

## شبیه‌سازی رواناب به کمک مدل SWAT در مقیاس سالانه (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور)

روزبه موذن‌زاده\*<sup>۱</sup>، بیژن قهرمان<sup>۲</sup>، صالح ارشد<sup>۳</sup>، کامران داوری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۱

۱- استادیار، گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: romo\_sci@shahroodut.ac.ir

### چکیده

رواناب از مؤلفه‌های اصلی بیلان آب در سطح حوضه آبریز است که برآورد دقیق آن به شبیه‌سازی بهتر هیدرولوژیک حوضه آبریز کمک می‌نماید. در این پژوهش از مدل  $SWAT^1$  برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز نیشابور با مساحت ۹۵۰۰ کیلومتر مربع در حد فاصل سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ استفاده شد. بدین منظور مدل  $SWAT$  با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب در سه ایستگاه هیدرومتری اندراب، خرو مجموع و حسین‌آباد در طی سال-های ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۶ واسنجی شد. برای واسنجی، بررسی عدم قطعیت و تحلیل حساسیت مدل از الگوریتم  $SUFI-2$  استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهایی نظیر تلفات انتقال آبراه‌ای، شماره منحنی نفوذ و فاکتورهای مربوط به ذوب برف بیشترین حساسیت را در برآورد دبی رواناب از خود نشان دادند. واسنجی مدل در هر سه ایستگاه اندراب، خرو مجموع و حسین‌آباد به ترتیب با استناد به مقادیر ۰/۸۴، ۰/۷۷ و ۰/۹۲ برای ضریب کارایی (نش- ساتکلیف) مناسب ارزیابی شد، اگرچه کم‌برآوردی نقاط اوج هیدروگراف به صورت نسبی مشاهده شد. مقادیر همین معیار برای دوره اعتبارسنجی نیز به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۱ به دست آمد. ریشه میانگین مربعات خطا نیز در مرحله واسنجی در بازه ۰/۴۶ تا ۰/۵۷ متر مکعب در ثانیه و در مرحله اعتبارسنجی در بازه ۰/۰۶ تا ۰/۱۹ متر مکعب در ثانیه برای ایستگاه‌های مذکور متغیر بود. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن مفاهیم مدیریت گیاهی، تخمین مقادیر رواناب را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، عدم قطعیت، کم برآورد، مدیریت گیاهی، واسنجی

## Simulation of Runoff Using SWAT Model at Annual Scale (Case Study: Neyshabour Watershed)

R Moazenzadeh<sup>\*1</sup>, B Ghahraman<sup>2</sup>, S Arshad<sup>3</sup>, K Davary<sup>2</sup>

Received: 09/17/2016

Accepted: 01/11/2020

<sup>1</sup>Assist. Prof., Dept. of Soil and Water Engineering, Faculty of Agric., Shahrood University of Technology, Iran

<sup>2</sup>Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

<sup>3</sup>Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric., Guilan University, Iran

\* Corresponding Author, Email: romo\_sci@shahroodut.ac.ir

### Abstract

Runoff is a main component of water balance in the watershed scale which its accurate estimation helps to better hydrological simulation of watershed. In this study, the SWAT (Soil Water Assessment Tool) model was used to simulate runoff in Neyshabour watershed with area of 9500 km<sup>2</sup> for the 2007 to 2010 period. To this means, SWAT model was calibrated based on measured runoff data at three hydrometric stations (Andarab, Kharve Majmoo and Hossein Abad) during 2000-2007. Calibration, uncertainty and sensitivity analysis were done using SUFI-2 algorithm. According to the results, parameters such as fraction of transmission losses, moisture condition curve number and factors related to snowmelt showed the greatest sensitivity to run off estimation. The model calibration in all three stations; Andarab, Kharve Majmoo and Hossein Abad, was evaluated as appropriate by referring the values of 0.84, 0.77 and 0.92 for the Nash-Sutcliff efficiency coefficient, respectively, although underestimations for the peak amounts of hydrographs were observed relatively. The values of the mentioned coefficient were obtained as 0.92, 0.66 and 0.71 for the validation period at the stations of Andarab, Kharve Majmoo and Hossein Abad, respectively. Also root mean square error values varied between 0.46 to 0.57 m<sup>3</sup>/s and 0.06 to 0.19 m<sup>3</sup>/s in the same three hydrometric stations for the calibration and validation periods, respectively. The results showed that considering the crop management concepts significantly improved runoff estimation.

**Keywords:** Calibration, Crop management, Sensitivity analysis, Uncertainty, Underestimation

### مقدمه

آبریز از طریق تقسیم حوضه به زیرحوضه‌ها صورت می‌پذیرد (آرنولد و همکاران ۱۹۹۸).

تعداد زیاد پارامترهای مدل، ساده‌سازی‌های اعمال شده در ساختار مدل و مکانیزم‌های طبیعی موجود در سطح حوضه آبریز که در ساختار مدل اعمال نشده از جمله مهمترین عواملی هستند که مانع از تعیین دقیق پارامترهای مدل SWAT گشته و منجر به ایجاد مبحث مهمی به نام تحلیل عدم قطعیت در مدل-سازی شده است. متناسب با هدف و منطقه مورد مطالعه، نوع پارامترهای حساس مدل و درجه اهمیت آنها متغیر است. کاربرد دو سناریوی استفاده از داده-

شبیه‌سازی دقیق حوضه‌های آبریز نقش مهمی در فهم رفتار هیدرولوژیک حوضه دارد. دشواری در اندازه‌گیری مستقیم مؤلفه‌ها، تأثیرات متقابل مؤلفه‌های مذکور بر یکدیگر و تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات هیدرولوژیک، محققین را ناچار به استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک در سطح حوضه آبریز نموده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل هیدرولوژیکی SWAT اشاره نمود. مدل SWAT به‌عنوان یک مدل نیمه-توزیعی، مبنای فیزیکی داشته و مدل‌سازی حوضه

نامناسب را عدم ورود داده‌های مدیریت گیاهی به مدل معرفی نمودند.

رواناب سطحی به عنوان یکی از مولفه‌های اصلی معادله بیلان آب نقش مهمی در شبیه‌سازی رفتار حوضه‌های آبریز دارد. همچنین برآورد دقیق آن می‌تواند از دیدگاه مدیریت سازه‌ای نظیر تعیین تعداد و محل مناسب ایستگاه‌های هیدرومتری سودمند باشد. بنابراین هدف اصلی این تحقیق بررسی توانایی شبیه‌سازی رواناب به کمک مدل نیمه توزیعی SWAT در مقیاس سال - حوضه با در نظر گرفتن عامل مدیریت‌های گیاهی؛ در حوضه‌ای با کاربری اصلی کشاورزی؛ در حد فاصل سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

حوضه آبریز نیشابور در شرق حوضه آبریز کویر مرکزی قرار دارد. وسعت این حوضه آبریز در حدود ۹۵۰۰ کیلومتر مربع است. حدود ۴۷ درصد سطح اراضی حوضه به اراضی کشاورزی (شامل کشاورزی آبی، دیم و باغات) اختصاص یافته است (شفیعی و همکاران ۱۳۹۲). در این تحقیق از آمار حدود ۱۸ ایستگاه باران‌سنجی موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. اصلی‌ترین آبراهه حوضه، رودخانه کال - شور است که عمده رواناب سطحی و سیلاب‌های دشت مذکور را زهکشی و در نهایت از محل روستای حسین - آباد به خارج از حوضه تخلیه می‌گردد. در حوضه آبریز نیشابور ۶ ایستگاه هیدرومتری فعال وجود دارد، که ۴ ایستگاه آن در ارتفاعات شمال شرقی حوضه (ارتفاعات بینالود) و ۲ ایستگاه (روح‌آباد و حسین‌آباد) در محدوده دشت واقع شده‌اند (شکل ۱).

