

واسنجی چندایستگاهی رواناب حوضه آبخیز هراز با مدل SWAT

محمد گلشن^۱، عطاالله کاویان^{۲*}، حامد روحانی^۳، اباذر اسمعیلی عوری^۴

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

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

۳. استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه گنبدکاووس

۴. دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۲۷ - 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 حوضه 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 به‌منزله حساس‌ترین پارامتر انتخاب شد. مدل SWAT در ایستگاه‌های بررسی شده، زمان وقوع دبی اوج و مقدار دبی اوج را با کارایی بالا شبیه‌سازی کرد. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره 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 به ترتیب 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 به‌منزله 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). نخستین بار 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 (حوضه 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 حوضه 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)، (2002) Kouwen and Mousavi 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 به دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری و مسئله 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 حوضه آبخیز نمی‌تواند متغیرهای شبیه‌سازی شده (مانند تخلیه 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

* نویسنده مسئول: a.kavian@sanru.ac.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 اندازه‌گیری شده و مشاهداتی در نظر گرفته می‌شود. اهداف بهینه‌سازی می‌تواند ترکیبی از چندین شاخصه 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 توسعه مدل‌های هیدرولوژیکی، که توانایی شبیه‌سازی مکانی متغیرهای هیدرولوژیکی را دارند، استفاده از اطلاعات مشاهداتی چندین ایستگاه برای ارزیابی کارایی مدل گسترده‌تر شده است.

مدل SWAT به صورت گسترده برای مدل‌سازی در مقیاس‌های مکانی مختلف به کار برده شده است. در مطالعه‌ای (Vinogradov et al., 2010) به منظور مقایسه دقت مدل در حوضه‌هایی با مقیاس‌های مختلف از سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی (DMHS)^۱ در شش حوضه رودخانه لن^۲ برای سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۸۴ استفاده کردند که در این مطالعه کوچک‌ترین زیرحوضه مطالعه شده با وسعت ۴۰/۲ کیلومتر مربع، با ضریب نش-ساتکلیف (NS) ۶۴ درصد، ضریب تبیین (R^2) ۸۵ درصد و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۳۳ متر مکعب نسبت به بقیه 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^۳ به منظور شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز کارکاوو^۴ در جنوب شرقی اسپانیا استفاده کردند. در مطالعه‌ای (Sommerlot et al., 2013) از سه مدل SWAT، HIT^۵ و RUSLE^۶، در مقیاس حوضه، به منظور شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده کردند. سپس قطعیت‌نداشتن هر یک از مدل‌ها با استفاده از فاکتور P (P-factor) و فاکتور R (R-factor) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل SWAT با $P\text{-factor}=0.51$ و $R\text{-factor}=0.31$ از بالاترین دقت و مدل HIT به ترتیب با مقادیر ۰/۳۹ و ۰/۲۲ از کمترین دقت برخوردار است.

مدل SWAT استفاده شده است.

Myrsane et al. (2009) با استفاده از مدل SWAT به برآورد رواناب در حوضه آبخیز رودخانه کرخه اقدام کردند. نتایج مطالعه در خروجی دو ایستگاه هیدرومتری کاکارضا و پل کشکان نشان داد که ایستگاه پل کشکان با قرارگرفتن در قسمت پایین دست 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 به دست آمد که نسبت به بقیه ایستگاه‌ها بیشترین دقت را دارد و در ایستگاه دهنو (با کمترین مساحت) مقادیر این ضرایب به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۱۰۴، ۰/۵۷ و ۰/۴۷ به دست آمد که نسبت به بقیه ایستگاه‌ها کمترین دقت را دارد. Omani et al. (2006) با استفاده از مدل SWAT دبی جریان ماهانه رودخانه کارون را شبیه‌سازی کردند. در مرحله واسنجی مدل، مقدار ضریب R^2 و ضریب NS در ایستگاه ماهی‌دشت ۰/۸۹ و ۰/۸۸ و در ایستگاه سنجابی ۰/۸۱ و ۰/۸۰ به دست آمد. نتایج نشان داد که زیرحوضه 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 حوضه کشاورزی در استان کبک^۷، در جنوب کانادا، ارزیابی کردند؛ Spruill et al. (2000) و Chu and Shirmohammadi (2004) با موفقیت جریان ماهانه دو حوضه آبخیز با مساحت ۵/۵ کیلومتر مربع و ۳/۴ کیلومتر مربع در کوه‌پایه مریلند را شبیه‌سازی کردند؛ Santhi et al. (2001) با موفقیت دبی جریان ماهانه را در رودخانه حوضه آبخیز بوسکیو^۸ با مساحت ۴۲۷۷ کیلومتر مربع شبیه‌سازی کردند؛ Zhang et al. (2007) برای شبیه‌سازی دبی جریان به صورت روزانه و ماهانه در حوضه آبخیز رودخانه لوها^۹ با مساحت ۵/۲۳۹ کیلومتر مربع در چین از مدل SWAT استفاده کردند. در همه تحقیقات یادشده از اطلاعات چندین ایستگاه هیدرومتری برای واسنجی مقادیر پارامترها مدل SWAT استفاده شده است.

