تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۴ (ص ۳۰۳-۲۹۳)

واسنجی چندایستگاهی رواناب حوضهٔ آبخیز هراز با مدل SWAT

محمد گلشن[۱]، عطاالله کاویان[۲*]، حامد روحانی[۳]، ابادر اسمعلی عوری[۴]

۱. دانشجوی دکتری دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲. دانشیار دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳. استادیار دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه گنبدکاووس

۴. دانشیار دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۲۷ ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۲/۱۱)

چکیده

کارایی مدل‌های هیدرولوژیک در شبیه‌سازی مقدار رواناب در حوضه‌هایی با مساحت‌های مختلف متفاوت است. در این تحقیق، کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی مقدار رواناب حوضهٔ آبخیز هراز، در زیرحوضه‌هایی با مساحت‌های مختلف ارزیابی شده است. برای این منظور، با استفاده از روش SUFI2 تحلیل حساسیت برای پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی مقدار رواناب منطقه انجام شد. پارامتر CN به‌منزلهٔ حساس‌ترین پارامتر انتخاب شد. مدل SWAT در ایستگاه‌های بررسی‌شده، زمان وقوع دبی اوج و مقدار دبی اوج را با کارایی بالا شبیه‌سازی کرد. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل برای دورهٔ واسنجی با استفاده از نمایه‌های آماری R^2 و NS نشان داد که ایستگاه کره‌سنگ به ترتیب با ضرایب ۰٫۸۰ و ۰٫۷۷ در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها بیشترین دقت و ایستگاه پنجاب به‌ترتیب با ضرایب ۰٫۶۸ و ۰٫۵۵ کمترین دقت را دارد که بیانگر افزایش دقت مدل در حوضه‌هایی با وسعت‌های بزرگ است.

کلیدواژگان: تحلیل حساسیت، روش SUFI2، واسنجی.

مقدمه

در دهه‌های گذشته، مدل‌های هیدرولوژیکی به‌طور وسیعی از سوی هیدرولوژیست‌ها و مدیران منابع آب به‌منزلهٔ ابزاری برای آنالیز سیستم‌های مدیریت حوضه‌های آبخیز به کار برده شده‌اند. معمولاً مدل‌های هیدرولوژیک شامل تعداد زیادی از پارامترهایی هستند که برای بررسی رواناب سطحی و زیرسطحی، آب‌های زیرزمینی، عمق نفوذ، تبخیر و تعرق، خصوصیات خاک، کاربری اراضی و بارندگی استفاده می‌شوند (Yapo *et al.*, 1996). نخستین‌بار Eagleson (1986) نیاز به مدل‌های هیدرولوژیک بزرگ‌مقیاس را بیان کرد. این مدل‌ها علاوه بر اینکه در حوضه‌های آبخیز با وسعت زیاد کاربرد بسیار مناسبی دارند، در سطح حوضه‌های مطالعاتی (حوضهٔ کوچک‌مقیاس) نیز قابلیت خوبی دارند (Arnell, 1999; Lehner *et al.*, 2006). در این زمینه، Dooge (1986) بیان داشت که از دیدگاه علمی، مشکل مقیاس در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضهٔ آبخیز وجود دارد و مدل‌های هیدرولوژیکی باید این توانایی را داشته باشند که مقیاس‌های کوچک تا جهانی را پوشش دهند. از مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ‌مقیاس می‌توان به مدل‌های SWIM[۱]، WATFLOOD[۲] و SWAT[۳] اشاره کرد که به ترتیب Krysanova *et al*. (1998)، Kouwen and Mousavi (2002) و Arnold *et al*.(1992) آن را توسعه دادند. این مدل‌ها هم در مطالعات بزرگ‌مقیاس و هم در مطالعات منطقه‌ای کاربرد دارند.

اما از طرف دیگر، امکان اندازه‌گیری مستقیم بعضی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیک به‌دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری و مسئلهٔ مقیاس امکان‌پذیر نیست (Beven 2000). به‌منظور کاربردهای عملی برای حل مشکلات منابع آب، پارامترهای مدل در هنگام شبیه‌سازی واسنجی شدند تا به مقادیر واقعی نزدیک شوند. مطالعات قبلی بیان می‌کند که واسنجی مدل فقط با استفاده از دبی مشاهداتی در خروجی حوضهٔ آبخیز نمی‌تواند متغیرهای شبیه‌سازی‌شده (مانند تخلیهٔ آب زیرزمینی، گنجایش آب غیراشباع و سطح تراز آب) را به‌خوبی نشان دهد (Ambroise *et al.*, 2001; Refsgaard 1997). بنابراین، محققان اهمیت چارچوب چندموضوعی (چندایستگاهی، چندمتغیره، همچنین چندمعیاره) را برای

1. Soil and Water Integrated Model
2. Distributed Hydrologic Modelling
3. Soil and Water Assessment Tool

* نویسندهٔ مسئول: a.kavian@sanru.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی توصیه کرده‌اند (Andersen *et al.*, 2001; Khu *et al.*, 2008; Dai *et al.*, 2010). بنابراین، در هنگام واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی یک یا چندین هدف برای مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مشاهداتی در نظر گرفته می‌شود. اهداف بهینه‌سازی می‌تواند ترکیبی از چندین شاخصهٔ آماری (مانند خطای نسبی و ضریب همبستگی)، چندین متغیر (مانند آب، انرژی، رسوب و نیترات) و چندین ایستگاه اندازه‌گیری باشد (Gupta *et al.*, 1998; Van Liew and Garbrecht, 2003; White and Chaubey, 2005; Demarty *et al.*, 2005; Cao *et al.*, 2006; Bekele and Nicklow, 2007). در سال‌های گذشته، با توسعهٔ مدل‌های هیدرولوژیک، که توانایی شبیه‌سازی مکانی متغیرهای هیدرولوژیک را دارند، استفاده از اطلاعات مشاهداتی چندین ایستگاه برای ارزیابی کارایی مدل گسترده‌تر شده است.

مدل SWAT به‌صورت گسترده برای مدل‌سازی در مقیاس‌های مکانی مختلف به کار برده شده است. در مطالعه‌ای Vinogrado *et al.* (2010) به‌منظور مقایسهٔ دقت مدل در حوضه‌هایی با مقیاس‌های مختلف از سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی (DMHS)[1] در شش حوضهٔ رودخانهٔ لنا[2] برای سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۸۴ استفاده کردند که در این مطالعه کوچک‌ترین زیرحوضهٔ مطالعه‌شده با وسعت ۴۰٫۲ کیلومتر مربع، با ضریب نش- ساتکلیف (NS) ۶۴ درصد، ضریب تبیین (R^2) ۸۵ درصد و ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰٫۳۳ متر مکعب نسبت به بقیهٔ زیرحوضه‌ها کمترین دقت را دارد و بزرگ‌ترین زیرحوضه با وسعت ۲۴۳۰۰۰ کیلومتر مربع، با ضریب NS (۰٫۸۴)، ضریب R^2 (۰٫۹۴) و RMSE (۰٫۸۴) متر مکعب، بیشترین دقت را دارد. Lesschen *et al.* (2009) با یک رویکرد چندمقیاسی از مدل LAPSUS[3] به منظور شبیه‌سازی رواناب حوضهٔ آبخیز کارکاوو[4] در جنوب شرقی اسپانیا استفاده کردند. در مطالعه‌ای Sommerlot *et al.* (2013) از سه مدل SWAT، HIT[5] و RUSLE2[6]، در مقیاس حوضه، به منظور شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده کردند. سپس قطعیت‌نداشتن هریک از مدل‌ها با استفاده از فاکتور P (P-factor) و فاکتور R (R-factor) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل SWAT با P-factor=۰٫۵۱ و R-factor=۰٫۳۱ از بالاترین دقت و مدل HIT به ترتیب با مقادیر ۰٫۳۹ و ۰٫۲۲ از کمترین دقت برخوردار است.

