



Improving Watershed Modeling with Aggregation of the Main Hydrological Components in SWAT Model

R. Moazenzadeh¹, B. Ghahraman^{2*}, S. Arshad³ and K. Davary⁴

Abstract

More accurate knowledge of the water balance components in the watersheds will help a better understanding of hydrological behavior of the watersheds. In this study, the effect of two components, river discharges and actual evapotranspiration, were investigated in modeling of the Neyshabour watershed (9500 km²) using SWAT (Soil Water Assessment Tool). SWAT was calibrated first with the river discharges values and then with the combination of river discharges and actual evapotranspiration obtained based on remote sensing. The model performance was validated in predicting these components for a separate time period. The sensitivity analysis results showed that parameters such as available water content, soil evaporation compensation coefficient, and plant uptake compensation factor were most sensitive to changes of input model parameters. The results showed as well that in three hydrometric stations of Andarab, Kharve Majmoo, and Hossein Abad the root mean square error for river discharges predictions on the validation period varied between 0.06 to 0.19 m³/s and 0.02 to 0.09 m³/s respectively for the models calibrated based on river discharges and combination of river discharges and actual evapotranspiration. The use of both mentioned components, i.e. river discharge and actual evapotranspiration, was prominently affected the predicting actual evapotranspiration. The root mean square error for actual evapotranspiration prediction in three selected subbasins varied between 10 to 18.52 mm/month and 6.84 to 7.82 mm/month for the models calibrated based on river discharges and combination of river discharges and actual evapotranspiration, respectively. Therefore, simultaneous use of river discharge and actual evapotranspiration improved the accuracy of modeling.

Keywords: Actual evapotranspiration, Hydrometric station, Remote sensing, River discharge, Sensitivity analysis.

Received: March 8, 2016

Accepted: September 3, 2016

بهبود مدل‌سازی حوضه آبریز از طریق تجمیع مؤلفه‌های اصلی هیدرولوژیک در مدل SWAT

روزبه موذن‌زاده^۱، بیژن قهرمان^{۲*}، صالح ارشد^۳
و کامران داوری^۴

چکیده

آگاهی دقیق‌تر از مؤلفه‌های بیلان آب در سطح حوضه‌های آبریز، به فهم بهتر رفتار هیدرولوژیک حوضه‌ها کمک شایانی خواهد نمود. در این تحقیق تأثیر کاربرد دو مؤلفه رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در مدل‌سازی حوضه آبریز نیشابور (۹۵۰۰ کیلومتر مربع) در قالب مدل SWAT (Soil Water Assessment Tool) مورد بررسی قرار گرفت. مدل یک‌بار به کمک داده‌های رواناب و بار دیگر به صورت ترکیبی و با استفاده از داده‌های رواناب و تبخیر- تعرق واقعی به‌دست آمده از تکنیک سنجش از دور، واسنجی و رفتار آن در برآورد همین دو مؤلفه در دوره زمانی جداگانه‌ای اعتبارسنجی شد. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که پارامترهایی نظیر آب قابل دسترس، ضریب جبران‌کننده تبخیر از سطح خاک و ضریب جبران‌کننده جذب رو به بالای آب توسط گیاه بیشترین حساسیت را به تغییرات ورودی مدل از خود نشان دادند. نتایج نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد رواناب در مرحله اعتبارسنجی و در سه ایستگاه آب‌سنجی اندراب، خرو مجموع و حسین‌آباد برای مدل واسنجی شده بر اساس رواناب در بازه ۰/۰۶ تا ۰/۱۹ و برای مدل ترکیبی در بازه ۰/۰۲ تا ۰/۰۹ متر مکعب در ثانیه متغیر بود. نقش استفاده از هر دو مؤلفه رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در پیش‌بینی تبخیر- تعرق واقعی برجسته‌تر بود. ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد تبخیر- تعرق واقعی در سه زیرحوضه منتخب و برای مدل واسنجی شده بر اساس رواناب در بازه ۱۰ تا ۱۸/۵۲ و برای مدل واسنجی شده ترکیبی در بازه ۶/۸۴ تا ۷/۸۲ میلی‌متر در ماه متغیر بود. بنابراین استفاده همزمان از دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی موجب افزایش دقت مدل‌سازی گردید.

کلمات کلیدی: آنالیز حساسیت، ایستگاه آب‌سنجی، تبخیر- تعرق واقعی، سنجش از دور، دبی رواناب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۶/۱۳

1- Assistant Professor, Department of Soil and Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Iran. Email: romo_sci@shahroodut.ac.ir

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. Email: bijangh@um.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Guilan University, Iran.

4- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

*- Corresponding Author

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

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

۳- استادیار گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*- نویسنده مسئول

آگاهی دقیق از رفتار هیدرولوژیک حوضه‌های آبریز می‌تواند به شبیه‌سازی بهتر این محیط به‌منظور کنترل مؤلفه‌های اصلی بیلان آب کمک شایانی نماید. عواملی نظیر دشواری در اندازه‌گیری مستقیم مؤلفه‌ها، تأثیرات متقابل و گاه تأثیرگذار مؤلفه‌های مذکور بر یکدیگر و تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات هیدرولوژیک، محققین را ناچار به استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک برای شبیه‌سازی حوضه آبریز نموده است. با استفاده از این مدل‌ها امکان تعریف و اعمال سناریوهای مختلف در زمینه مدیریت منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز وجود داشته و این فرصت را برای مدیران بخش آب فراهم می‌آورد تا با تکیه بر نتایج حاصل از این تحقیقات، تصمیمات مدیریتی صحیح را در سطح حوضه اتخاذ و اعمال نمایند.

یکی از این مدل‌ها، مدل هیدرولوژیکی SWAT است که اخیراً مورد توجه متخصصین قرار گرفته است. این مدل یک مدل نیمه توزیعی است که با هدف شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز، در مقیاس روزانه عمل کرده و به‌منظور بررسی تأثیر راهکارهای مدیریتی متفاوت بر روی جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌های آبریز وسیع و متفاوت از نقطه‌نظر خاک و کاربری اراضی، بسط و توسعه یافته است (Arnold et al., 1998). این مدل مبنای فیزیکی داشته و مدل‌سازی حوضه آبریز از طریق تقسیم حوضه به زیرحوضه‌ها، و زیرحوضه‌ها به واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRU) میسر می‌گردد. دشواری در اندازه‌گیری برخی از متغیرهای ورودی به مدل و آگاهی از ماهیت واقعی متغیرهای مذکور، تعداد زیاد پارامترهای مدل، ساده‌سازی‌های اعمال شده در ساختار مدل، مکانیزم‌های طبیعی موجود در سطح حوضه آبریز که در ساختار مدل اعمال نشده، تغییرات مکانی و خطاهای اندازه‌گیری 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 مدل‌سازی شده است. با توجه به موارد مذکور، در بیشتر مواقع و قبل از به‌کارگیری مدل SWAT، این مدل بایستی واسنجی شود.

واسنجی مدل SWAT به‌صورت متداول با استفاده از داده‌های دبی رواناب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی صورت می‌پذیرد. Eckhardt and Arnold (2001) از این مدل برای برآورد رواناب در حوضه‌ای به مساحت ۸۱ کیلومتر مربع در کشور آلمان استفاده نمودند. واسنجی مدل SWAT بر اساس داده‌های رواناب اندازه‌گیری شده طی ۳ سال (۹۳-۱۹۹۱) و در مقیاس روزانه صورت پذیرفت و

حکایت از کم‌برآورد ۴ درصدی متوسط رواناب سالانه شبیه‌سازی داشت. Tolson and Shoemaker (2007) از معادله پرستلی-تیلور و روش شماره منحنی به ترتیب برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق پتانسیل و رواناب سطحی در واسنجی مدل SWAT بر اساس داده‌های رواناب تک ایستگاه آب‌سنجی در مقیاس روزانه استفاده نمودند. Wu and Johnston (2007) از مدل SWAT برای برآورد رواناب حوضه آبریزی به مساحت ۹۰۱ کیلومتر مربع در کشور آمریکا (HRU ۱۲۴) استفاده نموده و نتایج برآورد رواناب در شرایط خشک را بهتر از شرایط نرمال معرفی نمودند. Abbaspour et al. (2007) به منظور شبیه‌سازی بار رسوب در حوضه آبریز رودخانه تور به مساحت ۱۷۰۰ کیلومتر مربع در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰، از مدل SWAT استفاده و آن را با استفاده از داده‌های رواناب سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۵ واسنجی نمودند. در این تحقیق مقادیر P-factor و R-factor برای مقادیر شبیه‌سازی شده دبی رواناب در مرحله واسنجی به ترتیب ۹۱ درصد و ۱ و در مرحله اعتبارسنجی ۸۹ درصد و ۰/۹۵ به‌دست آمد، که از نظر ایشان نتیجه عالی بوده است. Kannan et al. (2007) به‌منظور شبیه‌سازی وضعیت بیلان آب در حد فاصل سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ در حوضه‌ای به مساحت ۱۴۲ هکتار در کشور بریتانیا از مدل SWAT واسنجی شده در بازه ۲۴ اکتبر ۱۹۹۹ تا ۳۱ دسامبر ۱۹۹۹ در مقیاس زمانی روزانه استفاده نمودند و نتایج ایشان بیانگر سهم ۹/۳۸ درصدی رواناب از بارندگی بود. Milewski et al. (2009) از مدل واسنجی شده SWAT بر اساس داده‌های رواناب برای شبیه‌سازی جریان روی‌زمینی، جریان داخل کانال‌ها، تبخیر-تعرق و تغذیه آب زیرزمینی در کشور مصر و در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۹۸ استفاده کردند. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامترهایی مانند شماره منحنی نفوذ برای شرایط اولیه رطوبت (CN2)، ضریب ثابت پسروری جریان پایه (ALPHA_BF)، آب قابل دسترس (SOL_AWC) و زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان (GW_DELAY) بیشترین حساسیت را داشتند. Zhang et al. (2009) ساختارهای متفاوت برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل و روندیابی جریان سیلاب را در واسنجی مدل SWAT بر اساس داده‌های رواناب در دو منطقه با کاربری کشاورزی و مرتع لحاظ نموده و نتایج متفاوتی ارائه نمودند. ضمناً مهمترین دلیل وجود اختلاف در عملکرد مدل SWAT در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی را متفاوت بودن شرایط هیدرولوژیک حوضه در این دو بازه زمانی دانستند. Li et al. (2009) با استفاده از مدل SWAT تأثیرات ناشی از تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی بر روی هیدرولوژی سطحی (رواناب سطحی، رطوبت خاک و تبخیر-تعرق) را در حوضه آبریزی در کشور چین مورد بررسی قرار دادند. از روش شماره منحنی نفوذ و معادله پرستلی-تیلور به ترتیب برای شبیه‌سازی