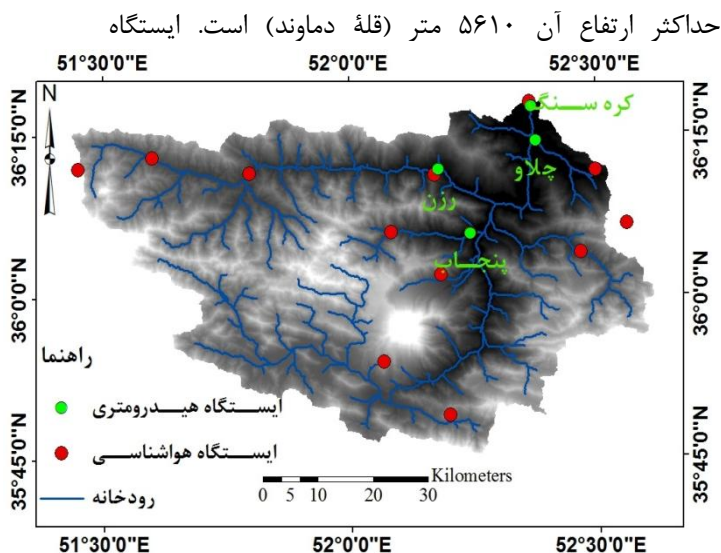
1. Deterministic Modelling Hydrological System
2. Lena
3. LandscApeProcesS modelling at mUlti dimensions and Scales
4. Carcavo
5. High Impact Targeting
6. Revised Universal Soil Loss Equation

7. Kebc
8. Bosque
9. Luohe

هیدرومتری رزن با مساحت بالادست ۱۱۸۲ کیلومتر مربع در خروجی رودخانه نوررود واقع شده است. ارتفاع حداقل و حداکثر حوضه نوررود ۱۲۵۵ و ۴۳۰۰ متر است. ایستگاه هیدرومتری چلاو با مساحت بالادست ۲۳۶ کیلومتر در خروجی رودخانه چلاو واقع شده است. ارتفاع حداقل و حداکثر حوضه چلاو ۴۵۶ و ۳۱۰۰ متر است. ایستگاه هیدرومتری پنجاب با مساحت بالادست ۱۳۰ کیلومتر مربع در خروجی رودخانه نمارستاق قرار گرفته است. ارتفاع حداقل و حداکثر حوضه نمارستاق ۹۷۴ و ۴۲۰۰ متر است.

معرفی مدل

مدل SWAT یک برنامه الحاقی به نرم افزار Arc Map به نام Arc SWAT2009 دارد (Neitsch *et al.*, 2011). این مدل به صورت مجموعه ای از معادلات ریاضی و فرمول های تجربی متفاوت است که برای شبیه سازی پارامترهای متفاوت به صورت روزانه، ماهانه و سالانه طراحی شده است (Neitsch *et al.*, 2012). در مدل SWAT، چرخه هیدرولوژی براساس معادله بیلان آب شبیه سازی می شود (Winchell *et al.*, 2012).



