

## تأثیر دبی چشمه‌ها بر قابلیت شبیه‌سازی رواناب با مدل SWAT در یک حوزه آبخیز کوهستانی با توپوگرافی شدید: واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از الگوریتم پرندگان (PSO)

ایمان فاضلی فارسانی<sup>۱</sup>، محمد حسن صالحی<sup>۲</sup>، علی اصغر بسالت‌پور<sup>۳</sup> و محمد رضا فرزانه<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۲- استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۳- استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر رفسنجان

۴- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۶ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۳/۱۸	در طول چند دهه اخیر استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی به منظور شبیه‌سازی، درک بهتر فرایندها و صرفه جویی در هزینه‌ها در حوضه‌های آبریز بسیار گسترش یافته است. برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس حوزه-های آبخیز، مدل‌های هیدرولوژیکی گوناگونی از جمله SWAT توسعه داده شده است. در این پژوهش از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه در حوزه آبخیز بازفت استفاده شد و تأثیر دبی چشمه‌ها موجود در منطقه بر دقت شبیه‌سازی آن در دو اجرا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تأثیر دبی چشمه‌ها بر جریان پایه، جریان پیشینه و شیب هیدروگرافها نسبت به داده‌های مشاهداتی بسیار نزدیک‌تر از حالتی است که دبی چشمه‌ها وارد مدل SWAT نشده است؛ سپس مدل همراه با دبی چشمه‌ها برای واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از الگوریتم پرندگان (PSO) انتخاب شد. در بخش آنالیز حساسیت، پارامترهای شماره منحنی (CN2)، زمان تأخیر برای آبخوان (GW_DELAY)، ضریب نفوذ آبخوان (RCHRG_DP)، فاکتور تأخیر دمای توده برف (TIMP) و متوسط کل بارش ماهانه در طول دوره پیش‌بینی (PCPMM) بیشترین حساسیت را بر قابلیت شبیه‌سازی مدل داشتند. مقادیر شاخص ارزیابی مدل شامل $r$ -factor و $p$ -factor و ضریب تبیین ( $R^2$ ) به دست آمده در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۱/۰۱، ۷۶ درصد و ۰/۷۹ و در مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/۷۶، ۷۲ درصد و ۰/۵۷ بود. بنابراین با توجه به تأثیر چشمگیر دبی چشمه‌ها و پارامترهای ورودی مدل بر شبیه‌سازی روند تغییرات جریان در منطقه مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن این عوامل در مدل‌سازی با SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌های آبخیز کوهستانی با توپوگرافی شدید، ضروری باشد.

\* عهده دار مکاتبات

Email: fazeligis@gmail.com

### مقدمه

فرسایش خاک طی چند دهه اخیر به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی جهان مطرح بوده است و تأثیر بسزایی بر توسعه پایدار در دنیا داشته است (۲). به طور کلی آمار دقیقی از میزان فرسایش خاک در ایران وجود ندارد. بر اساس آمار منتشر شده توسط فائو، ایران از جمله کشورهایی است که اراضی کشاورزی و عرصه‌های منابع طبیعی آن به شدت تحت تأثیر فرسایش هستند. بر اساس این گزارش، میزان فرسایش خاک در کشور ما بین ۱۵ تا ۲۰ تن بر هکتار در سال برآورد شده است؛ در حالی که این میزان در آمریکا و اروپا کمتر از یک تن بر هکتار در سال می‌باشد (۵). یکی از عوامل مهمی که سبب فرسایش خاک می‌شود وجود رواناب و دبی‌های سیلابی می‌باشد که سبب تخریب و هدررفت خاک سطحی و در اراضی منابع طبیعی و کشاورزی سبب ورود رسوب، عناصر غذایی و آفت‌کش‌ها به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شده و باعث کاهش کیفیت منابع آب و نیز خطر سمیت برای انسان و دیگر موجودات زنده می‌شود (۸ و ۱۳).

برای تعیین واکنش حوزه‌های آبریز در شرایط مختلف آب و هوایی، معمولاً از روش‌های هیدرولوژی و مدل‌های مختلف ریاضی استفاده می‌شود. امروزه استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی به منظور درک بهتر عوامل موثر در چرخه هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبریز توسعه یافته است و در طیف وسیعی از مسائل مدیریت منابع آب از جمله مدل‌سازی بارش-رواناب، مدیریت رسوب، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و غیره کاربرد دارند. پیش‌بینی رفتار هیدرولوژی حوزه‌های آبریز و تخمین دبی و حجم رواناب، برای ارزیابی بیشتر پروژه‌های آبی، حفاظت خاک و منابع آب مورد نیاز است. برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس حوزه‌های آبخیز، مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی توسعه داده شده است. از جمله مدل‌هایی که اخیراً به شکل وسیعی در سرتاسر دنیا در