نفوذ و تبخیر- تعرق پتانسیل استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای $ALPHA_BF$ و SOL_AWC ، بیشترین حساسیت را به تغییرات در ورودی‌های مدل از خود نشان دادند. آنچه‌آن که ملاحظه می‌شود در تمامی مطالعات مذکور از داده‌های رواناب برای واسنجی مدل استفاده شده، درحالی‌که استفاده از تعداد محدودی ایستگاه آب‌سنجی، از یک سو منجر به نادیده گرفتن بخشی از فرآیندهای هیدرولوژیک شده و از سوی دیگر با مشکل عدم توزیع مکانی مناسب خصوصیات هیدرولوژیک در سطح حوضه همراه خواهد شد. مشکل توزیع مکانی را برخی از محققین با دخیل نمودن مؤلفه‌های هیدرولوژیک مرتبط برطرف نمودند. به‌عنوان مثال Akhavan et al. (2010) به‌منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی در نیترات آب‌سویی شده در حوضه آبریز همدان - بهار (۹۹-۱۹۸۹) از مدل واسنجی شده SWAT بر اساس داده‌های رواناب و عملکرد محصول استفاده کردند. (Abbaspour et al. 2015) نیز به منظور به‌کمیت درآوردن تغییرات مکانی و زمانی موجودیت آب در محدوده وسیعی از اقلیم اروپا، مدل SWAT را با استفاده از دبی رواناب و عملکرد محصول واسنجی نمودند.

از آنجا که استفاده از مؤلفه‌هایی نظیر رواناب و عملکرد به‌تنهایی یا حتی با هم، شناخت دقیقی از پویایی سیستم هیدرولوژیک حاکم بر حوضه ارائه نخواهند نمود، استفاده از یک مؤلفه هیدرولوژیک با توزیع مکانی و زمانی مناسب، مانند تبخیر- تعرق، می‌تواند بر مشکل مذکور غلبه نماید. لذا در این تحقیق تأثیر تجمیع دو مؤلفه اصلی بیلان آب؛ رواناب و تبخیر- تعرق واقعی؛ در واسنجی و شبیه‌سازی مدل SWAT مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

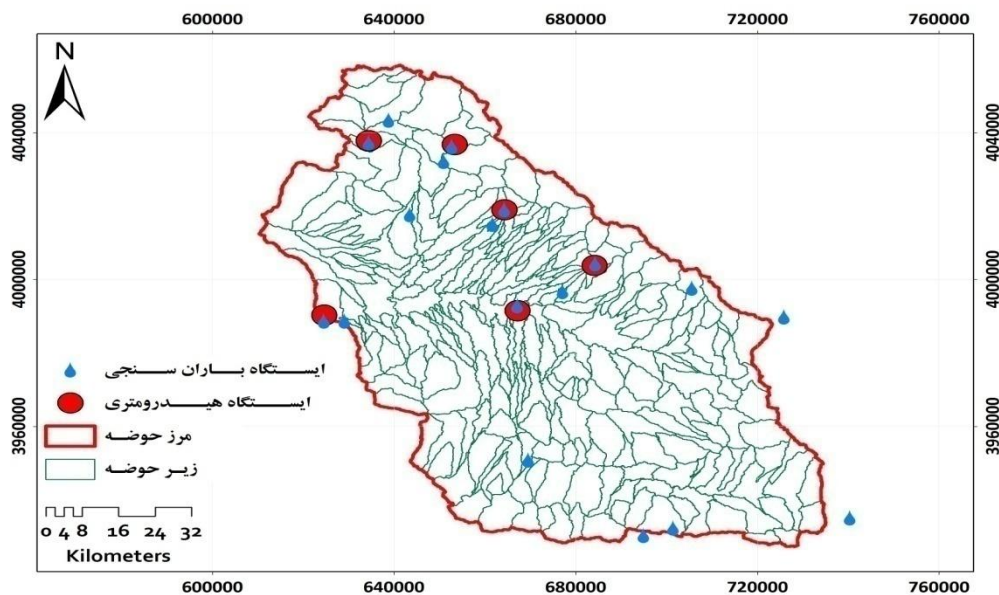
حوضه آبریز نیشابور در شرق حوضه آبریز کویر مرکزی و در محدوده ۱۳ - ۵۸ تا ۳ - ۵۹ طول شرقی و ۴ - ۳۵ تا ۳۹ - ۳۶ عرض شمالی قرار دارد. وسعت این حوضه آبریز در حدود ۹۱۵۸ کیلومتر مربع است. حدود ۴۷ درصد سطح اراضی حوضه به اراضی کشاورزی (شامل کشاورزی آبی، دیم و باغات) و ۴۸ درصد سطح اراضی به مراتع (درجه یک، دو و سه؛ عمدتاً از نوع درجه سه) اختصاص یافته است. در حوضه آبریز مورد مطالعه تنها یک ایستگاه سینوپتیک واقع در شهر نیشابور به مختصات ۱۶ - ۳۶ شمالی و ۴۸ - ۵۸ شرقی و به ارتفاع ۱۲۱۳ متر وجود دارد. در این تحقیق از آمار حدود ۱۸ ایستگاه باران‌سنجی موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد که ارتفاع آنها از سطح دریا در بازه ۱۰۷۵ تا ۱۹۶۷ متر از سطح دریا متغیر است. اصلی‌ترین آبراهه حوضه، رودخانه کالشور است که

عمده رواناب سطحی و سیلاب‌های دشت مذکور را زهکشی و نهایتاً از محل روستای حسین آباد جنگل به خارج از حوضه تخلیه می‌نماید.

در حوضه آبریز نیشابور ۶ ایستگاه آب‌سنجی 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). از میان شش ایستگاه آب‌سنجی مذکور، ایستگاه روح‌آباد به دلیل مقادیر نامعقول اندازه‌گیری شده و تغییر محل ایستگاه در بازه زمانی شبیه‌سازی از چرخه واسنجی کنار گذاشته شد. از پنج ایستگاه باقیمانده، به‌غیر از خروجی حوضه (حسین‌آباد)، چهار ایستگاه دیگر همگی تقریباً در ارتفاعات قرار داشتند که سه ایستگاه از آنها (بار، عیش‌آباد و خرومجموع) دارای جریان پایه دائمی بودند. زمانیکه دبی چشمه‌ها نیز در مدل لحاظ شدند، تنها مقادیر پیش‌بینی شده در دو ایستگاه از میان سه ایستگاه مذکور منطقی بنظر می‌رسید. در نهایت واسنجی مدل SWAT بر اساس مقادیر دبی رواناب سه ایستگاه اندراب، خرومجموع و حسین‌آباد در حد فاصل سال‌های ۸۶-۱۳۷۶ صورت پذیرفت.

مدل SWAT به‌منظور مدل‌سازی بهتر ممکن است حوضه آبریز را به چندین زیرحوضه و هر زیر حوضه را به چندین HRU تقسیم نماید. چنین راهکاری بیشترین تأثیر خود را زمانی نشان خواهد داد که در حوضه آبریز نواحی مختلفی با کاربری‌های متفاوت یا انواع مختلف خاک وجود داشته باشند بنحوی که هیدرولوژی حوضه را از خود متأثر سازند (Neitsch et al., 2011). در این تحقیق کل حوضه آبریز به ۲۴۸ زیرحوضه تقسیم شد (شکل ۱). در این تحقیق جمع‌آوری اطلاعات مدیریتی خاک و گیاه بر اساس بازدیدهای صحرایی صورت پذیرفت و از آنجا که این امر در مقیاس دهستان امکان‌پذیر بود، در هر زیرحوضه تنها یک واحد واکنش هیدرولوژیک و آن هم بر اساس کاربری اراضی، خاک و شیب غالب در نظر گرفته شد. همچنین از معادله هارگریوز و روش شماره منحنی به‌ترتیب برای شبیه‌سازی تبخیر- تعرق پتانسیل و رواناب استفاده شد.

در این تحقیق به‌منظور تحلیل عدم قطعیت و واسنجی مدل SWAT از برنامه SUFI-2 در قالب نرم افزار SWAT-CUP استفاده شد. در برنامه SUFI-2 هفت تابع هدف متفاوت تعریف شده است. واسنجی مدل تا رسیدن مقادیر هر یک از توابع هدف مذکور تا مقدار بهینه آن ادامه خواهد داشت. 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



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی، آب‌سنجی و زیرحوضه‌های تولید شده در منطقه مورد مطالعه

به ترتیب شار تابش خالص در سطح زمین، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس هستند که خود در قالب الگوریتم‌های نسبتاً پیچیده که مبنای فیزیکی دارند، محاسبه شدند (Allen et al., 2002).

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (3)$$

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- برآورد مقادیر تبخیر- تعرق واقعی

ابتدا مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در حوضه مورد مطالعه با استفاده از تکنیک سنش از دور (الگوریتم SEBAL) و در بازه زمانی ۸۹-۱۳۸۰ برآورد شد (Allen et al., 2002). لازم به توضیح است که الگوریتم SEBAL برای سه پوشش کشت آبی، مراتع و کشت دیم به صورت جداگانه اجرا شد. شکل ۲ نشان دهنده تصویر مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در روز ۸ تیر ماه ۱۳۸۶ است که تنها برای کشت‌های آبی صادق بوده و در بازه صفر تا ۹/۱۶ میلی‌متر متغیر است.

از آنجا که برای واسنجی مدل SWAT نیاز به مقادیر این مؤلفه در زیر حوضه‌های مورد مطالعه داشتیم، مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در هر زیرحوضه با برش از روی تصویر تبخیر- تعرق کل حوضه آبریز به دست آمد.

