



## واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم پرندگان برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در یک حوزه آبخیز کوهستانی

\* علی‌اصغر بسالت‌پور<sup>۱</sup>، شمس‌الله ایوبی<sup>۲</sup>، محمدعلی حاج‌عباسی<sup>۳</sup> و احمد جلالیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان،

<sup>۲</sup> استاد گروه علوم خاک، واحد خوراسگان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۱۱

### چکیده

فرسایش خاک یک تهدید زیست‌محیطی جدی برای توسعه پایدار و کشاورزی است که می‌تواند منجر به کاهش حاصل‌خیزی خاک، هدررفت عناصر غذایی و کاهش عملکرد گیاهی در زمین‌های کشاورزی شود. در این پژوهش قابلیت استفاده از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب روزانه در حوزه آبخیز بازفت (از زیرحوزه‌های اصلی حوزه آبخیز کارون شمالی) بررسی شد. برای این منظور ابتدا امکان استفاده از سه مجموعه داده اقلیمی مختلف شامل داده‌های اقلیمی بازفت، داده‌های اقلیمی جهانی (CRU) و داده‌های اقلیمی ترکیبی بازفت-CRU برای شبیه‌سازی رواناب روزانه، بررسی شد. پس از تعیین بهترین مجموعه داده اقلیمی، قابلیت استفاده از الگوریتم PSO برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل ارزیابی گردید. مدل SWAT طراحی شده با داده‌های اقلیمی ترکیبی بازفت-CRU، شبیه‌سازی بهتری از رواناب روزانه در منطقه مورد مطالعه داشت به شکلی که مقدار ضریب نش-ساتکلیف به‌دست آمده برابر ۰/۳۸ بود در حالی که مقدار آن برای مدل با داده‌های اقلیمی بازفت و مدل با داده‌های CRU به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۱ بود. مقادیر *r-factor* و *p-factor* به‌دست آمده در مرحله واسنجی مدل با الگوریتم PSO برای شبیه‌سازی رواناب روزانه به ترتیب برابر ۱/۲۵ و ۰/۸۱ و ضرایب تبیین و نش-ساتکلیف به‌دست آمده برای مرحله اعتبارسنجی نیز به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۶۰ بود. در شبیه‌سازی رسوب نیز، مقادیر *r-factor* و *p-factor* به‌دست آمده برای مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۰/۸۵ و برای مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/۶۳ و ۰/۸۰ بودند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم PSO، بازفت، رواناب و رسوب روزانه، مدل SWAT، SWAT-Cup.

\* مسئول مکاتبه: [a.besalatpour@vru.ac.ir](mailto:a.besalatpour@vru.ac.ir)

## مقدمه

فرسایش خاک به عنوان خطری جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده محسوب می شود و در مناطقی که کنترل نمی شود نه تنها سبب وارد شدن خسارت های جبران ناپذیر به اراضی منابع طبیعی و کشاورزی می شود، بلکه با رسوب مواد در آبراهه ها، مخازن، دریاچه سدها و بنادر سبب کاهش ظرفیت آب گیری آن ها و بنابراین زیان های فراوان می شود (مورگان و نیرینگ، ۲۰۱۱). تخریب و هدررفت خاک سطحی از اراضی منابع طبیعی و کشاورزی سبب ورود رسوب، عناصر غذایی و آفت کش ها به منابع آب های سطحی و زیرزمینی و بنابراین کاهش کیفیت این منابع آب و نیز خطر سمیت برای انسان و دیگر موجودات زنده می شود (یانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ مورگان و نیرینگ، ۲۰۱۱). فرسایش خاک از جمله چالش های مهم زیست محیطی است که تأثیر به سزایی بر توسعه پایدار در دنیا دارد (بیکر و همکاران، ۲۰۰۴).

به منظور اجرای برنامه های حفاظت خاک و تعیین روش های مناسب برای مبارزه با فرسایش خاک و کاهش رسوب زایی و نیز محاسبه و طراحی دقیق حجم سد در احداث سدهای مخزنی، نیاز است که حجم کل و میزان تولید سالانه رسوب در یک حوزه آبخیز ارزیابی و برآورد گردد (مورگان و نیرینگ، ۲۰۱۱). فرسایش خاک یک فرآیند پیچیده است که اندازه گیری میزان دقیق آن بسیار دشوار بوده و نیاز به درک عمیقی از فرآیندهای تولید رواناب و رسوب دارد. چنانچه در یک حوزه آبخیز آمار و اطلاعات مربوط به دبی آب و رسوب به اندازه کافی وجود داشته باشد، محاسبه حجم کل رسوب دهی سالانه با استفاده از روش های آماری مرسوم موجود امکان پذیر خواهد بود ولی به طور عمده نبود و یا کمبود آمار و اطلاعات در بسیاری از حوزه های آبخیز در دنیا و کشور، مدل سازی و استفاده از روش های پیش بینی شدت فرسایش خاک و رسوب زایی را الزامی می نماید.

از جمله مدل هایی که اخیراً به شکل وسیعی در سرتاسر دنیا در پژوهش های فرسایش و رسوب و مدیریت حوزه های آبخیز استفاده می شود، می توان به مدل SWAT<sup>۱</sup> اشاره نمود (اثرینگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ استراوچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ کفی و همکاران، ۲۰۱۰؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ ان دونبا و همکاران، ۲۰۰۸). مدل SWAT یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوزه آبخیز است که توسط سرویس پژوهش اداره کشاورزی ایالات متحده برای پیش بینی تأثیر روش های مدیریتی مختلف بر جریان آب، رسوب، عناصر غذایی و تعادل مواد شیمیایی در حوزه های آبخیز بزرگ و پیچیده با

1- Soil and Water Assessment Tool, SWAT

کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط مدیریتی گوناگون برای دوره‌های زمانی طولانی مدت تهیه و ارایه شده است. این مدل دارای اساس فیزیکی بوده و در حوزه‌های آبخیزی که بدون آماربرداری منظم هستند، قابل استفاده است. مدل SWAT از داده‌های ورودی قابل دسترس به راحتی استفاده کرده و محاسبه‌کننده کارآمدی است. شبیه‌سازی حوزه‌های خیلی بزرگ یا راه‌کارهای مدیریتی مختلف، می‌تواند با این مدل بدون سرمایه‌گذاری‌های زیاد زمانی و مالی انجام شوند و کاربر قادر خواهد بود که اثرات طولانی مدت را نیز مطالعه کند (نیتچ و همکاران، ۲۰۱۱).