پژوهش‌های شبیه‌سازی رواناب و رسوب و مدیریت حوزه‌های آبخیز استفاده می‌شود، می‌توان به مدل SWAT<sup>۱</sup> اشاره نمود. مدل SWAT یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوزه آبخیز می‌باشد که توسط سرویس پژوهش کشاورزی ایالات متحده برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف بر جریان آب، رسوب، عناصر غذایی و تعادل مواد شیمیایی در حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده با کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط مدیریتی گوناگون برای دوره‌های زمانی طولانی مدت تهیه و ارائه گردیده است (۹). در پژوهش‌های انجام شده، با تشخیص و اولویت‌بندی زیرحوزه‌های بحرانی در زیر حوزه آبخیز بازفت به وسیله مدل SWAT و استفاده از ۳ مجموعه داده اقلیمی مختلف شامل داده‌های اقلیمی بازفت، داده‌های اقلیمی جهانی (CRU<sup>۲</sup>) و داده‌های اقلیمی ترکیبی بازفت - CRU برای شبیه‌سازی رواناب روزانه نشان دادند که مدل می‌تواند در تشخیص زیر حوزه‌های با داده‌های عدم قطعیت و غیر دقیق برای اهداف مدیریتی موفقیت آمیز عمل کند (۳). در پژوهش‌های دیگر، با تخمین رواناب و رسوب در زیر حوزه بهشت آباد کارون شمالی توسط مدل SWAT نشان دادند که در مجموع، مدل در شبیه‌سازی رواناب خیلی بهتر از رسوب عمل کرده و از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب این بوده که در بعضی از ماه‌ها مدل نتوانسته ذوب برف را خوب شبیه‌سازی کند. از دیگر مشکلات موجود این بوده که به دلیل کوهستانی بودن حوزه، فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ زده و اشباع و تعداد کم داده‌ها می‌باشد (۱۲).

با وجود مطالعات و تحقیقات زیادی که در دو دهه اخیر در مورد مسئله فرسایش خاک، تولید رواناب و سرانجام ته‌نشست آن‌ها به عمل آمده است، اما هنوز به دلیل پیچیدگی‌های فرایندهای موثر بر آن راهی طولانی

1- Soil and Water Assessment Tool

2- Climatic Research Unit

جنگلی (عمدتاً بلوط ایرانی) یا عاری از پوشش می‌باشد. میانگین سالانه درجه حرارت در ارتفاعات شمال شرقی حوزه (ارتفاعات زردکوه) به کم‌تر از ۸ درجه سانتی‌گراد و در قسمت‌های جنوبی حوزه به ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. میانگین بارش سالانه در حوزه نیز از ۱۴۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال شرقی تا ۵۰۰ میلی‌متر در بخش‌های جنوبی حوزه متغیر می‌باشد (۴).

در این حوزه آبخیز بیش از ۲۲ چشمه وجود داشته که برخی از آن‌ها با دبی تولیدی نسبتاً زیادی بر چرخه هیدرولوژی در حوزه آبخیز اثرگذارند (جدول ۲). شکل (۱) موقعیت زیر حوزه بازفت در استان چهارمحال و بختیاری را نشان می‌دهد.

### معرفی مدل، داده‌های ورودی و اجرای مدل SWAT

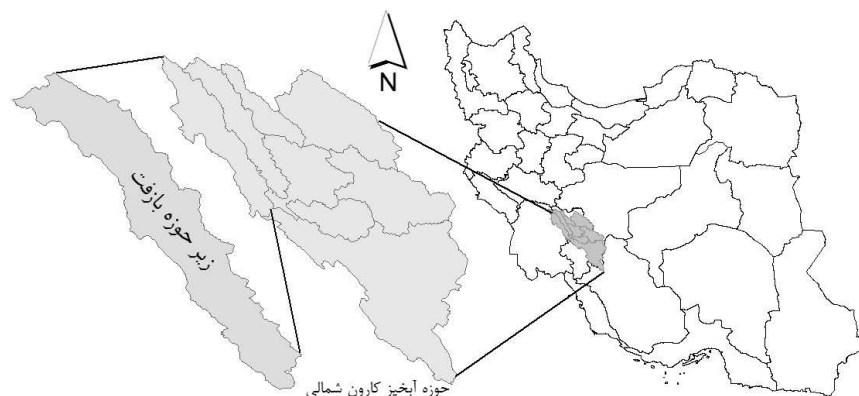
مدل SWAT، یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوزه‌های آبخیز، به منظور ارزیابی دبی جریان، میزان رسوب، عناصر غذایی و روش‌های مدیریتی است که توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا (ARS<sup>۲</sup>) ارائه شده و به صورت گسترده در بسیاری از کشورهای جهان (مانند ایالات متحده آمریکا، کانادا، ایتالیا و سوئیس) به کار گرفته شده است و دارای بازده محاسباتی بالا می‌باشد (۹). این مدل، شامل مجموعه‌ای از معادله‌های ریاضی و فرمول‌های تجربی متعدد است و به صورت یک مدل پیوسته می‌تواند در گام‌های زمانی مختلف (مانند ساعت، روز و یا دوره‌های طولانی‌تر) اجرا شود و ویژگی‌های مورد نظر را شبیه‌سازی کند. مدل مزبور، با تفکیک یک حوزه به تعداد زیادی زیرحوزه، شبیه‌سازی جزئیات مکانی را انجام می‌دهد. در این پژوهش ابتدا نقشه رقومی ارتفاع (DEM<sup>۳</sup>) وارد مدل شده و توسط نرم افزار ArcSWAT نقشه‌های زیر حوزه‌ها و شبکه آبراه‌های تهیه شدند.