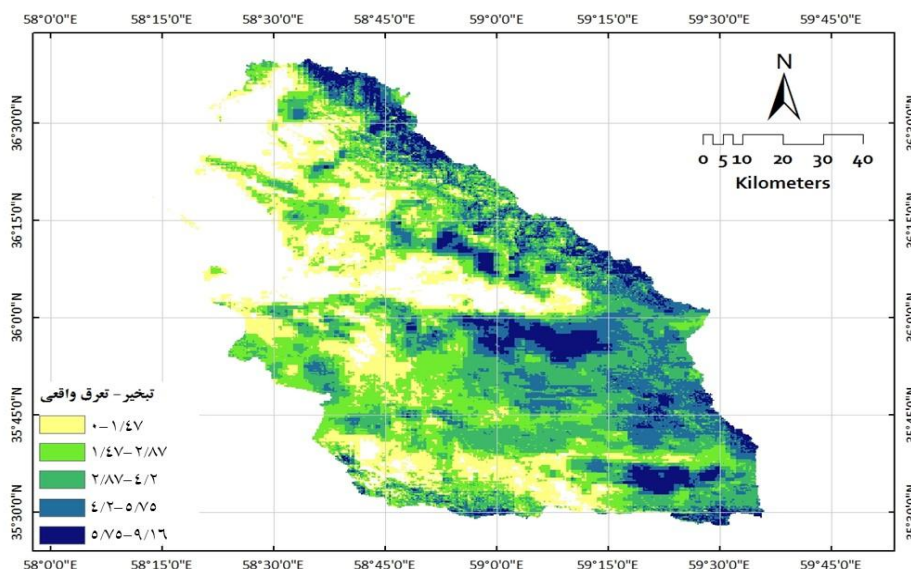
قطعیت ۹۵ درصد) را نیز لحاظ می‌نماید تا بهترین حالت انتخاب گردد. در مورد دو معیار مذکور بهترین نتیجه مربوط به حالتی است که به ترتیب مقادیر آنها به یک و صفر میل کنند. در این تحقیق برای تابع هدف از ضرایب نش- ساتکلیف و تبیین استفاده شد که از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

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

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

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 به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده است. مقدار ضریب NS از منفی بینهایت تا یک (مقدار بهینه) متغیر است.

مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در این تحقیق به کمک تصاویر ماهواره‌ای MODIS و در بازه زمانی ۸۹-۱۳۸۰ در قالب الگوریتم SEBAL برآورد شدند (Bastiaanssen, 2002). آماده‌سازی تصاویر شامل اصلاحات اتمسفریک و زمین‌مرجع نمودن آنها در محیط نرم افزار ENVI نسخه ۴٫۲ صورت پذیرفت. تصاویر ماهواره‌ای مذکور ابتدا در سیستم مختصات جغرافیایی زمین‌مرجع شده و سپس باندهای مورد نیاز از کل باندهای هر تصویر جدا و به هم چسبانده شدند. این الگوریتم میزان تبخیر- تعرق واقعی را به‌عنوان شار گرمای نهان (λET) و بر اساس معادله توازن انرژی در سطح زمین، به صورت جمله باقیمانده از معادله ۳ برآورد می‌نماید. در این معادله R_n ، G و H



شکل ۲- تصویر مقادیر تبعیر- تعرق واقعی (میلیمتر) در حوضه آبریز مورد مطالعه در ۸ تیرماه ۱۳۸۶ به کمک الگوریتم SEBAL

۲-۳- شبیه‌سازی مقادیر رواناب

همانطور که پیشتر نیز بیان شد، در این تحقیق ابتدا مدل SWAT بر اساس داده‌های رواناب و انسجی شد. بدین منظور پارامترهایی از مدل که بر دبی رواناب مؤثر بودند بر اساس مطالعات مشابه پیشین انتخاب شدند (Li et al., 2010; Li et al., 2009; Mileski et al., 2009; Pisinaras et al., 2010). همچنین به برخی از پارامترهای منتخب، در زیرحوضه‌ها و کاربری‌های خاص نیز مقداردهی شد تا به واسطی بهتر مدل کمک نماید (Eckhardt and Arnold, 2001; Akhavan et al., 2010).

نتایج آنالیز حساسیت مدل SWAT بر اساس داده‌های رواناب در سه ایستگاه منتخب نشان داد که پارامترهایی نظیر تلفات انتقال آبراهه‌ای (TRNSRCH)، شماره منحنی نفوذ (CN₂)، هدایت هیدرولیکی مؤثر (CH_K2) و ضریب مانینگ آبراهه (CH_N2) از مهمترین پارامترها بودند. وقوع عمده تلفات از طریق نفوذ آب از کف آبراهه‌ها و تبعیر سطحی به دلایل عدم پوشش آبراهه‌ها و قرارگیری منطقه مورد مطالعه در اقلیم خشک و نیمه خشک (Sophocleous, 2005; Yin et al., 2011; Wheater et al., 2014) نقش مستقیم شماره منحنی نفوذ در نگهداشت سطحی و مقدار رواناب (Green and Grienven, 2008; Li et al., 2009; Akhavan et al., 2010) و کنترل نمودن میزان نفوذ از داخل بستر و کف آبراهه و تأثیرگذاری بر دبی رواناب (Oeurng et al., 2011) می‌تواند از مهمترین دلایل حساسیت پارامترهای مذکور باشد. از دیگر پارامترهای حساس به دبی رواناب نیز می‌توان به ضریب ثابت پسروری جریان پایه

(ALPHA_BF، (Wu and Johnston, 2007))؛ هدایت هیدرولیکی اشباع (Eckhardt and Arnold, 2001)؛ درجه حرارت آستانه برای ذوب برف (SMTMP، (Li et al., 2010))، ضریب جبران کننده جذب رو به بالای آب توسط گیاه (ESCO، (Shen et al., 2009)) و زمان تاخیر برای تغذیه آبخوان (Mileski et al., 2009) اشاره نمود. به عنوان نمونه مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین برای پارامتر ALPHA_BF در بازه ۰/۳ تا ۳ روز در نوسان است که مقدار به دست آمده در این تحقیق (۰/۳۶) با آن همخوانی دارد. شاید بتوان زهکشی آرام و برداشت‌های بی‌رویه آب زیرزمینی در سالیان اخیر در حوضه مورد مطالعه را از جمله مهمترین دلایل در توجیه مقادیر اندک این پارامتر برشمرد، اگرچه مقدار ۰/۰۴۶ نیز برای این پارامتر گزارش شده است (Wu and Johnston, 2007).

(Li et al., 2009) برای پارامتر ESCO که در فرآیند تبعیر- تعرق مؤثر است مقدار ۰/۶ را گزارش کردند. مقادیر مذکور با مقادیر به دست آمده در این تحقیق (۰/۷۲-۰/۸۹) همخوانی دارد. در تأیید نتایج جدول ۱، (Wang et al., 2014) در تحقیقی به منظور شبیه‌سازی رواناب در سه ایستگاه هیدرومتری پارامترهای ESCO و CANMX و Gyamfi et al. (2015) نیز پارامترهای ESCO و SOL_AWC را به عنوان حساس‌ترین پارامترهای مدل معرفی نموده‌اند. از میان پارامترهای مدل که به ذوب برف مرتبط می‌گردند، پارامتر SMTMP حساسیت نسبتاً بالایی در شبیه‌سازی رواناب از خود نشان داد که دلیل آن را می‌توان به کوهستانی بودن منطقه (در

بخش‌هایی از آن) و نقش ذوب برف در کنترل رواناب، به خصوص در ایستگاه‌های اندراب و خرو مجموع، منسوب نمود (Li et al., 2010). در تحقیقی به منظور شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب، نتایج نشان داده که واسنجی برخی از الگوریتم‌های موجود در داخل مدل SWAT منجر به بهبود نتایج مربوط به رواناب شده است. از آنجا که منطقه مورد مطالعه ایشان منطقه‌ای کوهستانی بوده لذا پارامترهای SMFMN و SMTMP به عنوان پارامترهای حساس مدل معرفی شدند که مشابه نتایج جدول ۱ می‌باشد (Bieger et al., 2015).

پس از واسنجی مدل SWAT بر اساس داده‌های رواناب و تعیین دامنه تغییرات پارامترهای مدل، از مقادیر مذکور به دست آمده استفاده و مجدداً مدل بر اساس مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در بازه زمانی ۸۵-۱۳۸ واسنجی شد. دامنه تغییرات نهایی شده حساس‌ترین پارامترهای مدل در این مرحله از واسنجی در جدول ۱ آورده شده‌اند. از نکات مهم این جدول می‌توان به منتسب شدن پارامتر ظرفیت نگهداشت آب در خاک به عنوان یکی از حساس‌ترین پارامترها بر روی تبخیر- تعرق اشاره نمود. زیرا که با افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک پتانسیل تبخیر- تعرق نیز افزایش خواهد یافت. Immerzeel and Droogers (2008) نیز ظرفیت نگهداشت آب در خاک را از جمله پارامترهای مؤثر مدل در واسنجی بر اساس داده‌های تبخیر- تعرق واقعی معرفی نمودند بنحوی که اضافه شدن پارامتر مذکور به مجموعه پارامترهای اولیه مدل، منجر به افزایش ضریب

همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق از ۰/۴ به ۰/۴۹ شد. ضریب نفوذ عمقی آب به آبخوان نیز از حساس‌ترین پارامترهای مدل بوده که البته بصورت معکوس بر روی تبخیر- تعرق می‌تواند تأثیر بگذارد.

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که پارامتر فاکتور جبران تبخیر خاک (ESCO) در برآورد تبخیر- تعرق نقش مهمی داشته است. Li et al. (2010)؛ Arnold et al. (2012) و Shawul et al. (2013) پارامتر مذکور را از مهمترین پارامترهای مؤثر در واسنجی مدل معرفی نمودند. الگوریتم پیش فرض در مدل SWAT آن است که ۵ درصد از کل تقاضای تبخیر خاک از ۱۰ میلی‌متر سطحی خاک و مابقی آن از ۱۰۰ میلی‌متری سطحی خاک تأمین خواهد شد (Nietsch et al., 2011). این فاکتور امکان اصلاح چنین الگویی را به کاربر می‌دهد. به هر میزان که فاکتور فوق افزایش یابد لایه‌های پایینی خاک مشارکت بیشتری در تأمین رطوبت به منظور تبخیر خواهند داشت. در این تحقیق نیز با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک منطقه مورد مطالعه، قسمت بیشتری از تقاضای تبخیر خاک از لایه‌های زیرین تأمین شده و منجر به بروز مقادیر بیشتری از این پارامتر (مقادیر ۰/۷۵ تا ۰/۸۹) خواهد شد. Wu and Johnston (2007) مقدار این پارامتر را در تحقیق خود و برای شرایط اقلیمی خشک و نرمال به ترتیب ۰/۸ و ۰/۵ گزارش کردند.

