نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۹ شماره ۴صفحه‌های ۵۷ تا ۷۰ / سال ۱۳۹۸

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

روزبه موذن‌زاده*[۱]، بیژن قهرمان[۲]، صالح ارشد[۳]، کامران داوری[۲]

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*[۱] برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز نیشابور با مساحت ۹۵۰۰ کیلومتر مربع در حد فاصل سال‌های ۱۳۸٦ 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 سال‌های ۱۳۷٦ تا ۱۳۸٦ 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 آبراهه‌ای، 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 حسین آباد به‌ترتیب با استناد به مقادیر ۰/۸٤، ۰/۷۷ و ۰/۹۲ برای ضریب کارایی (نش- ساتکلیف) مناسب ارزیابی شد، اگرچه کم‌برآوردی نقاط اوج هیدروگراف به‌صورت نسبی مشاهده شد. مقادیر همین معیار برای دوره اعتبارسنجی نیز به‌ترتیب ۰/۹۲، ۰/٦٦ و ۰/۷۱ به‌دست آمد. ریشه میانگین مربعات خطا نیز در مرحله واسنجی در بازه ۰/٤٦ تا ۰/۵۷ متر مکعب در ثانیه و در مرحله اعتبارسنجی در بازه ۰/۰٦ تا ۰/۱۹ متر مکعب در ثانیه برای ایستگاه‌های مذکور متغیر بود. نتایج نشان داد که درنظر 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

1 Soil Water Assessment Tool

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

R Moazenzadeh[*1], B Ghahraman[2], S Arshad[3], K Davary[2]

Received: 09/17/2016 Accepted: 01/11/2020

[1]Assist. Prof., Dept. of Soil and Water Engineering, Faculty of Agric., Shahrood University of Technology, Iran

[2]Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

[3]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 km2 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 m3/s and 0.06 to 0.19 m3/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

شبیه‌سازی دقیق حوضه‌های آبریز نقش مهمی در فهم رفتار هیدرولوژیک حوضه دارد. دشواری در اندازه‌گیری مستقیم مؤلفه‌ها، تاثیرات متقابل مولفه‌های 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 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-

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 (۲۰۱٤) به‌منظور 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 (۲۰۱٤) بر اساس ۱٤ پارامتر حساس مدل *SWAT* اقدام به شبیه‌سازی رواناب نمودند که ضریب تعیین و ضریب نش- ساتکلیف در مرحله واسنجی مدل به‌ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۲ به‌دست آمدند. در تحقیق دیگری مبتنی بر واسنجی مدل بر اساس داده‌های رسوب در کشور اتیوپی، مقادیر شاخص‌های ضریب تعیین و ضریب نش- ساتکلیف به‌ترتیب در حدود ۰/۵۵ و ۰/۵۵ در مرحله واسنجی و ۰/۵۲ و ۰/۵۳ در مرحله اعتبارسنجی گزارش شدند (یوسف و همکاران ۲۰۱۵).

تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری و نحوه تکمیل فایل‌های مدیریت گیاهی نتایج شبیه‌سازی را از خود متاثر 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 ۱/٤۱ و ۲/۸ 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 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 درنظر گرفتن عامل مدیریت‌های گیاهی؛ در حوضه‌ای با کاربری اصلی کشاورزی؛ در حد فاصل سال‌های ۱۳۸٦ تا ۱۳۸۹ می‌باشد.

