

شبیه‌سازی جریان و رسوب حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم ژنتیک

فرزانه ناصری^۱ - محمود آذری^{۲*} - محمد تقی دستورانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۲۷

چکیده

تعیین مقدار رسوب حوضه و توزیع مکانی آن با اندازه‌گیری‌های میدانی در عمل با چالش جدی مواجه است. از این رو، مدل‌های مختلف، به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش خاک و برآورد رسوب استفاده می‌شود. مدل SWAT یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌فیزیکی و نیمه‌توزیعی است که در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای داشته است؛ اما شبیه‌سازی رسوب این مدل نسبت به دبی جریان با خطای زیادی همراه می‌باشد که بخشی از آن به دلیل استفاده از روش‌های تجربی هم‌چون منحنی سنج رسوب برای برآورد رسوب می‌باشد. از این رو، در این تحقیق برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوزه سد فریمان از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی رابطه دبی - رسوب استفاده گردید. بدین منظور مسئله بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به‌صورت یک فضای جستجو از مقادیر پیوسته ضرایب رابطه دبی - رسوب، در نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شد و ضرایب بهینه تعیین گردید. نتایج تحقیق، عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک در برآورد رسوب با ضریب نش - ساتکلیف ۰/۴۶، ضریب تعیین ۰/۷۲ و ریشه میانگین مربعات خطا ۷۰/۹ نسبت به منحنی سنج را نشان می‌دهد. از این رو داده‌های حاصل از این روش برای آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده گردید. در ارزیابی مدل، ضریب نش ساتکلیف دبی ماهانه برای دوره ۷ ساله واسنجی و دوره ۳ ساله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸۵ و برای رسوب ماهانه به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۶ به دست آمد. نتایج تحقیق بیانگر کارایی خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب می‌باشد، همچنین استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی رابطه دبی - رسوب نقش مهمی در تعیین مقادیر رسوب و دقت شبیه‌سازی مدل داشته است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تکاملی، بهینه‌سازی، رسوب‌دهی، شبیه‌سازی آبخیز، منحنی سنج

مقدمه

وضعیت رسوب حوضه با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است که در عمل با چالش جدی مواجه است از این رو در تحقیقات انجام شده از مدل‌های مختلف به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش خاک و برآورد رسوب استفاده می‌شود که هر یک از این مدل‌ها با ساده‌سازی سیستم آبخیز، فرآیندها را در قالب مجموعه‌ای از روابط و معادلات ریاضی بیان می‌کند. مدل‌های ریاضی با بهره‌گیری از قوانین و مبانی فیزیکی مانند اصل بقای ماده و انرژی قابلیت بررسی اثر اقدامات مدیریتی و پیش‌بینی اثرات سناریوهای مختلف مدیریت حوضه بر بار رسوب را دارا می‌باشند. مدل‌های هیدرولوژیکی متعددی با هدف شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه مورد استفاده قرار گرفته است اما دامنه کاربرد مدل هیدرولوژیکی نیمه‌فیزیکی و نیمه‌توزیعی SWAT^۴ به مراتب وسیع‌تر از سایر مدل‌هاست. این مدل شبیه‌سازی فرسایش خاک و بار رسوب را با استفاده

فرسایش خاک یکی از مهمترین مسائل زیست محیطی است که با افزایش فعالیت انسانی تشدید می‌شود و تهدید جدی برای بخش کشاورزی و تولید مواد غذایی به شمار می‌رود. فرسایش خاک با حذف لایه فوقانی موجب تخریب آن، کاهش مواد مغذی مورد نیاز گیاه و کاهش قابلیت نگهداری آب می‌شود. انتقال رسوبات نیز به نوبه خود باعث بروز مشکلات جدی مانند انتقال آلاینده‌ها و مواد شیمیایی، کاهش حجم مخزن و طول عمر سدها، رسوب‌گذاری در کانال‌های آبیاری و مشکلات بهره‌برداری می‌شود. از این رو، پیش‌نیاز هر اقدام حفاظتی و احداث سازه‌های آبی، برآورد بار رسوب می‌باشد. آگاهی از

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: m.azari@um.ac.ir)
* - نویسنده مسئول

مؤثر بر کیفیت آب در حوضه رودخانه Thur، در شمال شرقی سوئیس استفاده کردند. نتایج این مطالعه در شبیه‌سازی رواناب و نیترات خوب عنوان شده است ولی در مورد رسوب تا حدودی ضعیف عمل کرده است. در این تحقیق اثر رگبار متوالی و تولید رسوبات ریزدانه از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب عنوان شده است. دان و همکاران (۱۸)، در رودخانه Chaohe چین به برآورد رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT پرداختند. ضریب نش‌ساتکلیف و ضریب تعیین، برای شبیه‌سازی دبی جریان به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۹۳ و برای رسوب ۰/۷۶ و ۰/۸۰ برای دوره واسنجی به دست آمد، همچنین این ضرایب برای دوره اعتبارسنجی رواناب ۰/۵۱ و ۰/۷۸ و رسوب ۰/۷۲ و ۰/۷۹ به دست آمد. دنوما و همکاران، (۴۱) برآورد رسوب حوضه‌ای بزرگ در تانزانیا را با مدل SWAT انجام دادند. بدین منظور، مدل با داده‌های ۴ سال واسنجی گردید و سپس رسوب خروجی از حوضه به مدت ۲۷ سال محاسبه شد. برای بررسی صحت مدل، رسوب تجمع‌یافته پشت سد و نتایج خروجی مدل مقایسه شد. که دلالت بر خطای ۲/۶ درصد داشت. نتایج این تحقیق استفاده از مدل SWAT در حوضه‌هایی که فرسایش ورقه‌ای غالب است را توصیه می‌کند و آن را جایگزین مناسبی برای روش متداول منحنی‌سنجه رسوب می‌داند.

در مجموع، ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب ناشی از وجود داده‌های محدود مشاهده‌ای، خطا در اندازه‌گیری، استفاده از معادلات ساده برای محاسبه و انتقال رسوب و رفتار پیچیده و غیرخطی رسوب می‌باشد (۳۰ و ۱۸). در بیشتر تحقیقات انجام شده با توجه به تعداد کم نمونه‌برداری‌های رسوب، برای دستیابی به داده‌های روزانه از روش‌های تجربی همچون منحنی‌سنجه رسوب و روابط رگرسیونی بین دبی و رسوب استفاده شده است. منحنی‌سنجه رسوب یکی از متداول‌ترین روش‌های برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها می‌باشد که همواره با خطا و عدم قطعیت زیادی همراه است (۱۰ و ۱۱). مدل‌های رایج پیش‌بینی رسوب با دبی روزانه جزء مدل‌های رگرسیونی می‌باشند که بر اساس حداقل مربعات خطا عمل می‌کنند. این مدل‌ها مبتنی بر مفروضات محدود کننده نظیر نرمال بودن داده‌ها، خطی بودن داده‌ها و واریانس ثابت می‌باشد تحقیقات مختلف نشان داده که این مفروضات در مورد رسوب نمی‌تواند صادق باشد Altunkaynak (۹) به همین خاطر محققان به دنبال روش‌های دیگر برای بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه بوده‌اند که مناسب سیستم‌های پویا و پیچیده باشد یکی از این روش‌ها الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در شرایط غیرخطی و پیچیده عملکرد بهتری دارد. الگوریتم ژنتیک بر خلاف روش‌های رگرسیون معمول بیش از یک نقطه بهینه در فضای جستجو ارائه می‌کند. از این رو تحقیقات متعدد با الگوریتم‌های تکاملی اقدام به بهینه‌سازی ضرایب کرده‌اند.

Altunkaynak (۹)، از الگوریتم ژنتیک جهت برآورد مقدار رسوب رودخانه می‌سی‌سی‌پی در میسوری، استفاده کرد. نتایج نشان داد که

از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (MUSLE) انجام می‌دهد. همچنین قابلیت ارائه نتایج در بازه‌های زمانی سالانه، ماهانه، روزانه و ساعتی را نیز دارا می‌باشد (۲۹ و ۵). این مدل، در تلفیق با GIS^۱، امکان تحلیل مکانی تولید رسوب و تعیین مناطق بحرانی را فراهم می‌آورد، از این رو می‌تواند در تعیین اثرات تصمیم‌های مدیریت منابع آب و اقدامات کنترل منابع آلاینده‌های غیرنقطه‌ای در حوضه‌های بزرگ مورد استفاده قرار گیرد (۴).