مهمترین ورودی‌های مدل شامل نقشه رقوم، ارتفاعی، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی و داده‌های اقلیمی می‌باشند. مدل SWAT به منظور مدل‌سازی بهتر ممکن است یک حوضه آبریز را به چندین زیرحوضه و هر زیرحوضه را به چندین واحد واکنش هیدرولوژیک

های یک سال و داده‌های پنج سال برای واسنجی مدل نشان داد که حساس‌ترین پارامترهای مدل در شبیه‌سازی رواناب به ترتیب  $CN$  (شماره منحنی نفوذ برای شرایط اولیه رطوبت)،  $ESCO^1$  (ضریب جبران کننده تبخیر از سطح خاک)،  $SURLAG^2$  (ضریب تاخیر رواناب سطحی) بودند (گرین و گرینسون ۲۰۰۸). نتایج تحقیق وانگ و همکاران (۲۰۱۴) به منظور شبیه‌سازی رواناب در سه منطقه مختلف نشان داد که پارامترهای  $ESCO$ ،  $CN$  و  $SOL\_AWC^3$  (آب قابل دسترس خاک) حساس‌ترین پارامترهای مدل SWAT بوده‌اند.

برای واسنجی مدل SWAT می‌توان از داده‌های رواناب، میزان رسوب و یا فرسایش استفاده نمود. موسی و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس ۱۴ پارامتر حساس مدل SWAT اقدام به شبیه‌سازی رواناب نمودند که ضریب تعیین و ضریب نش - ساتکلیف در مرحله واسنجی مدل به ترتیب  $0.73$  و  $0.72$  به دست آمدند. در تحقیق دیگری مبتنی بر واسنجی مدل بر اساس داده‌های رسوب در کشور اتیوپی، مقادیر شاخص‌های ضریب تعیین و ضریب نش - ساتکلیف به ترتیب در حدود  $0.55$  و  $0.55$  در مرحله واسنجی و  $0.52$  و  $0.53$  در مرحله اعتبارسنجی گزارش شدند (یوسف و همکاران ۲۰۱۵).

تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری و نحوه تکمیل فایل‌های مدیریت گیاهی نتایج شبیه‌سازی را از خود متأثر می‌سازد. داگوپاتی و همکاران (۲۰۱۵) تاثیر افزایش تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری در قیاس با استفاده از یک ایستگاه را در مراحل واسنجی مدل SWAT با بهبود مقادیر ضریب نش - ساتکلیف خاطر نشان ساختند. شفیعی و همکاران (۱۳۹۲) مقادیر  $1/41$  و  $2/8$  را برای بیان عدم قطعیت ( $R$ -factor) به ترتیب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی رواناب گزارش و یکی از عوامل مهم بروز نتایج

1 Soil evaporation compensation coefficient

2 Surface run off lag coefficient

3 Available water capacity

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad [1]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{m,i} - \bar{Q}_m) - (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad [2]$$

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{n} \right)^{0.5} \quad [3]$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{m,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}} \times 100 \quad [4]$$

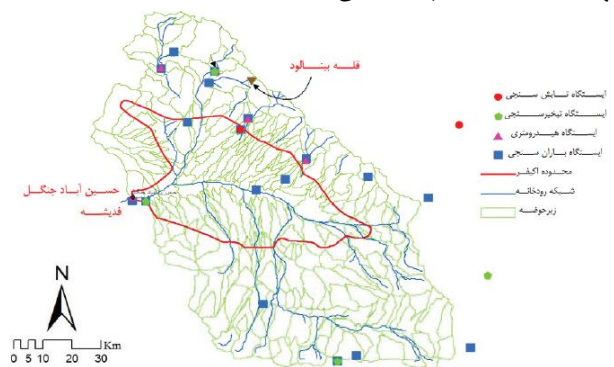
در این روابط n تعداد مشاهدات،  $Q_m$  و  $Q_s$  به- ترتیب مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده،  $\bar{Q}_m$  و  $\bar{Q}_s$  به‌ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده است. از میان شش ایستگاه هیدرومتری مذکور، ایستگاه روح‌آباد به‌دلیل مقادیر نامعقول اندازه‌گیری شده و تغییر محل ایستگاه در بازه زمانی شیب‌سازی از چرخه واسنجی کنار گذاشته شد. در نهایت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT بر اساس مقادیر دبی رواناب سه ایستگاه اندراب، خرومجموع و حسین‌آباد به‌ترتیب در حد فاصل سال‌های ۸۶-۱۳۷۶ و ۸۹-۱۳۸۶ صورت پذیرفت.

## نتایج و بحث

### تحلیل حساسیت مدل

در این تحقیق پارامترهایی از مدل که بر دبی رواناب موثر بودند بر اساس مطالعات مشابه پیشین انتخاب شدند (لی و همکاران ۲۰۱۰، وانگ و همکاران ۲۰۱۴ و گامفی و همکاران ۲۰۱۶). دامنه تغییرات مقادیر مهمترین پارامترهای مدل در مرحله واسنجی در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول، حساس‌ترین پارامتر مدل به دبی رواناب، تلفات انتقال آبراهه‌ای<sup>۳</sup> (TRNSRCH) بوده است. این موضوع با توجه به قرار-گیری منطقه مورد مطالعه در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و وقوع عمده نفوذ از طریق تلفات آب از کف آبراهه‌ها قابل توجیه است (سوفکلیوس ۲۰۰۵، بین و همکاران ۲۰۱۱). با این حال شماره منحنی نفوذ نیز به همان اندازه در برآورد رواناب موثر بوده است (آرنولد و همکاران ۲۰۱۲). تاثیرگذار بودن هدایت هیدرولیکی موثر کانال و ضریب مانینگ در کانال نیز بواسطه کنترل نمودن

(HRU<sup>۱</sup>) تقسیم نماید. چنین راهکاری تأثیر خود را زمانی نشان خواهد داد که در یک حوضه آبریز، نواحی مختلفی با کاربری‌های متفاوت یا انواع مختلف خاک وجود داشته باشد به‌نحوی که هیدرولوژی حوضه را از خود متأثر سازند (نیتسچ و همکاران ۲۰۱۱). در این تحقیق کل حوضه آبریز به ۲۴۸ زیرحوضه تقسیم شد (شکل ۱). در این تحقیق از معادله هارگریوز و روش شماره منحنی به‌ترتیب برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق پتانسیل و رواناب سطحی استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت مکانی حوضه آبریز نیشابور، ایستگاه-های باران‌سنجی، هیدرومتری و زیرحوضه‌های تولید شده.