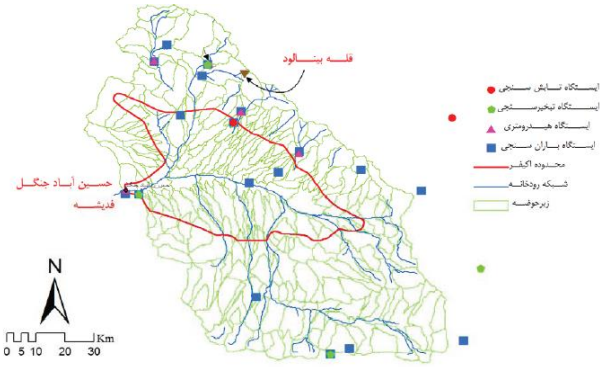
مواد و روش‌ها

حوضه آبریز نیشابور در شرق حوضه آبریز کویر مرکزی قرار دارد. وسعت این حوضه آبریز در حدود ۹۵۰۰ کیلومتر مربع است. حدود ٤۷ 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 کال‌شور است که عمده رواناب سطحی و سیلاب‌های دشت مذکور را زهکشی و در نهایت از محل روستای حسین‌آباد به خارج از حوضه تخلیه می‌گردد. در حوضه آبریز نیشابور ٦ ایستگاه هیدرومتری فعال وجود دارد، که ٤ 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 رقومی ارتفاعی، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی و داده‌های اقلیمی می‌باشند. مدل *SWAT* به‌منظور مدل‌سازی بهتر ممکن است یک حوضه آبریز را به چندین زیرحوضه و هر زیرحوضه را به چندین واحد واکنش هیدرولوژیک

1 Soil evaporation compensation coefficient
2 Surface run off lag coefficient
3 Available water capacity

(*HRU*[1]) 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 متاثر 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، ایستگاه‌های 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*[2] 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 ٤ قابل محاسبه‌اند (نیتسچ و همکاران ۲۰۱۱، خاکباز و همکاران ۲۰۱۲).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(Q_{m,i}-\bar{Q}_m)(Q_{s,i}-\bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{m,i}-\bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^{n}(Q_{s,i}-\bar{Q}_s)^2} \quad [۱]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[(Q_m-Q_s)_i]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{m,i}-\overline{Q_m})^2} \quad [۲]$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_m-Q_s)^2}{n}\right)^{0.5} \quad [۳]$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_s-Q_m)}{\sum_{i=1}^{n}Q_m} \times 100 \quad [٤]$$

در این روابط n تعداد مشاهدات، Q_m و Q_s به‌ترتیب مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده، $\overline{Q_m}$ و $\overline{Q_s}$ 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 شبیه‌سازی 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 ۸۹-۱۳۸۶صورت 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 ۲۰۱٤ و گامفی و همکاران ۲۰۱٦). 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 (*TRNSRCH*)[3] 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، یین و همکاران ۲۰۱۱). با این‌حال 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

1 Hydrologic response unit
2 SWAT Calibration and Uncertainty Programs

3 Fraction of transmission losses partitioned to the deep aquifer

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 ۰/۰۰٤٦ 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 ۰/٦ 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 نسبتا 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. رئوف 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[1] 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.

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 به خصوص 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 ۰/٤ و ۰/۵ گزارش شده که بر این اساس، نتایج مذکور در گروه رضایتبخش قرار می‌گیرند (گرین و گرینسون ۲۰۰۸).

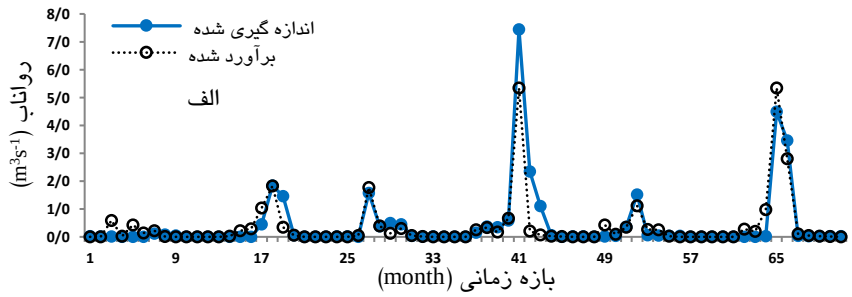
در تحقیق دیگری مقادیر بزرگتر از ۰/۵ برای ضریب *NS* در مقیاس ماهانه برای مطالعات

