲۷	۶۷	۰/۱۸	۱	-۳
	دهنو	۸	۳۸	۱/۳۶	۸	-۷۲

به‌صورت قابل قبولی ارائه کرد. در مجموع، مدل در شبیه‌سازی دبی رواناب خیلی بهتر از غلظت رسوب عمل کرد. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب در بعضی از ماه‌ها می‌توان به شبیه‌سازی ضعیف ذوب برف برای این حوضه کوهستانی، فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع و تعداد کم داده‌ها اشاره کرد. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی غلظت رسوب می‌توان به شبیه‌سازی ضعیف جریان، تعداد کم داده‌ها و هم‌چنین عدم پیوستگی اطلاعات رسوب استفاده شده در این مرحله اشاره کرد.

سپاسگزاری

بخشی از هزینه‌های انجام این تحقیق از محل اعتبارات طرح مشترک گروه خاک‌شناسی دانشگاه صنعتی اصفهان و مؤسسه تحقیقات محیط‌زیست کشور سوئیس (EAWAG) تأمین گردیده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. جلالیان، ا.، ا. محمدی قهساره و ح. کریم زاده. ۱۳۷۳. فرسایش و رسوب و علل آن در حوضه‌های آبخیز کشور و ارائه نتایج موردی در بعضی از حوضه‌های آبخیز ایران. خلاصه مقالات چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، صفحات ۹ -۱۰.

۲. غلامی، ش. ۱۳۸۲. مدل شبیه‌سازی رسوب روزانه با استفاده از مدل توزیعی SWAT در حوضه‌های کوهستانی (حوضه آبخیز امامه). فصل‌نامه پژوهش و سازندگی ۵۹: ۲۸-۳۳.

3. Abbaspour, K. C., C. A. Johnson and M. Th. Van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. Vadose Zone 3: 1340-1352.

4. Abbaspour, K. C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist, R. Srinivasan and P.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]

Reichert. 2007. Modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. J. Hydrol. 333: 413-430.
5. Abbaspour, K. C., M. Th. Van Genuchten, R. Schulin and E. Schlappi. 1997. A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. Water Resour. Res. 33(8): 1879-1892.
6. Baffaut, C., T. D. Farrand and V. W. Benson. 2005. Potential accuracy of water quality estimates based on non-calibrated SWAT simulations. 3rd International SWAT Conference, Zurich, Switzerland, pp. 301-309.
7. Beven, K. J. 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrologic modelling. Adv. Water Resour. 16: 41-51.
8. Chu, T. W. and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. Trans. ASAE 47(4): 1057-1073.
9. Dregne, H. E. 1992. Erosion and soil productivity in Asia. J. Soil Water Conserv. 47: 8-13.
10. Haan, C. T., D. E. Storm, T. Al-Issa, S. Prabhu, G. J. Sabbagh and D. R. Edwards. 1998. Effect of parameter distributions on uncertainty analysis of hydrologic models. Trans. ASAE 41(1): 65-70.
11. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King. 2002. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
12. Reckhow, K. H. 1994. Water quality simulation modeling and uncertainty analysis for risk assessment and decision-making. Ecol. Model. 72: 1-20.
13. Schuol, J., K. C. Abbaspour, H. Yang, P. Reichert, R. Srinivasan, Ch. Schar and A. J. B. Zehnder. 2006. Estimation of freshwater availability in the West African Sub-continent using the SWAT hydrologic model. J. Hydrol. 352: 30-49.
14. Shepherd, B., D. Harper and A. Millington. 1999. Modelling catchment-scale nutrient transport to watercourses in the U.K. Hydrobiologia 395/396: 227-237.
15. Tolson, B. A. and C. A. Shoemaker. 2004. Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville reservoir. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell Univ., Ithaca, N. Y.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.9.3]