مدل SWAT در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. در برخی از مطالعات صورت گرفته، نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب و رسوب مدل SWAT با دیگر مدل‌ها مانند AnnAGNPS^۲، JHACRES^۵، HSPF^۴، RUSLE2^۳، SIMHYD^۶ مقایسه شده است که نتایج، دلالت بر برتری نسبی این مدل دارد (۴۳، ۳۱، ۴۹، ۲۳ و ۲۴). اما با این وجود کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب در مقایسه با رواناب، ضعیف عنوان شده است. به طوری که رستمیان و همکاران (۴۵)، در شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه بهشت‌آباد با استفاده از مدل SWAT، علت ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب را، شبیه‌سازی ضعیف جریان، تعداد کم داده‌ها و عدم پیوستگی داده‌های رسوب عنوان کرده‌اند. محضری و همکاران (۳۳) نیز شبیه‌سازی رواناب، رسوب و مواد مغذی در حوضه گرگانرود را با مدل SWAT انجام دادند. برای این منظور، مدل در ۱۴ ایستگاه مورد مطالعه، برای ۲۱ سال واسنجی و ۱۰ سال اعتبارسنجی گردید. نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل نشان داد مدل به خوبی می‌تواند رواناب را شبیه‌سازی نماید ولی در مورد رسوب نتایج خیلی رضایت‌بخش نیست. لی و همکاران (۳۲)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT، به مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت بشر بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز Jihe در چین پرداختند. سال‌های ۱۹۸۱-۱۹۶۲ برای واسنجی مدل و سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۸۲ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. ضریب نش‌ساتکلیف و ضریب تعیین ماهانه رسوب به ترتیب برای دوره واسنجی ۰/۷۶ و ۰/۸۶ و دوره اعتبارسنجی ۰/۴۷ و ۰/۵۳ به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان دهنده عملکرد بهتر مدل برای دوره واسنجی می‌باشد، همچنین علت عملکرد ضعیف مدل در شبیه‌سازی رسوب، نقشه DEM معرفی شده به مدل و تأثیر آن در شیب و میزان رسوب حوضه عنوان شده است. عباسپور و همکاران (۱) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای

- 1- Geographic Information System (GIS)
- 2- Annualized Agricultural Non-Point Source
- 3- Revised Universal Soil Loss Equation 2
- 4- Hydrologic Simulation Program Fortran
- 5- Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow
- 6- Simple Hydrology

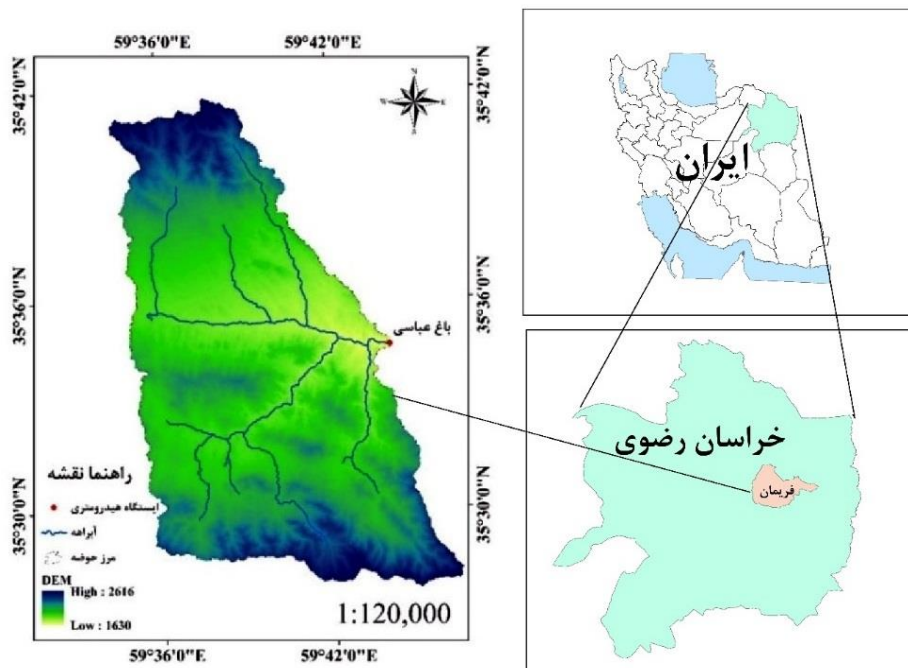
از این‌رو، هدف اصلی این پژوهش شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوزه سد فریمان با مدل SWAT می‌باشد. بدین منظور از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی رابطه دبی-رسوب استفاده گردید، سپس واسنجی و اعتبارسنجی مدل با انتخاب مدل بهینه انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سد فریمان به وسعت ۲۷۸/۸ کیلومتر مربع در محدوده عرض جغرافیایی ۳۳° ۳۵' تا ۳۵° ۴۱' و طول جغرافیایی ۳۴° ۳۴' تا ۳۴° ۵۹' در استان خراسان رضوی واقع شده است. ایستگاه هیدرومتری باغ عباسی در خروجی حوضه و بالادست سد فریمان قرار دارد که از سال آبی ۱۳۴۷-۱۳۴۶ داده‌های دبی روزانه و آمار رسوب آن ثبت شده است. شیب متوسط حوضه سد ۱۶/۹۲ درصد، طول آبراهه اصلی ۲۳/۵۵ کیلومتر و ارتفاع متوسط آن ۱۹۹۳/۹ متر می‌باشد (۲۶). شکل ۱ نقشه موقعیت حوزه آبخیز سد فریمان در استان خراسان رضوی را نشان می‌دهد.

میانگین نسبی خطای الگوریتم ژنتیک به‌مراتب بهتر از مدل‌های رگرسیونی می‌باشد. محمدرضاپور و همکاران (۳۴)، در تحقیقی به مقایسه الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه کردن رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب برای ایستگاه کهک در رودخانه سیستان پرداختند. ارزیابی نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک از دقت بالاتری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و منحنی‌سنجه رسوب برخوردار می‌باشد. وفایی‌نژاد و همکاران (۵۰) بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه رسوب را با الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مقدار ۶/۶ تن در روز کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و پس از آن، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده با مقدار ۷/۱۹ تن در روز قرار دارد. بهمنش و همکاران (۱۲) نیز ضرایب معادله سنجه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک در چهار ایستگاه هیدرومتری استان آذربایجان غربی بهینه کردند که نتایج برتری مدل الگوریتم ژنتیک را با کاهش ۲۵ درصد در میانگین مربع خطا نشان داد. طباطبایی و صالح پور جم (۴۸) نیز بهینه‌سازی ضرایب منحنی سنجه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات انجام دادند و بر کارایی این الگوریتم‌ها در کاهش خطای مدل منحنی سنجه تأکید کردند.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد فریمان در استان خراسان رضوی

Figure 1- The location of Fariman dam watershed in Khorasan Razavi province

مدل SWAT

شده است و بر این اساس برای هر روز با بارندگی و رواناب مشخص، تولید رسوب هر HRU با رابطه ۲ تعیین می‌شود.

$$Sed = \frac{1}{C} \times P \times LS \times CFRG \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.5} \times K \quad (2)$$

در رابطه ۲، Sed: بار رسوب در روز معین (تن)، Q_{surf} : حجم رواناب سطحی (میلی‌متر در هکتار)، q_{peak} : مقدار دبی اوج (متر مکعب در ثانیه)، $area_{hru}$: مساحت واحد پاسخ هیدرولوژیک (هکتار)، K: عامل فرسایش‌پذیری خاک، C: عامل مدیریت و پوشش زمین، P: عامل عملیات حفاظتی، LS: عامل توپوگرافی و CFRG: عامل اجزاء درشت دانه خاک است (۳۹).

آماده‌سازی داده‌ها

برای آماده‌سازی و اجرای مدل SWAT نیاز به نقشه و اطلاعات مدل ارتفاع رقومی، خاک، کاربری اراضی، داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی (بارندگی و دمای حداقل و حداکثر در مقیاس روزانه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ...) می‌باشد. همچنین داده‌های دبی جریان و رسوب به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز به افزایش دقت پیش‌بینی کمک می‌کند. در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی حوضه، اطلاعات مورد نیاز از منابع مختلف تهیه و جمع‌آوری گردید (جدول ۱). در شکل ۲ نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه اجزاء واحد خاک و زیرحوضه‌ها نشان داده شده است. در بخش هواشناسی نیز، داده‌های بارش روزانه ۴ ایستگاه بارانسنجی فرهادگرد، ناری، کاریزنو، بکاول و داده‌های دما مربوط به ایستگاه فرهادگرد برای دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۹۱ از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ شد و در شبیه‌سازی استفاده گردید.