برای فهم کامل این پدیده باقی مانده است. دانشمندان بسیاری در عرصه مدل‌سازی فرسایش، انتقال و رسوب-گذاری وارد شده‌اند و مدل‌های مختلفی برای نقاط مختلف دنیا توسعه داده‌اند. در این مطالعه نیز از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در زیر حوزه بازفت کارون شمالی استفاده شد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد نظر، وجود چشمه‌های پر آب و اختلاف شدید توپوگرافی در منطقه، تأثیر چشمه‌ها بر تولید رواناب در مدل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر پارامترهای ورودی مدل بر دقت شبیه‌سازی جریان توسط مدل، بررسی و مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر شبیه‌سازی رواناب در این حوزه آبخیز کوهستانی با توپوگرافی شدید تعیین شدند. سپس امکان استفاده از الگوریتم پرندگان (PSO<sup>۱</sup>) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل بررسی گردید.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بازفت یکی از ۶ زیر حوزه اصلی حوزه آبخیز کارون شمالی است و در شمال غرب و غرب استان چهارمحال و بختیاری و مرز شرقی استان خوزستان واقع شده است و بخش اعظم آن به استان چهارمحال و بختیاری تعلق دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی این حوزه در حد فاصل ۳۴' تا ۴۹° تا ۳۲' ۵۰° طول شرقی و ۳۱° ۳۷' تا ۳۹' ۳۲° عرض شمالی قرار دارد. مساحت کل حوزه حدود ۲۱۶۸ کیلومتر مربع بوده و دارای طولی حدود ۱۳۲ کیلومتر و عرض حدود ۱۷ کیلومتر است. بخش اعظم این حوزه (حدود ۵۰ درصد) کوهستانی است و مقدار کمینه ارتفاع در منطقه ۸۵۸ متر در خروجی حوزه و بیشینه آن ۴۱۷۱ متر و مربوط به ارتفاعات زردکوه بختیاری می‌باشد. ارتفاع متوسط حوزه نیز ۲۴۷۵ متر می‌باشد شیب متوسط حوزه متغیر و بیش‌ترین آن مربوط به کلاس شیب ۴۰ تا ۷۰ درصد است. حدود ۵۶ درصد از وسعت کل حوزه دارای پوشش مرتعی (عمدتاً دافنه و گون) و بقیه منطقه دارای پوشش



شکل (۱) موقعیت زیر حوزه بازفت در حوزه آبخیز کارون شمالی  
Figure (1) Location of Bazoft watershed in North Karoun basin

### واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از الگوریتم PSO

در این پژوهش قابلیت استفاده از الگوریتم PSO برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در محیط نرم افزار SWAT-CUP بررسی شد. الگوریتم بهینه‌سازی PSO یکی از جدیدترین روش‌های ارائه شده برای حل مسائل بهینه‌سازی است که مبتنی بر هوش جمعی است و تقریب مناسبی از پاسخ بهینه به دست می‌آورد و امروزه با این که روش نسبتاً جدیدی محسوب می‌شود، به صورت گسترده در علوم مختلف استفاده می‌گردد. در این الگوریتم هر ذره (Particle) معرف یک راه حل بالقوه برای بهینه‌سازی است که در نهایت بهترین راه حل، مقدار بهینه برای تابع هدف را تعیین می‌کند. به مجموعه ذره‌ها، Swarm گفته می‌شود که در لغت به معنی دسته حشرات است. در واقع این الگوریتم یکی از روش‌های هوش جمعی است که با تنظیم مسیر حرکت یک جمعیت از ذرات در فضای پاسخ مسئله 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 (۷). ایده اولیه الگوریتم PSO از رفتار اجتماعی مربوط به پرواز پرندگان و حرکت دسته‌جمعی ماهی‌ها برای یافتن غذا و یا دفاع از خود در برابر دشمنان گرفته شده است (۷).

در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU<sup>۱</sup>) تعریف شدند و در مجموع ۷۷۲ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تعریف شد. پس از تعریف نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، داده‌های هواشناسی شامل بارندگی روزانه، دمای حداقل و حداکثر وارد مدل شد و مدل از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۸ اجرا گردید. پس از آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی، رواناب شبیه‌سازی شده مدل در برابر داده‌های مشاهداتی دبی اندازه‌گیری شده در خروجی حوزه مورد مقایسه قرار گرفتند و دبی چشمه‌ها به عنوان یک منبع ورودی به مدل اضافه شد که در ادامه به طور مفصل به آن پرداخته شده است.

### آنالیز حساسیت

برای انجام آنالیز حساسیت از روش یک پارامتر در هر بار (OAT<sup>۲</sup>) استفاده شد. در این روش در هر بار اجرای مدل، یک پارامتر تغییر کرده و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند (۱). پارامتری که در دامنه تغییرات خود بیشینه تاثیر را بر تابع هدف دارد، به عنوان پارامتر حساس‌تر انتخاب شده و برای مرحله واسنجی معرفی می‌گردد (جدول ۱).