در پژوهش‌های بسیاری از مدل SWAT به عنوان مدلی کارآمد و مناسب برای مطالعات فرسایش و رسوب یاد شده است. برای مثال ائرینگ و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که داده‌های شبیه‌سازی شده روزانه رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در یک حوزه آبخیز وسیع (۱۱۱۰ کیلومترمربع) در جنوب غربی فرانسه، هم‌خوانی خوبی با داده‌های مشاهده‌ای داشتند. ان‌دومبا و همکاران (۲۰۰۸) قابلیت استفاده از مدل SWAT در حوزه آبریز رودخانه کیکولتوا<sup>۱</sup> با وسعت تقریبی ۷۲۸۰ کیلومترمربع با داده‌های محدود را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که طول دوره داده‌هایی که برای شبیه‌سازی استفاده می‌شوند بر نتایج مدل اثرگذار است و گزارش کردند که استفاده از داده‌های کافی و قابل اعتمادتر بارش و داده‌های طولانی مدت تر شدت جریان برای مدل SWAT می‌تواند بر اجرای دقیق‌تر و شبیه‌سازی بهتر مدل، تأثیر به‌سزایی داشته باشد. اخوان و همکاران (۲۰۱۰) ضمن اشاره به دقت بسیار خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌های منابع آب در حوزه آبخیز همدان- بهار، مقادیر ضریب نش- ساتکلیف بین ۰/۸-۰/۳ را برای مرحله واسنجی مدل گزارش کردند. بینگنر و همکاران (۱۹۹۷) از این مدل در حوزه آبخیز گردوین در ایالات متحده امریکا استفاده نموده و گزارش کردند که این مدل در فرآیندهای انتقال رسوب به تعداد زیرحوضه‌ها حساسیت بالایی داشت در حالی که رواناب سطحی به تعداد زیرحوضه‌ها حساسیت ناچیزی نشان داد. آبابایی و سهرابی (۲۰۰۹) نیز به قابلیت بالای مدل SWAT در شبیه‌سازی شدت جریان رودخانه زاینده‌رود اشاره کردند. تریپاسی و همکاران (۲۰۰۳) برای تعیین و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های بحرانی حوزه آبخیز نگوان<sup>۲</sup> با وسعت حدود ۹۲ کیلومترمربع از دیدگاه هدررفت سالانه خاک و عناصر غذایی از مدل SWAT استفاده نمودند و به دقت بالای مدل در شبیه‌سازی

1- Kikuletwa

2- Nagwan

رواناب و رسوب و نیز برآورد میزان هدررفت عناصر غذایی (نیتروژن نیتراته، نیتروژن آلی، فسفر کل و محلول) در حوضه مورد مطالعه خود اشاره نمودند. جیرانی و همکاران (۲۰۱۱) ضمن بررسی اثر دقت مکانی نقشه رقومی ارتفاعی بر نتایج شبیه‌سازی رواناب و رسوب توسط مدل SWAT در حوزه آبخیز گاماسیاب در جنوب‌غربی کشور، به قابلیت بالای این مدل برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب اشاره داشتند. عارفی‌اصل و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی امکان استفاده از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان، نتیجه‌گیری کردند که از آن‌جا که SWAT مدلی مدیریتی است و در این حوضه کارایی مقبولی داشت، می‌توان از آن برای بررسی اثر اقدامات مدیریتی بر تولید رواناب و رسوب استفاده نمود. در این پژوهش نیز امکان استفاده از مدل SWAT برای برآورد رواناب و رسوب در یک حوزه آبخیز کوهستانی با داده‌های اقلیمی محدود و نامطمئن (حوزه آبخیز بازفت از زیرحوضه‌های اصلی کارون شمالی) بررسی شد. همچنین بررسی کارایی الگوریتم پرندگان (PSO)<sup>۱</sup> در واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از دیگر اهداف این پژوهش بود.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز بازفت ۴۹ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی) یکی از شش زیرحوضه اصلی حوزه آبخیز کارون شمالی بود. بخش بیش‌تر این حوزه (حدود ۵۰ درصد)، کوهستانی بوده که مرتفع‌ترین نقطه آن زردکوه با ارتفاع ۴۲۲۱ متر و ارتفاع متوسط حوضه حدود ۲۲۰۰ متر است. شیب متوسط حوزه، متغیر و بیش‌ترین آن مربوط به کلاس شیب ۷۰-۴۰ درصد است. حدود ۵۶ درصد از وسعت کل حوضه دارای پوشش مرتعی (به‌طور عمده دافنه و گون) و بقیه منطقه دارای پوشش جنگلی (به‌طور عمده بلوط ایرانی) یا عاری از پوشش است. میانگین سالانه درجه حرارت در ارتفاعات شمال‌شرقی حوضه (ارتفاعات زردکوه) به کم‌تر از ۸ درجه سانتی‌گراد و در قسمت‌های جنوبی حوضه به ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. میانگین بارش سالانه در حوضه نیز از ۱۴۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال‌شرقی تا ۵۰۰ میلی‌متر در بخش‌های جنوبی حوضه متغیر می‌باشد (صفا‌منش، ۱۹۹۶). ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک

1- Particle Swarm Optimization, PSO

موجود در این حوزه آبخیز، محدود و پراکنش آن‌ها در منطقه نامناسب است به شکلی که تنها ۹ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه وجود داشته و نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک موجود نیز ایستگاه لردگان بود.