در این تحقیق به‌منظور تحلیل عدم قطعیت و واسنجی مدل SWAT از برنامه SUFI-2 در قالب نرم افزار SWAT-CUP<sup>۲</sup> استفاده شد. همزمان با پایش مقادیر تابع هدف، برنامه مذکور دو معیار P-factor (درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند) و R-factor (ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵ درصد) را نیز لحاظ می‌نماید تا بهترین حالت انتخاب گردد. در مورد دو معیار مذکور بهترین نتیجه مربوط به حالتی است که به‌ترتیب مقادیر آنها به یک و صفر میل کنند. در این پژوهش برای تابع هدف، ضرایب تعیین و نش-ساتکلیف و برای ارزیابی نتایج معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا و درصد اریب انتخاب شدند که از روابط ۱ تا ۴ قابل محاسبه‌اند (نیتسچ و همکاران ۲۰۱۱، خاکباز و همکاران ۲۰۱۲).

1 Hydrologic response unit

2 SWAT Calibration and Uncertainty Programs

3 Fraction of transmission losses partitioned to the deep aquifer

آنچنان که نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد، به‌خصوص در ایستگاه‌های خرو مجموع و حسین آباد (۲- ب و ۲- ج)، مدل SWAT مقادیر بیشتر دبی رواناب (اوج هیدروگراف) را کم‌برآورد نموده است. این نتیجه مشابه نتایج گزارش شده در مطالعات مشابه می‌باشد (اورنگ و همکاران ۲۰۱۱، شاول و همکاران ۲۰۱۳).

البته این کم‌برآوردی را نمی‌توان به ناتوانی مدل در برآورد مقادیر اوج هیدروگراف در تحقیق حاضر نسبت داد زیرا که در مطالعات مذکور مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده به مراتب بیشتر از مقادیر متناظر رواناب در این تحقیق بوده، اما باز هم کم‌برآورد نقاط اوج هیدروگراف گزارش شده است. شاید این کم-برآوردی نقاط اوج هیدروگراف را بتوان اینگونه توجیه نمود که مدل SWAT مقادیر شماره منحنی نفوذ را متناسب با آب قابل دسترس در کل پروفیل خاک اصلاح می‌نماید در حالیکه بنظر می‌رسد بهتر آن باشد که مقدار فوق با توجه به وضعیت رطوبتی در لایه‌های بالایی خاک، که نقش بیشتری در زمینه اشباع سطحی در حین وقوع بارندگی‌های سنگین از خود ایفا می‌نمایند، اصلاح گردد. در اینصورت فرآیندهایی نظیر آماس لایه‌های سطحی خاک که در کاهش ظرفیت نفوذپذیری موثرند نیز لحاظ گشته و دقت برآورد رواناب به‌خصوص در نقاط اوج هیدروگراف افزایش می‌یابد. نتایج مربوط به مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در مرحله واسنجی نیز که در جدول ۲ آورده شده حکایت از عملکرد قابل قبول مدل در برآورد دبی رواناب دارد. در مطالعه مشابهی در آمریکا مرز دسته‌بندی نتایج (رضایتبخش و نارضایتبخش) برحسب مقادیر  $NS$  و  $R^2$  به ترتیب ۰/۴ و ۰/۵ گزارش شده که بر این اساس، نتایج مذکور در گروه رضایتبخش قرار می‌گیرند (گرین و گرینسون ۲۰۰۸).

در تحقیق دیگری مقادیر بزرگتر از ۰/۵ برای ضریب  $NS$  در مقیاس ماهانه برای مطالعات

میزان نفوذ از داخل بستر و کف کانال و تاثیرگذاریشان بر دبی رواناب می‌تواند قابل توجیه باشد. از پارامترهای حساس دیگر مدل به رواناب می‌توان به ضریب ثابت پسروی جریان پایه اشاره نمود که به مفهوم سرعت ورود جریان آب زیرزمینی به داخل شبکه آبراه‌های است. مقادیر گزارش شده این پارامتر در بازه صفر تا یک روز در نوسان است که مقدار به‌دست آمده در این تحقیق (۰/۳۳) با آن همخوانی دارد (شاول و همکاران ۲۰۱۳). با اینحال زهکشی آرام و برداشت‌های بی‌رویه آب زیرزمینی در سالیان اخیر را می‌توان از جمله مهمترین دلایل در توجیه مقادیر اندک این پارامتر برشمرد، اگرچه مقدار ۰/۰۴۶ نیز برای این پارامتر گزارش شده است (وو و جانسون ۲۰۰۷). در تحقیق مشابهی برای پارامتر  $ESCO$  که در فرآیند تبخیر-تعرق موثر است مقدار ۰/۶ به دست آمده (لی و همکاران ۲۰۱۰) در حالیکه در مطالعه مشابه دیگری اگرچه بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۲۷ گزارش شده است ولی ایشان سرانجام مقدار ۰/۸ را برای آن در نظر گرفته‌اند (گرین و گرینسون ۲۰۰۸). از میان پارامترهای مدل که به ذوب برف مرتبط می‌گردند، پارامترهای  $SMFMN$  و  $SMTMP$  حساسیت نسبتاً بالایی در شبیه‌سازی رواناب از خود نشان داده‌اند. این امر را می‌توان به کوهستانی بودن منطقه و نقش ذوب برف در کنترل رواناب منسوب نمود. رثوف و همکاران (۱۳۹۵) نیز در تحقیق خود بر روی برآورد رواناب در حوضه بالخلوچای دمای ذوب برف را جزو حساس‌ترین پارامترها معرفی نمودند.

#### شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی

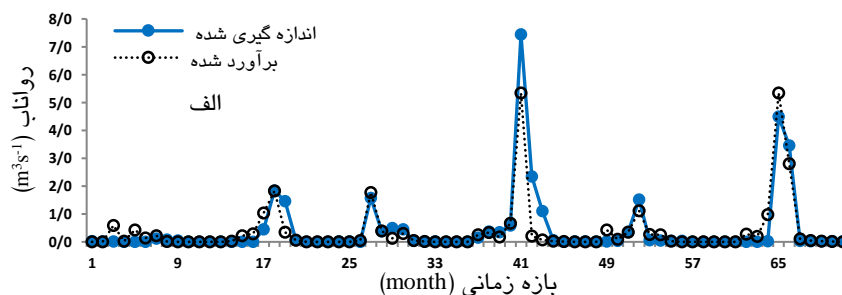
از میان این ۱۱ سال مورد استفاده در واسنجی مدل، ۳ سال ابتدایی به‌منظور سازگاری مدل<sup>۱</sup> با شرایط تعریف شده برای مدل و ۸ سال مابقی برای واسنجی مدل لحاظ شده است. نتایج مربوط به شبیه‌سازی رواناب در سه ایستگاه مذکور و طی مرحله واسنجی مدل در شکل‌های ۲-الف تا ۲-ج نشان داده شده است.