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده و ایستگاه های استفاده شده

جدول ۱. نوع کاربری حوضه های آبخیز مطالعه شده

| حوضه | مساحت (KM ²) | کاربری (کیلومتر مربع) | | | | |
|---------|--------------------------|-----------------------|--------|--------|------|--------|
| | | مرتع | جنگل | زراعت | بایر | علفی |
| کره سنگ | ۴۰۱۹ | ۲۵۰/۱۳ | ۲۳۷/۱۹ | ۲۱۵/۶۹ | ۶/۹۵ | ۴۴۲/۲۷ |
| رزن | ۱۱۸۲ | ۱۱۵/۹۱ | ۴۳/۰۶ | ۱۱۵/۰۵ | ۲/۳۸ | ۵/۳ |
| چلاو | ۲۳۶ | ۱۱۸/۵۴ | ۲۷/۲۹ | ۸۴/۸۷ | | ۳۰/۷۲ |
| پنجاب | ۱۳۰ | ۷۵/۸۸ | ۲۳/۴۰ | | | |

در سال های گذشته، از مدل SWAT در مدیریت حوضه های آبخیز ایران استفاده شده است. مانند حوضه آبخیز قره سو در استان اردبیل (Naserabadi, 2013)، حوضه آبخیز اهرچایی در استان تبریز (Atfi, 2014)، حوضه آبخیز گرگان رود (Salmani, 2011) و حوضه آبخیز هراز در استان مازندران (Golshan, 2013). در داخل کشور، کارایی این مدل به طور همزمان در چندین ایستگاه هیدرومتری مطالعه نشده است. بدین منظور، با استفاده از مدل SWAT رواناب حاصل از حوضه آبخیز هراز در خروجی چهار حوضه آبخیز با مساحت های متفاوت شبیه سازی شد.

مواد و روش ها

منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده 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 (شکل ۱). وسعت حوضه 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 (قله دماوند) است. ایستگاه

(رابطه 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 آب خاک، SW_0 مقدار اولیه آب خاک، R_{day} مقدار بارندگی در روز t ام، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز t ام، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز t ام، W_{seep} مقدار آب نفوذی به لایه فوقانی خاک در روز t ام و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز t ام است. معیار اندازه‌گیری پارامترهای یادشده برحسب میلی‌متر است.

در مدل SWAT، برای تخمین رواناب سطحی دو روش وجود دارد: الف) روش شماره منحنی و ب) رابطه نفوذ گرین-امپت (Neitsch et al., 2011). در این تحقیق، براساس روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) مقدار رواناب محاسبه شد:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2 S)^2}{(R_{day} 0.8 S)} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

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 محاسبه تبخیر و تعرق از روش هارگریوز-سامانی استفاده شد. شکل کلی آن به صورت رابطه‌های ۳ و ۴ است.

(رابطه ۳)

$$ET_o = 0.0135 K_t R_a T D^{0.5} (T + 17.8)$$

(رابطه ۴)

$K_t = 0.00185(TD)^2 - 0.0043TD + 0.4023$
 در این روابط، ET_o تبخیر-تعرق (میلی‌متر)، TD تفاوت متوسط دمای بیشینه و کمینه روزانه (درجه سانتی‌گراد) و T متوسط دمای روزانه برحسب درجه سانتی‌گراد است.

مدل SWAT برای محاسبه جریان زیرقشری از یک مدل ذخیره جنبشی استفاده می‌کند. این مدل جریان زیرقشری را در یک مقطع دوبعدی و در مسیر جریان به طرف پایین شیب شبیه‌سازی می‌کند که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$Q_{lat} = 0.024 \left(\frac{25 SW_{ly,excess} K_{sat} slp}{\phi_d L_{hill}} \right) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

در این رابطه، Q_{lat} دبی جریان زیرقشری (میلی‌متر در روز)، $SW_{ly,excess}$ مقدار آب زهکشی‌شده در لایه مورد نظر (میلی‌متر)، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر در ساعت)، slp شیب (ارتفاع در واحد فاصله)، ϕ_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 پایه زمانی روزانه از ۱۳ ایستگاه هواشناسی (۵ ایستگاه تبخیرسنجی، ۷ ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه سینوپتیک) موجود در منطقه مطالعه‌شده جمع‌آوری و وارد مدل شد (شکل ۱). داده‌های مربوط به دبی جریان در خروجی حوضه‌های آبخیز با مساحت‌های مختلف از ایستگاه‌های هیدرومتری تهیه شد. ایستگاه هیدرومتری واقع در شاخه اصلی رودخانه هراز از نوع درجه ۱ و ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در شاخه‌های فرعی رودخانه از نوع درجه ۳ و ۴ هستند. لایه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۲۸ متر، لایه کاربری اراضی شامل ۷ نوع کاربری (جدول ۱) و لایه خاک منطقه با ۵۷ نوع خاک (براساس گروه هیدرولوژیکی خاک، تعداد لایه‌های خاک، مواد آلی خاک و...) وارد مدل شد. همچنین، لایه 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 هیدرولوژیکی ۱۰ درصد مساحت زیرحوضه 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، ۱۶ و ۹ واحد هیدرولوژیکی همگن تقسیم شد (جدول ۱). 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؛ به طوری که سال آبی ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ به‌منزله دوره واسنجی و سال آبی ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ برای دوره اعتبارسنجی انتخاب شد.