**مدل‌سازی با SWAT:** برای ساخت و اجرای مدل SWAT در این پژوهش، ابتدا قابلیت استفاده از سه مجموعه داده اقلیمی مختلف بررسی شد. مدل نخست با استفاده از داده‌های اقلیمی موجود در منطقه شامل اطاعات مربوط به بارندگی و درجه حرارت روزانه به‌دست آمده از ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در منطقه ساخته شد. در مدل دوم از مجموعه داده‌های بارش و درجه حرارت روزانه برآورد شده برای کشور توسط مرکز تحقیقاتی BADC<sup>۱</sup> که با عنوان مجموعه داده‌های CRU<sup>۲</sup> (CRU TS 3.1) شناخته می‌شود، استفاده شد (جنز و هریس، ۲۰۰۸). مدل سوم نیز با استفاده از ترکیب داده‌های اقلیمی حوزه آبخیز بازفت و داده‌های اقلیمی CRU ساخته شد. مدل رقمی ارتفاعی (DEM)<sup>۳</sup>، به‌همراه نقشه‌های کاربری اراضی و خاک نیز برای منطقه مورد مطالعه تهیه و به مدل SWAT وارد شدند. ساخت مدل در محیط نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از ArcSWAT 2009 و برای یک دوره ۲۰ ساله (از سال ۱۹۸۹-۲۰۰۸) با در نظر گرفتن ۳ سال Warm-up انجام شد.

**آنالیز حساسیت:** در این پژوهش از روش آنالیز حساسیت مطلق برای تعیین متغیرهای حساس استفاده شد که میزان تغییر در خروجی را با توجه به تغییر در مقدار ورودی توصیف می‌کند. برای این منظور ابتدا پارامترهایی از مدل که بر تولید رواناب و رسوب مؤثر هستند و در پژوهش‌های گوناگون نیز به‌عنوان ویژگی‌های حساس معرفی شده‌اند، تعیین شدند. سپس دامنه‌ای از مقادیر برای هر یک از این پارامترها براساس مقدار مطلق آن‌ها تعریف شد (جدول ۱). در نهایت، مدل برای هر یک از این پارامترها به‌صورت جداگانه با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها و با در نظر گرفتن ۳ دور شبیه‌سازی اجرا شد.

1- British Atmosphere Data Center

2- Climatic Research Unit

3- Digital Elevation Model, DEM

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۴)، شماره (۴) ۱۳۹۳

جدول ۱- ویژگی‌های مدل مؤثر بر تولید رواناب و رسوب براساس نتایج آنالیز حساسیت (رستمیان و همکاران، ۲۰۰۸).

توضیحات	دامنه ویژگی		پارامتر
	کمینه	بیشینه	
شماره منحنی	-۰/۴	۰/۴	*r_CN2.mgt
زمان تأخیر برای تغذیه آب‌خوان	۰	۴۰۰	v_GW_DELAY.gw
عمق آستانه آب در آب‌خوان کم عمق برای جریان برگشتی	۰	۵۰۰	v_GWQMN.gw
فاکتور جبران جذب گیاهی	۰/۰۱	۱	v_EPCO.hru
فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰/۰۱	۱	v_ESCO.hru
متوسط تندی شیب	۰	۰/۶	r_HRU_SLP.hru
چگالی ظاهری خاک	-۰/۴	۰/۴	r_SOL_BD.sol
متوسط آب قابل استفاده	-۰/۵	۰/۵	r_SOL_AWC.sol
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	-۰/۸	۰/۸	r_SOL_K.sol
ضریب زبری مانینگ برای جریان در کانال اصلی	۰	۰/۳	v_CH_N2.rte
هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	۰	۱۵۰	v_CH_K2.rte
فاکتور ذوب برف ۲۱ جون	۰	۱۰	v_SMFMX.bsn
فاکتور ذوب برف ۲۱ دسامبر	۰	۱۰	v_SMFMN.bsn
فاکتور تأخیر دمای توده برف	۰/۰۱	۱	v_TIMP.bsn
ضریب چولگی برای بارش روزانه در ماه در طول دوره پیش‌بینی	-۰/۵	۰/۵	r_PCPSKW.wgn
انحراف معیار بارش روزانه در ماه در طول دوره پیش‌بینی	-۰/۵	۰/۵	r_PCPSTD.wgn
متوسط کل بارش ماهانه در طول دوره پیش‌بینی	-۰/۵	۰/۵	r_PCPMM.wgn
ضریب رابطه انتقال رسوب	۰/۰۰۱	۰/۰۱	v_SPECON.bsn
فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در USLE	-۰/۴	۰/۴	r_USLE_K.sol
فاکتور مدیریت در USLE	۰/۱	۰/۹	v_USLE_P.mgt
فاکتور تعدیل اوج جریان برای روندیابی رسوب در شاخه‌های فرعی	۰/۵	۲	v_ADJ_PKR.bsn

\* r و v کدهایی هستند که نوع تغییراتی را که برای ویژگی به‌کار برده می‌شوند، تعیین می‌کنند.

v بدان معنی است که مقدار ویژگی با مقدار جدید جایگزین شود و برای I مقدار پارامتر در ۱ + مقدار جدید ضرب می‌شود.

واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از الگوریتم PSO: در این پژوهش قابلیت استفاده از الگوریتم PSO برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT بررسی شد. الگوریتم فرا ابتکاری PSO یکی از جدیدترین روش‌های ارائه شده برای حل مسایل بهینه‌سازی است که مبتنی بر هوش جمعی بوده و تقریب مناسبی از پاسخ بهینه به دست می‌آورد. در واقع این الگوریتم یکی از روش‌های هوش جمعی است که با تنظیم مسیر حرکت یک جمعیت از ذرات در فضای پاسخ مسأله بر پایه اطلاعات مربوط به بهترین کارایی پیشین مربوط به هر ذره و بهترین کارایی پیشین مربوط به همسایگان هر ذره، عمل جستجو را در فضای پاسخ انجام می‌دهد (کندی و ابرهات، ۱۹۹۵). ایده اولیه الگوریتم PSO از رفتار اجتماعی مربوط به پرواز پرندگان و حرکت دسته‌جمعی ماهی‌ها برای یافتن غذا گرفته شده و نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات ارائه شد. در این الگوریتم قوانین نهفته که توسط اعضای یک دسته از پرندگان و یا گروه ماهی‌ها با یکدیگر ترکیب شده و آن‌ها را قادر به حرکت همگام در یک زمان و بدون تصادم با یکدیگر نموده و منتج به یک رقص آزایی تعجب برانگیز توسط دسته‌های موجودات می‌گردد، توسط دانشمندان مورد مطالعه و شبیه‌سازی قرار گرفته است (هینر و گرناندر، ۱۹۹۰).