برای شروع کار با مدل SWAT، ابتدا مدل ارتفاع رقومی به افزونه Arc SWAT 2012 در نرم‌افزار Arc GIS 10.3.1 معرفی شد و با تعریف آستانه ۴۵۰ هکتار، مرز حوضه و زیرحوضه‌ها تعیین گردید. با تعیین محل ایستگاه هیدرومتری باغ‌عباسی به عنوان خروجی حوضه، ۲۸ زیرحوضه تفکیک گردید. در مرحله بعد، به‌منظور تعیین واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی حوضه، نقشه‌خاک در ۲۰ طبقه، نقشه کاربری اراضی حوضه با ۴ طبقه (زراعت آبی، زراعت دیم، مرتع، مسکونی و روستا) و نقشه شیب با ۵ طبقه (۵-، ۱۰-، ۲۰-، ۳۰-، ۳۰+) به مدل معرفی شد. در بخش اقلیم، داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و دمای بیشینه و کمینه ایستگاه تبخیرسنجی نیز به مدل معرفی گردید و مدل برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۱ اجرا شد. علت انتخاب این دوره، عدم اجرای اقدامات آبخیزداری و داشتن شرایط و رفتار طبیعی حوضه بوده است. در این مطالعه از روش شماره منحنی، هارگریوز و ماسکینگام به ترتیب برای محاسبه رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و روندیابی جریان در رودخانه

مدل SWAT، یک مدل حوضه‌ای، نیمه‌توزیعی و پیوسته-زمانی می‌باشد. این مدل، برای پیش‌بینی تأثیر مدیریت اراضی بر هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی طراحی شده است. کوچکترین واحد کاری در این مدل، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی^۱ می‌باشد. هر یک از این واحدها ترکیب منحصر به فرد از کاربری زمین، خاک و شیب در زیرحوضه می‌باشد (۵ و ۷). فرآیندهای هیدرولوژیکی در مدل SWAT به دو مرحله زمینی^۲ و آبی^۳ تقسیم می‌شوند. مرحله زمینی مربوط به فرآیندهای سطح حوضه و ورود آب، رسوب و عناصر شیمیایی به آبراهه اصلی هر زیرحوضه است و مرحله آبی به روندیابی جریان رسوبات بالادست در آبراهه می‌پردازد (۲۱ و ۴۰). شبیه‌سازی بخش زمینی چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT بر پایه رابطه بیلان آبی به صورت رابطه ۱ صورت می‌گیرد.

$$SW_T = SW_0 + \sum_{i=1}^n (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

در این رابطه: SW_T : مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 : مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} : مقدار بارندگی در روز (میلی‌متر)، Q_{surf} : مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)، E_a : مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر)، W_{seep} : مقدار آبی که از خاک به ناحیه غیراشباع وارد می‌شود و Q_{gw} : مقدار جریان برگشتی (میلی‌متر) است. رواناب سطحی با دو روش شماره منحنی اصلاح شده و گرین-امپت^۴ محاسبه می‌شود. بخش‌های اصلی مدل SWAT شامل، هیدرولوژی، هواشناسی، فرسایش خاک، مواد مغذی، دمای خاک، رشد گیاه، آفت کش‌ها، مدیریت کشاورزی و روند جریان رودخانه می‌باشد (۶). برای روندیابی جریان دو روش ضریب ذخیره متغیر^۵ و ماسکینگام^۶ در مدل تعریف شده است. به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق نیز سه روش پریستلی-تیلور^۷، پنمن-مانتیث^۸ و هارگریوز^۹ در مدل ارائه شده است (۳۹). در این مدل فرسایش و بار رسوب برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی با استفاده از مدل MUSLE (۵۲ و ۵۳) تعیین می‌گردد که نسخه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش USLE (۵۴) می‌باشد. در روش MUSLE، عامل فرسایش باران با عامل رواناب جایگزین

- 1- Hydrologic Response Units (HRUs)
- 2- Land phase
- 3- Water phase
- 4- Green-Ampt
- 5- Variable Storage
- 6- Muskingum
- 7- Priestley-Taylor
- 8- Penman-Monteith
- 9- Hargreaves

از دو روش منحنی‌سنجه رسوب و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. بدین منظور، داده‌ها به‌طور تصادفی به ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون مدل‌ها تقسیم گردید (۱۵ و ۳۶).

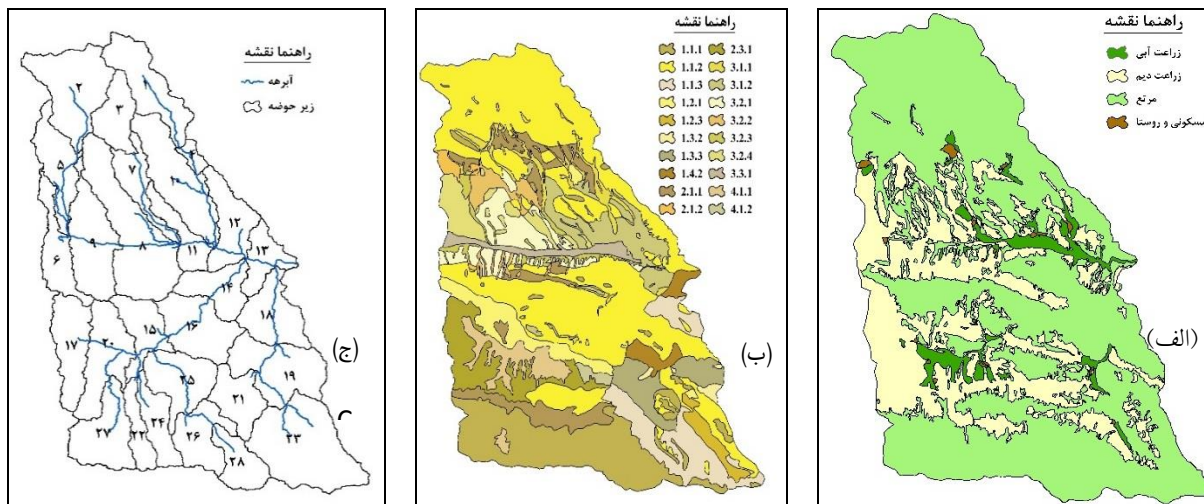
استفاده گردید. برای محاسبه رسوب ماهانه، آمار دبی جریان و غلظت رسوب اندازه‌گیری شده برای ایستگاه هیدرومتری باغ‌عباسی در خروجی حوضه، برای دوره زمانی ۱۳۸۰-۱۳۴۷ از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی اخذ گردید. سپس به‌منظور بررسی دقت برآورد رسوب

جدول ۱- داده‌های مورد نیاز مدل SWAT و منابع آن
Table 1- Required data for SWAT model and resources

منبع اخذ داده Source of data	مقیاس Scale	داده‌های مکانی Spatial data
تصاویر ماهواره‌ای Landsat5 Landsat 5 satellite images	1:50000	نقشه کاربری اراضی Land Use map
اداره کل منابع طبیعی استان خراسان رضوی Natural Resources Departemnt of Khorasan Razavi	1:20000	نقشه خاک Soil map
www.usgs.gov	1:50000	مدل ارتفاع رقومی Digital Elevation Model

جدول ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی حوضه سد فریمان
Table 2- The location of meteorological sations in Fariman Dam Watershed

عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ایستگاه Station
35° 34' 39.6"	59° 44' 3.3"	باغ‌عباسی Bagh Abbasi
35° 46' 66.1"	59° 43' 53.6"	فرهادگرد Farhadgerd
35° 31' 46.1"	59° 38' 59.1"	ناری Nari
35° 35' 54.1"	59° 38' 45"	کاریزنو Karizno
35° 29' 31"	59° 9' 7.8"	بکاول Bakavel



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی (الف)، اجزاء واحد خاک (ب) و زیرحوضه‌های (ج) حوزه‌آبخیز سد فریمان
Figure 2- Fariman dam watershed Landuse A), soil units (B) and Sub watersheds (C) maps

رسوب و Q_{oi} مقادیر محاسبه شده رسوب می‌باشد.

$$g(u) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(Q_{mi} - Q_{oi})^2} \quad (4)$$

آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی SWAT

به منظور آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی SWAT، از الگوریتم SUFI-2 (۵۶ و ۵۵) استفاده گردید. الگوریتم نیمه خودکار SUFI-2 یک مدل معکوس می‌باشد و داده‌های خروجی مدل SWAT را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و مقدار بهینه پارامترهای مؤثر در واسنجی را برآورد می‌نماید. این الگوریتم، برای ارزیابی عدم قطعیت از دو معیار P-factor و R-factor استفاده می‌کند (۲). P-factor معرف درصد داده‌های مشاهده‌ای است که در محدوده باند عدم قطعیت (95PPU) قرار گرفته است و مقدار آن بین ۰ تا ۱ می‌باشد و R-factor نسبت عرض باند 95PPU به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. شرایط ایده‌آل در یک شبیه‌سازی زمانی است که مقدار P-factor به یک و R-factor به صفر نزدیک شود (۳). به منظور آنالیز حساسیت پارامترهای مدل، با توجه به منابع مختلف (۸، ۴ و ۶)، اقدام به انتخاب پارامترهای مؤثر بر دبی و رسوب در منطقه مورد مطالعه گردید. سپس آنالیز حساسیت به روش کلی بر روی ۳۲ پارامتر انتخاب شده برای دبی و ۱۴ پارامتر برای رسوب انجام شد و پارامترهای حساس مشخص گردید، پس از آن، مدل با داده‌های دبی و بار رسوب ماهانه برای دوره زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ برای دبی و رسوب واسنجی و اعتبارسنجی گردید.