جدول ۲. مشخصات کلی حوضه‌های آبخیز مطالعه‌شده

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

تحلیل حساسیت

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

به منظور تحلیل کیفیت نتایج مدل از ۳ نمایه آماری R^2 ، ضریب NS و MSE استفاده شد. ضریب R^2 (ضریب تبیین تشخیص یا تعیین) نشان‌دهنده تطابقت بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی و مقدار آن بین صفر تا ۱ متغیر است. ضریب NS^۴ اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و مقدار این فاکتور از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است. میانگین مربعات خطا نشان‌دهنده تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده به وسیله مدل و مقدار مشاهداتی است. مقادیر شبیه‌سازی شده، که کمترین مقدار MSE را دارد، از دقت بیشتری برخوردار است (Zuo *et al.*, 2014). روابط مربوط به محاسبه این پارامترها بدین شرح است:

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

$$EN = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه‌ها، Q_{obs} دبی مشاهده‌ای، Q_{sim} دبی شبیه‌سازی شده، \bar{Q}_{obs} میانگین دبی مشاهده‌ای، \bar{Q}_{sim} میانگین دبی شبیه‌سازی شده 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 اولیه برنامه SWAT-CUP مقدار حساسیت برای پارامترهای ورودی مدل مشخص شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که ۸ پارامتر از حساسیت معناداری برخوردارند؛ بنابراین، این پارامترهای برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی انتخاب شد. این پارامترها به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر مقدار رواناب حوضه آبخیز هراز و زیرحوضه‌های آن تأثیر دارند. بالابودن حساسیت پارامتر شماره منحنی بیانگر نقش بالای عوامل توپوگرافی و کاربری اراضی در تشکیل جریان دبی رواناب خروجی از حوضه مطالعه شده است که با نتایج مطالعات Salmani *et al.* (2011) و

میزان کارایی یک مدل برای اهداف تعیین شده از طریق آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی بررسی می‌شود (Osmani *et al.*, 2013). روش‌های به کار برده شده برای انجام دادن آنالیز حساسیت به طور کلی در دو گروه آنالیزهای حساسیت موضعی^۱ و سراسری^۲ قرار می‌گیرند (Griensven and Meixner, 2006). آنالیز حساسیت موضعی که به روش OAT^۳ (یک فاکتور در یک زمان) شناخته شده است، واکنش شبیه‌سازی مدل را به تغییرات متوالی هر پارامتر مشخص می‌کند، درحالی که دیگر پارامترها بدون تغییرند (Spruill *et al.*, 2005; Holvet *et al.*, 2000). آنالیز حساسیت در مدل‌های بر پایه فیزیکی مانند SWAT به علت ابعاد و پیچیدگی مسئله سبب می‌شود که در زمان اجرای عملیات واسنجی صرفه‌جویی شود. براساس مطالعات انجام شده در منطقه (Namdar, 2014) و ویژگی‌های حوضه آبخیز مطالعه شده، 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 پایه تقریب خطی ارائه می‌دهد. از این رو، اطلاعاتی را درباره حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل فراهم می‌کند؛ به طور کلی، مقادیر مطلق t-state نشان‌دهنده حساسیت بیشتر پارامتر است. فاکتور p-value نیز برای تعیین معناداری درجه حساسیت پارامترها استفاده می‌شود. هرچه p-value به صفر نزدیک‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است (Abbaspour *et al.*, 2007).

در انتخاب پارامترها برای دوره واسنجی سعی بر آن بوده است تا فرایندهای مختلفی که بر شبیه‌سازی جریان آب مؤثرند مد نظر قرار گیرند. بنابراین، پارامترهای منتخب حساس در مرحله 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 اجرا شد 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

4. Nash and Sutcliffe

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

در دوره واسنجی، پارامترهای حساس به نرم افزار SWAT-CUP وارد شد سپس با استفاده از روش SUFI2، ۲۰۰۰ بار تکرار برای این پارامترها انجام و مقادیر بهینه برای هر پارامتر مشخص شد (جدول ۴).