1. Deterministic Modelling Hydrological System
2. Lena
3. LandscApeProcesS modelling at mUlti dimensions and Scales
4. Carcavo
5. High Impact Targeting
6. Revised Universal Soil Loss Equation

Myrsane *et al.* (2009) با استفاده از مدل SWAT به برآورد رواناب در حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ کرخه اقدام کردند. نتایج مطالعه در خروجی دو ایستگاه هیدرومتری کاکارضا و پل کشکان نشان داد که ایستگاه پل کشکان با قرارگرفتن در قسمت پایین‌دست حوضه و داشتن وسعت بیشتر نسبت به ایستگاه کاکارضا از دقت بیشتری برخوردار است. Rostameian *et al.* (2008) با استفاده از مدل SWAT به شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبخیز بهشت‌آباد رودخان| کارون اقدام کردند که این مطالعات در ۶ زیرحوضه انجام شد و کیفیت شبیه‌سازی مدل با استفاده از ضرایب p-factor، d-factor، ضریب R^2 و ضریب NS ارزیابی شد. مقادیر این ضرایب آماری در ایستگاه بهشت‌آباد (با بیشترین مساحت) به ترتیب ۰٫۶۱، ۰٫۴۸، ۰٫۸۵ و ۰٫۷۵ به‌دست آمد که نسبت به بقیهٔ ایستگاه‌ها بیشترین دقت را دارد و در ایستگاه دهنو (با کمترین مساحت) مقادیر این ضرایب به ترتیب ۰٫۴۲، ۱٫۰۴، ۰٫۵۷ و ۰٫۴۷ به‌دست آمد که نسبت به بقیهٔ ایستگاه‌ها کمترین دقت را دارد. Omani *et al.* (2006) با استفاده از مدل SWAT دبی جریان ماهانهٔ رودخانهٔ کارون را شبیه‌سازی کردند. در مرحلهٔ واسنجی مدل، مقدار ضریب R2 و ضریب NS در ایستگاه ماهی‌دشت ۰٫۸۹ و ۰٫۸۸ و در ایستگاه سنجابی ۰٫۸۱ و ۰٫۸۰به‌دست آمد. نتایج نشان دادکه زیرحوضهٔ ماهی‌دشت با داشتن مساحت بیشتر نسبت به ایستگاه سنجابی دقت بیشتری دارد. همچنین، تأثیر مقیاس حوضه بر دقت مدل در نتایج پژوهش‌های Cao *et al.* (2006) و Bekele and Nicklow (2007) قابل مشاهده است.

Gollamudi *et al.* (2007) مدل SWAT را در دو حوضهٔ کشاورزی در استان کبک[7]، در جنوب کانادا، ارزیابی کردند؛ Spruill *et al.* (2000) و Chu and Shirmohammadi (2004) با موفقیت جریان ماهانهٔ دو حوضهٔ آبخیز با مساحت ۵٫۵ کیلومتر مربع و ۳٫۴ کیلومتر مربع در کوه‌پایهٔ مریلند را شبیه‌سازی کردند؛ Santhi *et al.* (2001) با موفقیت دبی جریان ماهانه را در رودخانهٔ حوضهٔ آبخیز بوسکیو[8] با مساحت ۴۲۷۷ کیلومتر مربع شبیه‌سازی کردند؛ Zhang *et al.* (2007) برای شبیه‌سازی دبی جریان به‌صورت روزانه و ماهانه در حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ لوها[9] با مساحت ۵٫۲۳۹ کیلومتر مربع در چین از مدل SWAT استفاده کردند. در همهٔ تحقیقات یادشده از اطلاعات چندین ایستگاه هیدرومتری برای واسنجی مقادیر پارامترها مدلSWAT استفاده شده است.

7. Kebc
8. Bosque
9. Luohe

Archive of SID

www.SID.ir

در سال‌های گذشته، از مدل SWAT در مدیریت حوضه‌های آبخیز ایران استفاده شده است. مانند حوضهٔ آبخیز قره‌سو در استان اردبیل (Naserabadi, 2013)، حوضهٔ آبخیز اهرچایی در استان تبریز (Atfi, 2014)، حوضهٔ آبخیز گرگان‌رود (Salmani, 2011) و حوضهٔ آبخیز هراز در استان مازندران (Golshan, 2013). در داخل کشور، کارایی این مدل به‌طور هم‌زمان در چندین ایستگاه هیدرومتری مطالعه نشده است. بدین‌منظور، با استفاده از مدل SWAT رواناب حاصل از حوضهٔ آبخیز هراز در خروجی چهار حوضهٔ آبخیز با مساحت‌های متفاوت شبیه‌سازی شد.

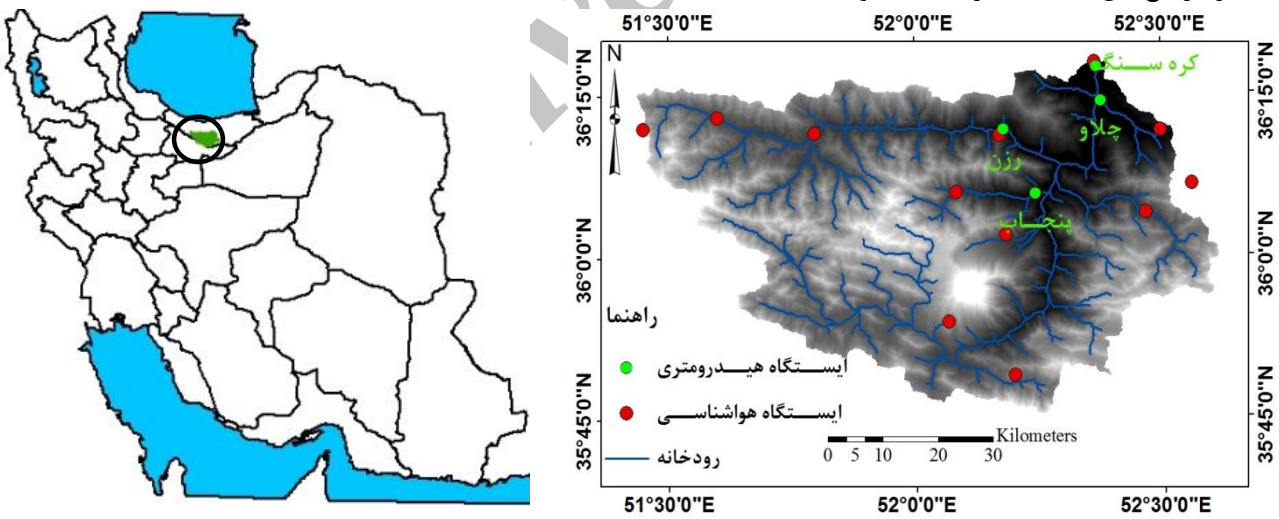
مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

منطقهٔ مطالعه‌شده بین '۴۳ °۵۱ تا '۳۶ °۵۲ طول شرقی و بین '۴۵ °۳۵ تا '۲۲ °۳۶ عرض شمالی و در جنوب استان مازندران واقع شده است (شکل۱). وسعت حوضهٔ آبخیز هراز در ایستگاه هیدرومتری کره سنگ بالغ بر ۴۰۱۴ کیلومتر مربع است. محیط حوضه برابر با ۴۴۳ کیلومتر، حداقل ارتفاع حوضه ۳۰۰ متر و حداکثر ارتفاع آن ۵۶۱۰ متر (قلهٔ دماوند) است. ایستگاه هیدرومتری رزن با مساحت بالادست ۱۱۸۲ کیلومتر مربع در خروجی رودخانهٔ نورود واقع شده است. ارتفاع حداقل و حداکثر حوضهٔ نورود ۱۲۵۵ و ۴۳۰۰ متر است. ایستگاه هیدرومتری چلاو با مساحت بالادست ۲۳۶ کیلومتر در خروجی رودخانهٔ چلاو واقع شده است. ارتفاع حداقل و حداکثر حوضهٔ چلاو ۴۵۶ و ۳۱۰۰ متر است. ایستگاه هیدرومتری پنجاب با مساحت بالادست ۱۳۰ کیلومتر مربع در خروجی رودخانهٔ نمارستاق قرار گرفته است. ارتفاع حداقل و حداکثر حوضهٔ نمارستاق ۹۷۴ و ۴۲۰۰ متر است.