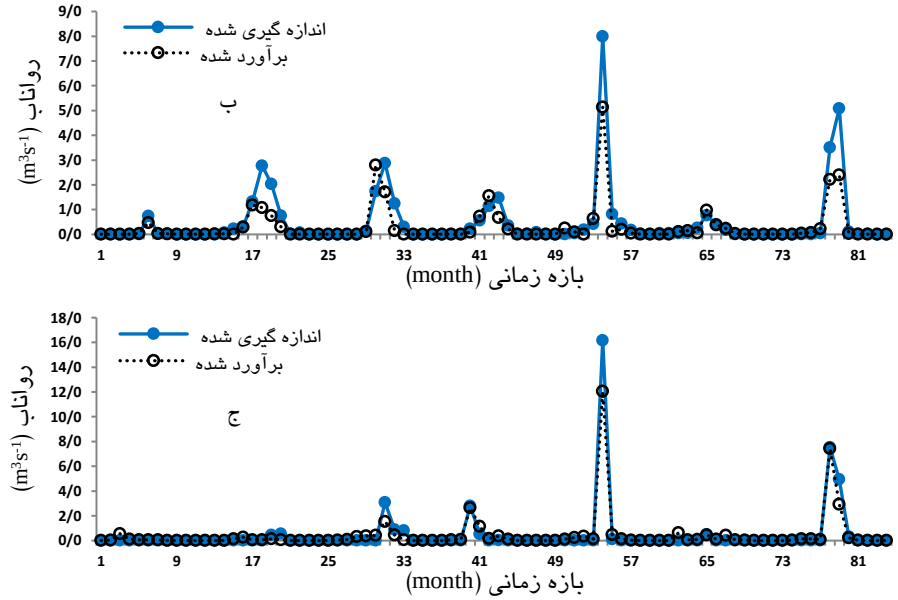
1 Warm up

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 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).

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_2	شماره منحنی نفوذ برای شرایط اولیه رطوبت	۰/۲۱	۰/۴۲	۱۸/۳۱	۰
CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر کانال ($mmhr^{-1}$)	۳۵	۴۷	۸/۲۴	۰
ALPHA_BF	ثابت پسروی 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 ریوپ	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 ($mmhr^{-1}$)	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 ($grcm^{-3}$)	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.

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 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).

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

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

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

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 می شود (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 به‌ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۳۱ گزارش شده است (شفیعی و همکاران ۱۳۹۲). از مهمترین دلایل توجیه نتایج ضعیف در تحقیق ایشان می‌توان به تعداد 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.

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	۰/۳٦	۰/٤	۰/۹٤	۰/۹۲
خرو مجموع	۰/٤۲	۰/٦۱	۰/۷٤	۰/٦٦
حسین‌آباد	۰/٤۲	۰/٦۳	۰/۷۱	۰/۷۱

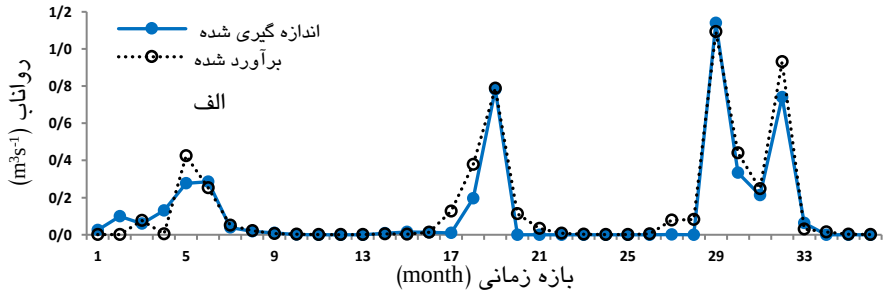
مقایسه نتایج جداول ۲ و ۳ حکایت از عملکرد بهتر مدل در مرحله واسنجی در قیاس با مرحله اعتبارسنجی دارد که با توجه به مستقل بودن بازه زمانی این دو مرحله تا حدودی نیز انتظار آن می‌رفت. همچنین می‌توان تفاوت ماهوی سال‌های شرکت دهنده در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از نقطه نظر شرایط اقلیمی را نیز موثر دانست. نتایج 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 عمدتا در حد فاصل اواخر سال ۸٦ تا اواخر سال ۸۸ رخ داده، درحالیکه در سال‌های پیش از آن کمترین تغییرات کلاس‌های خشکسالی (نرمال به نسبتا ترسالی و نرمال به نسبتا خشکسالی) اتفاق افتاده است (موذن‌زاده 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.