1- Hydrologic Response Unit  
2- One At Time

جدول (۱) پارامترهای مدل مؤثر بر تولید رواناب  
Table (1) Parameters affecting on discharge

توضیحات	دامنه پارامتر		پارامتر
	کمینه	بیشینه	
شماره منحنی (Curve number for moisture condition II)	-0.4	0.4	*r_CN2
ثابت کاهش جریان پایه (Baseflow alpha factor)	0	1	v_ALPHA_BF
زمان تأخیر برای تغذیه آب‌خوان (Groundwater delay time)	0	400	v_GW_DELAY
عمق آستانه آب در آب‌خوان کم‌عمق برای نفوذ به آب‌خوان عمیق (Threshold (water in shallow aquifer)	0	100	v_REVAPMN
ضریب آبی که از سفره‌های کم‌عمق به پروفیل خاک بر می‌گردد (Revap (coefficient)	0.02	0.2	v_GW_REVAP
عمق آغازین آب در آب‌خوان آزاد (Initial depth of water in the shallow (aquifer)	0	1000	v_SHALLST
ضریب نفوذ آب‌خوان (Deep aquifer percolation fraction)	0	1	v_RCHRG_DP
عمق آستانه آب در آب‌خوان کم‌عمق برای جریان برگشتی (Threshold depth of (water in the shallow aquifer required for return flow to occur)	0	500	v_GWQMN
فاکتور جبران جذب گیاهی (Plant uptake compensation factor)	0.01	1	v_EPCO
فاکتور جبران تبخیر از خاک (Soil evaporation compensation factor)	0.01	1	v_ESCO
متوسط طول شیب (Average slope length)	10	150	v_SLSUBBSN
ضریب زبری مانینگ برای جریان روی سطح زمین (Manning's n value for (overland flow)	0	0.8	v_OV_N
چگالی ظاهری خاک (Soil bulk density)	-0.4	0.4	r_SOL_BD
متوسط آب قابل استفاده (Soil available water storage capacity)	-0.5	0.5	r_SOL_AWC
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Soil hydraulic conductivity)	-0.8	0.8	r_SOL_K
ضریب بازتاب (آلبدو) خاک مرطوب (Moist soil albedo)	-0.5	0.5	r_SOL_ALB
ضریب زبری مانینگ برای جریان در کانال اصلی (Manning's n value for the (main channel)	0	0.3	v_CH_N2
هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی (Main channel conductivity)	0	150	v_CH_K2
دمای بارش برف (Snowmelt temperature)	-5	5	v_SFTMP
دمای پایه ذوب برف (Snowmelt base temperature)	-5	5	v_SMTMP
فاکتور ذوب برف ۲۱ جون (Melt factor for snow on 21 June)	0	10	v_SMFMX
فاکتور ذوب برف ۲۱ دسامبر (Melt factor for snow on 21 December)	0	10	v_SMFMN
فاکتور تأخیر دمای توده برف (Snow pack temperature lag factor)	0.01	1	v_TIMP
ضریب واسنجی برای کنترل تأثیر ثابت زمان ذخیره برای جریان نرمال (Muskingum (coefficient)	0	10	v_MSK_CO1
ضریب واسنجی برای کنترل تأثیر ثابت زمان ذخیره برای جریان کم (Muskingum (coefficient)	0	10	v_MSK_CO2
ضریب تأخیر رواناب سطحی (Surface runoff lag coefficient)	1	24	v_SURLAG
متوسط کل بارش ماهانه در طول دوره پیش‌بینی (Average amount of (precipitation falling in monthh)	-0.5	0.5	r_PCPMM

\* r و v کدهایی هستند که نوع تغییراتی را که برای پارامتر به کار برده می‌شوند، تعیین می‌کنند. v بدان معنی است که مقدار پارامتر با مقدار جدید جایگزین شود و برای r مقدار پارامتر در ۱ + مقدار جدید ضرب می‌شود.

\* r\_\_ means the existing parameter value is multiplied by (1 plus a given value) and v\_\_ means the default parameter is replaced by a given value

می‌کنند (که  $0 < C_1, C_2 \leq 2$ )، ضرایب شتاب یا اطمینان نامیده می‌شوند. بنابراین در مدل بهترین جهان، سرعت ذره به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [\hat{y}_j(t) - x_{i,j}(t)] \quad (۳)$$

و موقعیت ذرات با توجه به بردار سرعت جدید نیز به صورت زیر به‌روزی می‌شوند:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (۴)$$

الگوریتم شامل تکرار معادلات به‌روزرسانی ذکر شده تا برقراری شرط توقف می‌باشد. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم، سرعت‌ها باید محدود شوند:

$$v_{i,j} \in [v_{\min}^j, v_{\max}^j] \quad (۵)$$

یک تعبیر فیزیکی برای این محدودیت بر روی سرعت ذرات به این صورت است که اگر رابطه به‌روزرسانی مکان ذره را به وسیله رابطه ۶ نشان دهیم، در آن صورت سرعت ذره در واقع مقدار جابه‌جایی آن در یک مرحله خواهد بود و چون در حالت طبیعی، ذره در یک مرحله مسافت محدودی را طی می‌کند، سرعت آن نیز باید محدود گردد.

$$x_i(t+1) - x_i(t) = v_i(t+1) \quad (۶)$$

پارامترهای اصلی در الگوریتم PSO استاندارد شامل تعداد ذرات، مقداردهی اولیه و شرط توقف می‌باشند. با توجه به این که ایده اصلی الگوریتم PSO تکیه بر تفکر جمعی است، هرچه تعداد ذرات بیش‌تر باشد، نتایج حاصل بهتر خواهد بود؛ اما از طرفی افزایش تعداد ذرات نیازمند محاسبات بیش‌تر است و در نتیجه همگرایی کندتر خواهد 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 آرایی تعجب‌برانگیز توسط دسته‌های موجودات می‌گردد، توسط دانشمندان مورد مطالعه و شبیه‌سازی قرار گرفته است (۶). ثابت شده است که الگوریتم PSO یک روش موثر و کارآمد جهت حل مسائل بهینه‌سازی فراگیر است و در بسیاری موارد دشواری‌هایی که سایر روش‌های بهینه‌سازی با آن مواجه می‌شوند را ندارد (۷).