جدول ۱- دامنه تغییرات نهایی شده مهمترین پارامترهای مدل در مرحله واسنجی بر اساس داده‌های رواناب و تبخیر- تعرق واقعی

پارامتر	مفهوم	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	t-value	p-value
RCHRG_DP	ضریب نفوذ عمقی آبخوان	۰/۲۶	۰/۴۳	۴۱/۲۲	۰
SOL_AWC	آب قابل دسترس	۰/۲۱	۰/۳۳	۳۱/۳۱	۰
ESCO	ضریب جبران کننده تبخیر از سطح خاک	۰/۷۹	۰/۸۹	۲۹/۱۶	۰
EPCO	ضریب جبران کننده جذب رو به بالای آب توسط گیاه	۰/۷	۰/۷۴	۱۲/۳۷	۰
CANMX	بیشترین ذخیره کانوپی گیاه	۰	۰/۵	۱۲/۱۵	۰
SOL_BD	وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۰/۳۸	۰/۹۵	۷/۴	۰
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلیمتر در ساعت)	۰/۰۴۵	۰/۰۷	۵	۰
CN2	شماره منحنی نفوذ برای شرایط اولیه رطوبت	۰/۱۱	۰/۳۶	۲	۰/۰۳۶
SMFMN	فاکتور ذوب برف (میلیمتر آب بر روز- درجه سانتیگراد)	۰/۴۹	۲/۱۶	۲	۰/۰۴
SURLAG	ضریب تأخیر رواناب سطحی	۱	۴/۶۸	۱/۳۶	۰/۱۷
SMTMP	درجه حرارت آستانه برای ذوب برف (درجه سانتی‌گراد)	-۳/۵۶	-۱/۵۳	۰/۶۹	۰/۴۸
ALPHA_BF	ثابت پسروری جریان پایه	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۵۶	۰/۵۷
GW_DELAY	زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان (روز)	۴۶۸	۴۷۷	۰/۰۸	۰/۹۳

Li et al. (2010) مقدار پارامتر مذکور در تحقیق خود را در بازه ۰/۹۸ تا ۱ گزارش کرده و نقش لایه‌های سطحی خاک در تقاضای تبخیرپذیری خاک را اندک دانسته ولی دلیل آن را پوشش گیاهی متراکم منطقه مورد مطالعه برشمردند.

پارامتر دیگری از مدل که در برآورد تبخیر- تعرق مؤثر بوده، پارامتر فاکتور جبران جذب رو به بالای آب توسط گیاه (EPCO) است (Pisinaras et al., 2010 و Oeurng et al., 2011). هرچه مقدار این فاکتور از یک فاصله می‌گیرد (مقادیر حدود ۰/۷ در این مرحله از واسنجی) نشانگر آنست که لایه‌های عمیق خاک نقش زیادی در تامین رطوبت مورد نیاز گیاه برای تبخیر- تعرق داشته و لذا می‌تواند بر کل فرآیند مذکور تأثیر گذار باشد. (Wu and Johnston 2007) پارامتر مذکور را بر روی تبخیر- تعرق مؤثر قلمداد نموده و برای شرایط اقلیمی خشک منطقه مورد مطالعه خود، مقدار ۰/۷ که مشابه مقادیر به‌دست آمده در این تحقیق است را گزارش نمودند. نکته دیگر در مورد جدول ۱ و مقایسه آن با نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل واسنجی شده بر اساس مقادیر دبی رواناب بازگوکننده این حقیقت است که تأثیر پارامترهای مؤثر بر ذوب برف در تعیین رفتار تبخیر- تعرق در قیاس با رفتار دبی رواناب کاهش یافته است. دلیل این امر را اینگونه می‌توان توجیه نمود که رواناب حاصل از ذوب برف به‌صورت مستقیم می‌تواند بر روی دبی رواناب اثرگذار باشد، به خصوص آنکه قسمتی از حوضه مورد مطالعه و دو ایستگاه اندراب و خرومجموع در ارتفاعات واقع شده و نقش ذوب برف در تشکیل رواناب تشدید می‌یابد (Zhang et al., 2009) و (Neitsch et al., 2011).

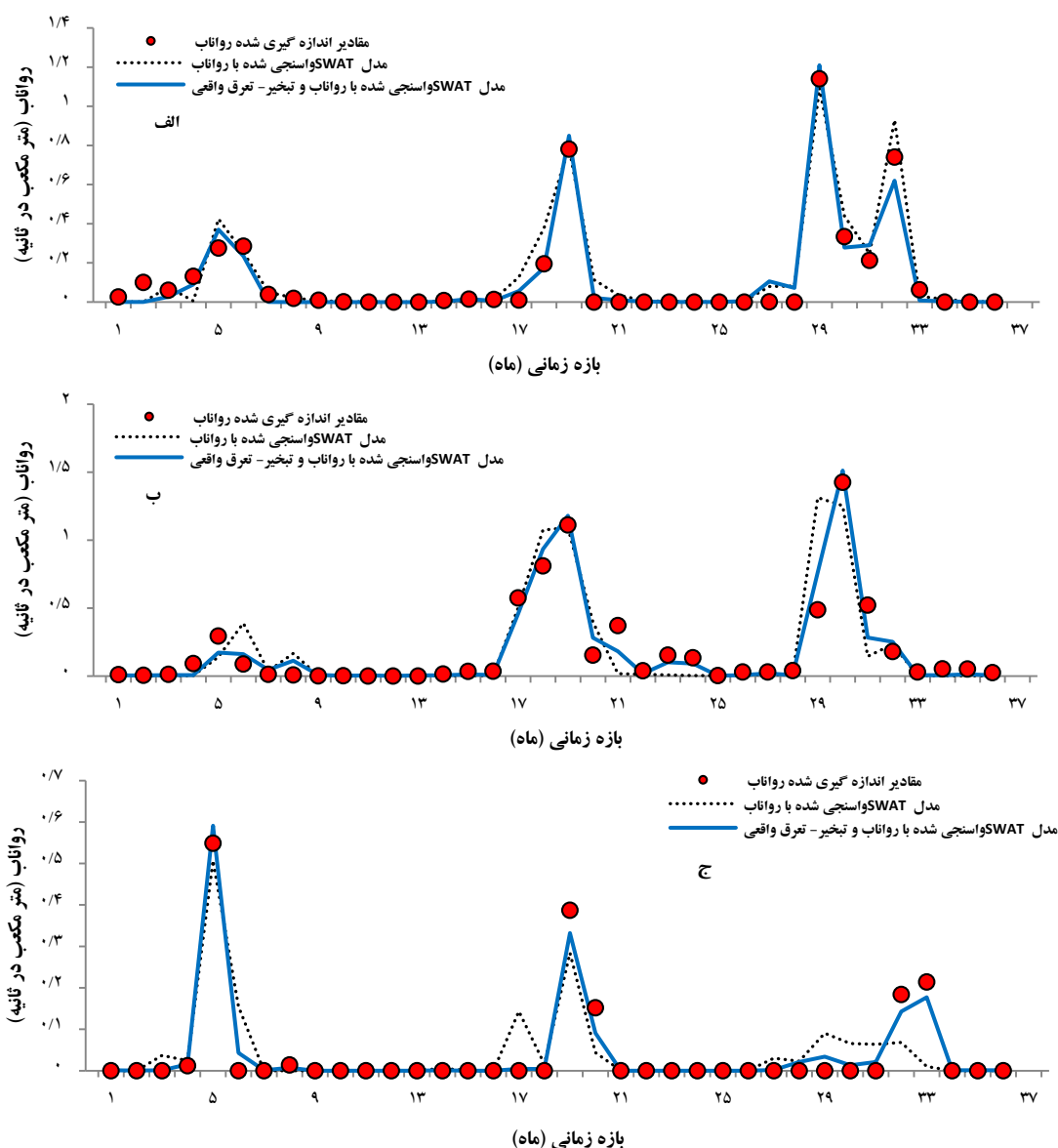
شکل ۳ مقادیر برآورد شده رواناب در مرحله اعتبارسنجی (۸۹-۱۳۸۶) به کمک مدل SWAT واسنجی شده در سه ایستگاه اندراب، خرومجموع و حسین آباد را نشان می‌دهد. نتایج شکل ۳-الف بیانگر آن است که مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی، در برآورد دبی رواناب ایستگاه اندراب عملکرد مناسب و نزدیک به هم داشتند به‌طوری‌که ریشه میانگین مربعات خطا برای دو مدل به‌ترتیب در حدود ۰/۰۷ و ۰/۴۸ متر مکعب در ثانیه به‌دست آمد. اگرچه مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در قیاس با مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب، میزان رواناب را در این ایستگاه بهتر برآورد کرده، با اینحال اختلاف عملکرد دو مدل تفاوت چندانی نداشته است.

در ایستگاه خرومجموع (شکل ۳-ب) نه تنها عملکرد مدل SWAT در برآورد دبی رواناب ضعیف‌تر از ایستگاه اندراب بود، بلکه بهبود در پیش‌بینی رواناب زمانیکه از هر دو مؤلفه دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در واسنجی مدل استفاده شد، بیشتر به‌چشم آمد. ریشه میانگین مربعات خطا برای برآورد رواناب به‌کمک مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و ترکیب دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در این ایستگاه به‌ترتیب در حدود ۰/۱۹ و ۰/۰۹ متر مکعب در ثانیه به دست آمد که در قیاس با ایستگاه اندراب هم مقادیر آن و هم اختلاف آنها بیشتر است. شاید یکی از دلایل نتایج ضعیف‌تر مدل SWAT در برآورد رواناب در ایستگاه خرومجموع را بتوان به مقادیر بیشتر رواناب ثبت شده در این ایستگاه در قیاس با ایستگاه اندراب منسوب دانست. متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب در طول دوره اعتبارسنجی در ایستگاه خرومجموع در حدود ۰/۱۹ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، درحالی‌که مقدار متناظر آن در ایستگاه اندراب ۰/۱۲ متر مکعب بر ثانیه بوده است.