ارزیابی کارایی مدل‌ها

به منظور ارزیابی منحنی‌سنجه رسوب و الگوریتم ژنتیک در تخمین بار رسوب معلق، و همچنین واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا^۴، معیار نش‌ساتکلیف^۵، ضریب تعیین^۶ و معیار ارزیابی کلینگ و گوپتا^۷ (رابطه‌های ۸-۵) استفاده گردید. هرچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کوچک‌تر باشد، صحت پیش‌بینی مدل بیشتر می‌شود و مدل از دقت بیشتری برخوردار است. ضریب تعیین نشان دهنده همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده می‌باشد و مقدار بهینه این شاخص آماری یک است. مقدار ضریب نش‌ساتکلیف و معیار ارزیابی کلینگ و گوپتا از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. هر چه این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد، مدل از کارایی بالاتری برخوردار است

منحنی‌سنجه رسوب^۱، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها می‌باشد که یک رابطه تجربی و جزء برآوردکننده‌های رگرسیونی می‌باشد. در این پژوهش، به منظور برآورد بار معلق رسوب، از مدل سالانه روش اداره عمران ایالات متحده^۲ براساس تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده و بدون دسته‌بندی داده‌ها استفاده شد (۳۵). معادله منحنی‌سنجه رسوب به صورت رابطه ۳ می‌باشد.

$$Q_s = a Q_w^b \quad (3)$$

در رابطه ۳، Q_s غلظت رسوب بر حسب میلی‌گرم در لیتر یا تن، Q_w دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و a و b ضرایب ثابت معادله می‌باشند که به ترتیب شاخصی از شدت فرسایش و توان فرسایش رودخانه را نشان می‌دهد (۲۰ و ۱۹). در این تحقیق رابطه دبی-رسوب و مقادیر ثابت a و b معادله برای داده‌های آموزش منحنی‌سنجه رسوب در نرم‌افزار Excel به دست آمد.

الگوریتم ژنتیک^۳ (GA)

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های تکاملی پرکاربرد است که به وسیله هالند در دهه ۱۹۷۰ معرفی شد. اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده است. مهم‌ترین عملگرهای الگوریتم ژنتیک، برش و جهش می‌باشد. در این الگوریتم، ابتدا به‌طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها ایجاد و سپس برازندگی آن‌ها محاسبه و تعیین می‌گردد. در ادامه، به وسیله عملگرهای برش و جهش جامعه‌ای جدید با مقادیر برازندگی بالاتر تولید می‌شود. عمل برش بر روی کروموزوم‌های افرادی که به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند اعمال می‌شود. در عمل جهش یک ژن می‌تواند با ژنی دیگر در طول کروموزوم تعویض شود یا مقدار عددی یک یا چند ژن به‌طور تصادفی تغییر کند. در واقع، عملگر جهش، الگوریتم ژنتیک را قادر می‌سازد تا به راه‌حل بهینه نزدیک شود. این عملگرها تا زمان رسیدن به تابع هدف تکرار می‌شوند (۲۲ و ۲۷). شکل ۳ نمودار جریان الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در این پژوهش، ابتدا مسئله بهینه‌سازی به‌صورت یک فضای جستجو از مقادیر پیوسته ضرایب رابطه دبی-رسوب (a و b) در نرم افزار MATLAB 2017 برنامه‌نویسی شد، سپس جمعیت اولیه در این فضا تعیین و تابع هدف برای هر کروموزوم (a و b) محاسبه گردید. تابع هدف الگوریتم ژنتیک به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر رسوب مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده می‌باشد که به صورت رابطه ۴ تعریف شده است. در رابطه ۴، Q_{mi} مقادیر اندازه‌گیری شده

4- Root Mean Squer Error (RMSE)

5- Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE)

6- Coefficient of Determination (R2)

7- Kling-Gupta efficiency (KGE)

1- Sediment Rating Curve (SRC)

2- USBR

3- Genetic Algorithm (GA)

نتایج و بحث

مقایسه روش‌های برآورد رسوب

در این تحقیق کارایی منحنی‌سنج رسوب و رابطه دبی- رسوب بهینه شده با الگوریتم ژنتیک تعیین گردید. شکل ۴ نشان دهنده مقایسه مدل الگوریتم ژنتیک و منحنی‌سنج رسوب در برآورد مقادیر رسوب معلق دوره آزمون ایستگاه باغ‌عباسی می‌باشد. بر اساس شکل ۴ برای دبی‌های پایین، مقادیر حاصل از مدل الگوریتم ژنتیک دارای اختلاف کمتری با مقادیر مشاهده‌ای رسوب می‌باشد، به عبارتی، قادر به پیش‌بینی دقیق‌تری بوده است. برای مثال، برای دبی ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه، الگوریتم ژنتیک توانسته مقدار رسوب نزدیک‌تر (۶/۷۵ تن) به داده مشاهده‌ای (۵/۹۷ تن) پیش‌بینی کند در صورتی که برای همین مقدار دبی، منحنی‌سنج (۲/۱۷ تن) قادر به پیش‌بینی دقیقی از مقدار رسوب نبوده است.

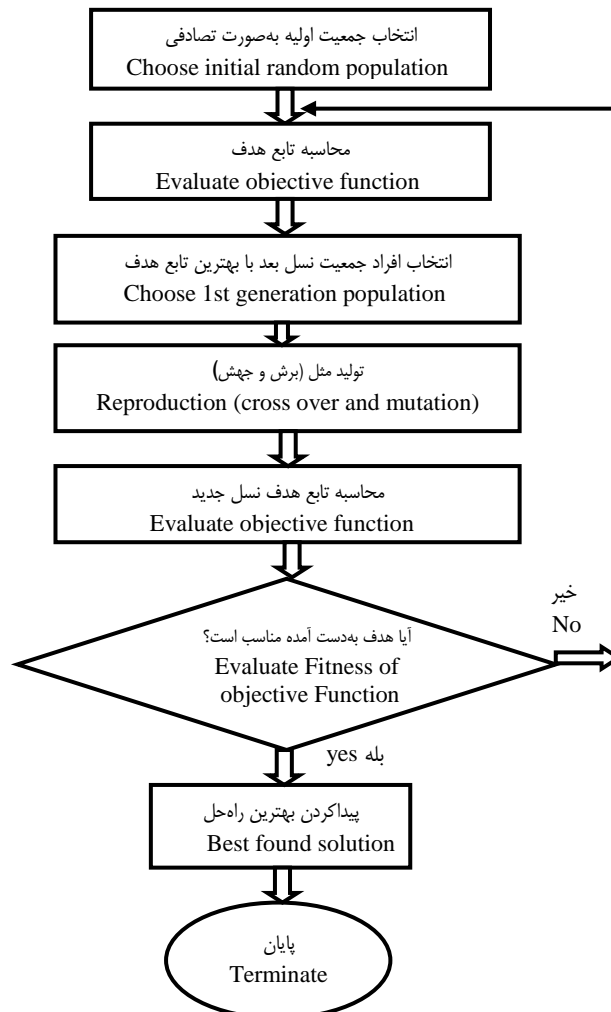
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (5)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (6)$$

$$NS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (8)$$

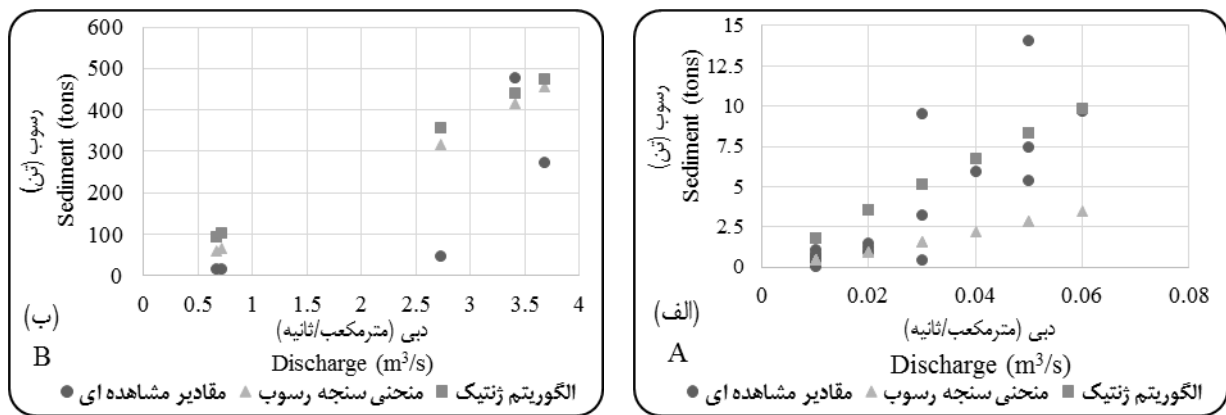
در روابط ۵ تا ۷، n: تعداد داده‌ها، O_i : مقدار مشاهده‌ای، P_i : مقدار پیش‌بینی مدل، \bar{O} : میانگین مقادیر مشاهده‌ای، \bar{P} : میانگین مقادیر پیش‌بینی مدل می‌باشد. در رابطه ۸، r ضریب همبستگی خطی داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل، α و β نیز به ترتیب نسبت انحراف معیار و نسبت میانگین‌ها داده‌های مشاهده‌ای به پیش‌بینی مدل می‌باشد.