جدول ۴. مقادیر بهینه و حد بالا و پایین پارامترهای منتخب در دوره 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 شبیه سازی مدل نشان می دهد که در بیشتر ماه های سال، مقادیر شبیه سازی مدل از مقادیر اندازه گیری شده تا حدودی کمتر است. در حوضه آبخیز کره سنگ، در آوریل ۲۰۰۳، دبی به بیشترین اوج (۵۲ مترمکعب بر ثانیه) رسیده است که همزمان با بیشترین بارندگی مشاهداتی (۸۶ میلی متر) است. همچنین، در حوضه های آبخیز چلاو، رزن و پنجاب بیشترین دبی اوج مشاهداتی ثبت شده به ترتیب ۴، ۲۹ و ۶۷ متر مکعب بر ثانیه است. مقادیر شبیه سازی شده برای این دبی اوج ها به ترتیب ۳,۳، ۱۹ و ۵,۳۹ متر مکعب بر ثانیه است. نتایج نشان می دهد مدل SWAT زمان وقوع دبی اوج و مقدار دبی اوج را به خوبی شبیه سازی کرده است. در گزارشی (Tolson and shoemaker, 2004) بیان شده است که مدل SWAT برای شبیه سازی وقایع شدید طراحی نشده است و معمولاً بزرگترین وقایع جریان را کمتر از مقدار اندازه گیری شده شبیه سازی می کند که در نتایج این تحقیق قابل مشاهده است. بین ماه های آوریل تا ژوئن (اوایل تا اواخر بهار) انطباق بین دبی های اوج مشاهداتی و شبیه سازی شده کمتر است. در این ماه ها، مقادیر دبی مشاهداتی بیشتر از دبی شبیه سازی شده است که می تواند 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 شبیه سازی در حوضه های مطالعه شده به طور درخور ملاحظه ای متأثر از مساحت حوضه های مطالعه شده است. عملکرد رضایت بخش مدل با توجه به مقادیر ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری کره سنگ بیشتر

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

جدول ۳. نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر بارش-رواناب براساس