آنچنان که نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد بارزترین اختلاف عملکرد مدل SWAT در برآورد رواناب در دو ایستگاه مذکور به مقادیر دبی رواناب ثبت شده در طی ماه‌های اردیبهشت تا آذر سال ۱۳۸۸ باز می‌گردد به‌طوری‌که متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه اندراب و خرومجموع به‌ترتیب در حدود ۰/۰۰۰۱ و ۰/۱۱ متر مکعب در ثانیه بوده که اختلاف آنها قابل توجه است. در ایستگاه خرومجموع و از میان هشت ماه مذکور، در هفت ماه مقادیر دبی رواناب توسط هر دو مدل واسنجی شده SWAT کم‌برآورد شده که با نتایج تحقیقات (Bosch et al., 2004), (Chu and Shirmohammadi 2004), (Du et al., 2005) و (Oeurng et al., 2011) مبنی بر کم‌برآورد مقادیر بیشتر رواناب همخوانی دارد، اگرچه که شدت این کم‌برآورد توسط مدل SWAT که بر اساس هر دو مؤلفه رواناب و تبخیر- تعرق واقعی واسنجی شده، کمتر بوده است. کم‌برآوردهای مذکور را اینگونه می‌توان تحلیل نمود که مدل SWAT مقادیر شماره منحنی نفوذ را متناسب با آب قابل دسترس در کل پروفیل خاک اصلاح می‌نماید درحالی‌که 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. این راهکار شاید منجر به آن گردد که فرآیندهایی نظیر آماس لایه‌های سطحی خاک که منجر به تغییر خصوصیات هیدرولیکی خاک و در نتیجه کاهش ظرفیت نفوذپذیری خاک می‌شوند نیز لحاظ گشته و مدل برآورد دقیق‌تری از مقادیر رواناب به خصوص در مورد مقادیر بیشتر آن داشته باشد (Daggupati et al., 2015), (Fu et al., 2015) نیز در تحقیق خود

در ایستگاه حسین آباد (شکل ۳-ج) و در مرحله اعتبارسنجی نیز ریشه میانگین مربعات خطا توسط مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و ترکیب رواناب با تبخیر- تعرق واقعی در برآورد رواناب به ترتیب در حدود ۰/۰۶ و ۰/۰۲ متر مکعب در ثانیه به دست آمد که مجدداً نشان از عملکرد تقریباً نزدیک و مناسب هر دو مدل دارد. اگرچه مقادیر اندک اندازه‌گیری شده دبی رواناب در ایستگاه مذکور از جمله دلایل عملکرد مناسب مدل بود، با اینحال هر دو مدل، خصوصاً مدل SWAT واسنجی شده بر اساس رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در برآورد مقادیر بیشتر رواناب نیز مناسب عمل کرده‌اند.

کم برآورد مقادیر دبی رواناب را گزارش نموده و دقت پایین در زمان شبیه‌سازی ذوب برف، استفاده از مقیاس زمانی روزانه و عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی رخداد‌های بارندگی و ذوب برف در مقیاس‌های کوتاه‌تر از روز، توانایی پایین مدل در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و مقادیر اندک و نزدیک به صفر دبی رواناب در طی فصول خشک در حوضه مورد مطالعه را از مهمترین دلایل این امر بر شمرده‌اند. از آنجا که در تحقیق حاضر مقیاس زمانی ماهانه بوده و منطقه مورد مطالعه نیز در منطقه‌ای خشک و نیمه خشک واقع شده است می‌توان تمامی موارد فوق را در عدم قطعیت برآورد دبی رواناب مؤثر دانست.



شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب به کمک مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب؛ دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در سه ایستگاه اندراب (الف)، خرو مجموع (ب) و حسین آباد (ج)

مقایسه نتایج رواناب شبیه‌سازی شده در هر سه ایستگاه و به کمک هر دو مدل مورد استفاده در تحقیق حاضر با نتایج تحقیق (Uniyal et al., 2015) با اختصاص مقادیر خطای ۹/۷، ۱۰/۱ و ۹/۶ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب برای الگوریتم‌های عدم قطعیت ParaSol، SUFI-2 و GLUE نشان از نتایج مناسب به دست آمده در تحقیق حاضر دارد که البته از دلایل این امر می‌توان به مقادیر اندک ثبت شده رواناب در ایستگاه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر اشاره نمود (Kannan et al., 2007).

بررسی نتایج نشان داد که هر دو مدل SWAT واسنجی شده بر اساس رواناب و ترکیب رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در برآورد رواناب تقریباً عملکرد یکسان و مشابهی در هر سه ایستگاه داشتند، اگرچه نتایج دو ایستگاه اندراب و خرومجموع ضعیف‌تر بود. از جمله دلایل این موضوع می‌توان به برخی عدم قطعیت‌ها که بر روی نتایج مدل اثرگذار است اشاره نمود. اول آنکه دو ایستگاه مذکور در ارتفاعات منطقه مورد مطالعه قرار داشته و از آنجا که شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی توزیع مکانی مناسبی را در این مناطق ندارند، طبیعتاً برآورد بارندگی به عنوان عامل اصلی تولید رواناب با خطا همراه خواهد شد (Immerzeel and Droogers, 2008). عامل بعدی مخازن تغذیه مصنوعی است که در بالادست هر دو ایستگاه مذکور و به‌منظور مدیریت منابع آب سطحی لحاظ شده، حال آنکه می‌تواند رژیم طبیعی آبراهه‌ها را از خود متأثر سازد (Akhavan et al., 2010). در مبحث بارندگی، مدل SWAT مدت و شدت بارندگی لحاظ را لحاظ نمی‌کند و این موضوع در مناطق خشک و نیمه‌خشک؛ مانند منطقه مورد مطالعه که بارندگی‌ها اکثراً با شدت زیاد و کوتاه مدت هستند؛ می‌تواند منبع مهمی در عدم قطعیت نتایج باشد (Alizadeh et al., 2013). عدم قطعیت‌هایی که در ساختار مفهومی مدل SWAT از نقطه نظر شبیه‌سازی ذوب برف وجود دارد (Fontaine et al., 2009) و عدم پارامتریزه شدن آن در زیرحوضه‌های مختلف، از دیگر دلایل مذکور می‌باشند. نکته حائز اهمیت آن است که زمانیکه علاوه بر دبی رواناب از تبخیر- تعرق واقعی نیز در مراحل واسنجی مدل استفاده شد، تا حدودی از اثرات مستقیم عدم قطعیت‌های نامبرده شده کاسته و شناخت بهتری از رفتار هیدرولوژیک حوضه حاصل گشت. تایید این موضوع، بهبود عملکرد مدل واسنجی شده ترکیبی است.

(Akhavan et al., 2010) و (Abbaspour et al., 2015) در تحقیقات مشابهی علاوه بر رواناب، عملکرد محصول را نیز در واسنجی مدل SWAT دخیل نمودند. اگرچه عملکرد محصول می‌تواند مشکلات ناشی از توزیع نامناسب مکانی ایستگاه‌های

آب‌سنجی در سطح حوضه آبریز را برطرف نماید، با اینحال ناتوانی این مؤلفه (عملکرد محصول) در پوشش توزیع زمانی همچنان پابرجاست. بنابراین استفاده از مؤلفه‌ای همانند تبخیر- تعرق واقعی که دارای توزیع زمانی و مکانی مناسبی در سطح حوضه است می‌تواند به فهم بهتر فرآیندهای هیدرولوژیک حوضه کمک شایانی بنماید. اهمیت این موضوع با آگاهی از آنکه حوضه مورد مطالعه دارای کاربری کشاورزی بوده و نقش تبخیر- تعرق در چنین حوضه‌هایی، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند منطقه مورد مطالعه، در بیلان آب سطحی بیش از پیش نمایان می‌گردد، دو چندان می‌شود.

۳-۳- شبیه‌سازی مقادیر تبخیر- تعرق واقعی

آن چنان که پیشتر نیز بیان شد، مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب مجدداً بر اساس مقادیر تبخیر- تعرق واقعی واسنجی و برای دوره مستقلی اعتبارسنجی شد. جدول ۲ نشان دهنده مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در سه زیرحوضه منتخب است. نتایج جدول ۲ بیانگر نزدیکی عملکرد مدل SWAT واسنجی شده ترکیبی در برآورد مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی دارد. به بیان دیگر حفظ عملکرد مناسب مدل در مرحله اعتبارسنجی؛ با دستیابی به مقادیر بهینه تابع هدف؛ از طریق افزایش ضخامت باند عدم قطعیت (مقادیر بیشتر P-factor) و ثابت ماندن درصدی از داده‌ها که در این باند قرار گرفته‌اند، حاصل شده است. نتایج جدول ۲ در قیاس با تقسیم‌بندی (Green and Griensven, 2007) مبنی بر آرایه مقادیر مرزی ۰/۴ و ۰/۵ به‌ترتیب برای معیارهای NS و R^2 و توصیه (Moriassi et al., 2007) مبنی بر مقادیر بیشتر از ۰/۵ برای معیار NS ، حکایت از رضایت بخش بودن مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT دارد. در تحقیق Immerzeel and Droogers (2008) مقادیر ضریب R^2 در مرحله واسنجی ما بین ۰/۴ و ۰/۸۱ متغیر بوده است درحالی‌که با توجه به نتایج جدول ۲ کمترین مقدار این ضریب در مرحله اعتبارسنجی مدل و برابر ۰/۷۲ به‌دست آمد. متأسفانه مقادیر مرجعی برای معیارهای P-factor و R-factor در مورد تبخیر- تعرق وجود ندارد، با اینحال (Akhavan et al., 2010) در واسنجی مدل SWAT بر اساس عملکرد محصول گندم دیم، گندم آبی و سیب زمینی به‌ترتیب مقادیر ۱/۲، ۲/۶ و ۰/۹۶ را برای معیار R-factor در حوضه آبریز همدان گزارش نمودند که مقایسه ارقام مذکور با نتایج جدول ۲ حکایت از عدم قطعیت کمتر در نتایج واسنجی مدل SWAT در این تحقیق دارد. اخیراً نیز

Abbaspour et al. (2015) مقادیر مناسب برای معیارهای P-factor و R-factor را به ترتیب ۰/۷ و ۱/۵ گزارش نموده‌اند. Cui et al. (2015) نیز در تحقیق خود با استفاده از داده‌های رواناب با طول زمانی متفاوت در مرحله واسنجی مدل مقادیر ۰/۵۲، ۰/۶۶، ۱/۰۸ و ۱/۳۷ را برای معیار R-factor گزارش نمودند. در تحقیق دیگری مبتنی بر واسنجی مدل بر اساس داده‌های رسوب در طی ۱۳ سال مقادیر معیارهای P-factor و R-factor به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۶۳ در مرحله واسنجی و ۰/۱۲ و ۰/۴ در مرحله اعتبارسنجی به دست آمدند که مقایسه آنها با نتایج جدول ۲ نشان دهنده تأثیر استفاده از مؤلفه تبخیر- تعرق واقعی در مراحل واسنجی مدل به منظور بهبود شبیه‌سازی تبخیر- تعرق واقعی بوده است (Yesuf et al., 2015).