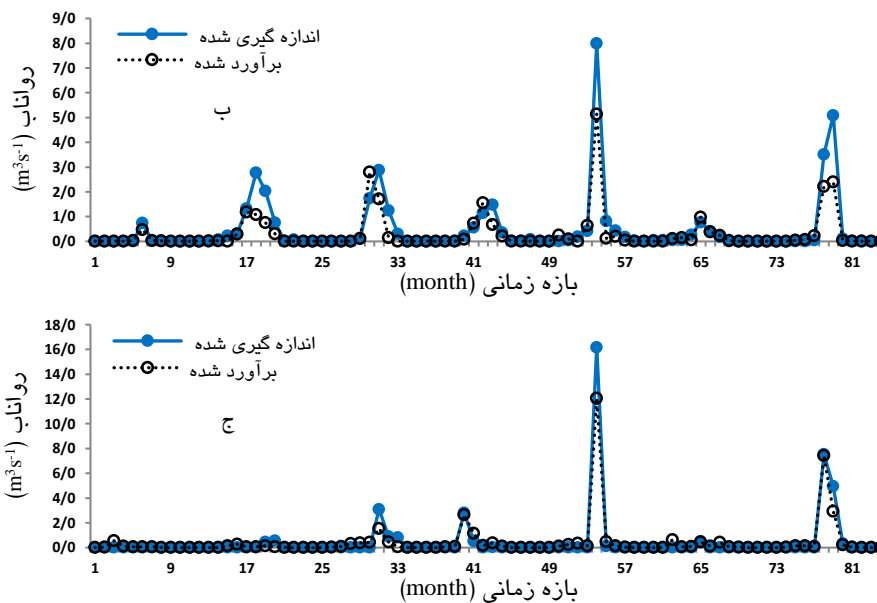
قیاس با نتایج تحقیق حاضر ضعیفتر است؛ با اینحال در مطالعه جدیدی که در همین زمینه صورت پذیرفته است مقادیر مرزی مناسب برای معیارهای مذکور به ترتیب ۰/۷۵ و ۱/۵ معرفی شده است، با اینحال ایشان مقادیر مذکور را مطلق ندانسته و تابعی از منطقه مطالعاتی می‌دانند (عباسپور و همکاران ۲۰۱۵).

هیدرولوژیک و شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با انتقال آلاینده‌ها پیشنهاد شده است (موریاسی و همکاران ۲۰۰۷). اگرچه در مطالعه مشابهی مقادیر ۰/۲۳ و ۰/۷۸ به ترتیب برای معیارهای *P-factor* و *R-factor* در مرحله واسنجی مدل بر اساس داده‌های جریان آبراه‌های گزارش شده است (اخوان و همکاران ۲۰۱۰)؛ که در

جدول ۱- حساس‌ترین پارامترهای مدل SWAT در مرحله واسنجی بر اساس دبی رواناب در منطقه مورد مطالعه.

پارامتر	مفهوم	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	t-value	p-value
TRNSRCH	تلفات انتقال آبراه‌های	۰/۳۲	۰/۵۷	۱۹/۹۲	۰
CN <sub>2</sub>	شماره منحنی نفوذ برای شرایط اولیه رطوبت	۰/۲۱	۰/۴۲	۱۸/۳۱	۰
CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر کانال (mmhr <sup>-1</sup> )	۳۵	۴۷	۸/۲۴	۰
ALPHA_BF	ثابت پسروری جریان پایه	۰/۳	۰/۳۹	۳/۰۲	۰
CH_N2	ضریب زبری مانینگ در کانال	۰/۱۹	۰/۲۲	۱/۶۳	۰/۱
GW_REVAP	ضریب ریو پ	۰/۰۳	۰/۰۴	۱/۵	۰/۱۳
SMFMN	مولفه ذوب برف برای تاریخ ۲۱ دسامبر	۰/۲۱	۲/۴۷	۱/۲۱	۰/۲۳
SMTMP	درجه حرارت آستانه برای ذوب برف (°C)	-۴/۲۱	-۲/۱۶	۱/۱۶	۰/۲۵
EPCO	ضریب جبران کننده جذب رو به بالای آب توسط گیاه	۰/۷	۰/۸۱	۰/۹۳	۰/۳۵
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع (mmhr <sup>-1</sup> )	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۹	۰/۳۷
GW_DELAY	زمان تاخیر برای تغذیه آکیفر (day)	۴۷۱	۴۸۴	۰/۵۴	۰/۴۲
RCHRG_DP	ضریب نفوذ عمقی آکیفر	۰/۳	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۴۴
SMFMX	مولفه ذوب برف برای تاریخ ۲۱ ژوئن	۴/۸۷	۹/۴۸	۰/۴۵	۰/۶۵
SOL_BD	وزن مخصوص ظاهری خاک (grcm <sup>-3</sup> )	۰/۹۱	۱/۳۴	۰/۴۲	۰/۶۷
SFTMP	درجه حرارت مرزی برای تفکیک باران و برف	۰/۲۷	۳/۴۲	۰/۳۹	۰/۷
ESCO	ضریب جبران کننده تبخیر از سطح خاک	۰/۷۲	۰/۸۹	۰/۳۵	۰/۷۳
SOL_AWC	آب قابل دسترس	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۲	۰/۸۴
SURLAG	ضریب تاخیر رواناب سطحی	۱	۷	۰/۱۸	۰/۸۵





شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب در سه ایستگاه هیدرومتری اندراب (الف)، خرو مجموع (ب) و حسین آباد (ج) در قیاس با مقادیر شبیه‌سازی شده به کمک مدل SWAT در مرحله واسنجی.

هیدرومتری اندراب و خرو مجموع دو مخزن تغذیه مصنوعی آب احداث شده که قطعا بر رژیم طبیعی جریان تاثیر گذار بوده است (اخوان و همکاران ۲۰۱۰، عباسپور و همکاران ۲۰۱۵). مورد اخیر را می‌توان در توجیه عدم برآورد مناسب مدل از دبی‌های اوج هیدروگراف موثر دانست زیرا که سیستم شبیه‌ساز با یک تاخیر زمانی روبرو می‌گردد. یکی دیگر از دلایل عدم قطعیت به شبیه‌سازی ذوب برف در ساختار مدل SWAT باز می‌گردد که در سرچشمه رودخانه‌های بار و خرو مجموع که خصوصا در ارتفاعات واقع شده‌اند تاثیر خود را بیشتر نشان داده است (فونتاین و همکاران ۲۰۰۲).

در تحلیل نتایج عدم قطعیت مدل SWAT در ایستگاه‌های اندراب و خرو مجموع می‌توان دلایل مختلفی را محتمل دانست. ایستگاه‌های مذکور در ارتفاعات شمال شرقی منطقه مورد مطالعه قرار دارند و تغییرات شدید ارتفاعی این قسمت از حوضه با تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود به‌منظور شبیه‌سازی دقیق بارندگی همخوانی ندارد. سناریوهای مدیریتی که در سطح حوضه‌های آبریز انجام می‌شود، اگرچه به مدیریت بهتر منابع آب کمک می‌نماید، اما در بلند مدت بر هیدرولوژی منطقه اثرگذار خواهد بود و لذا شبیه‌سازی طبیعی حوضه را با مشکل روبرو خواهد نمود. در منطقه مورد مطالعه و در بالادست ایستگاه‌های

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT در پیش‌بینی دبی رواناب در مرحله واسنجی.