شکل ۳- نمودار جریان الگوریتم ژنتیک
Figure 3- Flow chart of the Genetic Algorithm

این در حالی است که در برخی از مطالعات نظیر محمدرضاپور و همکاران (۳۴) و Altunkaynak (۹)، الگوریتم ژنتیک برای دبی‌های اوج عملکرد بهتری داشته است و در پژوهش روشننگر و همکاران (۴۶)، نیز عملکرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک در برآورد دبی‌های پایین بهتر عنوان شده است. در این پژوهش، پیش‌بینی بهتر مدل برای مقادیر رسوب پایین می‌تواند به دلیل مشارکت بیشتر مقادیر پایین دبی و رسوب در آموزش مدل باشد، زیرا تعداد نمونه‌برداری در زمان‌های سیلابی کمتر بوده و مدل برای شرایط سیلابی و پیش‌بینی رسوب برای دبی‌های اوج به خوبی آموزش داده نشده است. علت تفاوت بین عملکرد بهتر روش‌های هوش مصنوعی در مقایسه با روش‌های آماری می‌تواند در قابلیت تخمین و پیش‌بینی این روش‌ها برای تقریب غیرخطی با حجم کم داده‌ها باشد (۲۶). این در حالی است که عملکرد و دقت روش‌های رگرسیونی به شدت وابسته به حجم نمونه می‌باشد و می‌تواند عامل محدودیت مدل‌های آماری باشد. همچنین در جدول ۳ رابطه دبی-رسوب و نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی مدل در مرحله آزمون ایستگاه باغ‌عباسی ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از این معیارها نشان می‌دهد که مدل الگوریتم ژنتیک با ریشه میانگین مربعات خطای ۷۰/۹، ضریب نش-ساتکلیف ۰/۴۶ و ضریب تعیین ۰/۷۲ عملکرد بهتری نسبت به

منحنی سنجه رسوب داشته است. مقادیر برآورد شده با الگوریتم ژنتیک دارای روند بهتری در شبیه‌سازی داده‌های رسوب نسبت به منحنی سنجه رسوب می‌باشد. به منظور مقایسه عملکرد مدل SWAT، مقادیر رسوب ماهانه خروجی مدل بدون واسنجی با رسوب برآورد شده با روش‌های الگوریتم ژنتیک و منحنی سنجه رسوب نیز مقایسه گردید که نتایج در شکل ۷ برای دوره شبیه‌سازی (۲۰۰۰-۱۹۹۱) ارائه شده است. با توجه به شکل ۵، مقدار رسوب شبیه‌سازی شده با مدل SWAT به مقدار الگوریتم ژنتیک نزدیک‌تر می‌باشد. مقدار ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای منحنی سنجه رسوب به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۴۴ و برای الگوریتم ژنتیک ۰/۵۱ و ۰/۵۳ می‌باشد. بر اساس شکل ۵ مدل SWAT مقادیر بالای رسوب را به خوبی برآورد نکرده است که این موضوع در تحقیقات رستمیان و همکاران (۴۵)، محضری و همکاران (۳۳)، عباسپور و همکاران (۱)، لی و همکاران (۳۲) نیز مشاهده شده است. در پژوهش ندومبا و همکاران (۴۱) نیز عملکرد مدل SWAT در برآورد رسوب‌های کم حاصل از فرسایش ورقه‌ای بهتر بوده است. در مجموع با توجه به کارایی بهتر رابطه بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، این روش به عنوان روش برتر در برآورد رسوب روزانه و ماهانه برای واسنجی مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفت.

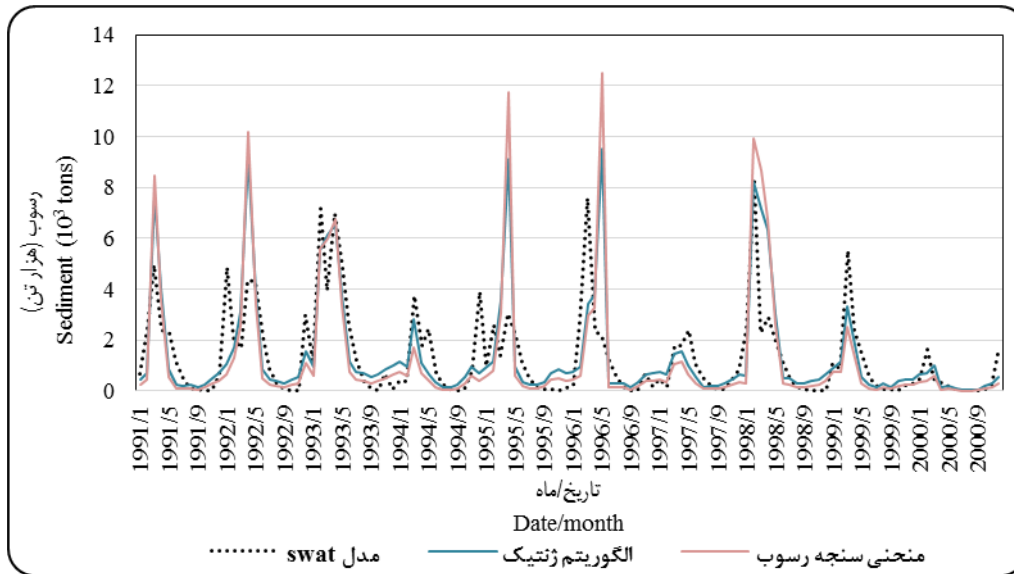


شکل ۴- مقایسه مدل الگوریتم ژنتیک و منحنی سنجه رسوب در برآورد رسوب دبی‌های کم (الف) و دبی‌های زیاد (ب) برای دوره آزمون
Figure 4- Comparison of the Genetic Algorithm and Sediment Rating Curve models in Estimation of Sediment yield for low flow (A) and high flow (B) in the test period

جدول ۳- معیارهای ارزیابی مدل‌های برآورد رسوب برای داده‌های آزمون

Table 3- Evaluation results of Sediment_discharge models for the test period

مدل Model	رابطه دبی-رسوب Sediment_discharge equation	NS	RMSE	R ²
منحنی سنجه رسوب Sediment Rating Curve	$y = 97.594 x^{1.1818}$	0.41	86.01	0.71
الگوریتم ژنتیک Genetic Algorithm	$y = 139.15 x^{0.9397}$	0.46	70.91	0.72



شکل ۵- مقایسه مدل‌ها در برآورد رسوب ماهانه

Figure 5- The comparison of models in estimation of monthly sediment yield

جدول ۴- دامنه اولیه و مقدار بهینه پارامترهای منتخب دبی

Table 4- Initial range and optimal value for selected discharge parameters

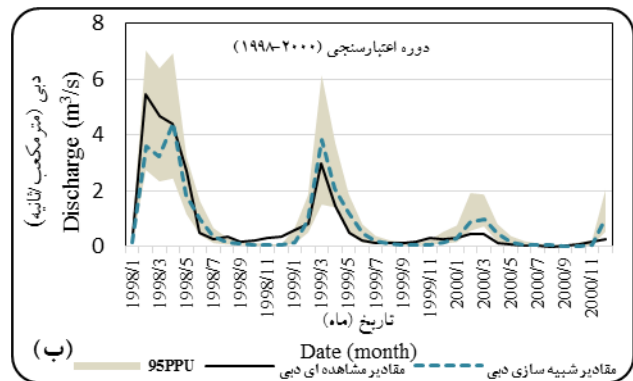
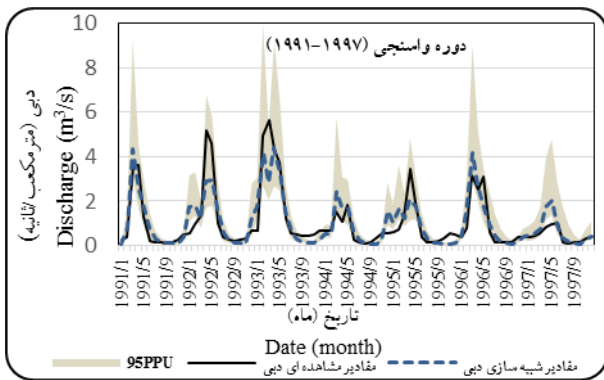
پارامتر Parameter	علامت اختصاری پارامتر Parameter name	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	مقدار بهینه Optimum
شماره منحنی رواناب به روش SCS SCS runoff curve number	r*_CN2.mgt	-0.5	0.5	0.17
عامل تاخیر رواناب سطحی Surface runoff lag coefficient	v__SURLAG.bsn	0.05	24	14.96
عامل α در محاسبه جریان پایه Base flow alpha factor	v**_ALPHA_BF.gw	0.2	1	0.72
ضریب برگشت آب‌های زیرزمینی Groundwater "revap" coefficient	v__GW_REVAP.gw	0.02	0.2	0.05
عمق آستانه آب در آبخوان عمیق Threshold depth of water in the shallow aquifer	v__GWQMN.gw	0	5000	3085.09
عملکرد ویژه آبخوان کم عمق Specific yield of the shallow aquifer	v__GW_SPYLD.gw	0	0.4	0.25
عامل α در محاسبه جریان پایه Baseflow alpha factor for bank storage	v__ALPHA_BNK.rte	0	1	0.07
برگاب (حداکثر ذخیره پوشش تاج گیاهی) Maximum canopy storage	v__CANMX.hru	0	100	88.11
هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک Saturated hydraulic conductivity	r__SOL_K.sol	-0.8	0.8	-0.79
وزن مخصوص ظاهری خاک Moist bulk density	r__SOL_BD.sol	-0.5	0.5	-0.24
هدایت هیدرولیکی موثر بستر آبراهه اصلی Manning's "n" value for the main channel	v__CH_K2.rte	0	150	107.35
ضریب هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه‌های فرعی Saturated hydraulic conductivity	v__CH_K1.sub	5	150	85.4