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT در مراحل واسنجی (رواناب و تبخیر- تعرق واقعی) و اعتبارسنجی

مرحله واسنجی مدل					
شماره زیرحوضه	p-factor	R-factor	R ²	NS	
۴۱	۰/۷۶	۰/۴۶	۰/۹۲	۰/۸۸	
۹۴	۰/۸۲	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۷۶	
۱۳۸	۰/۷۶	۰/۶۳	۰/۸۴	۰/۷	
مرحله اعتبارسنجی مدل					
شماره زیرحوضه	p-factor	R-factor	R ²	NS	
۴۱	۰/۷۵	۰/۵۷	۰/۹۴	۰/۹۳	
۹۴	۰/۸۲	۰/۶۵	۰/۸۷	۰/۸۷	
۱۳۸	۰/۷۷	۰/۵۳	۰/۹	۰/۸۸	

مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیر- تعرق واقعی توسط مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و مدل واسنجی شده بر اساس ترکیب دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در دوره اعتبارسنجی در شکل ۴ نشان داده شده است. اگرچه مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و مدل واسنجی شده بر اساس ترکیب رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در برآورد دبی رواناب عملکرد نزدیک به هم داشتند (شکل ۳)، با اینحال نتایج شکل ۴ بیانگر آن است که تجمیع مؤلفه‌های هیدرولوژیک رواناب و تبخیر- تعرق واقعی بهبود چشمگیری در شبیه‌سازی مؤلفه تبخیر- تعرق واقعی داشته و لذا شناخت دقیق‌تری از سیستم هیدرولوژیک حوضه ارائه خواهد نمود. به‌منظور تحلیل بهتر نتایج، مقادیر تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تکنیک سنجش از دور در قیاس با مقادیر برآوردی حاصل از دو مدل SWAT واسنجی شده در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. در زیرحوضه

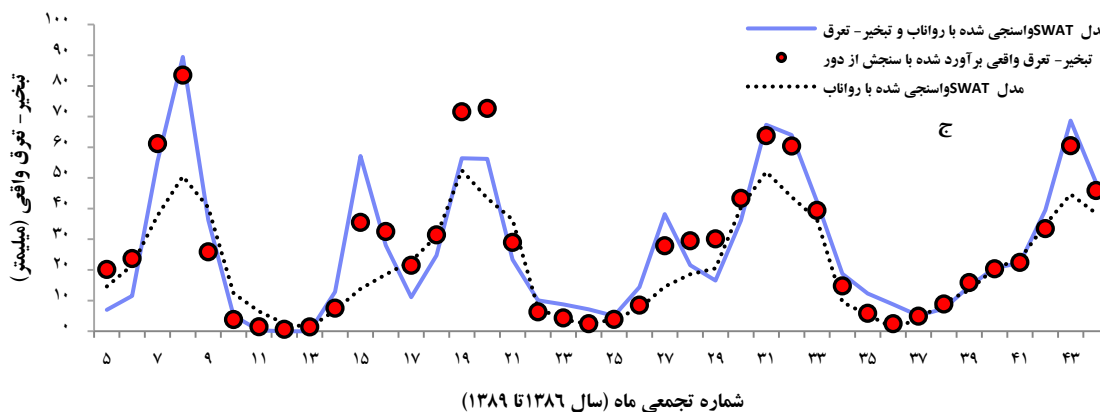
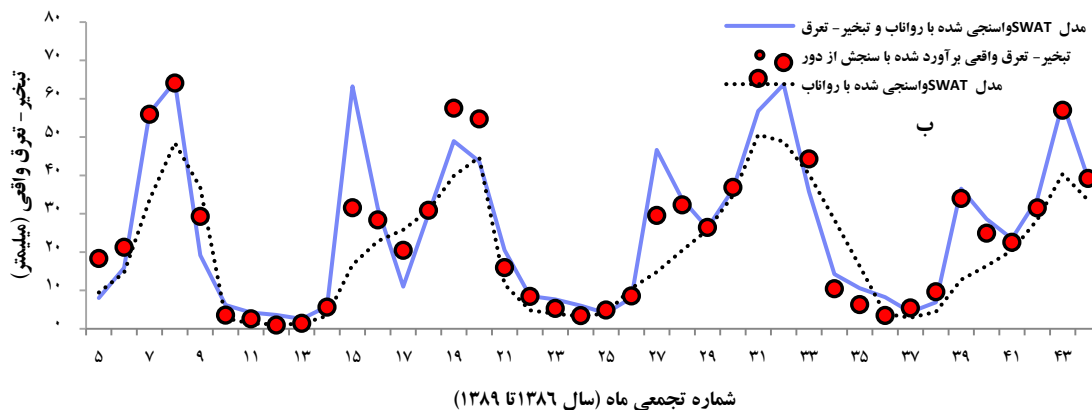
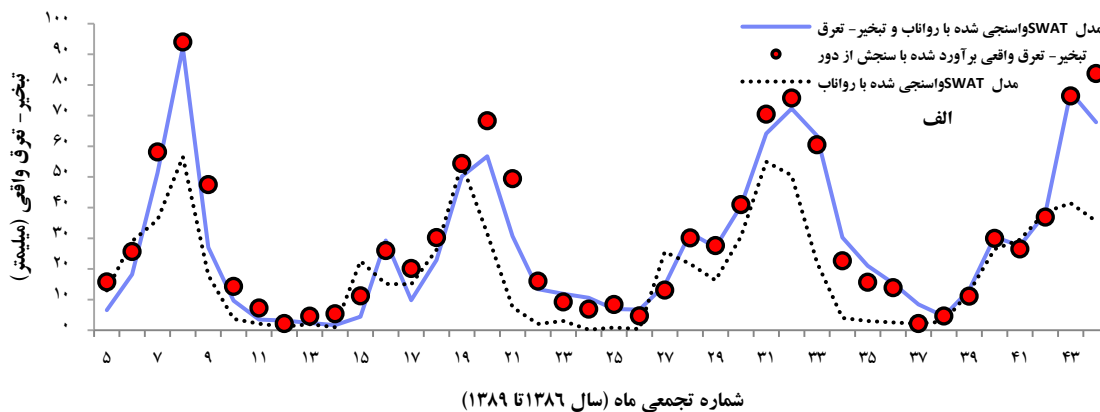
شماره ۴۱ (شکل ۵- الف) ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل واسنجی شده بر اساس رواناب و مدل واسنجی شده ترکیبی (رواناب و تبخیر- تعرق) به ترتیب ۶/۸۴ و ۱۸/۵۲ میلیمتر در ماه به‌دست آمد که به وضوح عملکرد بهتر مدل واسنجی شده ترکیبی در برآورد تبخیر- تعرق واقعی را نشان می‌دهد. از میان ۴۰ ماه شرکت داده شده در مراحل اعتبارسنجی مدل SWAT، مدل واسنجی شده ترکیبی در ۲۳ و ۱۷ ماه به‌ترتیب با کم و بیش برآورد این مؤلفه همراه بوده که از نقطه نظر تعداد ماه‌ها، می‌توان عملکرد مدل را مناسب دانست (عدم کم یا بیش‌برآورد مطلق). این در حالی است که در مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب، مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در حدود ۸۵ درصد از ماه‌ها کم‌برآورد شده است.

نکته مهم در این زیرحوضه آن است که عملکرد مدل واسنجی شده ترکیبی در ماه‌های بیش‌برآورد تبخیر- تعرق واقعی به‌مراتب بهتر از عملکرد آن در ماه‌های کم‌برآورد این مؤلفه بوده است بنحوی که ریشه میانگین مربعات خطا برای این دو دسته به‌ترتیب در حدود ۳/۳ و ۸/۵۶ میلیمتر در ماه به‌دست آمد. بررسی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که این اختلاف دو منشأ اساسی دارد. اول آنکه بخشی از این اختلاف به تفاوت عملکرد مدل در برآورد مقادیر تبخیر- تعرق کمتر از ۲۰ میلیمتر در ماه باز می‌گردد. در هر دو دسته از ماه‌های کم‌برآورد (۲۳ ماه) و بیش برآورد (۱۷ ماه) تبخیر- تعرق واقعی، در ۹ ماه (۳۹ و ۵۳ درصد از ماه‌ها) مقادیر تبخیر- تعرق واقعی حاصل از سنجش از دور خود کمتر از ۲۰ میلیمتر در ماه بوده است که خطای برآورد این مؤلفه در ماه‌های کم و بیش‌برآورد به ترتیب ۴/۶۳ و ۳/۳۹ میلیمتر در ماه به‌دست آمده است. دلیل دوم که مهمتر نیز بنظر می‌رسد، نه خطای سیستماتیک مدل در برآورد تبخیر- تعرق واقعی، بلکه به‌دلیل خطاهای موضعی است که در سه ماه از کل ماه‌های کم‌برآورد رخ داده است بنحوی که اگر این سه ماه از کل ۲۳ ماه مذکور حذف می‌شد، ریشه خطا از مقدار کنونی آن (۸/۵۶ میلیمتر در ماه) به حدود ۵/۷ میلیمتر در ماه کاهش می‌یافت.