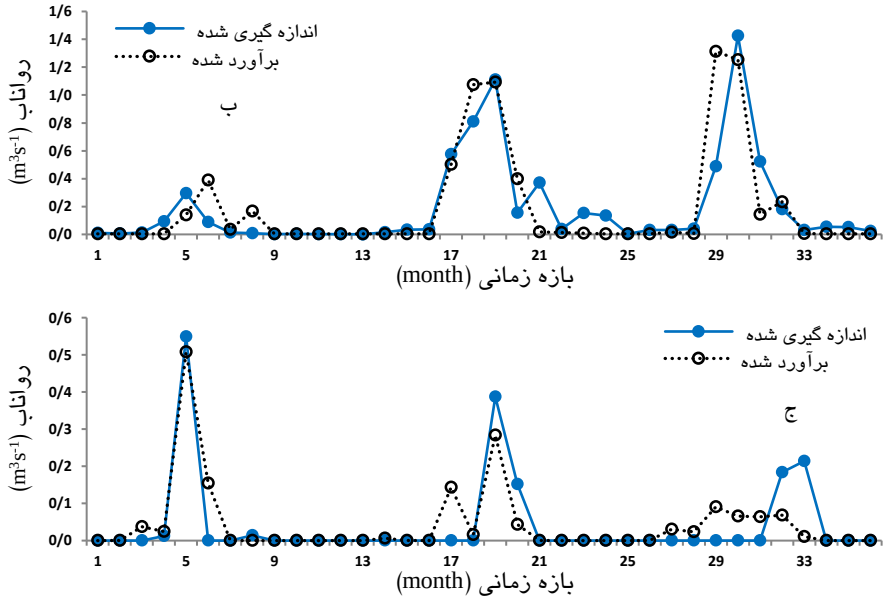
نتایج مربوط به شبیه‌سازی رواناب به کمک مدل واسنجی شده شده *SWAT* در سه ایستگاه هیدرومتری

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 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 به‌ترتیب 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 کم‌برآورد بیشتری شده باشد، زیادتر است.





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.

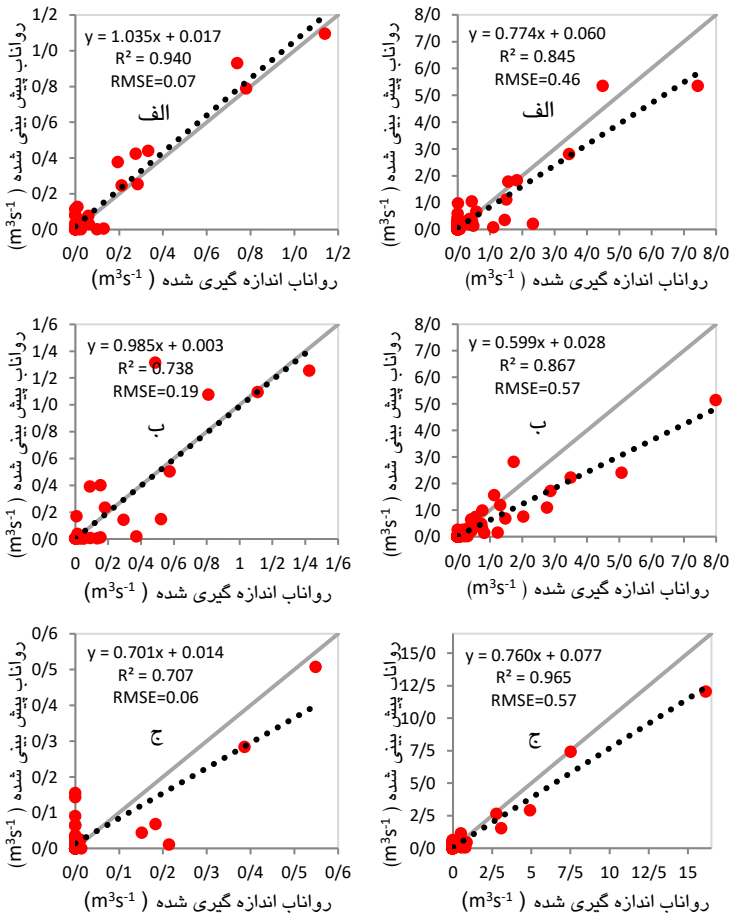
همچنین در ایستگاه اندراب متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب در مرحله واسنجی مدل (۰/۳۸۵ متر مکعب در ثانیه) بیشتر از مقدار متناظر آن در مرحله اعتبارسنجی مدل (۰/۱٤٦ متر مکعب در ثانیه) بوده است که دلیل آن را احتمالا می‌توان به واسطه تعداد بیشتر ماه‌های سرد، با احتمال وقوع مقادیر بالاتر رواناب دانست (گرین 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 (۱٦/۱۷ میلیمتر در ماه) می‌باشد.