دو مدل کلی برای الگوریتم PSO وجود دارد: مدل بهترین جهان و مدل بهترین همسایگی. 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 به عنوان 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 به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات، ابتدا باید بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت در بین کل ذرات در هر مرحله به‌روز شود. بهترین موقعیت ذره به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود:

(۱)

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & \text{if } f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases}$$

در این مدل اگر S تعداد کل ذرات باشد، بهترین موقعیت در بین کل ذرات به صورت زیر حاصل می‌شود:

(۲)

$$\hat{y}(t) \in \{y_1, \dots, y_s \mid f(\hat{y}(t)) = \min[f(y_1), \dots, f(y_s)]\}$$

این رابطه بیان‌گر آن است که بهترین موقعیت به‌دست آمده توسط همه ذرات تا مرحله t است. این الگوریتم از دو عدد تصادفی  $K_1$  و  $K_2$  استفاده کرده که دارای توزیع یک‌نواخت در بازه (۰,۱) هستند. دو پارامتر  $C_1$  و  $C_2$  که مقادیر ثابت اختیار

داده‌های مشاهداتی آن مقایسه شدند. در مدل SWAT چشمه‌ها به عنوان منابع نقطه‌ای تولید رواناب، وارد شدند و تاثیر آن بر رواناب بررسی گردید. جدول و شکل ۲ موقعیت و دبی چشمه‌ها را نشان می‌دهند. همان طور که مشخص است تعداد زیادی چشمه با دبی‌های پرآب وارد آبراهه‌های حوزه می‌شوند و می‌توانند بر میزان رواناب تاثیر چشمگیری داشته باشند.

شکل ۳ نتایج حاصل از دو اجرای مختلف و مقایسه آن‌ها با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است نتایج اجرای همراه با وارد کردن دبی چشمه‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر است. این در حالی است که در اجرای بدون دبی چشمه‌ها در طول دوره شبیه‌سازی، برآوردی کم‌تر از حد برای جریان پایه دیده می‌شود، به طوری که جریان پایه اختلاف بسیار زیادی با داده‌های مشاهداتی رواناب دارد. برای جریان بیشینه نیز به طور کلی در طول دوره شبیه‌سازی، برآورد اجرای با دبی چشمه‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی رواناب نزدیک‌تر از برآورد اجرای بدون دبی چشمه‌ها می‌باشد؛ بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از مدل SWAT با داده‌های دبی چشمه‌ها نسبت به عدم وارد کردن آن‌ها برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز مورد مطالعه مطلوب‌تر می‌باشد و از این رو مدل SWAT به همراه دبی چشمه‌ها برای واسنجی و اعتبارسنجی انتخاب شد.

#### آنالیز حساسیت

پس از انجام آنالیز حساسیت بر پارامترهای مدل موثر بر رواناب به روش یک پارامتر در هر بار (OAT) از مجموع ۳۷ پارامتر موجود در جدول ۱، ۱۵ پارامتر به عنوان پارامترهای حساس برای مرحله واسنجی انتخاب گردید که از جمله مهم‌ترین پارامترهای حساس می‌توان به شماره منحنی (CN2)، زمان تاخیر برای آبخوان (GW\_DELAY)، ضریب نفوذ آبخوان (RCHRG\_DP)، فاکتور تاخیر دمای توده برف (TIMP) و متوسط کل بارش ماهانه در طول دوره پیش‌بینی (PCPMM) اشاره کرد.

در این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم PSO در محیط نرم‌افزار SWAT-CUP<sup>۱</sup> انجام شد. دوسوم داده‌های موجود برای واسنجی مدل و از یک‌سوم باقی‌مانده 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<sup>۲</sup> برای سنجش دقت مدل SWAT در برآورد رواناب و رسوب استفاده گردید. ضریب نش-ساتکلیف معمولاً به منظور ارزیابی قدرت یک مدل در پیش‌بینی مورد استفاده می‌شود و با توجه به خروجی مدل در این تحقیق که رواناب ماهانه است، می‌توان از این ضریب استفاده کرد. رابطه ۷ ضریب نش-ساتکلیف را نشان می‌دهد که در آن  $Q_i$  مقدار مشاهده‌ای پارامتر اندازه‌گیری شده،  $Q_j$  مقدار شبیه‌سازی شده پارامتر توسط مدل و  $Q$  مقدار میانگین پارامتر اندازه‌گیری شده می‌باشد:

مقدار عددی ضریب نش-ساتکلیف بین منفی بی‌نهایت تا ۱ بوده و هر چه 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 در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشده و از متوسط مقادیر داده‌های مشاهده‌ای استفاده شود.