دو مدل کلی برای الگوریتم PSO وجود دارد: مدل بهترین جهان<sup>۱</sup> و مدل بهترین همسایگی<sup>۲</sup>. تفاوت بین این دو مدل در مجموعه ذراتی است که هر ذره با آن‌ها تبادل اطلاعات می‌کند. در مدل بهترین جهان همه ذرات با یکدیگر در ارتباط بوده و تنها یک پاسخ به‌عنوان بهترین پاسخ ذخیره می‌شود. در این مدل ذره مانند یک جاذب عمل نموده و بقیه ذرات را به سمت خود متمایل می‌سازد. بنابراین اگر ذره به روز نشود، الگوریتم به یک همگرایی زودرس و نابهنگام دچار می‌شود. برای به روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات، ابتدا باید بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت در بین کل ذرات در هر مرحله، به روز شود (کندی و ابرهات، ۱۹۹۵).

در این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم PSO در محیط نرم‌افزار SWAT-Cup2 انجام شد (عباس‌پور، ۲۰۱۱). دوسوم داده‌های موجود (از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹) برای واسنجی مدل و از یک‌سوم باقی‌مانده (از سال ۱۹۹۲-۹۷) برای اعتبارسنجی آن استفاده شد. تعداد دور شبیه‌سازی و تکرار نیز به روش سعی و خطا تعیین گردید. از دو شاخص مرسوم برای ارزیابی کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی شامل ضریب تبیین و ضریب نش- ساتکلیف برای سنجش

- 
- 1- Best Global
  - 2- Best Neighbor

دقت مدل SWAT در برآورد رواناب و رسوب استفاده شد. ضریب نش- ساتکلیف از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد که در آن،  $Q_i$ : مقدار مشاهده‌ای پارامتر اندازه‌گیری شده،  $Q'_i$ : مقدار شبیه‌سازی شده پارامتر توسط مدل و  $Q$ : مقدار میانگین پارامتر اندازه‌گیری شده می‌باشد:

$$NS_{CO} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2} \quad (1)$$

مقدار عددی ضریب نش- ساتکلیف بین منفی بی‌نهایت تا ۱ بوده و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد بیانگر آن است که مدل شبیه‌سازی بهتری داشته است و مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل برآورد خوبی از فرآیند مورد نظر داشته و هرچه به صفر نزدیک‌تر شود از دقت مدل کاسته می‌شود. در صورت منفی شدن مقدار عددی ضریب نش- ساتکلیف بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشده و از متوسط مقادیر داده‌های مشاهده‌ای استفاده شود (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰). عدم قطعیت خروجی مدل نیز به وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد که در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع متغیر خروجی نمونه‌برداری می‌شود، محاسبه می‌گردد و با معیار ۹۵ ppu بیان می‌شود. برای تمام متغیرها به وسیله ۲/۵ امین  $X_L$  و ۹۷/۵ امین  $X_U$  درصد از تابع توزیع هر نقطه شبیه‌سازی شده محاسبه می‌شود. متوسط فاصله بین حد بالا و پایین ۹۵ ppu از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\bar{d}_x = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (X_U - X_L)_l \quad (2)$$

که در آن،  $l$ : شمارش‌گر و  $k$ : تعداد نقاط مشاهده‌ای می‌باشند. حالت بهینه زمانی است که ۱۰۰ درصد نقاط اندازه‌گیری شده در ناحیه ۹۵ ppu قرار گیرند و مقدار  $\bar{d}_x$  نزدیک صفر باشد (عباس‌پور، ۲۰۱۱).