معرفی مدل

مدل SWAT یک برنامهٔ الحاقی به نرم‌افزار Arc Map به نام Arc SWAT2009 دارد (Neitsch *et al.*, 2011). این مدل به‌صورت مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و فرمول‌های تجربی متفاوت است که برای شبیه‌سازی پارامترهای متفاوت به‌صورت روزانه، ماهانه و سالانه طراحی شده است (Neitsch *et al.*, 2012). در مدل SWAT، چرخهٔ هیدرولوژی براساس معادلهٔ بیلان آب شبیه‌سازی می‌شود (Winchell *et al.*, 2012).



شکل۱. موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده و ایستگاه‌های استفاده‌شده

جدول۱. نوع کاربری حوضه‌های آبخیز مطالعه‌شده

حوضه	مساحت (KM^2)	کاربری (کیلومتر مربع)						
		مرتع		جنگل		زراعت		بایر
		علفی	بوته‌ای	برگ‌ریز	همیشه‌سبز	آبی	دیم	
کره‌سنگ	۴۰۱۹	۲۷۲۸٫۶۵	۲۵۰٫۱۳	۲۳۷٫۱۹	۲۱۵٫۶۹	۶٫۹۵	۴۴۲٫۲۷	۷۸٫۱۳
رزن	۱۱۸۲	۸۸۳٫۱۴	۱۱۵٫۹۱	۴۳٫۰۶		۴٫۵۸	۱۱۵٫۰۵	۲٫۳۸
چلاو	۲۳۶	۱۱۸٫۵۴		۲۷٫۲۹	۸۴٫۸۷		۵٫۳	
پنجاب	۱۳۰	۷۵٫۸۸		۲۳٫۴۰			۳۰٫۷۲	

www.SID.ir

(رابطهٔ ۱)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i$$

در این رابطه، SW_t مقدار نهایی آب‌خاک، SW_o مقدار اولیهٔ آب‌خاک، R_{day} مقدار بارندگی در روز iام، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز iام، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز iام، W_{seep} مقدار آب نفوذی به لایهٔ فوقانی خاک در روز iام و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز iام است. معیار اندازه‌گیری پارامترهای یادشده برحسب میلی‌متر است.

در مدل SWAT، برای تخمین رواناب سطحی دو روش وجود دارد: الف) روش شمارهٔ منحنی و ب) رابطهٔ نفوذ گرین‌ـ امپت (Neitsch *et al.*, 2011). در این تحقیق، براساس روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) مقدار رواناب محاسبه شد:

(رابطهٔ ۲)

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day}-0.2\,S)^2}{(R_{day}0.8\,S)}$$

در این رابطه، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی، R_{day} مقدار بارندگی در روز مورد نظر و S پارامتر نگهداشت سطحی خاک است. معیار اندازه‌گیری پارامترهای یادشده برحسب میلی‌متر است.

برای محاسبهٔ تبخیر و تعرق از روش هارگریوزـ سامانی استفاده شد. شکل کلی آن به‌صورت رابطه‌های ۳ و ۴ است.

(رابطهٔ ۳)

$$ET_o = 0.0135K_tR_aTD^{0.5}(T+17.8)$$

(رابطهٔ ۴)

$$K_t=0.00185(TD)^2-0.0043TD+0.4023$$

در این روابط، ET_o تبخیرـ تعرق (میلی‌متر)، TD تفاوت متوسط دمای بیشینه و کمینهٔ روزانه (درجهٔ سانتی‌گراد) و T متوسط دمای روزانه برحسب درجهٔ سانتی‌گراد است.

مدل SWAT برای محاسبهٔ جریان زیر قشری از یک مدل ذخیرهٔ جنبشی استفاده می‌کند. این مدل جریان زیرقشری را در یک مقطع دوبعدی و در مسیر جریان به طرف پایین شیب شبیه‌سازی می‌کند که از رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود.

(رابطهٔ ۵)

$$Q_{lat}=0.024\left(\frac{25\,SW_{ly,excess}K_{sat}slp}{\emptyset_d L_{hill}}\right)$$

در این رابطه، Q_{lat} دبی جریان زیرقشری (میلی‌متر در روز)، $SW_{ly,excess}$ مقدار آب زهکشی‌شده در لایهٔ مورد نظر (میلی‌متر)، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر در ساعت)، slp شیب (ارتفاع در واحد فاصله)، $\emptyset_d$ تخلخل قابل زهکشی خاک (میلی‌متر بر میلی‌متر) و L_{hill} طول شیب (برحسب متر) است.

جمع‌آوری اطلاعات و مدل‌سازی

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش، شامل داده‌های مکانی و داده‌های عددی و هیدروکلیماتولوژی است. داده‌های عددی و کلیماتولوژی شامل داده‌های بارندگی، دمای بیشینه و کمینه، سرعت باد و رطوبت نسبی بر پایهٔ زمانی روزانه از ۱۳ ایستگاه هواشناسی (۵ ایستگاه تبخیرسنجی، ۷ ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه سینوپتیک) موجود در منطقهٔ مطالعه‌شده جمع‌آوری و وارد مدل شد (شکل۱). داده‌های مربوط به دبی جریان در خروجی حوضه‌های آبخیز با مساحت‌های مختلف از ایستگاه‌های هیدرومتری تهیه شد. ایستگاه هیدرومتری واقع در شاخهٔ اصلی رودخانهٔ هراز از نوع درجهٔ ۱ و ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در شاخه‌های فرعی رودخانه از نوع درجهٔ ۳ و ۴ هستند. لایهٔ مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۲۸ متر، لایهٔ کاربری اراضی شامل ۷ نوع کاربری (جدول۱) و لایهٔ خاک منطقه با ۵۷ نوع خاک (براساس گروه هیدرولوژیکی خاک، تعداد لایه‌های خاک، مواد آلی خاک و...) وارد مدل شد. همچنین، لایهٔ شیب منطقه با توجه به خصوصیات فیزیوگرافی به ۵ کلاس (۰-۵، ۵-۱۲، ۱۲-۲۵، ۲۵-۴۵ و بیش از ۴۵ درجه) تقسیم‌بندی شد. برای جلوگیری از ایجاد تعداد بیش از حد واحدهای هیدرولوژیکی، حد آستانه برای هر واحد هیدرولوژیکی۱۰درصد مساحت زیرحوضهٔ مربوطه انتخاب شد. پس از اجرای مدل حوضه‌های آبخیز هراز، رزن، چلاو و پنجاب به ترتیب به ۳۳، ۱۲، ۵ و ۲ زیرحوضه تقسیم شد. سپس جهت کاهش ناهمگنی و افزایش دقت مطالعات با توجه به لایه‌های شیب، خاک و کاربری اراضی هر حوضه، به ترتیب به ۹۱، ۴۶،۱۶و ۹ واحد هیدرولوژیک همگن تقسیم شد (جدول۱). این واحدها باید تا حد امکان از نظر هیدرولوژیکی مشابه باشند (Neitsch *et al.*, 2011). پس از بررسی آمار هواشناسی و هیدرومتری و شرایط حوضه در این تحقیق، اجرای مدل در مقیاس زمانی ماهانه و از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۹ انجام شد؛ به‌طوری‌که سال آبی ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ به‌منزلهٔ دورهٔ واسنجی و سال آبی ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ برای دورهٔ اعتبارسنجی انتخاب شد.