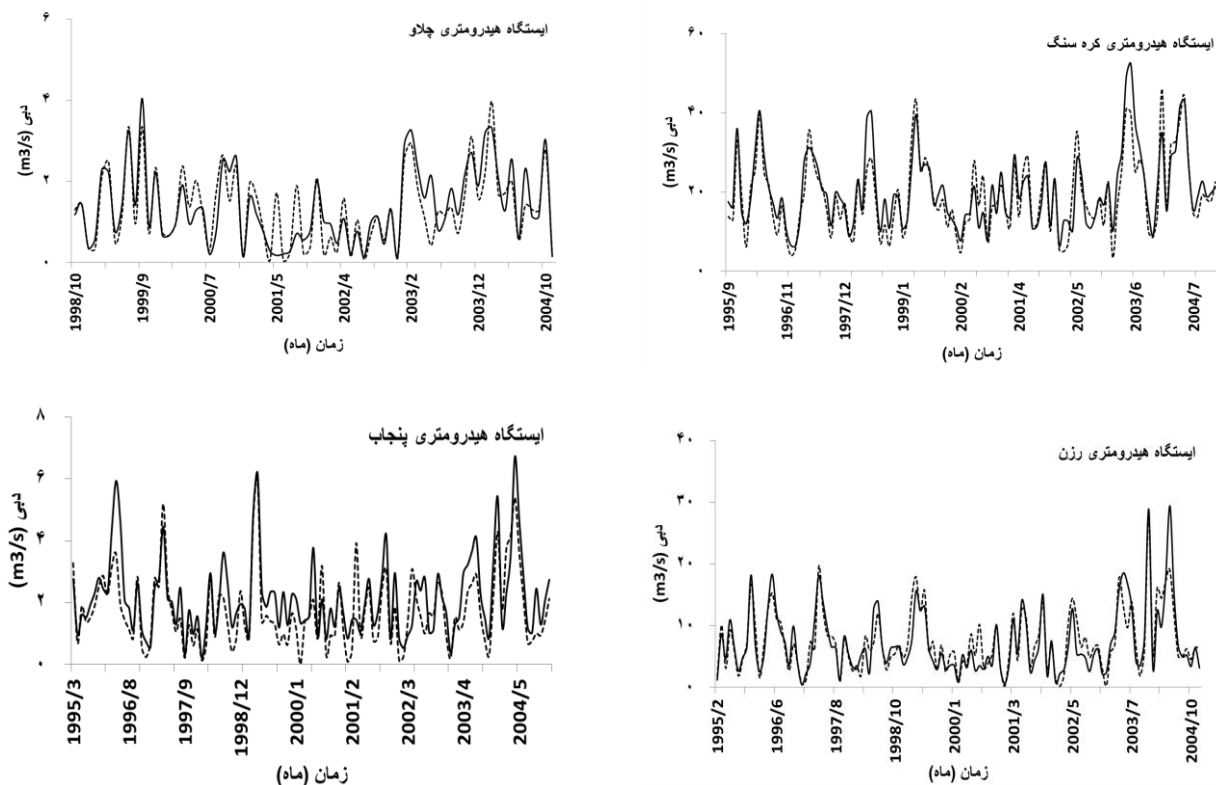
| قدر مطلق t-Stat و P-Value | | توضیحات | نام پارامتر |
|---------------------------|--------|---|-----------------|
| P-Value | t-Stat | | |
| ۰,۶۷ | ۰,۴۲ | | |
| ۰,۶۵ | ۰,۴۶ | نرخ ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mm.day) | v_SMFMX.bsn |
| ۰,۶۳ | ۰,۴۹ | | |
| ۰,۳۴ | ۰,۸۵ | | |
| ۰,۳۴ | ۰,۹۴ | | |
| ۰,۶۷ | ۰,۴۲ | نرخ ظرفیت رطوبت خاک (mmH2O,mm (Soil) | r_SOL_AWC().sol |
| ۰,۶۵ | ۰,۴۶ | | |
| ۰,۶۳ | ۰,۴۹ | | |
| ۰,۳۴ | ۰,۸۵ | | |
| ۰,۳۴ | ۰,۹۴ | | |
| ۰,۶۷ | ۰,۴۲ | زمان تأخیر جریان زیرسطحی (day) | r_LAT_TTIME.hru |
| ۰,۶۵ | ۰,۴۶ | | |
| ۰,۶۳ | ۰,۴۹ | | |
| ۰,۳۴ | ۰,۸۵ | | |
| ۰,۳۴ | ۰,۹۴ | | |
| ۰,۳۱ | ۰,۹۹ | درصد تغذیه سفر عمیق از سفره سطحی | v_Rchrg_Dp |
| ۰,۲۷ | ۱,۰۸ | شیب متوسط زمین در هر HRU | r_SLOPE |
| ۰,۲۱ | ۱,۲۴ | ضریب صعود موینگی از سفره کم عمق | v_GW_REVAP |
| ۰,۱۹ | ۱,۲۸ | ضریب بازتاب لایه خاک حداقل مقدار آب برای تبخیر آب زیرزمینی (mm) | r_Sol_Alb |
| ۰,۱۳ | ۱,۴۸ | متوسط دمای هوا برای بارش برف (c) | v_SFTMP |
| ۰,۱۲ | ۱,۵۳ | ضریب مانینگ رودخانه | v_CH_N2 |
| ۰,۱۰ | ۱,۶۲ | ضریب تبخیر خاک | r_ESCO |
| ۰,۱۰ | ۱,۶۲ | ضریب تأخیر رواناب سطحی (day) | v_SURLAG |
| ۰,۰۱ | ۲,۴ | پارامتر آلفا در جریان پایه (day) | v_ALPHA_BF |
| ۰,۰۰۲ | ۳,۰۵ | فاکتور تأخیر دمای فشرده سازی برف | v_TIMP |
| ۰,۰۰۰۲ | ۳,۷۳ | ضریب تخلیه کانال (day) | v_ALPHA_BNK |
| ۰,۰۰۰۰۸ | ۳,۹۶ | دمای پایه ذوب توده برف (c) | v_SMTMP |
| ۰ | ۵,۱۸ | چگالی توده خاک (gr,cm3) | r_SOL_BD |
| ۰ | ۵,۵۷ | هدایت هیدرولیکی مؤثر (mm/hr) | v_CH_K2 |
| ۰ | ۶,۱۸ | شماره منحنی | r_CN2 |

۷- به معنای جایگزین کردن مقادیر موجود با مقدار داده شده و ۲ به معنای ضرب کردن مقادیر موجود پارامتر در (+1) مقدار داده شده است.