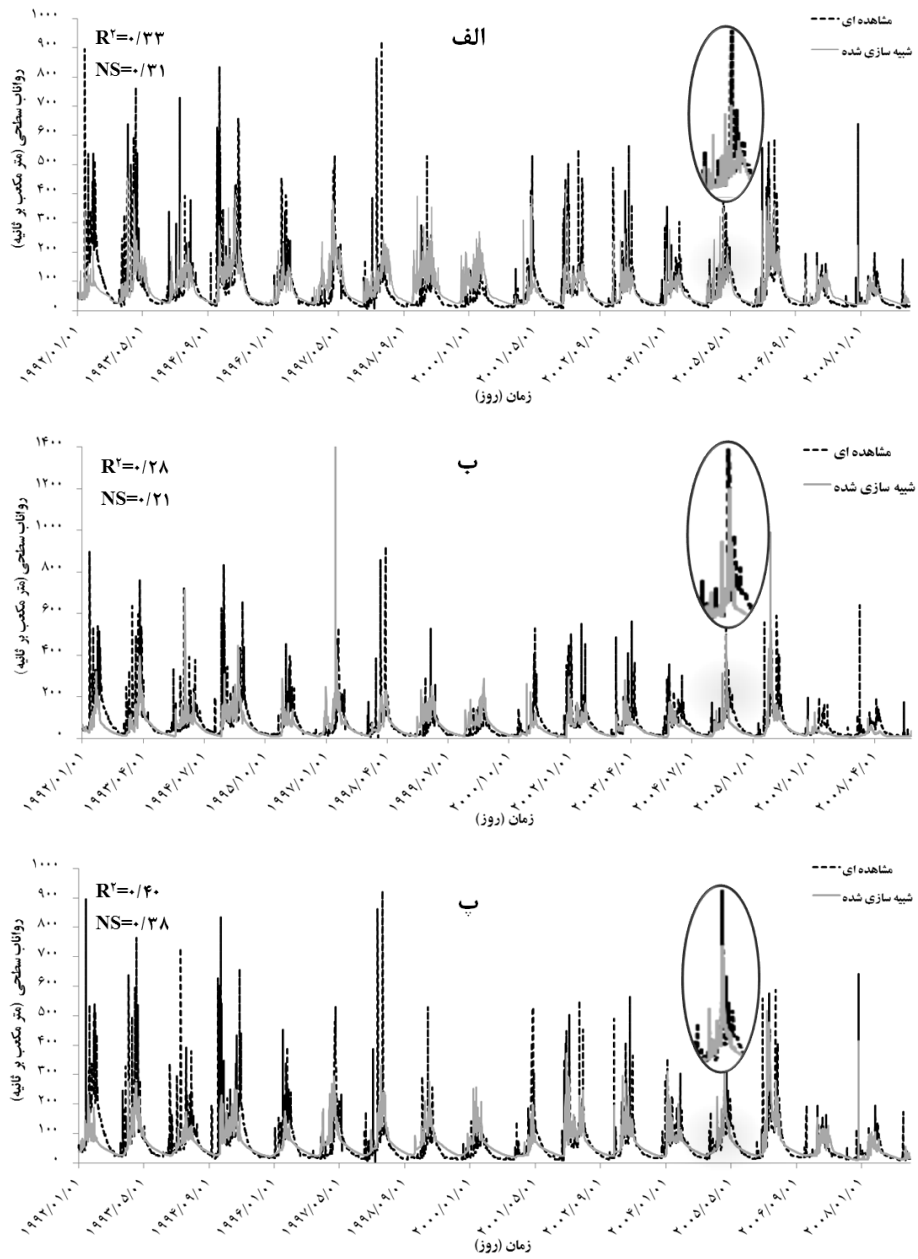
## نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از اجرای اولیه مدل با استفاده از مجموعه داده‌های اقلیمی گوناگون: نتایج به دست آمده از اجرای اولیه مدل با استفاده از مجموعه داده‌های اقلیمی مختلف (داده‌های اقلیمی حوزه آبخیز بازفت، داده‌های اقلیمی CRU و داده‌های اقلیمی بازفت - CRU) برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز بازفت در شکل ۱ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که مدل با داده‌های اقلیمی ترکیبی بازفت - CRU، شبیه‌سازی بهتری از رواناب جاری در منطقه مورد مطالعه داشته است و داده‌های شبیه‌سازی شده، همبستگی بیشتری با داده‌های مشاهده‌ای دارند. مقدار ضریب تبیین بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های اقلیمی بازفت - CRU برابر ۰/۴۰ بود در حالی که مقدار آن برای مدل با داده‌های اقلیمی حوزه آبخیز بازفت و مدل با داده‌های اقلیمی CRU به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۲۸ بود. همچنین مدل SWAT طراحی شده با استفاده از داده‌های اقلیمی بازفت - CRU دارای ضریب نش - ساتکلیف بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها بود. به شکلی که مقدار ضریب نش - ساتکلیف برای مدل با داده‌های اقلیمی بازفت - CRU برابر ۰/۳۸ بود در حالی که مقدار آن برای مدل با داده‌های اقلیمی حوزه آبخیز بازفت و مدل با داده‌های اقلیمی CRU به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۱ بود (شکل ۱).

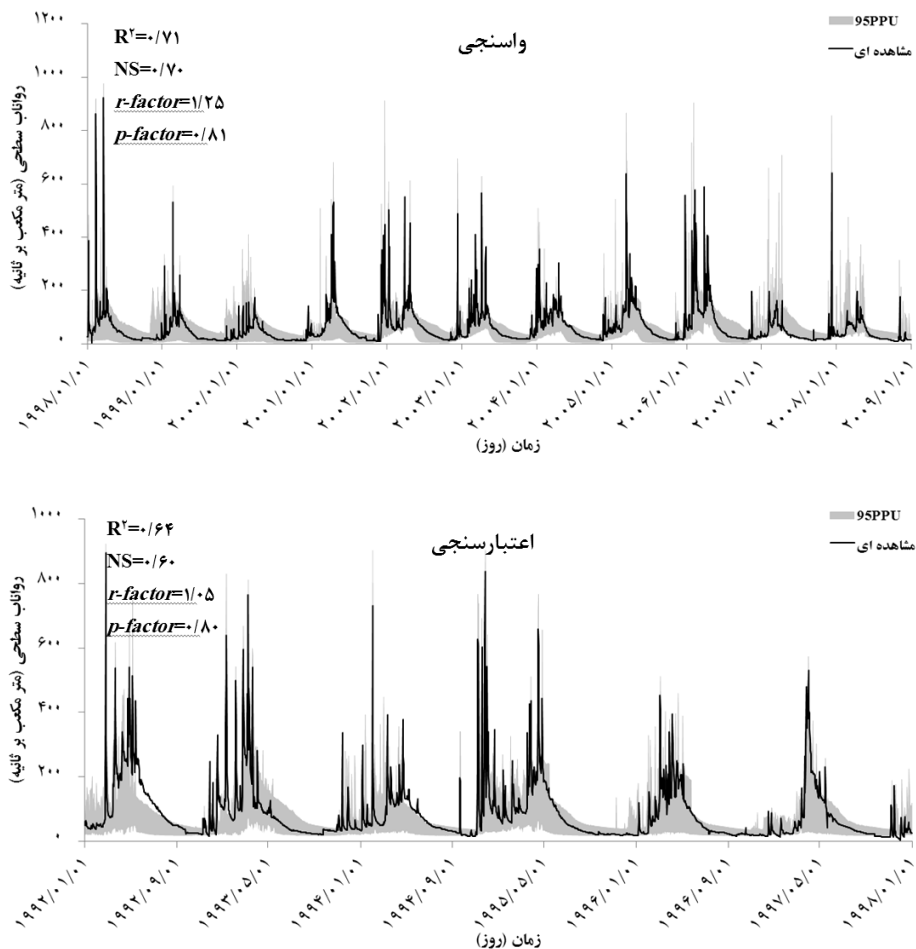
بررسی چگونگی شبیه‌سازی رواناب توسط مدل‌های طراحی شده با مجموعه داده‌های اقلیمی مختلف نسبت به زمان نیز نمایانگر آن است که مدل طراحی شده با استفاده از داده‌های اقلیمی بازفت - CRU شبیه‌سازی بهتری از روند جریان داشته است (شکل ۱). این در حالیست که در مدل با داده‌های اقلیمی CRU در بیش‌تر زمان‌ها در طول دوره شبیه‌سازی، برآوردی کم‌تر از حد برای جریان‌های پایه و بیشینه (اوج جریان) دیده می‌شود. برای مدل با داده‌های اقلیمی حوزه آبخیز بازفت نیز روند جریان به‌ویژه برای جریان بیشینه به‌خوبی شبیه‌سازی نشده است و در بیش‌تر زمان‌ها در طول دوره شبیه‌سازی، بیش‌برآوردی از جریان پایه و جریان بیشینه دیده می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از مدل SWAT با داده‌های اقلیمی بازفت - CRU (که در آن ترکیبی از داده‌های ایستگاه‌های موجود در حوضه و ایستگاه‌های CRU استفاده شده و هم تراکم ایستگاه‌ها و هم پراکنش آن‌ها در حوضه بهبود یافته است) برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز مورد مطالعه مطلوب‌تر باشد.