ضرب مقدار اولیه پارامتر در (۱+ ارزش داده شده) v^{**} : مقدار اولیه پارامتر مورد نظر با مقدار داده شده جایگزین می‌شود (۳)

جدول ۵- دامنه اولیه و مقدار بهینه پارامترهای منتخب رسوب

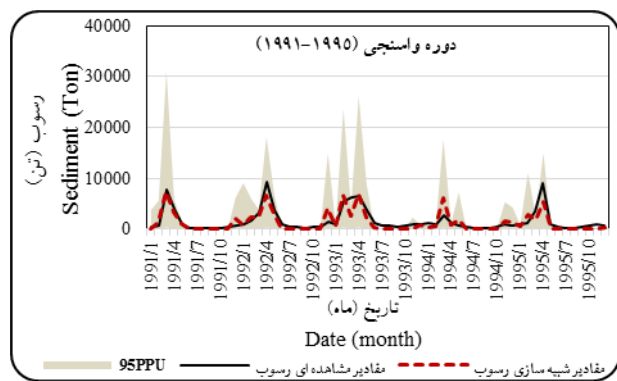
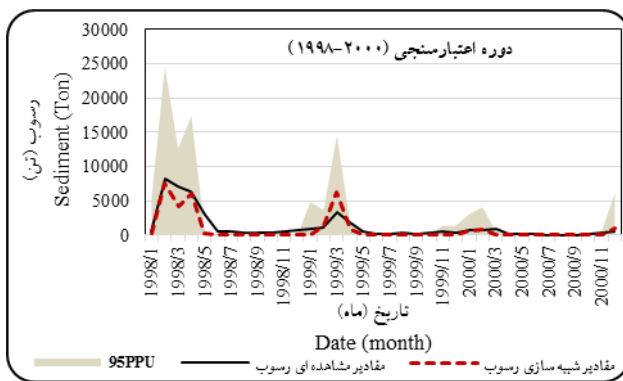
Table 5- Initial range and optimal value for selected sediment parameters

پارامتر Parameter	علامت اختصاری پارامتر Parameter name	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	مقدار بهینه Optimum
عامل تعدیل اوج جریان برای روندیابی رسوب در شاخه‌های فرعی Peak rate adjustment factor for sediment routing	v__ADJ_PKR.bsn	0.5	2	0.16
عامل فرسایش‌پذیری خاک در USLE USLE equation soil erodibility (K) factor	r__USLE_K.sol	-0.8	0.8	-0.38
تمرکز رسوب در جریان جانبی و زیرزمینی Sediment concentration in lateral flow and groundwater flow	v__LAT_SED.hru	0	5000	2280.34
ضریب رابطه انتقال رسوب Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment	v__SPCON.bsn	0.001	0.01	0.0075
نمای رابطه انتقال رسوب Exponent parameter for calculating sediment	v__SPEXP.bsn	1	1.5	1.44
عامل تعدیل اوج جریان برای روندیابی رسوب در آبراهه Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	v__PRF_BSN.bsn	0	2	1.71
ضریب تجزیه باقی‌مانده پوشش Residue decomposition coefficient	v__RSDCO.bsn	0.02	1	0.63



شکل ۶- مقایسه دبی ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره واسنجی و اعتبار سنجی

Figure 6- Comparison of observed and simulated monthly discharge for the calibration and validation periods



شکل ۷- مقایسه رسوب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهده‌ای رسوب

Figure 7- Comparison of observed and simulated monthly sediment yield for the calibration and validation periods

نتایج ارزیابی مدل SWAT

بر اساس منابع تحقیق تعداد ۳۰ پارامتر برای دبی و ۱۴ پارامتر برای رسوب به SUFI2 معرفی گردید. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که ۱۲ پارامتر برای دبی و ۷ پارامتر برای رسوب حساسیت بیشتری دارند که در واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. از میان پارامترهای مورد بررسی پارامترهای CN2، CH_K1، ALPHA_BNK، SOL_K و GWQMN بیشترین حساسیت برای دبی و پارامترهای USLE_K، LAT_SED، SPCON، SPEXP و PRF_BSN نیز بیشترین حساسیت را برای رسوب داشته‌اند. پارامترهای CH_N، ALPHA_BNK، ESCO، CN2 برای دبی و پارامترهای CH_K، USLE_K، SPEXP برای رسوب در تحقیقات دان و همکاران (۱۸)، دولت‌آبادی و زمردیان (۱۷)، بریک و همکاران (۱۶)، ویلایسن و همکاران (۵۱)، عربی و همکاران (۸) نیز به عنوان پارامترهای حساس شناخته شده است. مدل با تعیین بازه مناسب برای پارامترهای حساس برای دوره زمانی ۱۹۹۷-۱۹۹۱ برای دبی و ۱۹۹۵-۱۹۹۱ برای رسوب واسنجی شد و سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۹۸ برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. جدول ۴ و ۵ به ترتیب نتایج واسنجی و مقدار بهینه پارامترهای دبی و رسوب را نشان می‌دهد.

در شکل ۶ هیدروگراف شبیه‌سازی و هیدروگراف مقادیر مشاهده ای ماهانه دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای دبی نشان داده شده است. در شکل ۷ نیز هیدروگراف شبیه‌سازی و هیدروگراف مقادیر مشاهده‌ای ماهانه دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای رسوب ارائه شده است. همان‌گونه که در نمودارهای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، زمان وقوع دبی اوج و زمان وقوع بار رسوب حداکثر به خوبی شبیه‌سازی شده است، به عبارتی، مدل به خوبی توانسته است مقادیر دبی و رسوب را پیش‌بینی کند، تنها در پیش‌بینی مقادیر کم رسوب، ضعیف عمل کرده است که می‌تواند به دلیل تأثیرگذاری پارامترهای دبی و ساده‌سازی‌های مدل در شبیه‌سازی بار ناشی از مواد بستر رودخانه باشد (۱۸ و ۵۰) اما مدل در پیش‌بینی

مقادیر زیاد رسوب به خوبی عمل کرده است.

جدول ۶ معیارهای ارزیابی مدل را نشان می‌دهد. دقت شبیه‌سازی دبی و رسوب ماهانه با استفاده از شاخص ارزیابی نش‌ساتکلیف در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۷۳ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۷۶ به دست آمد. همچنین، معیار ارزیابی کلینگ و گوپتا در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۷۶ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۴ به دست آمد. با توجه به نتایج مدل دارای همبستگی مناسبی بوده است. مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات مشابه بیانگر نزدیک بودن آماره‌های به دست آمده با پژوهش‌های فومچا و همکاران (۴۴)، الانسی و همکاران (۷)، بافوت و صادقی (۱۳)، تشاگر (۴۹)، بریک و همکاران (۱۶)، حسینی و همکاران (۲۸)، صالح و دو (۴۷)، داون و همکاران (۱۸) و عثمانی و همکاران (۴۲) در سایر حوضه‌ها می‌باشد.

موربیسای و همکاران (۳۷) طبقه‌بندی توصیفی برای ضریب نش-ساتکلیف و تعیین کارایی مدل SWAT ارائه نمودند. بر این اساس مقدار این ضریب بین ۰/۷۵ تا ۱ در طبقه "خیلی خوب"، ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ در طبقه "خوب" و ۰/۵۰ تا ۰/۶۵ در طبقه "قابل قبول" قرار دارد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶ و طبقه‌بندی موربیسای و همکاران (۳۷)، شبیه‌سازی در ایستگاه باغ‌عباسی برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب در در طبقات "خیلی خوب" و "خوب" قرار می‌گیرد.