جدول۲. مشخصات کلی حوضه‌های آبخیز مطالعه‌شده

حوضهٔ آبخیز	زیرحوضه	مساحت (کیلو متر	ارتفاع متوسط	تعداد زیرحوضه	تعداد HRU
هراز	پنجاب	۱۳۰	۳۴۰۰	۲	۹
	چلاو	۲۳۶	۲۵۴۰	۵	۱۶
	رزن	۱۱۸۲	۲۸۰۰	۱۲	۴۶
	کره‌سنگ	۴۰۱۹	۲۶۶۲	۳۳	۹۱

Archive of SID

www.SID.ir

تحلیل حساسیت

میزان کارایی یک مدل برای اهداف تعیین‌شده از طریق آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی بررسی می‌شود (Osmani *et al.*, 2013). روش‌های به‌کاربرده‌شده برای انجام‌دادن آنالیز حساسیت به‌طورکلی در دو گروه آنالیزهای حساسیت موضعی[1] و سراسری[2] قرار می‌گیرند (Griensven and Meixner, 2006). آنالیز حساسیت موضعی که به روش OAT[3] (یک فاکتور در یک زمان) شناخته شده است، واکنش شبیه‌سازی مدل را به تغییرات متوالی هر پارامتر مشخص می‌کند، درحالی‌که دیگر پارامترها بدون تغییرند (Holvet *et al.*, 2005; Spruill *et al.*, 2000). آنالیز حساسیت در مدل‌های بر پایهٔ فیزیکی مانند SWAT به علت ابعاد و پیچیدگی مسئله سبب می‌شود که در زمان اجرای عملیات واسنجی صرفه‌جویی شود. براساس مطالعات انجام‌شده در منطقه (Namdar, 2014) و ویژگی‌های حوضهٔ آبخیز مطالعه‌شده، ۲۰ پارامتر مؤثر بر دبی جریان انتخاب شد و ۱۵۰ بار اجرای مدل با روش SUFI2 انجام گرفت. نتایج حاصل با استفاده از مقادیر t-state و p-value ارزیابی شد. ضریب t-state مقیاسی برای سنجش حساسیت پارامترهاست. این ضریب حساسیت نسبی را بر پایهٔ تقریب خطی ارائه می‌دهد. ازاین‌رو، اطلاعاتی را دربارهٔ حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل فراهم می‌کند؛ به‌طورکلی، مقادیر مطلق t-state نشان‌دهندهٔ حساسیت بیشتر پارامتر است. فاکتور p-value نیز برای تعیین معناداری درجهٔ حساسیت پارامترها استفاده می‌شود. هرچه p-value به صفر نزدیک‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است (Abbaspour *et al.*, 2007).

در انتخاب پارامترها برای دورهٔ واسنجی سعی بر آن بوده است تا فرایندهای مختلفی که بر شبیه‌سازی جریان آب مؤثرند مد نظر قرار گیرند. بنابراین، پارامترهای منتخب حساس در مرحلهٔ آنالیز حساسیت انتخاب شدند و سایر پارامترهای مدل، در مقادیر پیش‌فرضشان نگه داشته شدند. در این تحقیق، برای واسنجی مدل SWAT از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 استفاده شده است. عباسپور و همکارانش در سال ۲۰۰۷ الگوریتم SUFI2 را توسعه دادند. این الگوریتم در چارچوب نرم‌افزار SWAT-CUP اجراشدنی و روشی برای واسنجی و آنالیز قطعیت‌نداشتن هم‌زمان مدل SWAT است (Abbaspour *et al.*, 2007). پس از اجرای مدل SWAT، فایل‌های نتایج شبیه‌سازی در مدل از طریق نرم‌افزار SWAT-CUP دریافت و با انتخاب الگوریتم SUFI2 واسنجی و اعتبارسنجی مدل انجام شد. الگوریتم SUFI2 نسبت به الگوریتم‌های GLUE و Parasol عمومیت بیشتری دارد (Van Griensven *et al.*, 2006; Abbaspour *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2008).

ارزیابی کارایی مدل

به‌منظور تحلیل کیفیت نتایج مدل از ۳ نمایهٔ آماری R^2، ضریب NS و MSE استفاده شد. ضریب R^2 (ضریب تبیین تشخیص یا تعیین) نشان‌دهندهٔ تطابقت بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با استفاده از روش تجزیهٔ رگرسیونی و مقدار آن بین صفر تا ۱ متغیر است. ضریب NS[4] اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد و مقدار این فاکتور از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است. میانگین مربعات خطا نشان‌دهندهٔ تفاوت میان مقدار پیش‌بینی‌شده به وسیلهٔ مدل و مقدار مشاهداتی است. مقادیر شبیه‌سازی‌شده، که کمترین مقدار MSE را دارد، از دقت بیشتری برخوردار است (Zuo *et al.*, 2014). روابط مربوط به محاسبهٔ این پارامترها بدین شرح است:

$$R^2=\left\{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})}{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})^2\right]^{0.5}\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})^2\right]^{0.5}}\right\} \quad \text{(رابطهٔ ۶)}$$

$$EN=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs}-Q_{Sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs}-\overline{Q}_{Obs})^2} \quad \text{(رابطهٔ ۷)}$$

$$MSE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs}-Q_{Sim})^2 \quad \text{(رابطهٔ ۸)}$$

در این رابطه‌ها، Q_{Obs} دبی مشاهده‌ای، Q_{Sim} دبی شبیه‌سازی‌شده، $\overline{Q}_{Obs}$ میانگین دبی مشاهده‌ای، $\overline{Q}_{Sim}$ میانگین دبی شبیه‌سازی‌شده برحسب متر مکعب بر ثانیه‌اند.

نتایج و بحث

حساسیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز برحسب شرایط و ویژگی‌های موجود در منطقه در برابر پارامترها متفاوت است. در اجرای اولیهٔ برنامهٔ SWAT-CUP مقدار حساسیت برای پارامترهای ورودی مدل مشخص شد (جدول۳). نتایج نشان داد که ۸ پارامتر از حساسیت معناداری برخوردارند؛ بنابراین، این پارامترهای برای دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی انتخاب شد. این پارامترها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر مقدار رواناب حوضهٔ آبخیز هراز و زیرحوضه‌های آن تأثیر دارند. بالابودن حساسیت پارامتر شمارهٔ منحنی بیانگر نقش بالای عوامل توپوگرافی و کاربری اراضی در تشکیل جریان دبی رواناب خروجی از حوضهٔ مطالعه‌شده است که با نتایج مطالعات Salmani و (2011) *et al.* مطابقت

1. local sensitivity
2. global sensitivity
3. One At a Time

4. Nash and Sutcliffe

Archive of SID

www.SID.ir

Mirsane (2009) و Panagopoulos *et al.* (2011) مطابقت دارد. حساسیت پارامتر هدایت هیدرولیکی مؤثر نشان‌دهندهٔ نقش انتقال و حرکت آب در ایجاد رواناب منطقه است که با نتایج مطالعات (Namdar, 2014) در حوضهٔ آبخیز هراز مطابقت دارد.

جدول۳. نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر بارش- رواناب براساس قدر مطلق t-stat و P-Value