#### نتایج و بحث

##### شبیه‌سازی اولیه رواناب

پس از جمع‌آوری داده‌ها و آماده کردن آن‌ها مطابق فرمت نرم‌افزار ArcSWAT، دو مدل مختلف (۲ سناریو) طراحی شد. در سناریوی اول تمامی لایه‌ها بدون اضافه کردن دبی چشمه‌ها در نظر گرفته شد و در سناریوی دوم دبی چشمه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نیز اضافه گردید. سپس نتایج شبیه‌سازی رواناب حاصل از دو اجرا، با

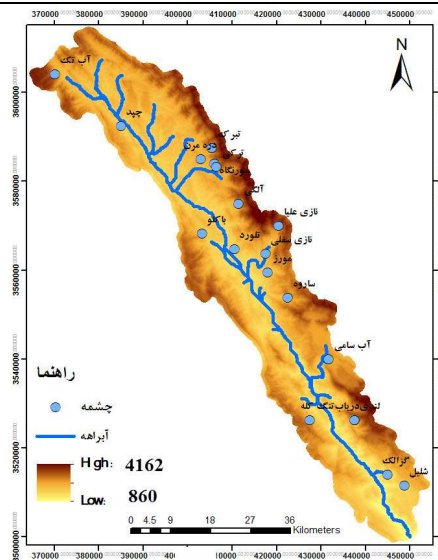
1- SWAT Calibration and Uncertainty Programs  
2- Nash-Sutcliffe

فاضلی فارسانی و همکاران: تاثیر دبی چشمه‌ها بر قابلیت شبیه‌سازی...

جدول (۲) نام و دبی چشمه های مورد استفاده در مدل

Table (2) Name and discharge of springs were used in model

دبی (لیتر بر ثانیه) (Discharge m <sup>3</sup> /s)	نام چشمه (Spring Name)	دبی (لیتر بر ثانیه) (Discharge m <sup>3</sup> /s)	نام چشمه (Spring Name)
500	تنگ کله (Tange Kaleh)	2200	شلیل (Shalil)
150	ساروه (Sarooh)	1122	چپد (Chepd)
2200	آب دودی (Ab Doodi)	400	دره بالا (Dareh Bala)
300	غزالک (Gazalak)	1100	مورز (Mavarz)
2800	آب سامی (Ab Samsami)	72	تلورد (Telord)
150	دریاب (Daryab)	1800	نازی علیا (Nazi Olia)
400	الگی (Algi)	110	سورنگاه (Sorengah)
40	باکلو (Bakloo)	1950	ترکی (Terki)
250	دره مرن (Dareh Mern)	250	آب سفید (Ab Sefid)
600	آب تک (Ab Tak)	800	تبرک (Tabarak)
150	لندی (Landi)	950	نازی سفلی (Nazi Sofla)



شکل (۲) موقعیت چشمه‌ها در حوزه بازفت

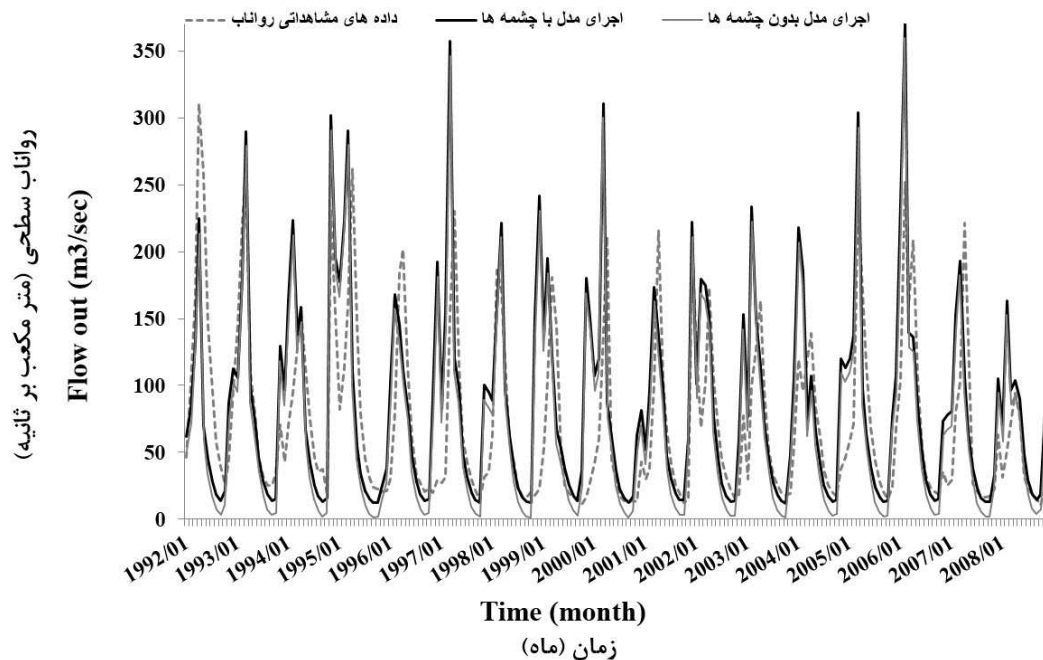
Figure (2) Location of springs in Bazoft watershed

و اعتبارسنجی در شکل ۵ مشخص می‌باشد. هم‌چنین مقادیر شاخص‌های آماری سنجش کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب برای این دو فرآیند نیز در جدول ۳ آمده است. نتایج حاکی از آن است که مدل توانایی نسبتاً 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 ۵). مقادیر **r-factor** و **p-factor** به دست آمده در مرحله واسنجی به ترتیب برابر

### واسنجی و اعتبارسنجی رواناب

به منظور واسنجی و اعتبارسنجی در ابتدا با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل، پارامترهای موثر در این بخش شناسایی شده و در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از الگوریتم PSO واسنجی و اعتبارسنجی صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی رواناب ماهانه توسط مدل SWAT بهینه شده با الگوریتم PSO در فرآیندهای واسنجی