با توجه به جدول ۶ شاخص P-factor برای دوره واسنجی دبی و رسوب نشان می‌دهد که ۵۴ و ۴۲ درصد پیش‌بینی مدل برای دبی و رسوب در باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته‌اند. همچنین مقادیر شاخص R-factor برای دبی و رسوب در این دوره ۰/۶۳ و ۱/۸۴ به دست آمده است. عدم قطعیت زیاد مدل برای رسوب که در پژوهش رستمیان و همکاران (۴۵)، نیز اشاره شده است به دلیل عدم قطعیت‌های مدل مفهومی و ورودی‌های رسوب مربوط می‌باشد.

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل SWAT برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 6- Evaluation criterias of SWAT model for the calibration and validation periods							
متغیر	دوره	دوره آماری	NS	R ²	KGE	P_factor	R_factor
Variable	period	Statistical period					
Discharge	دبی	1991-1997	0.75	0.75	0.81	0.54	0.63
	واسنجی						
Sediment	اعتبارسنجی	1998-2000	0.85	0.86	0.80	0.53	0.38
	واسنجی						
Sediment	رسوب	1991-1995	0.73	0.75	0.76	0.42	1.84
	اعتبارسنجی	1998-2000	0.76	0.81	0.74	0.44	1.41

نتیجه گیری

نش ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای دبی ماهانه به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸۵ و برای رسوب ماهانه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۶ به دست آمد که بیانگر کارایی مدل SWAT در شبیه سازی رواناب و رسوب با دقت مناسب می باشد. استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه سازی رابطه دبی- رسوب نقش مهمی در استخراج مقادیر رسوب روزانه و دقت شبیه سازی مدل داشته است. با توجه به اینکه تعداد نمونه برداری رسوب برای بیشتر ایستگاه های هیدرومتری کم می باشد استفاده از الگوریتم های تکاملی می تواند نقش به سزایی در استخراج روابط دبی- رسوب داشته باشد که معمولاً در مدل های تجربی نظیر منحنی سنج با خطای زیادی همراه است.

در این پژوهش به منظور شبیه سازی رواناب و رسوب حوزه آبخیز سد فریمان از مدل SWAT استفاده شده است. به منظور برآورد رسوب، ابتدا رابطه دبی- رسوب روزانه با رابطه بهینه شده با الگوریتم ژنتیک مقایسه گردید. نتایج مقایسه مدل های برآورد رسوب نشان دهنده عملکرد بهتر و برتری الگوریتم ژنتیک بود، از این رو، با استفاده از رابطه بهینه، رسوب روزانه و ماهانه ایستگاه باغ عباسی در خروجی حوضه محاسبه گردید. سپس از مقادیر به دست آمده برای واسنجی، آنالیز حساسیت و اعتبارسنجی مدل SWAT، در نرم افزار- SWAT-CUP استفاده گردید. نتایج آنالیز حساسیت بیانگر حساسیت، ۱۴ پارامتر برای دبی و ۷ پارامتر برای رسوب بوده است که برای واسنجی به مدل معرفی شد. دقت شبیه سازی با استفاده از شاخص ارزیابی

منابع

- 1- Abbaspour K. C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., and Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333 (2): 413-430.
- 2- Abbaspour K.C. 2009. User manual for SWAT-CUP2, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 95 Pages.
- 3- Abbaspour K. C. 2011. SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag.
- 4- Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., and Klve B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524: 733–752.
- 5- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resource Association*, 34 (1): 73–89.
- 6- Arnold J. G., Moriasi D. N., Gassman P. W., Abbaspour K. C., White M. J., Srinivasan R., and Kannan N. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4):1491-1508.
- 7- Alansi A. W., Amin M. S. M., Abdul Halim G., Shafri H. Z. M., and Aimrun W. 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6 (6): 7581-7609.
- 8- Arabi M., Frankenberger J. R., Engel B. A., and Arnold J. G. 2008. Representation of agricultural conservation practices with SWAT. *Hydrological Processes*, 22 (16): 3042-3055.
- 9- Altunkaynak A. 2009. Sediment load prediction by genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40 (9): 928-934.
- 10- Asselman N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 23(4): 228-248.
- 11- Abdi Dehkordi M. 2012. Intelligent Estimation of suspended sediment discharge using modern technologies. MS.c Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Faculty of Water and Soil Engineering. Iran. 91 P. (In Persian)
- 12- Bahmanesh J., Mohammadpour M M., and Bateni M. 2017. Comparison of River Suspended Sediment Load Estimation, using Regression and GA Methods, *Journal of Watershed Management Research*, 8(16), 132-141. (In Persian)
- 13- Baffaut C., and Sadeghi A. 2010. Bacteria modeling with SWAT for assessment and remediation studies: A review. *Transactions of the ASABE*, 53(5): 1585-1594.
- 14- Bayramin I., Dengiz O., BAŞKAN O., and Parlak M. 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model; case study: Bepazarı area, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(2): 105-116.
- 15- Bouzeria H., Ghenim A., and Khanchoul K. 2017. Using artificial neural network (ANN) for prediction of sediment loads, application to the Mellah catchment, northeast Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 33(1):47-55.

- 16- Briak H., Moussadek R., Aboumaria K., and Mrabet R. 2016. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model, *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3): 177-185.
- 17- Dowlatabadi S., and Zomorodian M.A. 2013. Hydrological simulation of Firoozabad basin using SWAT model. *Journal of Irrigation and Water*, 4(14): 38-48. (In Persian with English abstract)
- 18- Duan Z., Song X., and Liu J. 2009. Application of SWAT for sediment yield estimation in a mountainous agricultural basin, In *Geoinformatics, 2009 17th International Conference on IEEE*. (pp. 1-5).
- 19- Emam Gholi Zadeh S., Karimedemaneh R., and Ajdari KH. 2016. Comparison of common methods for estimating suspended sediment load of Karkheh River with the method of gene expression programming. *Geography and Development Quarterly*, (45): 121-140. (In Persian)
- 20- Fleming G. 1979. Deterministic model in hydrology. *IRRIGATION and Drainage paper.32 FAO.Rome*, 80p.
- 21- Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., and Arnold J.G. 2007. The soil and water assessment tool: historic development, applications, and future research directions. *Trans. ASABE*, 50 (4): 1211-1250.
- 22- Goldberg D. 1989. Genetic algorithms in search optimization and machine learning. *Journal of Hydrology Research*, 8:354-361.
- 23- Golshan M., Esmaeli Ouri A., Shahedi K., and Jahanshahi A. 2016. Evaluation of the Efficiency of SWAT and IHACRES Models in Runoff Simulation of Khoramabad Basin. *Journal of Water and Soil Science*, 26(1/2): 29-42. (In Persian)
- 24- Goodarzi M.R., Zahabioun B., Masah Boani A., and Kamal A. 2012. Comparison of performance of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD in simulation of Ghareh Sou basin runoff. *Journal of Water Management and Irrigation*, 2(1): 25-40. (In Persian with English abstract)
- 25- Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., and Martinez G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), pp.80-91.
- 26- Hayat Zadeh M., Chezgy J., and Dastoorani M.T. 2015. Evaluation of Sediments Using Rating Curve and Artificial Neural Network Methods by Combining Morphological Parameters of Basin (Case Study: Bagh Abbas Basin) *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences*, 19 (72): 217-227. (In Persian)
- 27- Holland J. H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- 28- Hosseini M., Ghafouri A. M., M Amin M. S., Tabatabaei M. R., Goodarzi M., and Abde Kolahchi A. 2012. Effects of land use changes on water balance in Taleghan catchment, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(5): 1161-1174.
- 29- Kavian A., Bahrami M., and Rouhani H. 2014. Evaluation of the Efficiency of SWAT Model in Estimating Surface Runoff in Kachik Watershed of Golestan Province. *Watershed Research (Research and construction)*. 103. (In Persian)
- 30- Kavian A., Golshan M., Rouhani H., and Esmaeli Ouri A. 2015. Runoff and sediment simulation of the watershed of the Haraz River of Mazandaran using the SWAT pattern. *Natural Geography Research*, 47(2): 197-211. (In Persian)
- 31- Kliment Z., Kadlec J., and Langhammer J. 2008. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi – empirical erosion models. *Catena*, 73:286-299.
- 32- Li Q., Yu X., Xin Z., and Sun Y. 2012. Modeling the effects of climate change and human activities on the hydrological processes in a semiarid watershed of loess plateau. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(4), 401-412.
- 33- Mahzari S., Kiani F., Azimi M., and Khormali F. 2016. Using SWAT Model to Determine Runoff, Sediment Yield and Nitrate Loss in Gorganroud Watershed, Iran. *ECOPERSIA*, 4(2): 1359-1377.
- 34- Mohammad Reza Pour O., Haghighat-ju P., and Zainali M J. 2015. Compression of Genetic Algorithm and Particle Swarm Algorithm models for Optimizing Coefficients of Sediment Rating Curve in estimation of Suspended Sediment in Sistan River ;Case Study Kohak station. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 6(22): 76-89. (In Persian)
- 35- Mosaedi A., Zanganeh M.A., and Farazjoo H. 2010. Estimation of suspended sediment discharge based on the sediment curve equation and its affected factors in the Gorganroud watershed. *Proceedings of the First National Conference on Applied Resources of Water Resources of Iran. Kermanshah Regional Water Company. Iran*. 12 P. (In Persian)
- 36- Mohammadi A., Akbari G., and Azizzian G. 2012. Suspended sediment concentration estimation using artificial neural networks and neural-fuzzy inference system case study: Karaj Dam. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(8): 3188-3193.
- 37- Moriassi D.N., Arnold J.G., VanLiew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., and Veith T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3):