نام پارامتر	توضیحات	t-Stat	P-Value
v__SMFMX.bsn	نرخ ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mm/day)	۰/۴۲	۰/۶۷
		۰/۴۶	۰/۶۵
		۰/۴۹	۰/۶۳
		۰/۸۵	۰/۳۴
r__SOL_AWC().sol	نرخ ظرفیت رطوبت خاک (mmH2O/mm (Soil	۰/۹۴	۰/۳۴
		۰/۴۲	۰/۶۷
		۰/۴۶	۰/۶۵
		۰/۴۹	۰/۶۳
		۰/۸۵	۰/۳۴
		۰/۹۴	۰/۳۴
r__LAT_TTIME.hru	زمان تأخیر جریان زیرسطحی (day)	۰/۴۲	۰/۶۷
		۰/۴۶	۰/۶۵
		۰/۴۹	۰/۶۳
		۰/۸۵	۰/۳۴
		۰/۹۴	۰/۳۴
r__EPCO.hru	فاکتور جبران جذب آب توسط گیاه	۰/۴۲	۰/۶۷
		۰/۴۶	۰/۶۵
		۰/۴۹	۰/۶۳
		۰/۸۵	۰/۳۴
		۰/۹۴	۰/۳۴
v__Rchrg_Dp	درصد تغذیهٔ سفر عمیق از سفره سطحی	۰/۹۹	۰/۳۱
r__SLOPE	شیب متوسط زمین در هر HRU	۱/۰۸	۰/۲۷
v__GW_REVAP	ضریب صعود مویینگی از سفرهٔ کم عمق	۱/۲۴	۰/۲۱
r__Sol_Alb	ضریب بازتاب لایهٔ خاک	۱/۲۸	۰/۱۹
v__REVAPMN	حداقل مقدار آب برای تبخیر آب زیرزمینی (mm)	۱/۴۸	۰/۱۳
v__SFTMP	متوسط دمای هوا برای بارش برف (c·)	۱/۴۹	۰/۱۳
v__CH_N2	ضریب مانینگ رودخانه	۱/۵۳	۰/۱۲
r__ESCO	ضریب تبخیر خاک	۱/۶۲	۰/۱۰
v__SURLAG	ضریب تأخیر رواناب سطحی (day)	۱/۶۲	۰/۱۰
v__ALPHA_BF	پارامتر آلفا در جریان پایه (day)	۲/۴	۰/۰۱
v__TIMP	فاکتور تأخیر دمای فشرده‌سازی برف	۳/۰۵	۰/۰۰۲
v__ALPHA_BNK	ضریب تخلیهٔ کانال (day)	۳/۷۳	۰/۰۰۰۲
v__SMTMP	دمای پایهٔ ذوب تودهٔ برف (c·)	۳/۹۶	۰/۰۰۰۰۸
r__SOL_BD	چگالی تودهٔ خاک (gr/cm3)	۵/۱۸	۰
v__CH_K2	هدایت هیدرولیکی مؤثر (mm/hr)	۵/۵۷	۰
r__CN2	شمارهٔ منحنی	۶/۱۸	۰

v- به معنای جایگزین‌کردن مقادیر موجود با مقدار داده‌شده و r به‌معنای ضرب‌کردن مقادیر موجود پارامتر در (۱+) مقدار داده‌شده است.

در دورهٔ واسنجی، پارامترهای حساس به نرم‌افزار SWAT-CUP وارد شد سپس با استفاده از روش SUFI، ۲۰۰۰ بار تکرار برای این پارامترها انجام و مقادیر بهینه برای هر پارامتر مشخص شد (جدول۴).

جدول۴. مقادیر بهینه و حد بالا و پایین پارامترهای منتخب در دورهٔ واسنجی SWAT

نام پارامتر	مقدار بهینه	حد پایین	حد بالا
v_SURLAG	۴۸/۴۲	۳۵	۵۷
v_ALPHA_BF	۰/۰۱۴	۰/۰۱	۰/۰۵
v_TIMP	۱/۵۰	۰/۹۵	۲/۰۲
v_ALPHA_BNK	۶۷	۵۱	۷۵
v_SMTMP	۰/۴۶	۰/۳۲	۰/۵۱
r_SOL_BD	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۴۲
v_CH_K2	۰/۶۸	۰/۵۸	۰/۷۵
r_CN2	۳/۹۲	۰/۴	۸

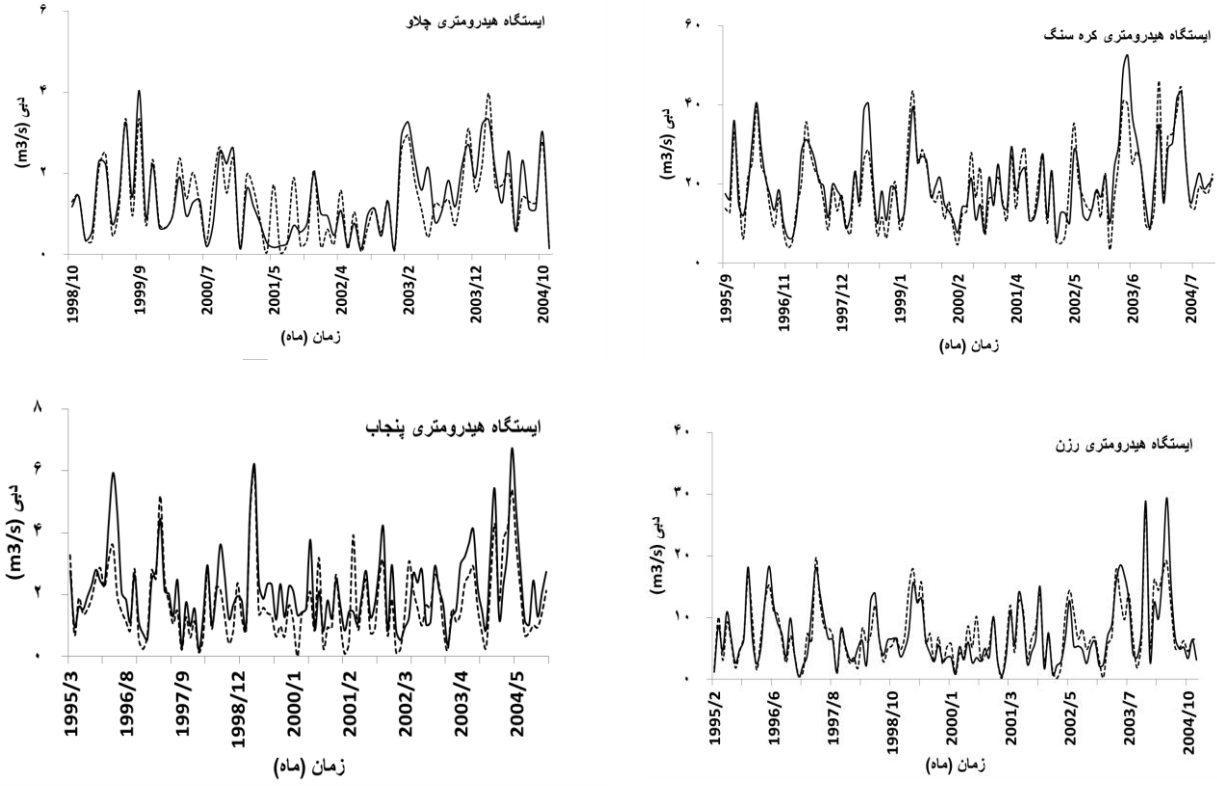
نتایج شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که در بیشتر ماه‌های سال، مقادیر شبیه‌سازی مدل از مقادیر اندازه‌گیری‌شده تا حدودی کمتر است. در حوضهٔ آبخیز کره‌سنگ، در آوریل ۲۰۰۳، دبی به بیشترین اوج (۵۲ مترمکعب بر ثانیه) رسیده است که هم‌زمان با بیشترین بارندگی مشاهداتی (۸۶ میلی‌متر) است. همچنین، در حوضه‌های آبخیز چلاو، رزن و پنجاب بیشترین دبی اوج مشاهداتی ثبت‌شده به ترتیب ۴، ۲۹ و ۶/۷ متر مکعب بر ثانیه است. مقادیر شبیه‌سازی‌شده برای این دبی اوج‌ها به ترتیب ۳/۳، ۱۹ و ۵/۳۹ متر مکعب بر ثانیه است. نتایج نشان می‌دهد مدل SWAT زمان وقوع دبی اوج و مقدار دبی اوج را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است. در گزارشی (Tolson and shoemaker, 2004) بیان شده است که مدل SWAT برای شبیه‌سازی وقایع شدید طراحی نشده است و معمولاً بزرگ‌ترین وقایع جریان را کمتر از مقدار اندازه‌گیری‌شده شبیه‌سازی می‌کند که در نتایج این تحقیق قابل مشاهده است. بین ماه‌های آوریل تا ژوئن (اوایل تا اواخر بهار) انطباق بین دبی‌های اوج مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده کمتر است. در این ماه‌ها، مقادیر دبی مشاهداتی بیشتر از دبی شبیه‌سازی‌شده است که می‌تواند به دلیل تأثیر فرایند ذوب برف بر مقدار دبی مشاهداتی باشد. این موضوع در کارهای محققان دیگر چون Spruill *et al.* (2000) و Osmani *et al.* (2013) بیان شده است. از طرف دیگر، در تحقیق حاضر، تفاوت بین دقت شبیه‌سازی در حوضه‌های مطالعه‌شده به‌طور درخور ملاحظه‌ای متأثر از مساحت حوضه‌های مطالعه‌شده است. عملکرد رضایت‌بخش مدل با توجه به مقادیر ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ بیشتر