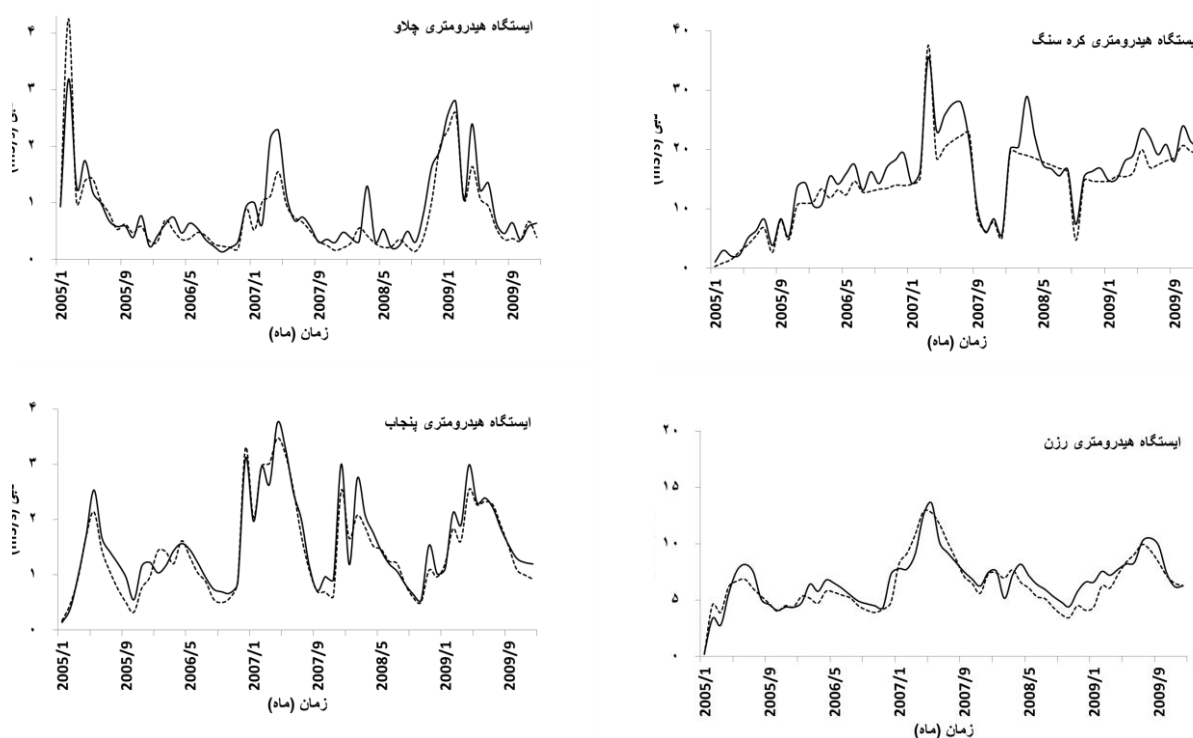
بودند، بنابراین پاسخ هیدرولوژیکی در ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ به ترکیب رفتار جریان در زیرحوضه‌های بالادست بستگی دارد. طبق شکل ۲، به‌طور سیستماتیکی کم‌برآوردی در تخمین داده‌های دبی پایه در همه هیدروگراف‌ها مشاهده می‌شود که احتمالاً به‌دلیل خطاهای موجود در شبیه‌سازی آب زیرزمینی است.

اعتبارسنجی نتایج مدل برای افزایش سطح اعتماد کاربر در قابلیت شبیه‌سازی مدل ضروری است. بنابراین، مدل توسط داده‌های رواناب مشاهده‌ای در ایستگاه‌های اندازه‌گیری برای دوره ۵ ساله ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ اعتبارسنجی شد. نتایج این اعتبارسنجی در شکل ۳ ارائه شده است. آنچه در بخش گذشته درباره عملکرد نه‌چندان قابل قبول مدل در فصل بهار یاد شد، در دوره اعتبارسنجی نیز مصداق دارد. شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله 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 حوضه آبخیز پنجاب (کمترین مساحت) نیز ضعیف‌ترین شبیه‌سازی را دارد.