واسنجی و اعتبارسنجی رواناب: شکل ۲ نمایانگر چگونگی شبیه‌سازی رواناب روزانه توسط مدل SWAT بهینه شده با الگوریتم PSO در فرآیندهای واسنجی و اعتبارسنجی است. نتایج بیانگر آن است که مدل توانایی به نسبت قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب داشته است. روند تغییرات جریان به ویژه مقدار بیشینه جریان در مرحله واسنجی به خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شده است (شکل ۲). مقادیر  $r$ -factor و  $p$ -factor به دست آمده در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۱/۲۵ و ۸۱ درصد می‌باشند که بیانگر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب برای این مرحله است. یکی از اهداف بهینه‌سازی در فرآیند واسنجی، کاهش عدم قطعیت می‌باشد به گونه‌ای که بیش‌تر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ppu قرار گیرند. مقدار مطلوب برای شاخص  $p$ -factor هنگامی است که ۱۰۰ درصد داده‌های شبیه‌سازی شده در سطح ۹۵ درصد محدوده اطمینان قرار گیرند ( $p$ -factor=۱۰۰ درصد). ولی معمولاً به دلیل خطاهای گوناگون در داده‌برداری و عدم قطعیت مدل‌های مفهومی، هیچ‌گاه این مقدار حاصل نمی‌شود. براساس نتایج دیگر پژوهشگران، مقادیر  $p$ -factor بیش از ۶۰ درصد و  $r$ -factor کم‌تر از ۱/۳۰ نشان‌دهنده توانایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی است. همبستگی به نسبت بالای داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای ( $R^2=0/71$ ) و ضریب نش- ساتکلیف برابر ۰/۷۰ نیز دلیلی دیگر بر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی است.

بررسی روند تغییرات جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل در مرحله اعتبارسنجی و نیز شاخص‌های سنجش کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در این مرحله نیز، نمایانگر آن است که مدل با دقت به نسبت قابل قبولی قادر به شبیه‌سازی رخدادهای آینده در حوزه آبخیز مورد مطالعه است (شکل ۲). ضرایب تبیین و نش- ساتکلیف به دست آمده برای این مرحله به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۶۰ بود و درصد قابل قبولی از داده‌های شبیه‌سازی شده در محدوده ۹۵ ppu قرار گرفتند ( $p$ -factor=۸۰ درصد). مقدار  $r$ -factor در این مرحله از شبیه‌سازی نیز برابر ۱/۰۵ بود (شکل ۲). بنابراین با توجه توانایی مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان و نیز مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی، به نظر می‌رسد که مدل SWAT بهینه شده با الگوریتم PSO برای برآورد رواناب در حوزه آبخیز بازت قابل استفاده باشد.



شکل ۱- نتایج به دست آمده از اجرای مدل با استفاده از مجموعه داده های اقلیمی گوناگون (الف: داده های اقلیمی حوزه آبخیز بازفت، ب: داده های اقلیمی CRU و ب: داده های اقلیمی بازفت - CRU).



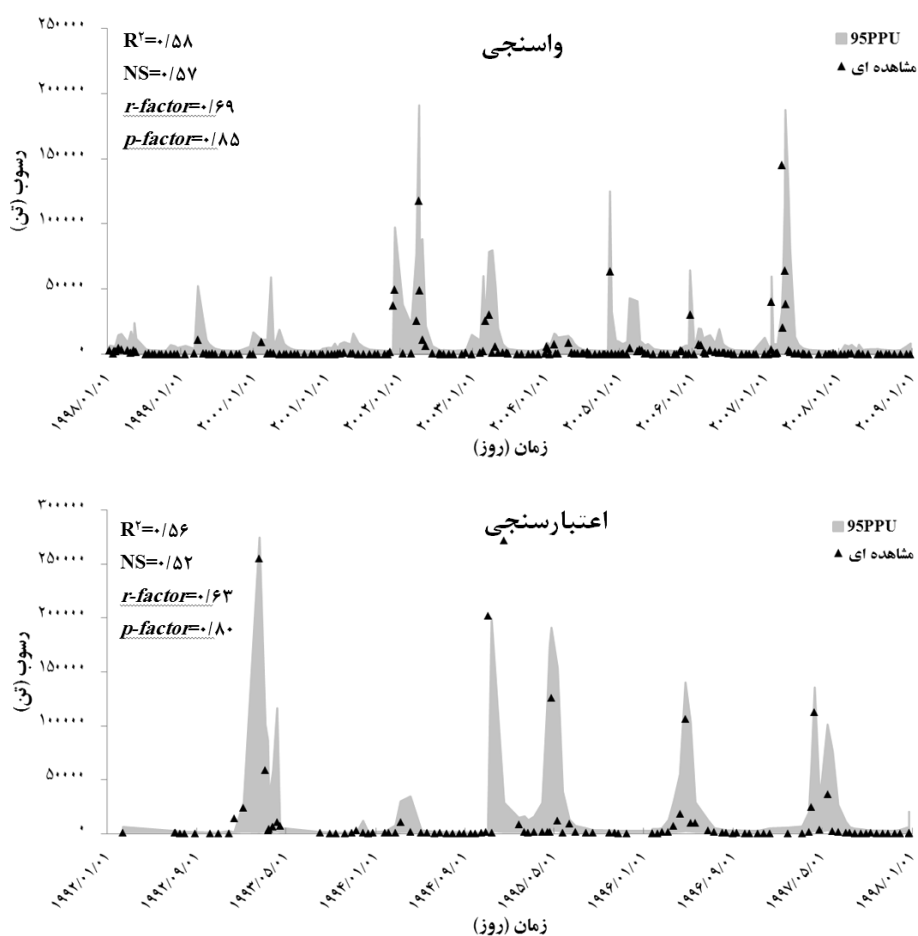
شکل ۲- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم PSO برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز بازفت.