Archive of SID

www.SID.ir

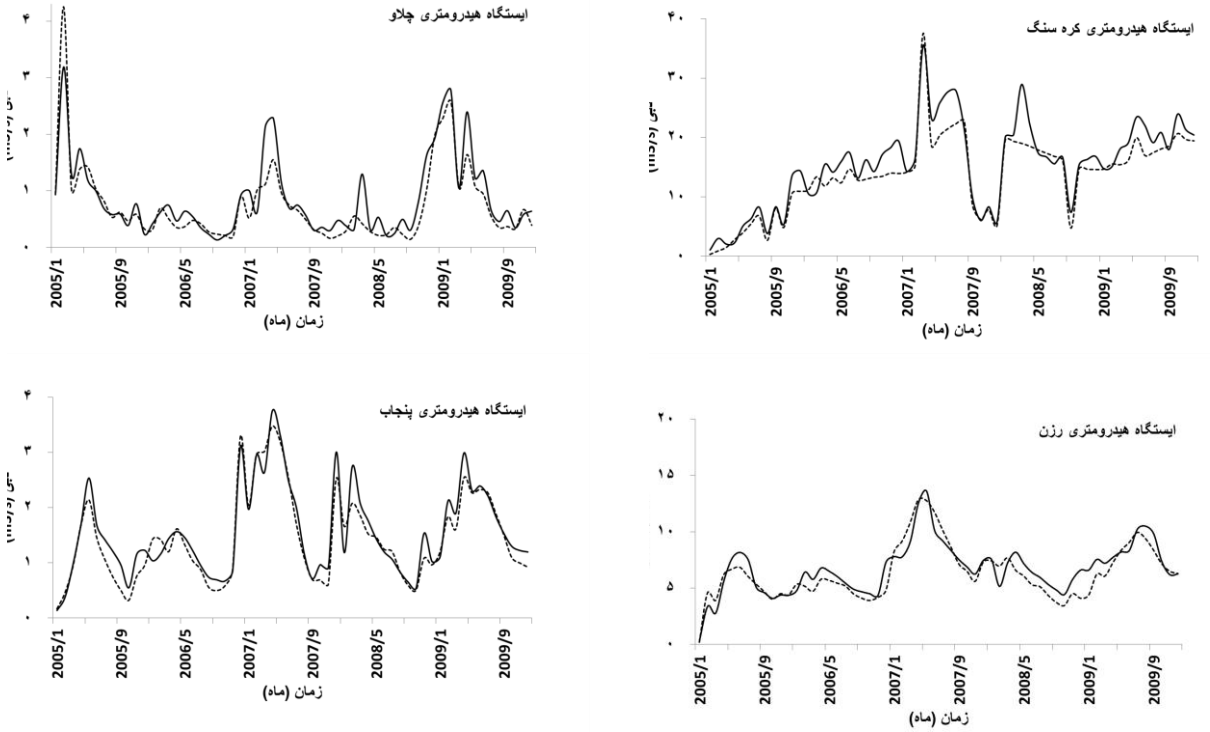
به‌دلیل توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان‌های پیک و میانه بود؛ به‌طوری‌که حوضهٔ آبخیز کره‌سنگ با مساحت ۴۰۱۴ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۸۰) و ضریب NS (۰/۷۷) از بیشترین دقت برخوردار است. سپس حوضهٔ آبخیز رزن با مساحت ۱۱۸۲ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۷۹) و ضریب NS (۰/۷۴) نسبت به حوضهٔ آبخیز چلاو با مساحت ۲۳۶ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۷۵) و ضریب NS (۰/۷۳) از دقت بیشتری برخوردار است. درصورتی‌که حوضهٔ آبخیز پنجاب با مساحت ۱۳۰ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۶۸) و ضریب NS (۰/۵۵) کمترین دقت را دارد. شاخصهٔ آماری NS وزن بیشتری به جریان‌های پیک می‌دهد (Henriksen *et al.*, 2003). بنابراین، اجرای مدل برای وقایع جریان زیاد (حوضه‌های بزرگ‌تر) مقادیر NS و R^2 قابل قبول راحت‌تری را نسبت به اجرای مدل در جریان‌های کوچک‌تر (حوضه‌های کوچک) می‌دهد (Wang *et al.*, 2012). همچنین، در حوضهٔ آبخیز پنجاب، علاوه بر مساحت کمتر نسبت به بقیهٔ زیرحوضه‌های مطالعه‌شده، در بالادست حوضه قرار گرفته بود و شرایط جوی و کوهستانی بسیار ناپایداری داشت و مدل به شبیه‌سازی جریان رودخانه به‌خوبی بقیهٔ حوضه‌ها قادر نبود. همهٔ حوضه‌های مطالعه‌شده درنهایت بخشی از حوضهٔ کره‌سنگ بودند، بنابراین پاسخ هیدرولوژیکی در ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ به ترکیب رفتار جریان در زیرحوضه‌های بالادست بستگی دارد. طبق شکل۲، به‌طور سیستماتیکی کم‌برآوردی در تخمین داده‌های دبی پایه در همهٔ هیدروگراف‌ها مشاهده می‌شود که احتمالاً به‌دلیل خطاهای موجود در شبیه‌سازی آب زیرزمینی است.

اعتبارسنجی نتایج مدل برای افزایش سطح اعتماد کاربر در قابلیت شبیه‌سازی مدل ضروری است. بنابراین، مدل توسط داده‌های رواناب مشاهده‌ای در ایستگاه‌های اندازه‌گیری برای دورهٔ ۵ ساله ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ اعتبارسنجی شد. نتایج این اعتبارسنجی در شکل۳ ارائه شده است. آنچه در بخش گذشته دربارهٔ عملکرد نه‌چندان قابل قبول مدل در فصل بهار یاد شد، در دورهٔ اعتبارسنجی نیز مصداق دارد. شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحلهٔ اعتبارسنجی در جدول ۵ آورده شده است؛ به‌طوری‌که، در این مرحله نیز ایستگاه کره‌سنگ نسبت به ایستگاه‌های دیگر از کیفیت شبیه‌سازی بالایی برخوردار است و حوضهٔ آبخیز پنجاب (کمترین مساحت) نیز ضعیف‌ترین شبیه‌سازی را دارد.



شکل۲. سری زمانی دبی شبیه‌سازی (....) و مشاهده‌ای (▬) در خروجی ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه‌شده در حوضهٔ آبخیز هراز در دورهٔ واسنجی

www.SID.ir



شکل۳. سری زمانی دبی شبیه‌سازی (....) و مشاهده‌ای (▬) در خروجی ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه‌شده در حوضهٔ آبخیز هراز در دورهٔ اعتبارسنجی

جدول۵. مقایسهٔ آماری دبی روزانهٔ شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در دورهٔ واسنجی

ایستگاه هیدرومتری	طول دورهٔ آماری		R^2		NS		MSE (متر مکعب بر
	واسنجی	اعتبار	واسنجی	اعتبار	واسنجی	اعتبار	واسنجی	اعتبار سنجی
کره‌سنگ	۱۰۸ ماه	۶۰ ماه	۰٫۸۰	۰٫۸۷	۰٫۷۷	۰٫۷۵	۲۰٫۹۳	۱۰٫۱۷
چلاو	۸۴ ماه	۶۰ ماه	۰٫۷۵	۰٫۸۳	۰٫۷۳	۰٫۷۷	۱٫۲۳	۰٫۲۱
رزن	۱۰۸ ماه	۶۰ ماه	۰٫۷۹	۰٫۸۱	۰٫۷۵	۰٫۷۲	۵٫۹۱	۱٫۳۴
پنجاب	۱۰۸ ماه	۶۰ ماه	۰٫۶۸	۰٫۷۵	۰٫۵۵	۰٫۷۰	۲٫۷۰	۰٫۶۷