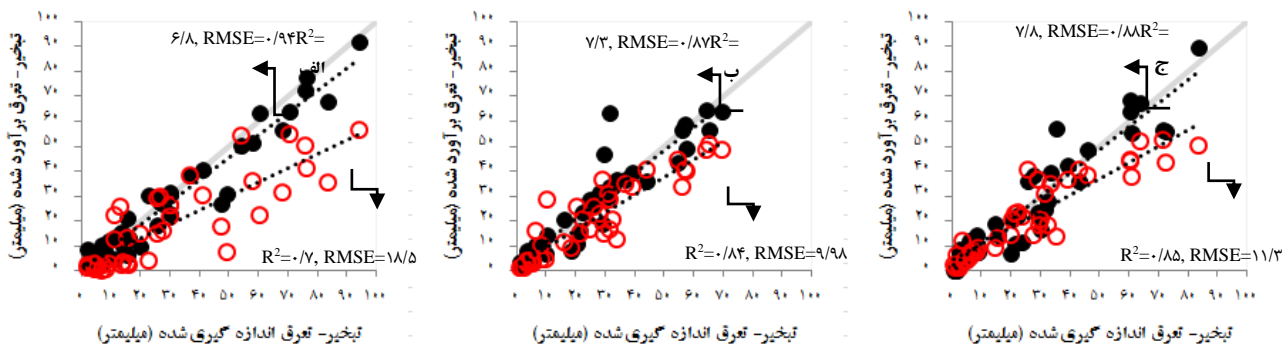
در زیرحوضه شماره ۱۳۸ (شکل ۵- ج) مجموع کل مقادیر تبخیر- تعرق حاصل از سنجش از دور حدود ۱۰۷۸ میلیمتر به‌دست آمد درحالی‌که مقدار متناظر آن به‌کمک مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و ترکیب دبی رواناب با تبخیر- تعرق واقعی به ترتیب در حدود ۸۶۸ و ۱۰۷۲ میلیمتر برآورد شد که حکایت از کم برآورد کلی ۱۹ و ۰/۵ درصدی تبخیر- تعرق واقعی در کل دوره اعتبارسنجی دارد. در این زیرحوضه ریشه میانگین مربعات خطا در مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب و ترکیب رواناب با تبخیر- تعرق واقعی به‌ترتیب ۱۱/۲۹ و ۷/۸۲ میلیمتر در ماه به‌دست آمد که

به دست آمد که حکایت از عملکرد نزدیکتر دو مدل در قیاس با دو زیرحوضه دیگر دارد. نزدیکی عملکرد دو مدل مذکور نه به واسطه عملکرد مناسب‌تر مدل ترکیبی واسنجی شده SWAT، بلکه به دلیل عملکرد بهتر مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب در این زیرحوضه است.

باز هم تاکید و تاییدی بر بهبود شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه آبریز منوط به دخیل نمودن بخش بیشتری از این چرخه در واسنجی مدل SWAT است. در زیرحوضه شماره ۹۴ (شکل ۵-ب) ریشه میانگین مربعات خطا در مدل SWAT واسنجی شده بر اساس رواناب و مدل واسنجی شده ترکیبی به ترتیب در حدود ۱۰ و ۷/۳۴ میلیمتر در ماه



شکل ۴- مقادیر تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از سنجش از دور (دوایر تو پر) در قیاس با مقادیر برآورد شده به کمک مدل SWAT واسنجی شده با دبی رواناب (خط چین) و مدل واسنجی شده بر اساس ترکیب دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی (خط ممتد) در زیرحوضه‌های ۴۱ (الف)، ۹۴ (ب) و ۱۳۸ (ج)



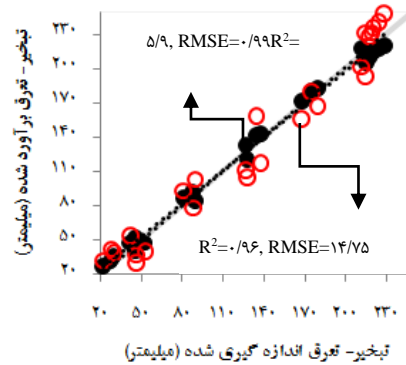
شکل ۵- مقادیر تبخیر- تعرق واقعی به کمک سنجش از دور در قیاس با مقادیر برآورد شده همین مؤلفه به کمک مدل SWAT واسنجی شده با دبی رواناب (دوایر تو خالی) و ترکیب رواناب با تبخیر- تعرق واقعی (دوایر تو پر) در زیرحوضه‌های ۴۱ (الف)، ۹۴ (ب) و ۱۳۸ (ج)؛ خط ممتد: خط ۱:۱؛ خط چین‌ها: خطوط رگرسیونی دو مدل

ترکیبی (بر اساس دبی رواناب و تبخیر- تعرق واقعی) در برآورد مقادیر تبخیر- تعرق واقعی از طریق مقایسه با روش پنمن- مونتیت- فائو مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در یکی از زیرحوضه‌های تولید شده در مدل SWAT، مقادیر تبخیر- تعرق واقعی به روش پنمن- مونتیت- فائو و با استفاده از ضریب گیاهی محاسبه و با مقادیر متناظر همان زیرحوضه که از طریق مدل SWAT و الگوریتم سبال به دست آمده بودند مقایسه گردید که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به محصول غالب در زیرحوضه مورد مطالعه (چغندرقد)، دوره شبیه‌سازی این مقایسه از اردیبهشت سال ۱۳۸۶ تا مرداد ۱۳۸۹ (بازه زمانی مشترک ما بین دوره رشد محصول چغندرقد در منطقه مورد مطالعه و دوره شبیه‌سازی موجود مدل SWAT) انتخاب شد. آنچنان که در شکل ۶ مشخص است عملکرد مدل SWAT واسنجی شده ترکیبی در برآورد تبخیر- تعرق واقعی به مراتب بهتر از عملکرد روش پنمن- مونتیت- فائو بوده است به نحوی که ریشه میانگین مربعات خطا در سال‌های ۸۶ تا ۸۹ به ترتیب ۵/۴، ۶/۷، ۵/۲ و ۶/۵ میلیمتر در ماه برای مدل SWAT واسنجی شده ترکیبی به دست آمد. مقادیر متناظر برای روش پنمن- مونتیت- فائو نیز به ترتیب ۱۴/۵، ۱۵/۲، ۱۴/۲ و ۱۵ میلیمتر در ماه به دست آمدند. همچنین مجموع مقادیر تبخیر- تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از مدل SWAT واسنجی شده ترکیبی در طول دوره شبیه‌سازی حدود ۳۳۳۵ میلیمتر به دست آمد که در قیاس با مقدار متناظر آن در روش پنمن- مونتیت- فائو (حدود ۳۳۴۸ میلیمتر) به مقدار به دست آمده از الگوریتم سبال که حدود ۳۳۳۲ میلیمتر بوده، نزدیکتر بوده است که البته این اختلاف ناچیز است. مهمترین دلیل این امر عدم بیش برآورد و یا کم برآورد محض در روش پنمن- مونتیت- فائو در طی ۴ سال مورد بحث است که باعث شده علی‌رغم بروز مقادیر نسبتاً بالای خطا در برآورد تبخیر- تعرق واقعی

به‌بیان دیگر مقایسه نتایج در سه زیر حوضه نشان از آن دارد که مدل ترکیبی واسنجی شده تقریباً دارای عملکرد نزدیک به هم بوده (ریشه خطا بین ۶/۸۴ تا ۷/۸۲ میلیمتر در ماه)، در حالیکه مدل واسنجی شده بر اساس دبی رواناب دارای تغییرات عملکرد بیشتری در سه زیر حوضه (ریشه خطا بین ۱۰ تا ۱۸/۵۲ میلیمتر در ماه) بوده است. این موضوع بیانگر این نکته مهم است که افزوده شدن مؤلفه تبخیر- تعرق واقعی به مراحل واسنجی مدل SWAT نه‌تنها عملکرد مدل را در برآورد تبخیر- تعرق واقعی بهبود بخشیده است، بلکه دامنه تغییرات عملکرد مدل در سه زیرحوضه را نیز کاهش داده است. (Panhalkar (2015) به منظور شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیک حوضه آبریزی در کشور هندوستان و در حد فاصل سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ از مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب استفاده نمودند و متوسط مقادیر تبخیر- تعرق واقعی برآورد شده سالانه در حوضه مورد مطالعه خود را ۳۳۵/۷ میلیمتر گزارش نمودند در حالیکه مقادیر متناظر در تحقیق حاضر و در زیرحوضه‌های ۴۱، ۹۷ و ۱۳۸ به ترتیب ۲۸۹، ۲۳۷ و ۲۶۰ میلیمتر به دست آمد که البته با توجه به مشخص نبودن الگوی کشت (در تحقیق مذکور) و عدم تطابق زیرحوضه‌های دو تحقیق نمی‌توان در مورد کم برآورد نتایج تحقیق حاضر بحث نمود. همچنین در تحقیق دیگری مقادیر تبخیر- تعرق واقعی برآورد شده به کمک مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب، با مقادیر لایسیمتری مقایسه شده است که بروز مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در حدود ۱۲/۴ میلیمتر در ماه در قیاس با مقادیر متناظر آن در تحقیق حاضر (شکل ۵؛ مقادیر ۶/۸ تا ۷/۸ میلیمتر در ماه) بیانگر نقش مهم تبخیر- تعرق واقعی در بهبود واسنجی مدل SWAT می‌باشد (Marek et al., 2015).

در این تحقیق سعی شد تا دقت عملکرد مدل SWAT واسنجی شده

ماهانة (($14-15$) RMSE= میلیمتر)، مجموع مقادیر مذکور در طی ۲۵ ماه شبیه‌سازی به مقدار متناظر آن که از الگوریتم سبال به دست آمده است نزدیک باشد. از جمله دلایل مهم در توجیه عملکرد ضعیف روش پنمن- مونتیت- فائو می‌توان به عدم قطعیت‌های ناشی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع و عدم قطعیت در تخمین ضرایب گیاهی اشاره نمود.