واسنجی و اعتبارسنجی رسوب: مقادیر به نسبت مناسب معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل، بیانگر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رسوب در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی است (شکل ۳). از سوی دیگر، مدل قابلیت به نسبت بالایی در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان رسوب به ویژه برای مقادیر بیشینه جریان در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی داشته است به گونه‌ای که بیش‌تر داده‌های

مشاهده‌ای رسوب در سطح ۹۵ ppu قرار گرفته‌اند (شکل ۳). مقادیر  $r$ -factor و  $p$ -factor به دست آمده برای مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۸۵ درصد و برای مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/۶۳ و ۸۰ درصد هستند که دلیلی بر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رسوب می‌باشد. مقدار ضریب تبیین برای مرحله واسنجی ۰/۵۸ و برای مرحله اعتبارسنجی ۰/۵۶ بود که نشان‌دهنده همبستگی به نسبت مناسب داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای است. ضریب نش-ساتکلیف برای مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۵۷ و ۰/۵۲ بود (شکل ۳). با توجه به مقادیر شاخص‌های سنجش کارایی مدل در شبیه‌سازی رسوب در مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی و نیز قابلیت مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان رسوب در طول دوره شبیه‌سازی، به نظر می‌رسد که مدل SWAT از دقت به نسبت مناسبی برای شبیه‌سازی رخدادهای آینده در حوزه آبخیز بازفت برخوردار بوده و بتوان از آن برای برآورد رسوب در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. با این وجود ذکر این نکته ضروری است که برآورد رسوب در حوزه‌های آبخیز با استفاده از مدل‌ها، همواره با خطا روبه‌رو بوده و در مناطقی که داده‌های مشاهده‌ای با کمیت و کیفیت مناسب در دسترس باشند، استفاده از داده‌های مشاهده‌ای رسوب توصیه می‌شود.

در پژوهش‌هایی مشابه یانگ و همکاران (۲۰۰۹) از مدل SWAT برای بررسی اثر تراس‌های بازدارنده جریان آب بر کیفیت آب (بار رسوب، نترات و فسفر محلول) در یک حوزه آبخیز در کشور کانادا استفاده نمودند و گزارش کردند که مدل برآورد به نسبت مناسبی از بار رسوب داشت ( $R^2=0/5$ ). پندی و همکاران (۲۰۰۵) به قابلیت بالای مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز نیکده در هند اشاره و ضریب تبیین ۰/۹۷-۰/۷۷ و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۹۵-۰/۷۰ را گزارش نمودند. اثرینگ و همکاران (۲۰۱۱) از مدل SWAT برای برآورد رواناب و رسوب روزانه در یک حوزه آبخیز بزرگ (۱۱۱۰ کیلومتر مربع) در جنوب غربی فرانسه استفاده نمودند و گزارش کردند که داده‌های شبیه‌سازی شده هم‌خوانی خوبی با داده‌های مشاهده‌ای داشتند. تلسون و شوئماکر (۲۰۰۴) ضمن واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای برآورد رواناب، رسوب و فسفر در حوزه آبخیز کانونسویل در ایالات متحده آمریکا، خطا در شبیه‌سازی اوج جریان را مهم‌ترین منبع خطا در شبیه‌سازی فسفر و رسوب توسط مدل گزارش نمود. کفی و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT، مقادیر رواناب روزانه شبیه‌سازی شده همبستگی بسیار خوبی

با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند ( $R^2=0/83$  و ضریب نش-سانتکیف برابر  $0/78$ ) و بنابراین مدل به‌خوبی برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک در حوضه قابل استفاده است. هوانگ و همکاران (۲۰۰۹) برای برآورد بار آلاینده‌های ورودی به دریاچه گوجنگ در طی سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۵۱ از مدل SWAT استفاده و گزارش کردند که مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رواناب سطحی و بار رسوب در حوضه مورد مطالعه داشت.



شکل ۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم PSO برای شبیه‌سازی رسوب در حوضه آبخیز بازفت.

### نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نمایانگر آن بود که مدل SWAT طراحی شده با داده‌های اقلیمی ترکیبی بازفت- داده‌های اقلیمی جهانی (داده‌های CRU)، شبیه‌سازی بهتری از رواناب جاری در منطقه مورد مطالعه داشت و از داده‌های اقلیمی جهانی برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوزه‌های آبخیز با محدودیت داده‌های اقلیمی (حوزه‌های آبخیزی که دارای تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک محدود و با پراکنش نامناسب هستند) می‌توان استفاده نمود. مدل SWAT بهینه‌سازی شده با الگوریتم PSO، دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب در مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی داشت. همچنین مدل قابلیت به نسبت بالایی در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان رسوب به‌ویژه برای مقادیر بیشینه جریان در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در شبیه‌سازی رسوب داشت. بنابراین براساس نتایج به‌دست آمده از مدل SWAT واسنجی و اعتبارسنجی شده با الگوریتم PSO می‌توان برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب روزهانه در حوزه‌های آبخیز با داده‌های ورودی محدود (مانند منطقه مورد بررسی در این پژوهش) استفاده نمود. با این وجود پیشنهاد می‌گردد که امکان استفاده از سایر روش‌های نوین بهینه‌سازی هم‌چون الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچه، جستجوی ممنوعه<sup>۲</sup> و... در واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در پژوهش‌های آینده بررسی گردد. همچنین با توجه به تأثیر مطلوب استفاده از داده‌های اقلیمی CRU در شبیه‌سازی رواناب و رسوب در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که قابلیت استفاده از این مجموعه داده‌های اقلیمی در شبیه‌سازی رواناب و رسوب در دیگر حوزه‌های آبخیز کشور بررسی شود.