به‌دلیل توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان‌های پیک و میانه بود؛ به‌طوری‌که حوضه آبخیز کره‌سنگ با مساحت ۴۰۱۴ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۸۰) و ضریب NS (۰/۷۷) از بیشترین دقت برخوردار است. سپس حوضه آبخیز رزن با مساحت ۱۱۸۲ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۷۹) و ضریب NS (۰/۷۴) نسبت به حوضه آبخیز چلاو با مساحت ۲۳۶ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۷۵) و ضریب NS (۰/۷۳) از دقت بیشتری برخوردار است. در صورتی‌که حوضه آبخیز پنجاب با مساحت ۱۳۰ کیلومتر مربع با ضریب R^2 (۰/۶۸) و ضریب NS (۰/۵۵) کمترین دقت را دارد. شاخص 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 حوضه آبخیز پنجاب، علاوه بر مساحت کمتر نسبت به بقیه زیرحوضه‌های مطالعه‌شده، در بالادست حوضه قرار گرفته بود و شرایط جوی و کوهستانی بسیار ناپایداری داشت و مدل به شبیه‌سازی جریان رودخانه به‌خوبی بقیه حوضه‌ها قادر نبود. همه حوضه‌های مطالعه‌شده در نهایت بخشی از حوضه کره‌سنگ



شکل ۲. سری زمانی دبی شبیه‌سازی (....) و مشاهده‌ای (—) در خروجی ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه‌شده در حوضه آبخیز هراز در دوره واسنجی



شکل ۳. سری زمانی دبی شبیه‌سازی (....) و مشاهده‌ای (—) در خروجی ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه‌شده در حوضه آبخیز هراز در دوره اعتبارسنجی

جدول ۵. مقایسه آماری دبی روزانه شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در دوره واسنجی

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

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری تغییرپذیری مکانی در مدل‌سازی هیدرولوژی و دانستن فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز حائز اهمیت است (Beven, 2000; Anquetin et al., 2010). به‌خصوص برای مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز بزرگ مقیاس که نسبت به حوضه‌های کوچک مقیاس 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., 2009; Smerdon et al., 2003; al., 2003). بنابراین، این عوامل به چالش‌های مهمی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی منجر می‌شوند. در این مطالعه، شبیه‌سازی مدل نیمه‌توزیعی- فیزیکی SWAT برای بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز هراز با مقیاس بزرگ با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری چهار ایستگاه به‌طور هم‌زمان انجام شد. پارامتر شماره منحنی

براساس پیشنهاد (Benaman and Shoemaker, 2005)

شبیه‌سازی مدل هنگامی می‌تواند رضایت‌بخش باشد که مقدار ضریب R² بیشتر از ۰٫۶۰ درصد باشد و ضریب NS بیشتر از ۰٫۵ باشد. مقادیر ضریب R² در دوره 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 دوره زمانی مطالعه‌شده دقت مناسبی دارد که با نتایج برخی پژوهش‌ها درباره کارایی برنامه 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).

است؛ به طوری که 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 به دلیل 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 به وجود می‌آید تا سناریوهای مختلف مدیریتی را بدون صرف هزینه سنگین و در زمان کوتاه ارزیابی و بهترین تصمیم را جهت مدیریت حوضه آبخیز اتخاذ کنند.

REFERENCES

- 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 the pre-alpine, alpine Thur watershed using SWAT, *Journal of Hydrology*, 333, 413-430.
- Ambrose, 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, *Transactions of the ASAE*, 47(4), 1057-1073.
- Demarty, J., Otle, C., Braud, I., Oliso, 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 Resource 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

به‌منزله 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 کوچک مقیاس برخوردار

- 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, Science agriculture and natural resource. (In Farsi)
- Griensven, V.A. and Meixner, T. (2006). Methods to quantify and identify the sources of uncertainty 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., Trolborg, 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., Muller-Wohlfeil, 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, *Journal 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 on Climate Change in Haraz Watershed*, M.Sc dissertation, University of Sari, Science agriculture and natural resource. (in Farsi)
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, 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 validation SWAT model (case study of upstream the Lalyan 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 Ecological 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). Hydrologic Calibration and Validation of SWAT in a snow dominated rocky mountain Watershed, Montana, U.S.A. *Journal the American Water Resources Association*, 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 Science 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 watershed), 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.

- 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, *Transactions 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 Hydrology*, 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, *Transactions 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/thjsj20/current#.VJ-6NVCIQ>