NS	R <sup>2</sup>	R-factor	p-factor	ایستگاه هیدرومتری
۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۳۵	۰/۴۸	اندراب
۰/۷۷	۰/۸۷	۰/۲۷	۰/۴۶	خرو مجموع
۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۶۸	۰/۳۷	حسین‌آباد

با عملکرد بهتری همراه بوده است (عباسپور و همکاران ۲۰۰۷)، زیرا که جریان در مناطق خشک و نیمه‌خشک در اکثر مواقع اندک بوده و اصولا رژیم جریان گسسته

بررسی مطالعات نشان دهنده آن است که مدل-سازی دبی رواناب به کمک مدل SWAT در مناطق مرطوب در قیاس با مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولا

کمتر زیرحوضه‌های تعریف شده (۲۲ زیرحوضه)، عدم ورود چشمه‌ها به‌عنوان یکی از منابع اصلی تاثیرگذار بر روی جریان پایه آبراهه‌ای و عدم تعریف فایل‌های مدیریت گیاهی در مدل SWAT (با تنظیمات ساختاری مشابه مدل در هر دو مطالعه) اشاره نمود.

#### شبیه‌سازی رواناب در مرحله اعتبارسنجی

پس از اتمام مراحل تحلیل حساسیت و واسنجی مدل، با حفظ مقادیر پارامترهای مدل، توانایی مدل SWAT در پیش‌بینی دبی رواناب در بازه زمانی مستقلی از مرحله واسنجی (۸۹-۱۳۸۶) بررسی شد. نتایج مربوط به معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در مرحله اعتبارسنجی در جدول ۳ آورده شده‌اند.

است (مشابه آنچه در هر سه ایستگاه مورد استفاده در این تحقیق رخ داده است) و تنها برای بارش‌های با مقادیر زیاد، جریان رواناب به‌صورت پیوسته برقرار می‌شود (علیزاده و همکاران ۱۳۹۲). با اینحال در هر سه ایستگاه، به‌خصوص در ایستگاه حسین‌آباد، با آنکه در بسیاری از زمان‌ها مقادیر ثبت شده رواناب اندک بوده است، نتایج شبیه‌سازی رواناب باز هم مناسب ارزیابی شده است. در تحقیقی مشابه بر روی حوضه آبریز نیشابور از ایستگاه‌های هیدرومتری اندراب و حسین‌آباد به منظور واسنجی مدل SWAT استفاده شده و مقادیر ضرایب  $NS$  و  $R^2$  در مرحله واسنجی مدل در ایستگاه اندراب به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۳۱ گزارش شده است (شفیعی و همکاران ۱۳۹۲). از مهمترین دلایل توجیه نتایج ضعیف در تحقیق ایشان می‌توان به تعداد

جدول ۳- مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT در پیش‌بینی دبی رواناب در مرحله اعتبارسنجی.

ایستگاه هیدرومتری	$p$ -factor	$R$ -factor	$R^2$	$NS$
اندراب	۰/۳۶	۰/۴	۰/۹۴	۰/۹۲
خرو مجموع	۰/۴۲	۰/۶۱	۰/۷۴	۰/۶۶
حسین‌آباد	۰/۴۲	۰/۶۳	۰/۷۱	۰/۷۱

به نسبتا خشکسالی) اتفاق افتاده است (مؤذن‌زاده و همکاران ۱۳۹۱). نتایج یک تحقیق بر روی حوضه آبریز تور واقع در شمال شرقی کشور سوئیس منجر به بروز مقادیر ۰/۹۱ و ۱ به ترتیب برای معیارهای  $P$ -factor و  $R$ -factor در مرحله واسنجی و مقادیر ۰/۸۹ و ۰/۹۵ در مرحله اعتبارسنجی شده است (عباسپور و همکاران ۲۰۰۷). ایشان کیفیت مناسب داده‌های اندازه‌گیری شده و تبدیل قسمت عمده‌ای از بارندگی به رواناب و در نتیجه کمرنگ‌تر شدن عواملی چون تغذیه آب زیرزمینی و اندرکنش میان رودخانه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی را از مهمترین دلایل در کاهش عدم قطعیت مدل خود برشمرده‌اند.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی رواناب به کمک مدل واسنجی شده شده SWAT در سه ایستگاه هیدرومتری

مقایسه نتایج جداول ۲ و ۳ حکایت از عملکرد بهتر مدل در مرحله واسنجی در قیاس با مرحله اعتبارسنجی دارد که با توجه به مستقل بودن بازه زمانی این دو مرحله تا حدودی نیز انتظار آن می‌رفت. همچنین می‌توان تفاوت ماهوی سال‌های شرکت دهنده در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از نقطه نظر شرایط اقلیمی را نیز موثر دانست. نتایج بخشی از یک تحقیق بر روی حوضه آبریز نیشابور نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات کلاس‌های خشکسالی (تبدیل حالت نرمال به خشکسالی بسیار شدید) یا ترسالی (نرمال به ترسالی شدید) بر اساس شاخص  $SPI$  شش یا نه ماهه عمدتاً در حد فاصل اواخر سال ۸۶ تا اواخر سال ۸۸ رخ داده، درحالیکه در سال‌های پیش از آن کمترین تغییرات کلاس‌های خشکسالی (نرمال به نسبتاً ترسالی و نرمال

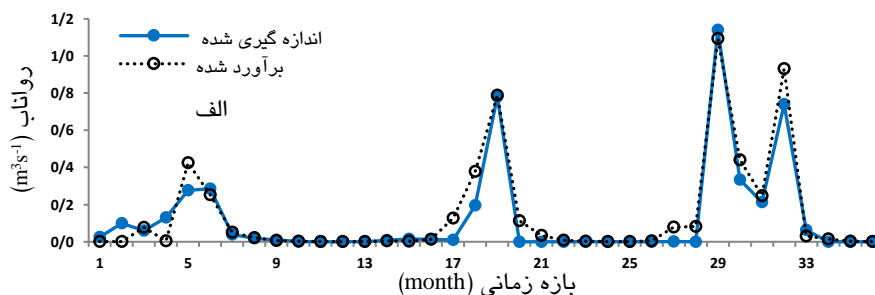


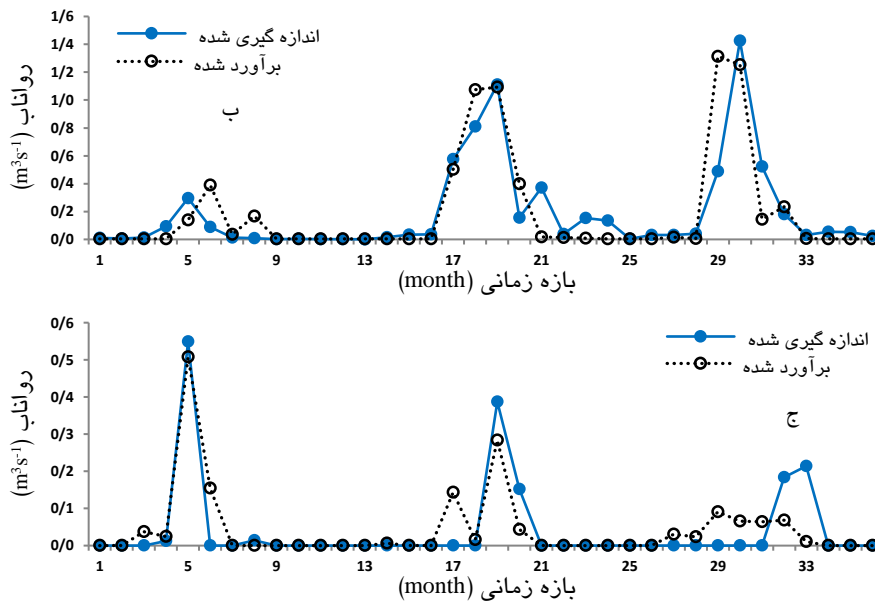
تمام سال‌های مورد مطالعه است، اگرچه که شدت این کم‌برآورد در ایستگاه خرو مجموع به مراتب بیشتر از دو ایستگاه دیگر است.