شکل (۳) نمودار شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT و مقایسه آن با داده‌های مشاهداتی در دو سناریوی مورد مطالعه (سناریوی ۱: مدل با اضافه کردن دبی چشمه‌ها و سناریوی ۲: مدل بدون در نظر گرفتن چشمه‌ها)  
Figure (3) Flow out simulation using SWAT model Vs. observed data in two scenarios

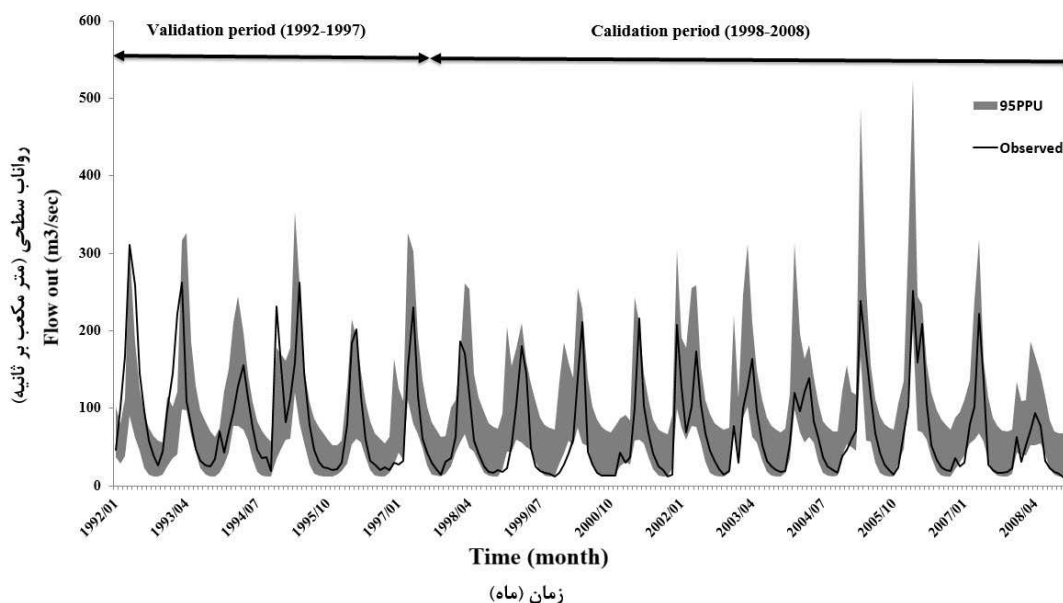
نسبتاً بالای داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده-ای ( $R^2=0.79$ ) و ضریب نش-ساتکلیف برابر  $0.78$  نیز دلیلی دیگر بر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی است (جدول ۳). بررسی روند تغییرات جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل در مرحله اعتبارسنجی و نیز شاخص‌های سنجش کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب، در این مرحله نیز نمایان‌گر آن است که مدل با دقت نسبتاً قابل قبولی قادر به شبیه‌سازی رخدادهای آینده در حوزه آبخیز مورد مطالعه است (شکل ۵ و جدول ۳). ضرایب تبیین و نش-ساتکلیف به دست آمده برای این مرحله به ترتیب  $0.57$  و  $0.56$  بود و درصد قابل قبولی از داده‌های شبیه‌سازی شده در محدوده  $95\text{ppu}$  (95% prediction uncertainty قرار گرفتند (factor= $0.72$ ). مقدار r-factor در این مرحله از شبیه‌سازی نیز برابر  $0.76$  بود (جدول ۳).

$1/01$  و  $76$  درصد می‌باشند که بیان‌گر دقت قابل قبول در شبیه‌سازی رواناب برای این مرحله می‌باشد (جدول ۳). هم چنین در مورد ضریب تبیین در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب  $0.79$  و  $0.57$  می‌باشد و نمایانگر همبستگی مقادیر مشاهداتی با مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی شده دارد. یکی از اهداف بهینه‌سازی در فرآیند واسنجی، کاهش عدم قطعیت می‌باشد به گونه‌ای که بیش‌تر داده‌های مشاهده‌ای در سطح  $95\text{ppu}$  قرار گیرند. مقدار مطلوب برای شاخص **p-actor** هنگامی است که  $100$  درصد داده‌های شبیه‌سازی شده در سطح  $95$  درصد محدوده اطمینان قرار گیرند ( $p\text{-factor}=100\%$ ). ولی معمولاً به دلیل خطاهای گوناگون در داده‌برداری و عدم قطعیت مدل‌های مفهومی، هیچ‌گاه این مقدار حاصل نمی‌شود. بر اساس نتایج دیگر پژوهش‌گران مقادیر **p-factor** بیش از  $60\%$  و **r-factor** کم‌تر از  $1/30$  نشان‌دهنده توانایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی است. هم‌بستگی

جدول (۳) مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی

Table (3) Summary statistic results for the monthly flow out calibration and validation periods.