شکل ٤ 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 ٤-الف (مرحله واسنجی) حکایت از آن دارد که در ایستگاه اندراب عموما مقادیری از رواناب بیش‌برآورد شده‌اند که مقدار اندازه‌گیری شده آنها نزدیک به صفر بوده است. همچنین نتایج بیانگر آن است که کم‌برآوردی مقادیر دبی رواناب در مرحله اعتبارسنجی مدل در همین ایستگاه عمدتا 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 ۰/۹٤ و ۰/۸۵ به‌ترتیب برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل به‌دست آمد.

در ایستگاه خرومجموع مجموع مقادیر اندازه-گیری و برآورد شده رواناب در مرحله واسنجی به-ترتیب ۳۹/۵ و ۲٦/۰۹ متر مکعب در ثانیه به‌دست آمد که حکایت از کم‌برآورد نسبتا بالایی (حدود ۳٤ درصدی) در این ایستگاه داشت. مقادیر مذکور در همین ایستگاه و در مرحله اعتبارسنجی مدل به‌ترتیب ٦/۸۷ و ٦/۸۹ متر مکعب در ثانیه به دست آمدند که نشان دهنده شبیه‌سازی بسیار خوب کل رواناب در این ایستگاه بود. شاید دلیل کم‌برآورد نسبتا 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 ۰/٤۷ متر مکعب در ثانیه است و در ۱٦ ماه از کل دوره واسنجی

(۸٤ 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 (۰/٤۲ 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. ضمنا 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، ۱/۸٤، ۱/۵۸، ۷/٤۵، ۱/۵۱ و ٤/٤۹ متر مکعب در ثانیه و مقادیر متناظر آن برای ایستگاه خرومجموع ۰/۷٤، ۲/۸۸، ۱/٤۹، ۷/۹۹، ۰/۷۷ و ۵/۰۸ متر مکعب در ثانیه به‌ترتیب در طی سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۲ تا ۱۳۸٦ 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 ۰/۷٤ و ۰/۸۷ به‌دست آمدند. مقایسه نتایج مذکور با نتایج تحقیق مشابهی که کمترین مقادیر معیارهای R^2 و $RMSE$ را به‌ترتیب ۰/٦۸ و ۰/٤ و بیشترین مقادیر آن را ۰/۹۹ و ٤۰/٦ گزارش کرده اند حکایت از مناسب بودن نتایج 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 احتمالا 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 ۳۸/۷٤ و ۳۵/۹٤ و در مرحله اعتبارسنجی به‌ترتیب ۱/۵۱ و ۱/۵۷ متر مکعب در ثانیه به‌دست آمدند. از مهمترین دلایل برآورد نسبتا 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 نسبتا بالا و نه تعدد این رخدادهای رواناب بوده است. ضریب تعیین میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب در ایستگاه حسین‌آباد به‌ترتیب ۰/۹٦ و ۰/۷۱ در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به دست آمده است. شکل ٤-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.



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.

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 ۰/۷۸ و ۰/۸۵ در مرحله واسنجی و ۰/۷۸ و ۰/۵۲ در مرحله اعتبارسنجی به‌دست آمده است. ایشان یکی از دلایل نتایج ضعیف‌تر مدل به 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). ویلایسان 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 ۰/۸۲ و ۰/۷۳ را گزارش نمودند. جودی حمزه‌آباد و همکاران (۱۳۹۵) با اختصاص مقدار ۰/۴۱ برای شاخص *RMSE* در برآورد رواناب ماهانه رودخانه لیقوان چای، عملکرد مدل *SWAT* را مناسب ارزیابی نمودند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی رواناب در دو مقیاس روزانه و ماهانه در تحقیق ویلایسان 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 سه ایستگاه هیدرومتری واقع در حوضه آبریز نیشابور با مساحتی در حدود ۹۵۰۰ کیلومتر مربع به کار رفت. نتایج شبیه‌سازی با توجه به معیارهای ضریب نش- 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 ۰/٦٦ تا ۰/۹۲ و ۰/۷۱ تا ۰/۹٤ در مرحله اعتبارسنجی متغیر بود. با توجه به مقادیر نسبتا 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 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 آبراهه‌ای در سرشاخه‌های دو ایستگاه از سه ایستگاه مذکور، مهمترین دلایل عدم قطعیت در شبیه‌سازی رواناب شناخته شدند به‌نحوی که منجر به تغییر مقادیر معیار- های *P-factor* و *R-factor* به‌ترتیب در بازه ۰/۳٦ تا ۰/٤۲ و ۰/٤ تا ۰/٦۳ شدند.

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.

Raoof 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.