براساس پیشنهاد Benaman and Shoemaker (2005) شبیه‌سازی مدل هنگامی می‌تواند رضایت‌بخش باشد که مقدار ضریب R^2 بیشتر از ۶۰درصد باشد و ضریب NS بیشتر از ۰٫۵ باشد. مقادیر ضریب R^2 در دورهٔ واسنجی بین ۰٫۶۸ تا ۰٫۸۰ و مقادیر ضریب NS بین ۰٫۷۵ تا ۰٫۸۷ متغیر است. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل در ایستگاه‌های بررسی‌شده حاکی از آن است که مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب در دورهٔ زمانی مطالعه‌شده دقت مناسبی دارد که با نتایج برخی پژوهش‌ها دربارهٔ کارایی برنامهٔ SUFI2 با تابع هدف NS مطابقت دارد (Hwa *et al.*, 2012; Setegn *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2008; Shafiei *et al.*, 2013). نتایج نشان می‌دهد که مدل SWAT در حوضه‌هایی با مساحت‌های بزرگ از دقت بالایی برخوردار است. این بخش با نتایج حاصل از مطالعات برخی پژوهشگران مطابقت دارد (Rostamian Mirsane *et al.*, 2009; Sommerlot *et al.*, 2013; Omani *et al.*, 2006; *et al.*, 2008; Vinogrado *et al.*, 2010).

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری تغییرپذیری مکانی در مدل‌سازی هیدرولوژی و دانستن فرایندهای هیدرولوژیکی حوضهٔ آبخیز حائز اهمیت است (Beven, 2000; Anquetin *et al.*, 2010). به‌خصوص برای مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز بزرگ‌مقیاس که نسبت به حوضه‌های کوچک‌مقیاس وضعیت هیدرولوژیکی متنوعی دارند اهمیت دارد (Sivapalan, 2003). همچنین، حوضه‌های کوهستانی معمولاً ناهمگنی زیادی در ساختار زمین‌شناسی، توپوگرافی، خاک، پوشش و آب و هوا دارند (Weingartner *et al.*, 2003; Smerdon *et al.*, 2009)، بنابراین، این عوامل به چالش‌های مهمی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی منجر می‌شوند. در این مطالعه، شبیه‌سازی مدل نیمه‌توزیعی- فیزیکی SWAT برای بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضهٔ آبخیز هراز با مقیاس بزرگ با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری چهار ایستگاه به‌طور هم‌زمان انجام شد. پارامتر شمارهٔ منحنی

Archive of
www.SID.ir

به‌منزلهٔ حساس‌ترین پارامتر با داشتن بیشترین t-state و کمترین p-value تعیین شد. با توجه به نمایه‌های آماری ضریب R^2، NS و MSE نتایج شبیه‌سازی مدل در ایستگاه‌های مطالعه‌شده رضایت‌بخش بود. زمان وقوع دبی اوج به‌خوبی شبیه‌سازی و مطابق با مقادیر مشاهداتی است. در بیشتر شبیه‌سازی‌ها مقدار دبی اوج به مقدار دبی مشاهده‌ای نزدیک بود. برای ماه‌های فروردین تا خرداد به دلیل مطابقت با زمان وقوع ذوب برف منطقه مقدار دبی مشاهداتی کمی بیشتر از مقدار دبی شبیه‌سازی‌شده است. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل SWAT در حوضه‌هایی با مقیاس بزرگ از کارایی بیشتری نسبت به حوضه‌های کوچک‌مقیاس برخوردار است؛ به‌طوری‌که ایستگاه پنجاب با مساحت ۱۳۰ کیلومتر مربع نسبت به ایستگاه‌های دیگر از کمترین دقت و ایستگاه کره‌سنگ با مساحت ۴۰۱۴ کیلومتر مربع از بیشترین دقت برخوردار بود. استفاده از این مدل یا مدل‌های رایانه‌ای دیگر به‌دلیل کاهش هزینه عملیات میدانی، به‌ویژه کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، می‌تواند جزء راهکارهای ممکن به منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط زیست قلمداد شود. علاوه بر این، با استفاده از این ابزار این امکان برای پژوهشگران و مدیران اجرایی به‌وجود می‌آید تا سناریوهای مختلف مدیریتی را بدون صرف هزینهٔ سنگین و در زمان کوتاه ارزیابی و بهترین تصمیم را جهت مدیریت حوضهٔ آبخیز اتخاذ کنند.

REFRENCES

Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. (2007). Modeling hydrology and water quality in thepre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT, *Journal of Hydrology*, 333, 413-430.

Ambroise, B., Perrin, J. L. and Reutenauer, D. (1995). Multi criterion validation of a semi-distributed conceptual model of the water cycle in the Fecht catchment (Vosges Massif, France), *Water Resources Research*, 31, 1467–1481.

Andersen, J., Refsgaard, J. C. and Jensen, K. H. (2001). Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin-model construction and validation, *Journal of Hydrology*, 247, 200–214.

Anquetin, S., Braud, I., Vannier, O., Viallet, P., Boudevillain, B., Creutin, J. D. and Manus, C. L. (2010). Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the Gard 2002 flash-flood event, *J. Hydrol.*, 394, 134–147.

Arnell, N.W. (1999). A simple water balance model for the simulation of stream flow over a large geographic domain, *Journal of Hydrology*, 217, 314-335.

Arnold, J.G., Williams, J.R. and Maidment, D.A. (1992). Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121 (2), 171-183.

Atfi, Gh. (2014). *Flow and sediment yield prediction using SWAT model and ArcGIS in Ahar chai*, Ms.c. dissertation, University of Ardabil, Mohaghegh Ardabili. (in Farsi)

Bekele, E. G. and Nicklow, J. W. (2007). Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II, *Journal of Hydrology*, 341(3-4), 165-176.

Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models, *Journal of Hydrology*, 198, 69–97.

Benaman, J. and Shoemaker, C.A. (2005). An analysis of high-flow sediment event data for evaluating model performance, *Hydrological Processes*, 19(3), 605-620.

Beven, K.J. (2000). Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. New York, N.Y., John Wiley and Sons.

Cao, W., Bowden, B. W., Davie, T. and Fenemor, A. (2006). Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrology Processes*, 20(5), 1057-1073.

Chu, T. W. and Shirmohammadi, A. (2004). Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the Piedmont physiographic region of Maryland, *Transations of the ASAE*, 47(4), 1057-1073.

Demarty, J., Ottle, C., Braud, I., Olioso, A., Frangi, J. P., Gupta, H. V. and Bastidas, L. A. (2005). Constraining a physically based soil-vegetation-atmosphere transfer model with surface water content and thermal infrared brightness temperature measurements using a multi objective approach, *Water Resources Research*, 41(1), 1-15.

Dooge, J.C.I. (1986). Looking for hydrologic laws, *Water Resources Research*, 22, 46-58.

Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resourc Research*. 28, 1015-1031.

Khu, S. T., Madsen, H. and di Pierro, F. (2008). Incorporating multiple observations for distributed hydrologic model calibration: An approach using a multi-objective evolutionary algorithm and clustering, *Water Resources Research*, 31, 1387–1398.

Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, H.V., Rousseau, A.N. and Turcotte, R. (2013). *Advances in Automatic Calibration of Watershed Models, Calibration of watershed models*, Willy, 9-28.

Eagleson, P.S. (1986). The emergence of global-scale hydrology, *Water Resources Research*, 22 (9), S6-14.

Etienne, L., Anctil, F., Van Grienseven, A. and

Archive of SID

www.SID.ir

Beauchamp, N. (2008). Evaluation of stream flow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall, *Hydrological sciences journal*, 53(5), 961-976.

Gollamudi, A., Madramootoo C. A. and Enright, P. (2007). Water quality modeling of two agricultural fields in southern Quebec using SWAT, *Transactions of the ASABE*, 50(6), 1973-1980.

Golshan, M. (2013). *Flow and sediment yield prediction using SWAT model in haraz watershed, Mazandaran Province*, MS.c dissertation, University of Sari, Scince agricalture and nathral resourse. (In Farsi)

Griensven, V.A. and Meixner, T. (2006). Methods to quantify and identify the sources ofuncertainty for river basin water quality models, *Journal of Water Science and Technology*, 53:51-59.