- 885–900.
- 38- Nash J. E., and Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol*, 10: 282–290.
 - 39- Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., and Williams J. R. 2005. SWAT theoretical documentation version 2005. Grassland. Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Temple, Texas, USA.
 - 40- Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., and Williams J. R. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
 - 41- Ndomba P.M., Mtalo F.W., and Killingtveit A. 2007. Sediment yield modeling using SWAT model at a large and complex catchment: Issues and approaches. A case study of Pangani River catchment, Tanzania, 4th International SWAT Conference, Institute for Water Education Delf, The Netherlands, July 4-6.
 - 42- Osmani H., Motamedvaziri B., and Moeini A. 2013. Flow Simulation, Calibration and Validation of SWAT Model, Case Study: Upper Basin of Latyan Dam, Tehran. *Journal of Engineering and Watershed Management*, 5(2): 134-143. (In Persian with English abstract)
 - 43- Parajuli P.B., Nelson N.O., Frees L.D., and Mankin K.R. 2009. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas, *Hydrol. Process*, 23: 748–763.
 - 44- Phomcha P., Wirojanagud P., Vangpaisal T., and Thaveevouthi T. 2011. Suitability of SWAT model for simulating of monthly streamflow in Lam Sonthi Watershed, *Journal of Industrial Technology*, 7(2): 49-56.
 - 45- Rostamian R., Jaleh A., Afyuni M., Mousavi S. F., Heidarpour M., Jalalian A., and Abbaspour K. C. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 53 (5): 977-988.
 - 46- Roshangar K., Aalami M.T., and Vojudi-Mehrabani F. 2015. Enhancing Accuracy of Sediment Total Load Prediction Using Evolutionary Algorithms (Case Study: Gotoorchay River). *Journal of Water and Soil*, 29(2): 1416-1426. (In Persian)
 - 47- Saleh A., and Du B. 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the upper North Bosque River watershed in central Texas. *Transactions of the ASAE*, 47(4): 1039.
 - 48- Tabatabaei M., and Salehpour Jam A. 2017. Optimization of sediment rating curve coefficients using evolutionary algorithms and unsupervised artificial neural network. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 15(4), 387-401.
 - 49- Teshager A. D., Gassman P. W., Secchi S., Schoof J. T., and Misgna G. 2016. Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (SWAT): Calibration and validation with a novel procedure for spatially explicit hrus, *Environmental Management*, 57(4): 894-911.
 - 50- Vafaei Nejad A., Chatr Simab Z., Boolori A., and Mirdar Harijani F. 2017. Optimization Coefficients of Curve Equation Sediment Measurement in Estimating Sediment Flow Using Particle Swarm Algorithm (PSO) and Simulated Refrigeration Algorithm (SA) Case Study: Bijar Station. *Journal of natural ecosystems Iran*, 8(3), 69-82. (In Persian)
 - 51- Vilaysane B., Takara K., Luo P., Akkharath I., and Duan W. 2015. Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28: 380-390.
 - 52- Williams J. R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 11(5): 965-974.
 - 53- Williams J.R., and Berndt H.D. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE* 20 (6), 1100–1104.
 - 54- Wishmeier W.H., and Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook 537.
 - 55- Yang J., Reicher P., Abbaspour K.C., Xia J., and Yang H. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chao he Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358 (1–2):1-23.
 - 56- Yesuf H. M., Melesse A. M., Zeleke G., and Alamirew T. 2016. Streamflow prediction uncertainty analysis and verification of SWAT model in a tropical watershed. *Environmental Earth Sciences*, 75(9): 806.

Simulation of Stream Flow and Sediment Yield in Fariman Dam Watershed Using SWAT Model and Genetic Algorithm

F. Naseri¹– M. Azari^{2*}– M.T. Dastoorani³

Received: 04-12-2017

Accepted: 17-06-2018

Introduction: Determining the amount of watershed sedimentation and its spatial distribution by using field measurements in practice faces a serious challenge. In recent decades, hydrological models have been widely used by hydrologists and water resource managers as a tool for analysing water resource management systems. The SWAT model is one of the semi-physical and semi-distributed hydrological models that have been widely used in recent years. Despite the wide use of the SWAT, simulation of the sediment has been associated with a large error in comparison to flow. These errors may come from using empirical methods such as the sediment rating curve for estimating sediment based on measured data. Therefore, in this research, the capabilities of the genetic algorithm (GA) were used to optimize the relationship between discharge and sediment and further optimal equation used for calibration and validation of the model.

Materials and Methods: The studied area is Fariman dam watershed with an area of 278.8 km² which is located at latitude of 35 ° 33' to 35 ° 41' and longitude of 59 ° 34' to 59 ° 44' in Razavi Khorasan province. In this study, SWAT model was used to simulate runoff and sediment yield of Fariman dam watershed. In order to run the model, meteorological and hydrometric data including daily rainfall and maximum and minimum temperatures and sediment yield and discharge data, soil and land use maps of the watershed were achieved from relevant resources. The capabilities of the genetic algorithm were used to optimize the discharge -sediment relationship and were compared with sediment rating curve. For this purpose, optimization problem was defined for the genetic algorithm in MATLAB software as a search space of continuous values of the discharge – sediment coefficients. After that, sediment yield was extracted based on discharge data and calculated monthly sediment for SWAT calibration and validation. Sensitivity analysis, calibration and validation of the model were performed using the SUFI-2 algorithm using SWAT-CUP software. For this purpose using high sensitive parameters, the model was calibrated and validated for the period of 1991 to 2000.

Results and Discussion: Optimal coefficients extracted by GA indicate a better performance of the genetic algorithm in estimating the sediment yield. The comparative results of the sediment estimation models, revealed better performance of the genetic algorithm with RMSE = 70.9, NSE =0.46 and R²= 0.72 than the sediment rating curve. According to sensitivity analysis of SWAT model, twelve parameters for stream flow and seven parameters for sediment yield were found to be sensitive. The most sensitive parameters for stream flow were SCS runoff curve number (CN2), effective hydraulic conductivity in tributary channel (CH_K1) and base flow alpha factor for bank storage (ALPHA_BNK) and the most sensitive parameters for sediment yield were peak rate adjustment factor for sediment routing, USLE equation soil erodibility factor (USLE_K), sediment concentration in lateral flow and groundwater flow (LAT_SED) and exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing (SPEXP). The SWAT calibration and validation results showed that the Nash-Sutcliffe efficiency index for monthly sediment and discharge for calibration period was 0.75 and 0.73, respectively and in the validation period was 0.85 and 0.76, respectively. Calibration and validation of the SWAT model was done with genetic algorithm model as an optimal method for deriving sediment data from measured daily discharge. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient for monthly discharge was 0.75 and 0.85 in the calibration and validation periods. Nash-Sutcliffe efficiency coefficients for monthly sediment yield were 0.86 and 0.81 for the same periods. SWAT evaluation results indicate that the model simulation is acceptable for predicting sediment yield and river flow. The performance of SWAT model in predicting of sediment in low flow is poor, which can be due to the effect of the parameters and model simplifications in the simulation of the sediment load.

Conclusions: In this research, simulation of runoff and sediment flow for Fariman dam watershed was performed using SWAT model. For this purpose, the capabilities of the genetic algorithm were used to optimize the relationship between discharge and sediment yields; then the results were used to calibrate and validate the

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Professor, Department of Range and Watershed Management, College of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: m.azari@um.ac.ir)

SWAT model. The results indicate that genetics algorithm can be used for optimizing coefficient of sediment discharge equation and the result is better than sediment rating curve. Simulation of watershed hydrology using SWAT shows that the capability of the model in prediction of sediment yield and water flow is good. Using genetic algorithm to optimize the relationship between discharge and sediment has an important role in extracting daily sediment yield and simulation accuracy of the model. Also, the use of evolutionary algorithms can have a significant role in extracting the discharge -sediment relations, which usually is accompanied with a large error in experimental models such as a sediment rating curve.

Keywords: Evolutionary algorithm, Fariman dam, Sediment yield, Watershed simulation