شکل ۶- مقادیر تبخیر- تعرق واقعی به کمک سنجش از دور در قیاس با مقادیر برآورد شده همین مؤلفه به کمک مدل SWAT واسنجی شده ترکیبی (دوایر تو پر) و روش پنمن- مونتیت- فائو (دوایر تو خالی) در زیرحوضه منتخب؛ خط ممتد: خط ۱:۱؛ خط چین‌ها: خطوط رگرسیونی دو مدل

بررسی نتایج در سه زیرحوضه مورد مطالعه نشان داد که عملکرد مدل واسنجی شده ترکیبی SWAT از نقطه نظر بیش یا کم‌برآورد تبخیر- تعرق واقعی در حوضه‌های ۹۴ و ۱۳۸ در قیاس با زیرحوضه ۴۱ یکنواخت‌تر بوده است. ریشه میانگین مربعات خطا در زیرحوضه ۹۴ در ماه‌های کم و بیش‌برآورد تبخیر- تعرق واقعی به ترتیب ۶/۶۸ و ۷/۷۴ میلیمتر در ماه؛ در زیرحوضه ۱۳۸ به ترتیب ۸/۷ و ۷ میلیمتر در ماه و در زیرحوضه ۴۱ به ترتیب ۳/۳ و ۸/۶ میلیمتر در ماه به‌دست آمد. آنچنان که نتایج نشان می‌دهد خطای بیشتر در کم‌برآورد مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در زیرحوضه‌های ۴۱ و ۱۳۸ خطر کاهش کمیت و کیفیت محصول در این دو زیرحوضه را برجسته‌تر می‌سازد، درحالی‌که خطای بیشتر در بیش‌برآورد مؤلفه مذکور در زیرحوضه ۹۴ با تهدید بیش برداشت از منابع آب زیرزمینی و کسری مخازن همراه خواهد بود. اگرچه مدل SWAT در برآورد مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در زیرحوضه ۴۱، در کل دوره اعتبارسنجی (۴۰ ماه) و در ماه‌های بیش‌برآورد این مؤلفه (۱۷ ماه) به ترتیب با اختصاص مقادیر ۶/۸۴ و ۳/۳ میلیمتر در ماه به شاخص ریشه میانگین مربعات خطا، بهترین مقادیر را به خود اختصاص داده است؛ با اینحال بنظر می‌رسد که توازن بیشتر مدل SWAT در توزیع خطا میان ماه‌های کم و بیش‌برآورد تبخیر- تعرق واقعی در زیرحوضه‌های ۹۴ و ۱۳۸، عملکرد بهتری از این مدل به‌همراه داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر به‌کارگیری رواناب و ترکیب رواناب با تبخیر- تعرق واقعی (مدل ترکیبی) در شبیه‌سازی همین دو مؤلفه، در سطح حوضه آبریز نیشابور (۹۵۰۰ کیلومتر مربع) و در قالب مدل هیدرولوژیکی SWAT مورد بررسی قرار گرفت. برای رواناب از سه ایستگاه آب‌سنجی اندراب، خرو مجموع و حسین‌آباد (خروجی حوضه) و برای تبخیر- تعرق واقعی از سه زیرحوضه تولید شده توسط مدل SWAT با کاربری کشاورزی فاریاب در طی سال‌های ۸۹-۱۳۸۶ استفاده شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل SWAT واسنجی شده بر اساس رواناب و مدل ترکیبی در برآورد رواناب و در هر سه ایستگاه مذکور تقریباً عملکرد مشابهی داشتند به طوری‌که ریشه میانگین مربعات خطا برای دو مدل مذکور به ترتیب در حدود ۰/۰۷ و ۰/۰۵؛ ۰/۱۹ و ۰/۰۹؛ ۰/۰۶ و ۰/۰۲ به ترتیب در سه ایستگاه اندراب، خرو مجموع و حسین‌آباد به‌دست آمد. این در حالی است که تأثیر استفاده از بخش کامل‌تری از هیدرولوژی حوضه در واسنجی مدل SWAT، در برآورد تبخیر- تعرق واقعی خود را به‌صورت برجسته نشان داد بنحوی که ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد تبخیر- تعرق واقعی به کمک مدل واسنجی شده بر اساس رواناب در سه زیر حوضه ۴۱،

در سیستم‌های پویایی نظیر حوضه آبریز، مؤلفه‌های اصلی بیلان آب بر یکدیگر اثر گذارند (تأثیرات متقابل) بنحوی که بیش یا کم‌برآورد هر کدام از آنها سایر مؤلفه‌ها را از خود متأثر خواهد ساخت. اگر از چنین اثر متقابلی چشم‌پوشی نماییم، بیش یا کم‌برآورد هر مؤلفه به تنهایی نیز قابل تامل است. با توجه به نتایج شکل ۵ مدل SWAT واسنجی شده بر اساس دبی رواناب در هر سه زیرحوضه با کم‌برآورد چشمگیر تبخیر- تعرق واقعی همراه بوده است به طوری‌که به ترتیب در ۳۴، ۳۳ و ۲۸ ماه از کل دوره اعتبارسنجی (۴۰ ماه)، این مؤلفه کم برآورد شده است. این در حالی است که در مدل واسنجی شده SWAT بر اساس رواناب و تبخیر- تعرق واقعی در این سه زیرحوضه به ترتیب در ۲۳، ۱۶ و ۱۸ ماه کم‌برآورد تبخیر- تعرق واقعی مشاهده شد. اهمیت این موضوع از آن بابت است که کم‌برآورد تبخیر- تعرق واقعی (بیشتر از یک حد معین) و اعمال آن در برنامه‌ریزی‌های آبیاری می‌تواند منجر به کاهش کمیت و کیفیت محصول گردد، درحالی‌که بیش‌برآورد آن منجر به افزایش تلفات آب و افزایش کسری مخازن آب زیرزمینی خواهد شد؛ زیرا که عمده آب مورد نیاز آبیاری در دشت نیشابور از طریق منابع آب زیرزمینی تامین می‌گردد.

- Bastiaanssen WGM (2000) SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229:87-100
- Bieger K, Fohrer N, Hoermann G (2015) Detailed spatial analysis of SWAT-simulated surface runoff and sediment yield in a mountainous watershed in China. *Hydrological Sciences Journal* 60(5):784-800
- Bosch DD, Sheridan JM, Batten HL, Arnold JG (2004) Evaluation of the SWAT model on a coastal plain agricultural watershed. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 47(5):1493-1506
- Chu TW, Shirmohammadi A (2004) Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 47(4):1057-1073
- Cui X, Sun W, Teng J, Song H, Yao X (2015) Effect of length of the observed dataset on the calibration of a distributed hydrological model. *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resource* 368:305-311
- Daggupati P, Yen H, White MJ, Srinivasan R, Arnold JG, Keitzer CS, 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
- Du B, Arnold JG, Saleh A, Jaynes DB (2005) Development and application of SWAT to landscapes with tiles and potholes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 48(3):1121-1133
- Eckhardt K, Arnold JG (2001) Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology* 251:103-109
- Fontaine TA, Cruickshank TS, Arnold JG, 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
- Fu C, James L, Yao H (2015) Investigations of uncertainty in SWAT hydrologic simulations: a case study of a Canadian shield catchment. *Hydrological Processes* 29(18):4000-4017
- Green CH, Griensven AV (2008) Autocalibration in hydrologic modelling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling and Software* 23:422-434
- Gyamfi C, Ndambuki JM, Salim RW (2016) Application of SWAT model to the olifants basin: calibration, ۹۴ و ۱۳۸ به ترتیب ۱۸/۵۲، ۱۰ و ۱۱/۲۹ و برای مدل واسنجی شده ترکیبی به ترتیب ۶/۸۴، ۷/۳۴ و ۷/۸۲ میلیمتر در ماه به دست آمد. همچنین مقایسه نتایج مدل SWAT واسنجی شده ترکیبی در قیاس با روش پنمن - موتیث - فائو در برآورد تبخیر - تعرق واقعی در طی ۲۵ ماه متعلق به دوره اعتبارسنجی مدل نشان داد که مدل SWAT با اختصاص مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در بازه ۵/۲ تا ۶/۷ میلیمتر در ماه در قیاس با روش پنمن - موتیث - فائو با اختصاص مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در بازه ۱۴/۲ تا ۱۵/۲ میلیمتر در ماه به مراتب عملکرد بهتری داشته است.
- ### ۵- مراجع
- Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, 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, 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, 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, Hamidi Z (2013) Estimation of actual evapotranspiration at regional-annual scale using SWAT. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2(7):243-258 (In Persian)
- Allen RG, Tasumi M, Trezza R, Waters R, Bastiaanssen WGM (2002) SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land, Advanced Training and Users Manual. Version 1.0.
- Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, Abbaspour KC, White MJ, Srinivasan R, Santhi C, Harmel RD, van Griensven A, Van Liew MW, Kannan N, 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, Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34:73-89

- Pisinaras V, Petalas C, Gikas GD, Gemitzi A, Tsihrantzis VA (2010) Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the soil and water assessment tool (SWAT). *Desalination* 250:274-286
- Shawul AA, Alamirew T, 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
- Shen ZY, Gong YW, Li YH, Hong Q, Xu L, Liu RM (2009) A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the three gorges reservoir area. *Agricultural Water Management* 96:1435-1442
- Sophocleous MA (2005) Groundwater recharge and sustainability in the high plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal* 13(2):351-365
- Tolson BA, Shoemaker CA (2007) Cannonsville reservoir watershed SWAT 2000 model development, calibration and validation. *Journal of Hydrology* 337:68-86
- Uniyal B, Jha MK, Verma AK (2015) Parameter identification and uncertainty analysis for simulating streamflow in a river basin of eastern India. *Hydrological Processes* 29(17):3744-3766
- Wang X, Liang Z, Wang J (2014) Simulation of runoff in Karst-influenced lianjiang watershed using the SWAT model. *Scientific Journal of Earth Science* 4(2):85-92
- Wheatler HS, Mathias SA, Li X (2014) Groundwater modeling in arid and semi-arid areas. Cambridge University Press, 131p
- Wu K, 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, 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, Li H (2011) Groundwater-recharge estimation in the Ordos Plateau, China: Comparison of methods. *Hydrogeology Journal* 19:1563-1575
- Zhang X, Srinivasan R, Bosch D (2009) Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using Genetic Algorithms and Bayesian Model Averaging. *Journal of Hydrology* 374:307-317
- validation and uncertainty analysis. *Journal of Water Resource and Protection* 8:397-410
- Immerzeel WW, Droogers P (2008) Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 349:411-424
- Kannan N, White SM, Worrall F, Whelan MJ (2007) Hydrological modelling of a small catchment using SWAT-2000- Ensuring correct flow partitioning for contaminant modelling. *Journal of Hydrology* 334:64-72
- Li Z, Liu WZ, Zhang XC, Zheng FL (2009) Impact of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology* 377:35-42
- Li Z, Shao Q, Xu Z, 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
- Marek GW, Gowda PH, Evett SR, Baumhardt RL, Brauer DK, Howell TA, Marek TH, Srinivasan R (2015) Evaluation of SWAT for estimating ET in irrigated and dryland cropping systems in the Texas high plain. In: *Emerging Technologies for Sustainable Irrigation*, 10-12 November, Long Beach, California, USA, 1-14
- Milewski A, Sultan M, Yan E, Becker R, Abdeldayem A, Soliman F, Gelil KA (2009) A remote sensing solution for estimating runoff and recharge in arid environments. *Journal of Hydrology* 373:1-14
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Binger RL, Harmel RD, 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
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR (2011) Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406.
- Oeurng C, Sauvage S, 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
- Panhalkar SS (2014) Hydrological modeling using SWAT model and geoinformatic techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 17:197-207