### منابع

1. Abbaspour, K.C. 2011. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs Version 2: A User Manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
2. Ababei, B., and Sohrabi, T. 2009. Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud watershed. J. Water Soil Cons. 16: 3. 41-58.
3. Akhavan, S., Abedi Kupaie, J., Mousavi, F., Abbaspour, K.C., Afyuni, M., and Eslamian, S. 2010. Prediction of blue water and green water in the Hamedan-Bahar watershed using SWAT model. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. 53: 9-24.

---

1- Ant Colony  
2- Taboo Search

4. Arefi Asl, A., Najafi Nejad, A., Kiani, F., and Salman Mahini, A. 2012. Runoff and sediment prediction using SWAT model in the Chehel Chai watershed in Golestan province. *J. Range Watershed Manage.* 66: 433-446.
5. Bakker, M.M., Govers, G., and Rounsevell, M.D.A. 2004. The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena.* 57: 55-76.
6. Bingner, R.L., Garbrecht, J., Arnold, J.G., and Srinivasan, R. 1997. Effect of watershed sub-division on simulation runoff and fine sediment yield. *Trans. ASAE.* 40: 5. 1329-1335.
7. Coffey, R., Cummins, E., O'Flaherty, V., and Cormican, M. 2010. Analysis of the soil and water assessment tool (SWAT) to model *Cryptosporidium* in surface water sources. *Biosyst Eng.* 106: 303-314.
8. Heppner, F., and Grenander, U. 1990. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks, P 233-238. In: Krasner, S. (ed.), *The Ubiquity of Chaos*, ISBN: 0871683504, AAAS Publications, Washington, DC.
9. Huang, Z., Xue, B., and Pang, Y. 2009. Simulation on stream flow and nutrient loadings in Gucheng Lake, Low Yangtze River Basin, based on SWAT model. *Quatern. Int.* 208: 109-115.
10. Jeirani, F., Morid, S., and Moridi, A. 2011. Impact of DEM cell size on calibration and predictions of runoff and sediment, using SWAT-CUP. *J. Water Soil Cons.* 18: 81-101.
11. Jones, P., and Harris, I. 2008. CRU Time Series (TS) high resolution gridded datasets, [Internet]. NCAS British Atmospheric Data Centre, Available from: [http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_ATOM\\_dataent\\_1256223773328276](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_1256223773328276).
12. Kennedy, J., and Eberhart, R.C. 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV*, Piscataway, NJ: IEEE Press. Pp: 1942-1948.
13. Morgan, R.P.C., and Nearing, M.A. 2011. *Handbook of erosion modelling*. John Wiley & Sons, Ltd, 413p.
14. 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.
15. Ndomba, P., Mtalo, F., and Killingtveit, A. 2008. SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. *Phys. Chem. Earth.* 33: 626-632.
16. 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, Technical Report No. 406, Texas A&M University System, Collage Station, Texas 77843-2118.
17. Oeurng, C., Sauvage, S., and Sanchez-Perez, J.M. 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *J. Hydrol.* 401: 145-153.



18. Pandey, V.K., Sudhindra, N., Panda, N., and Sudhakar, S. 2005. Modelling of an Agricultural Watershed using Remote Sensing and a Geographic Information System. *Biosyst. Engin.* 90: 331-347.
19. Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, F., Heidarpour, M., Jalalian, A., and Abbaspour, K. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrol. Sci. J.* 53: 5. 977-988.
20. Safamanesh, R. 1996. Erosion and sediment report. Comprehensive study in Bazoft watershed, Chaharmahal and Bakhtiary province, Iran, Part 7.
21. Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., and Makeschin, F. 2011. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT stream flow simulation. *J. Hydrol.* 415: 413-424.
22. Tolson, B.A., and Shoemaker, B. 2004. Watershed modelling of the Cannonsville basin using SWAT 2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to Cannonsville reservoir. Technical report, School of civil and environmental engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
23. Tripathi, M.P., Panda, R.K., and Raghuwanshi, N.S. 2003. Identification and prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosyst. Eng.* 85: 365-379.
24. Yang, Q., Meng, F.R., Zhao, Z., Chow, T.L., Benoy, G., Rees, H.W., and Bourque, C.P.A. 2009. Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. *Agr. Ecosyst. Environ.* 132: 23-31.



## **Calibration and validation of SWAT model using PSO algorithm for the simulation of runoff and sediment in a mountainous watershed with limited climate data**

**\*A.A. Besalatpour<sup>1</sup>, Sh. Ayoubi<sup>2</sup>, M.A. Hajabbasi<sup>2</sup> and A. Jalalian<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Isfahan University of Technology, <sup>3</sup>Professor, Dept. of  
Soil Science, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Received: 11/15/2013; Accepted: 07/02/2014

### **Abstract**

Soil erosion is a major environmental threat to sustainability and agricultural productivity leading to reduction of soil fertility, loss of nutrients and declines of crop yields in arable lands. In this study, the suitability of SWAT model for simulating the daily runoff and sediment in the Bazoft watershed (one of the main sub-basins of the Karun river basin in central Iran) was investigated. For this purpose, three different climate data sets including climate data obtained from the Bazoft watershed (Bazoft watershed data), the climate research unit data (CRU data) and a combination of the CRU and Bazoft watershed data (Bazoft-CRU data) were first investigated. Then, the potential use of PSO algorithm for calibrating and validating of the model was evaluated. The constructed SWAT model using a combination of the CRU data and the Bazoft climate data had a better runoff simulation performance in the study area. The obtained Nash-Sutcliffe (NS) coefficient for the constructed SWAT model using the Bazoft-CRU data was 0.38 while it was 0.31 and 0.21 for the proposed SWAT model using the Bazoft watershed data and the CRU data, respectively. The obtained *r-factor* and *p-factor* values in the model calibration period using the PSO algorithm were 1.25 and 0.81, respectively. The  $R^2$  and NS coefficients for the validation period were also 0.64 and 0.60, respectively. Furthermore, in the sediment simulation step, the *r-factor* and *p-factor* values for the calibration period were 0.69 and 0.85, respectively and they were 0.63 and 0.80 for the validation period, respectively.

**Keywords:** SWAT model, Daily runoff and sediment, SWAT-Cup, PSO algorithm

---

\* Corresponding Authors; Email: a.besalatpour@vru.ac.ir