مجموع مقادیر دبی رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده در ایستگاه اندراب و در کل دوره اعتبارسنجی به- ترتیب ۴/۴۶ و ۵/۲۴ متر مکعب به‌دست آمده‌اند که باز هم نشان دهنده عملکرد متفاوت مدل از نقطه نظر برآورد مجموع مقادیر دبی رواناب در مرحله واسنجی (کم‌برآورد ۸ درصدی) و اعتبارسنجی (بیش‌برآورد ۱۷ درصدی) است. شاید دلیل این موضوع را بتوان اینگونه توجیه نمود، از آنجا که ایستگاه اندراب از نقطه نظر رقوم ارتفاعی در مناطق کوهستانی منطقه مورد مطالعه واقع شده، بارش‌های به صورت برف می‌تواند نقش مهمی در تولید رواناب در این ایستگاه داشته باشد. از طرف دیگر تعداد ماه‌های سرد (فصل زمستان) که احتمال ریزش بارش به صورت برف در آنها بیشتر است، در دوره واسنجی مدل (۱۸ ماه) در قیاس با دوره اعتبارسنجی مدل (۹ ماه) بیشتر بوده است. از آنجا که مدل SWAT فرآیند ذوب برف را نمی‌تواند به خوبی شبیه‌سازی نماید؛ امکان تعریف توزیع مکانی برای پارامترهای برف وجود نداشته و روش شماره منحنی نفوذ هم در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف عملکرد مناسبی ندارد (فونتاین و همکاران ۲۰۰۲)؛ احتمال آنکه مقادیر دبی رواناب اندازه‌گیری شده در مرحله واسنجی در قیاس با مرحله اعتبارسنجی کم-برآورد بیشتری شده باشد، زیادتر است.

منتخب و در مرحله اعتبارسنجی در شکل ۳ نشان داده شده است. بررسی نتایج شبیه‌سازی رواناب در ۳۶ ماه مورد بررسی در دوره اعتبارسنجی حکایت از آن دارد که در ایستگاه اندراب در ۱۰ ماه (حدود ۲۸ درصد از ماه‌ها)، در ایستگاه خرومجموع در ۲۴ ماه (حدود ۶۷ درصد از ماه‌ها) و در ایستگاه حسین‌آباد در ۶ ماه (حدود ۱۷ درصد از ماه‌ها) میزان رواناب کم‌برآورد شده است. اهمیت کم‌برآوردی مقادیر رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری از آن جهت است که می‌تواند منجر به تخریب ناشی از عدم کنترل رواناب گردد.

در ایستگاه اندراب و در دوره واسنجی مدل، متوسط مقادیر دبی رواناب اندازه‌گیری شده در حدود ۰/۴۲ متر مکعب در ثانیه بوده است. از میان تمام تعداد ماه‌های دوره شبیه‌سازی در این ایستگاه (۷۱ ماه) تنها در ۱۳ ماه مقادیر دبی رواناب اندازه‌گیری شده از مقدار متوسط مذکور بالاتر بوده است. مدل در ۸ ماه از ۱۳ ماه مذکور نیز مقادیر دبی رواناب را کم‌برآورد نموده است. در مجموع این ۸ ماه، مقادیر دبی رواناب در حدود ۴۳۷ درصد کم‌برآورد شده است. این موضوع نشان دهنده آن است که مدل SWAT بطور کلی در برآورد مقادیر بالاتر از متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب، در این ایستگاه با کم‌برآورد همراه بوده است. در مرحله واسنجی مقادیر درصد اریب در ایستگاه‌های اندراب، خرو مجموع و حسین‌آباد به ترتیب ۸-، ۳۴- و ۷- درصد به‌دست آمده که بیانگر کم‌برآورد کلی در





شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب در سه ایستگاه هیدرومتری اندراب (الف)، خرو مجموع (ب) و حسین آباد (ج) در قیاس با مقادیر شبیه‌سازی شده به کمک مدل SWAT در مرحله اعتبارسنجی.

مقادیر دبی رواناب در مرحله اعتبارسنجی مدل در همین ایستگاه عمدتاً برای دبی‌های کمتر از ۰/۱۳ متر مکعب در ثانیه (کمی بیشتر از متوسط مقادیر دبی رواناب اندازه‌گیری شده) رخ داده است. ضریب تعیین میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب در این ایستگاه ۰/۹۴ و ۰/۸۵ به ترتیب برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل به دست آمد.

در ایستگاه خرومجموع مجموع مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب در مرحله واسنجی به ترتیب ۳۹/۵ و ۲۶/۰۹ متر مکعب در ثانیه به دست آمد که حکایت از کم‌برآورد نسبتاً بالایی (حدود ۳۴ درصدی) در این ایستگاه داشت. مقادیر مذکور در همین ایستگاه و در مرحله اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۶/۸۷ و ۶/۸۹ متر مکعب در ثانیه به دست آمدند که نشان دهنده شبیه‌سازی بسیار خوب کل رواناب در این ایستگاه بود. شاید دلیل کم‌برآورد نسبتاً محسوس در این ایستگاه (در قیاس با ایستگاه اندراب) و در مرحله واسنجی را بتوان اینگونه توجیه نمود که در ایستگاه مذکور متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب در حدود ۰/۴۷ متر مکعب در ثانیه است و در ۱۶ ماه از کل دوره واسنجی

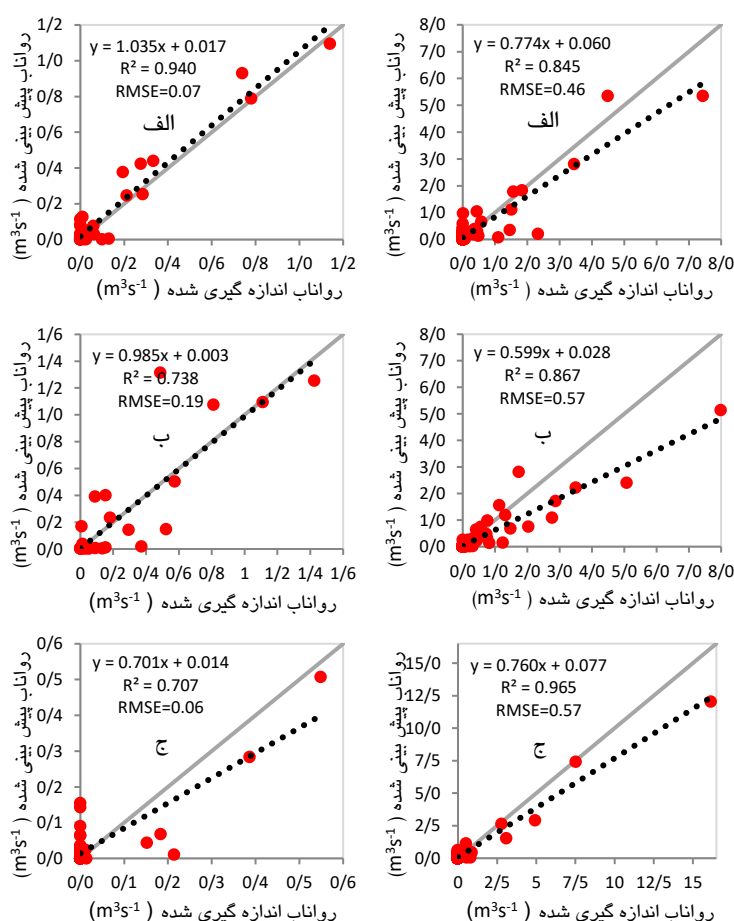
همچنین در ایستگاه اندراب متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب در مرحله واسنجی مدل (۰/۳۸۵ متر مکعب در ثانیه) بیشتر از مقدار متناظر آن در مرحله اعتبارسنجی مدل (۰/۱۴۶ متر مکعب در ثانیه) بوده است که دلیل آن را احتمالاً می‌توان به واسطه تعداد بیشتر ماه‌های سرد، با احتمال وقوع مقادیر بالاتر رواناب دانست (گرین و گرینسون ۲۰۰۸). همچنین عامل مهم دیگر در این رابطه مقدار بیشتر متوسط بارندگی در مرحله واسنجی مدل (۱۹/۹ میلی‌متر در ماه) در قیاس با مقدار متناظر آن در مرحله اعتبارسنجی مدل (۱۶/۱۷ میلی‌متر در ماه) می‌باشد.