(Evaluation Criteria) شاخص ارزیابی				
<i>p</i> -factor	<i>r</i> -factor	ضریب نش-ساتکلیف (NS)	ضریب تبیین (R <sup>2</sup> )	فرآیند
0.76	1.01	0.78	0.79	Calibration (واسنجی)
0.72	0.76	0.56	0.57	Validation (اعتبارسنجی)



شکل (۵) نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT همراه دبی چشمه‌ها با استفاده از الگوریتم PSO برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز بازفت

Figure (5) Results of calibration and validation of SWAT for spring discharge using PSO algorithm to simulate the flow out in Bazoft watershed

۰/۷۵ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۵ و ۰/۷۵ گزارش کرد. اثرینگ و همکاران<sup>۲</sup> (۱۰)، از مدل SWAT برای برآورد رواناب و رسوب روزانه در یک حوزه آبخیز وسیع (۱۱۱۰ کیلومتر مربع) در جنوب غربی فرانسه استفاده نمودند و گزارش کردند که داده‌های شبیه‌سازی شده هم‌خوانی خوبی با داده‌های مشاهده‌ای داشتند. فان و همکاران<sup>۳</sup> (۱۱)، با بررسی رواناب ماهانه مقدار ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸۲ و ۰/۷۷ را به ترتیب برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی گزارش کردند.

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 بازفت قابل استفاده باشد. در پژوهش‌هایی مشابه، رستمیان<sup>۱</sup> (۱۲)، با بررسی رواناب توسط مدل SWAT در زیر حوزه بهشت آباد در مرحله واسنجی ضرایب R<sup>2</sup> و نش-ساتکلیف را به ترتیب ۰/۸۵ و

2- Oeurng *et al.*  
3- Phan *et al.*

1- Rostamian

(TIMP) و متوسط کل بارش ماهانه در طول دوره پیش‌بینی (PCPMM) به عنوان مؤثرترین پارامترهای ورودی مدل بر قابلیت شبیه‌سازی رواناب در این حوزه آبخیز کوهستانی با توپوگرافی شدید شناسایی شدند که می‌توانند در پژوهش‌هایی که در حوزه‌های آبخیز با شرایط مشابه انجام می‌شوند، مورد توجه قرار گیرند. مدل SWAT بهینه‌سازی شده با الگوریتم PSO، دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب در مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی داشت. بنابراین با توجه به تأثیر چشمگیر دبی چشمه‌ها و پارامترهای ورودی مدل بر شبیه‌سازی روند تغییرات جریان در منطقه مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن این عوامل در مدل‌سازی با SWAT بر روی بیلان آبی منطقه موثر بوده و برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌های آبخیز کوهستانی ضروری باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در حوزه‌های آبخیز دیگر، تأثیر دبی چشمه‌ها و هم‌چنین قنات‌ها و چاه‌ها در نظر گرفته شود و بر شبیه‌سازی رواناب مورد مطالعه قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

در بیشتر مطالعات هیدرولوژی و مدل‌سازی با مدل SWAT، تنها ورودی عامل رواناب، بارندگی فرض می‌شود؛ حال آن‌که در مناطق کوهستانی، یکی دیگر از منابعی که می‌تواند تأثیر زیادی بر شبیه‌سازی رواناب داشته باشد، وجود چشمه‌های پرآب در منطقه است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در منطقه مورد مطالعه نشان داد که با وارد کردن دبی چشمه‌ها در مدل، شبیه‌سازی جریان بسیار به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر می‌شود. تأثیر دبی چشمه‌ها به عنوان منبع ورودی موثر بر تولید رواناب بر جریان پایه، جریان بیشینه و شیب هیدروگراف‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی بسیار نزدیک‌تر از حالتی بود که دبی چشمه‌ها وارد مدل SWAT نشده است. پارامترهای شماره منحنی (CN2)، زمان تاخیر برای آبخیز (GW\_DELAY)، ضریب نفوذ آبخیز (RCHRG\_DP)، فاکتور تاخیر دمای توده برف

### منابع

1. Abbaspour, K.C. 2012. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis program. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Ewag, Duebendorf, Switzerland. 103 pp.
2. 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.
3. Basalatpour, A.A., Hajabbasi M.A., Ayoubi, S., and Jalalian, A. 2012. Identification and prioritization of critical sub-basins in a highly mountainous watershed using SWAT model. *Eurasian Journal of Soil Science*, 1:58-63.
4. Basalatpour, A.A. 2012. Modelling of soil erosion hazard in the Bazoft watershed using fuzzy logic algorithm, SWAT model, and Fuzzy Clustering - Genetic algorithm. PhD thesis in soil science. Faculty of agriculture, Isfahan University of Technology (in Persian with English abstract).
5. FAO, UNDP and UNEP. 1994. Land degradation in south Asia: its severity, causes and effects upon the people. *World Soil Resources, Report No. 78*, FAO, Rome.

6. Heppner F., and Grenander, U. 1990. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. In: Krasner, S. (ed.), the Ubiquity of Chaos, ISBN: 0871683504, AAAS Publications, Washington, DC. 233-238.
7. Kennedy, J., and Eberhart, R.C. 1995. Particle swarm optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV, Piscataway, NJ: IEEE Press. 1942-1948.
8. Morgan, R.P.C., and Nearing, M.A. 2011. Handbook of erosion modelling. John Wiley & Sons, Ltd.
9. 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.
10. 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. Journal of Hydrology, 401:145-153.
11. Phan, D.B., Wu, C.C., and Hsieh, S.C. 2011. Impact of climate change on stream discharge and sediment yield in Northern Viet Nam. Water Resources, 38(6):827-836.
12. Rostamian, R. 2007. Estimation of Runoff and Sediment in Beheshtabad Watershed in Northern Karun Basin Using SWAT2000. Master thesis in irrigation engineering. Faculty of agriculture, Isfahan University of Technology (in Persian with English abstract).
13. 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. Agriculture, Ecosystems and Environment, 132:23-31.