Gupta, H. V., Sorooshian, S. and Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information, *Water Resource Research*, 34(4), 751-763.

Henriksen, H.J., Troldborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C. and Madsen, B. (2003). Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark, *J. Hydrol*., 280, 52–71.

Holvoet, K., van Griensven, A., Seuntjens, P. and Vanrolleghem, P.A. (2005). Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT, *Physics and Chemistry of the Earth*, 30 (8), 518-526.

Hwa, K., Pachepsky, Y.A., Ha, J., Kim, J. and Park, M. (2012). The modified SWAT model for predicting fecal coliforms in the Wachusett Reservoir Watershed , *Water Research*, 46(15), 4750–4760.

Kouwen, N. and Mousavi, S.F. (2002). WATFLOOD/SPL9: hydrological model and flood forecasting system and flood forecasting system In Mathematical Models of Large Watershed Hydrology, Water Resources, Highlands Ranch.

Krysanova, V., MullerWohlfeil, D.I. and Becker, A. (1998). Development and test of a spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds, *Journal Ecological Modelling*, 106, 261–289.

Lehner, B., Doll, P., Alcamo, J., Henrichs, T. and Kaspar, F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis, *Jornal of Climatic Change*, 75, 273–299.

Lesschen, J.P., Schoorl, J.M. and Cammeraat, L.H. (2009). Modelling runoff and erosion for a semi-arid catchment using a multi-scale approach based on hydrological connectivity, *Journal of Geomorphology*, 109, 174–183.

Mirsane, S., Kavianpor, Z. and Delavar, M. (2009). Assessment impact of Hydrological various parameters on watershed runoff by SWAT model, In Proceedings: *Eighth the Civil Engineering International Congress*, May 11-13., Shiraz, Iran, PP. 1-9. (In Farsi)

Namdar, M. (2014). *Surface Runoff Prediction based onClimate Change in Haraz Watershed*, M.Sc dissertation, Universitu of Sari, Scince agricalture and nathral resourse. (in Farsi)

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kinity, J.R. and Williams, J.R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009, College Station: Texas Water Resources Institute, Technical Report no 406.

Omani, N., Tajrishi, M. and Abrishamchi, A. (2006). Simulating of Runoff by SWAT & GIS, In Proceedings; *Seventh international seminar of river engineering*, January 14-16., Ahvaz, Iran, PP. (in Farsi)

Osmani, H., Motamed Vaziri, B. and Moeini, A. (2013). Flow simulation, calibration and validashion SWAT model (case study of upstream the Latyan dam). *Journal of watershed engineering and management*, 5, 134-143.

Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Baltas. E. and Mimikou, M. (2011). SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations, *Journal of Ecologinal Modelling*, 222, 3500- 3512.

Ridwansyah, I., Pawitan, H., Sinukaban, N. and Hidayat, Y. (2014). Watershed Modeling with ArcSWAT and SUFI2 In Cisadane Catchment Area: Calibration and Validation of River Flow Prediction. *Journal of Science and Engineering*, 6, 92-101.

Robert, S.A., Scott, w.w. and Hans, R.Z. (2008). Hhdrologic Calibration and Validation of SWAT in a snow dominated rocky mountain Watershed, Montana, U.S.A. *Journal the American Water Resources Assocation*, 44, 1411-1430.

Rostameian, R., mosavi, S.F., Manochehr, H., Afyoni, M. and Abaspor, K. (2008). Evaluation of runoff and sediment Yield using SWAT2000 model in the North Karon in Beheshtabad watershed, *Journal Sience and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 48, 531-517.(In Farsi)

Salmani, H. (2011). Optimization of the parameters affecting the rain fall-run off in SWAT semi distributive model (case study of Ghazaghli subwatershed, (Gorganrood waterhed), MS.c dissertation, University of tehran.

Salmani, H., Mohseni Saravi, M., Rouhani, H. and Salajeghe, A. (2012). Evaluation of Land Use Change and its Impact on the Hydrological Process in the Ghazaghli Watershed (Golestan Province), *Journal of Watershed Management Research*, 3(6), 43-60. (In Farsi)

Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A. and Hauck, L. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188.

Archive of SID

www.SID.ir

Setegn, S. G., Dargahi, B., Srinivasan, R. and Melesse, A. M. (2010). Modeling of Sediment Yield From Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 514–526.

Shafiei, M., Ansari, H., Davari, K. and Gahreman. (2013). Calibration and uncertainty analysis of a semi-distributed model in a semi-arid region, (case study:Watershed management Nishabor). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 64 (7), 148-137. (In Farsi)

Sivapalan, M. (2003). Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: Is there a connection?, *Hydrology Process*, 17, 1037–1041.

Smerdon, B. D., Allen, D. M., Grasby, S. E. and Berg, M. A. (2009). An approach for predicting groundwater recharge in mountainous watersheds, *Journal of Hydrology*, 365, 156–172, 2009.

Sommerlot, A., Nejadhashemi, A., Woznicki, S., Giri, S. and Prohaska, M. (2013). Evaluating the capabilities of watershed-scale models in estimating sediment yield at field-scale, *Journal of Environmental Management*,127, 227-236.

Spruill, C. A., Workman, S. R. and Taraba, J. L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model, *Transations of the ASABE*, 43(6), 1431-1439.

Spruill, C.A., Workman, S.R. and Taraba, J.L. (2000). Simulation of Daily and Monthly Stream Discharge From Small Watersheds Using the SWAT Model, *Journal of Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 43, 1431-1439.

Tang, F.F., XU, H.S. and XU, Z.X. (2012). Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting, *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1760-1770.

Tolson, B. A. and Shoemaker, C. A. (2004). Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000:Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville reservoir. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca.

van Griensven, A. and Meixner, T. (2006). Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water SciTechnol*, 53(1), 51-59.

Van Liew, M. W. and Garbrecht, J. (2003). Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT. *Journal of American Water Resources Association*, 39(2), 413-426.

Vinogrado, Y.B., Semenova, O.M. and Vingoradova, T.V. (2010). An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. *Journal Hydrological Processes*, 24, 1-19.

Wang, S., Zhang, Z., Sun, G., Strauss, P., Guo, j., Tang, Y. and Yao, A. (2012). Multi-site calibration, validation, and sensitivity analysis of the MIKE SHE Model for a large watershed in northern China. *Hydrology Earth System Sciences*, 16, 4621–4632.

Dai, Z., Li, C., Trettin, C., Sun, G., Amatya, D. and Li, H. (2010). Bicriteria evaluation of the MIKE SHE model for a forested watershed on the South Carolina coastal plain, *Hydrology Earth System Sciences*, 14, 1033–1046.

Wang, X. and Melesse, A.M. (2005). Evaluation of the SWAT model's snow melt hydrology in a northwestern minnesota watershed, *Journal Transactions of the ASAE*, 48(4), 1–18.

Weingartner, R., Barben, M. and Spreafico, M. (2003). Floods in mountain areas–an overview based on examples from Switzerland. *Journal of Hydrol*ogy, 282, 10–24.

White, L. K. and Chaubey, I. (2005). Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model, *Journal of American Water Resources Association*, 41(5), 1077–1089.

Winchell, M., Srinivasan, R., Luzio, M.D. and Arnold, J.G. (2012). *Arc–SWAT interfaces for SWAT2009-User's guide*. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple, Texas.

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.

Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C., Xia, J. and Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1–2), 1–23.

Yapo, P.O, Gupta, H.V. and Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall runoff models: Sensitivity to calibration data, *Journal of Hydrology*, 181(1–4), 23–48.

Zhang, X., Srinivasan, R. and Hao, F. (2007). Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River basin using the SWAT model, *Transations of the ASABE*, 50(3), 901–910.

Zuo. D., Xu, Z., Zhao, J., Abbaspour, K and Yang, H. (2014). Response of runoff to climate change in the Wei River basin, China, *Hydrological Sciences Journal*, manuscript, Retrieved November 08, 2014, from http:// www. tandfonline. com/ toc/ thsj20/ current#. VJ–6NVCIQ

Archive of SID

www.SID.ir