شکل ۴ که نشان دهنده مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده دبی رواناب در هر سه ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه است (در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی)، شاید بتواند کم‌برآورد یا بیش برآورد-های مدل SWAT را بهتر نمایش دهد. شکل ۴-الف (مرحله واسنجی) حکایت از آن دارد که در ایستگاه اندراب عموماً مقادیری از رواناب بیش‌برآورد شده‌اند که مقدار اندازه‌گیری شده آنها نزدیک به صفر بوده است. همچنین نتایج بیانگر آن است که کم‌برآوردی

تحقیق حاضر دارد (فیکلین و همکاران ۲۰۰۹). ذکر این نکته نیز ضروری است که تعداد اندک ایستگاه‌های باران‌سنجی در ارتفاعات منطقه مورد مطالعه نیز خود مزید بر علت شده تا احتمالاً تخمین مقادیر بارندگی و به‌تبع آن میزان رواناب در هر دو ایستگاه مذکور از عوامل اصلی خطاهای برآورد محسوب گردد.

در ایستگاه حسین‌آباد مجموع مقادیر دبی رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۳۸/۷۴ و ۳۵/۹۴ و در مرحله اعتبارسنجی به‌ترتیب ۱/۵۱ و ۱/۵۷ متر مکعب در ثانیه به‌دست آمدند. از مهمترین دلایل برآورد نسبتاً مناسب مدل در این ایستگاه می‌توان به وقوع تعداد زیاد مقادیر دبی‌های اندک اندازه‌گیری شده در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی اشاره نمود. لازم به توضیح است که مقادیر بیشتر رواناب در مرحله واسنجی نسبت به اعتبارسنجی، به دلیل تک رخداد‌های رواناب با مقادیر نسبتاً بالا و نه تعدد این رخداد‌های رواناب بوده است. ضریب تعیین میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب در ایستگاه حسین‌آباد به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۷۱ در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به دست آمده است. شکل ۴-ج نشان دهنده کم‌برآورد نقاط اوج هیدروگراف (مقادیر بیشتر از ۳ متر مکعب در ثانیه) در مرحله واسنجی است درحالی‌که مدل در برآورد مقادیر دبی‌های کمتر از ۲ متر مکعب در ثانیه عملکرد خوبی داشته است. کم‌برآورد نقاط اوج هیدروگراف در این ایستگاه در مرحله اعتبارسنجی مدل نیز مشاهده می‌شود. این در حالی است که بیشتر مقادیر اندک رواناب در این ایستگاه با بیش‌برآورد همراه بوده است، اگرچه که مقدار بیش‌برآورد مذکور ناچیز و کمتر از ۰/۲ متر مکعب در ثانیه بوده است.

(۸۴ ماه) مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر از مقدار مذکور هستند، درحالی‌که تعداد ماه‌های مذکور در ایستگاه اندراب ۱۳ ماه بوده است. نکته مهمتر آنکه اختلاف این مقادیر با مقدار متوسط، بیشتر از مقدار متناظر در ایستگاه اندراب بوده است. در ایستگاه اندراب مجموع مقادیر دبی‌های بیشتر از مقدار متوسط (۰/۴۲ متر مکعب)، در حدود ۲۷/۲ متر مکعب در ثانیه بوده درحالی‌که همین مقدار در ایستگاه خرومجموع و در مرحله واسنجی در حدود ۳۵ متر مکعب در ثانیه است. لازم به توضیح است که در مرحله واسنجی در ایستگاه اندراب و خرومجموع به‌ترتیب در ۱۵ و ۲۱ ماه مقادیر گزارش شده برای دبی رواناب صفر بوده است. ضمناً مقایسه مقادیر دبی اوج هیدروگراف در مرحله واسنجی مدل در دو ایستگاه مذکور دلیل دیگری در توجیه عملکرد ضعیف‌تر مدل در ایستگاه خرومجموع است زیرا که مدل در برآورد نقاط اوج هیدروگراف ضعیف‌تر عمل می‌نماید. مقدار دبی اوج در طی ماه‌های دوره واسنجی و برای ایستگاه اندراب ۰/۱۲، ۱/۸۴، ۱/۵۸، ۷/۴۵، ۱/۵۱ و ۴/۴۹ متر مکعب در ثانیه و مقادیر متناظر آن برای ایستگاه خرومجموع ۰/۷۴، ۲/۸۸، ۱/۴۹، ۷/۹۹، ۰/۷۷ و ۵/۰۸ متر مکعب در ثانیه به‌ترتیب در طی سال-های ۱۳۸۰، ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۶ اندازه‌گیری شدند که نشان از مقادیر بالاتر دبی رواناب در ایستگاه خرومجموع است. مقادیر ضرایب تعیین میان دبی‌های رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده در ایستگاه خرومجموع در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۸۷ به‌دست آمدند. مقایسه نتایج مذکور با نتایج تحقیق مشابهی که کمترین مقادیر معیارهای  $R^2$  و  $RMSE$  را به‌ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۴ و بیشترین مقادیر آن را ۰/۹۹ و ۴۰/۶ گزارش کرده اند حکایت از مناسب بودن نتایج



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده دبی رواناب در قیاس با مقادیر متناظر برآورد شده در ایستگاه‌های اندراب (الف)، خرو مجموع (ب) و حسین آباد (ج) در مراحل واسنجی (شکل‌های سمت چپ) و اعتبارسنجی (شکل‌های سمت راست) مدل SWAT؛ خط ممتد: خط یک به یک و خط چین: خط رگرسیونی.

نمودند. جودی حمزه‌آباد و همکاران (۱۳۹۵) با اختصاص مقدار  $0.41$  برای شاخص  $RMSE$  در برآورد رواناب ماهانه رودخانه ليقوان چای، عملکرد مدل SWAT را مناسب ارزیابی نمودند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی رواناب در دو مقیاس روزانه و ماهانه در تحقیق ویلیسان و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که کم برآوردی مقادیر اوج هیدروگراف در مقیاس ماهانه به مراتب شدیدتر از مقیاس روزانه به‌وقوع پیوسته است که تایید کننده نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر و در هر سه ایستگاه می‌باشد.

#### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در بازه زمانی سال‌های ۸۹-۱۳۸۶،

در مطالعه مشابهی که به منظور شبیه‌سازی مقادیر رواناب در دو حوضه آبریز در کشور چین صورت پذیرفته است بهترین مقادیر ضریب نش-ساتکلیف به‌ترتیب  $0.78$  و  $0.85$  در مرحله واسنجی و  $0.78$  و  $0.52$  در مرحله اعتبارسنجی به‌دست آمده است. ایشان یکی از دلایل نتایج ضعیف‌تر مدل در خصوص در مرحله اعتبارسنجی را ضعف مدل در برآورد نقاط اوج هیدروگراف بیان نموده‌اند که با نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر همخوانی دارد (سان و همکاران ۲۰۱۶). ویلیسان و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی به‌منظور شبیه‌سازی رواناب در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه از مدل SWAT استفاده نموده و برای ضریب تعیین مقادیر  $0.82$  و  $0.73$  را گزارش

بهبود عملکرد مناسب مدل SWAT در مناطق خشک و نیمه خشک نقش مهمی داشته است. همچنین عدم قطعیت‌های ناشی از ساختار مفهومی مدل، واقع شدن ایستگاه‌های مذکور در ارتفاعات منطقه به همراه تعداد کم ایستگاه‌های باران‌سنجی در این مناطق و دخالت انسانی در برهم زدن رژیم جریان آبراه‌ای در سرشاخه‌های دو ایستگاه از سه ایستگاه مذکور، مهمترین دلایل عدم قطعیت در شبیه‌سازی رواناب شناخته شدند به نحوی که منجر به تغییر مقادیر معیار-های  $P$ -factor و  $R$ -factor به ترتیب در بازه ۰/۳۶ تا ۰/۴۲ و ۰/۴ تا ۰/۶۳ شدند.

در سه ایستگاه هیدرومتری واقع در حوضه آبریز نیشابور با مساحتی در حدود ۹۵۰۰ کیلومتر مربع به کار رفت. نتایج شبیه‌سازی با توجه به معیارهای ضریب‌نش-ساتکلیف و ضریب تعیین در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مناسب ارزیابی شد. مقادیر این دو ضریب به ترتیب در بازه ۰/۷۷ تا ۰/۹۲ و ۰/۸۵ تا ۰/۹۷ در مرحله واسنجی و ۰/۶۶ تا ۰/۹۲ و ۰/۷۱ تا ۰/۹۴ در مرحله اعتبارسنجی متغیر بود. با توجه به مقادیر نسبتاً اندک دبی رواناب در هر سه ایستگاه مذکور، شبیه‌سازی مناسب دبی رواناب بازگو کننده این نکته مهم بود که استفاده از فایل‌های مدیریت گیاهی در

#### منابع مورد استفاده

- Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H and Klove B, 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524: 733-752.
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist j and Srinivasan R, 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333: 413-430.
- Akhavan S, Abedi-Koupai J, Mousavi SF, Afyuni M, Eslamian SS and Abbaspour KC, 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139: 675-688.
- Alizadeh A, Izady A, Davary K, Ziaei AN, Akhavan S and Hamidi Z, 2013. Estimation of actual evapotranspiration at regional-annual scale using SWAT. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2(7): 243-258.
- Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, Abbaspour KC, White MJ, Srinivasan R, Santhi C, Harmel RD, van Griensven A, Van Liew MW, Kannan N and Jha MK, 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 55(4): 1491-1508.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS and Williams JR, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 73-89.
- Daggupati P, Yen H, White MJ, Srinivasan R, Arnold JG, Keitzer CS and Sowa SP, 2015. Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin. *Hydrological processes* 29(26): 5307-5320
- Ficklin DL, Luo Y, Luedeling E and Zhang M, 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 374: 16-29.
- Fontaine TA, Cruickshank TS, Arnold JG and Hotchkiss RH, 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology* 262: 209-223.
- Green CH and Griensven AV, 2008. Autocalibration in hydrologic modelling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds. *Environmental modelling and software* 23: 422-434.
- Gyamfi C, Ndambuki JM and Salim RW, 2016. Application of SWAT model to the Olifants basin: calibration, validation and uncertainty analysis. *Journal of Water Resource and Protection* 8: 397-410.
- Hamzeabad AJ, Khadkhodahosseini M, Akhavan S and Nozari H, 2016. Evaluation of SWAT and SVM models to simulate the runoff of Lighvanchay river. *Water and Soil Science* 26(4.1): 137-150.

- Khakbaz B, Bisher I, Kuolin H and Sorooshian S, 2012. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology* 418-419: 61-77.
- Li Z, Shao Q, Xu Z and Cai X, 2010. Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: A case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in northwest China. *Journal of Hydrology* 385: 76-83.
- Moazenzadeh R, Arshad S, Ghahraman B and Davari K, 2012. Drought monitoring in unirrigated lands based on the remote sensing technique. *Water and Irrigation Management* 2(2): 39-52.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Binger RL, Harmel RD and Veith T, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3): 885-900.
- Musau J, Sang J, Gathenya J, Luedeling E and Home P, 2014. SWAT model parameter calibration and uncertainty analysis using the HydroPSO R package in Nzoia basin, Kenya. *Journal of Sustainable Research in Engineering* 1(3): 17-29.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR and Williams JR, 2011. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406.
- Oeurng C, Sauvage S and Sanchez-Perez JM, 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.
- Raof M, Azizi Mobaser J and Salahshoor A, 2016. Estimating hydrological and hydrogeological parameters of watershed using SWAT model (case study: Balukhlu-chay basin). *Water and Soil Science* 26(4.2): 173-185.
- Shafiei M, Ansari H, Davari K and Ghahraman B, 2013. Calibration and uncertainty analysis of a semi-distributed model in a semi-arid region, case study: Nishabour watershed. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science* 17(64): 137-148.
- Shawul AA, Alamirew T and Dinka MO, 2013. Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, Southeastern Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences* 10: 13955- 13978.
- Sophocleous MA, 2005. Groundwater recharge and sustainability in the high plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal* 13(2): 351-365.
- Sun W, Wang Y, Cui X, Yu J, Zuo D and Xu Z, 2016. Physically-based distributed hydrological model calibration based on a short period of streamflow data: case studies in two Chinese basins. *Hydrology and Earth System Sciences* 192: 1-20.
- Vilaysane B, Takara K, Luo P, Akkharath I and Duan W, 2015. Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences* 28: 380-390.
- Wang X, Liang Z and Wang J, 2014. Simulation of runoff in Karst-influenced lianjiang watershed using the SWAT model. *Scientific Journal of Earth Science* 4(2): 85-92.
- Wu K and Johnston CA, 2007. Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes watershed: A case study with the SWAT model. *Journal of Hydrology* 337: 187-199.
- Yesuf HM, Assen M, Alamirew T and Melesse AM, 2015. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. *Catena* 127: 191-205.
- Yin I, Hu G, Huang J, Wen D, Dong J, Wang X and Li H, 2011. Groundwater-recharge estimation in the Ordos Plateau, China: Comparison of methods. *Hydrogeology Journal* 19: 1563-1575.