نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۳، مهر - آبان ۱۳۹۸، ص. ۱۱۲۹-۱۱۱۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 13, Oct.-Nov. 2019, p. 1113-1129

تخمین و مقایسه میزان آب آبی و آب سبز با استفاده از مدل‌های SWAT و SWAT-MODFLOW در حوضه آبریز نیشابور

عالیه سعادت‌پور[۱]، امین علیزاده[۲*]، علی نقی ضیایی[۳]، عزیزا... ایزدی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲

چکیده

پیشرفت‌های اقتصادی و اجتماعی یک منطقه متأثر از مقدار کل منابع آب آن حوضه می‌باشد به‌طوری‌که دانستن مقدار دقیق منابع آب به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک حیاتی است. روش‌های سنتی تخمین منابع آب، تنها بر مقدار کمی آب آبی تمرکز داشته و اهمیت آب سبز مورد توجه قرار نگرفته است. در این مطالعه، منابع آب آبی و آب سبز در حوضه آبریز نیشابور توسط دو مدل SWAT و SWAT-MODFLOW مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین از الگوریتم SUFI-2، در بسته نرم افزاری SWAT-CUP برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیک نیشابور بر اساس دبی ماهانه رودخانه استفاده گردید. آمار رواناب چهار ایستگاه هیدرومتری در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۱ برای واسنجی و اعتبارسنجی این حوضه به کار برده شد. نتایج نشان داد که در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، ضرایب p-factor، r-factor، R^2 و NS که به منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب به کار برده شد، در خروجی حوضه به ترتیب حدود ۰/۳۷، ۰/۵۵، ۰/۸۶ و ۰/۸۵ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب حدود ۰/۲۹، ۰/۸۳، ۰/۷ و ۰/۶۵ بوده است. بررسی نتایج دو مدل نشان داد که مؤلفه‌های منابع آب به جز آب آبی، که مدل SWAT-MODFLOW مقدار بیشتری را تخمین زده، در سایر موارد تقریباً مشابه بدست آمده است. لذا با بررسی تغییرات مکانی آب آبی دو مدل مشاهده گردید که بیشترین تفاوت در محدوده آبخوان نیشابور می‌باشد که می‌تواند به دلیل قابلیت بهتر مدل تلفیقی در شبیه‌سازی فرایندهای مختلف از جمله تغذیه آب‌های زیرزمینی و نفوذ منطقه غیراشباع باشد. همچنین روند تغییرات مکانی آب سبز نشان داد که میزان آب سبز به سمت دشت نیشابور افزایش می‌یابد. تغییرات ماهانه آب آبی و سبز حاصل از شبیه‌سازی دو مدل گویای این مطلب است که روند تغییرات بارندگی، آب آبی و سبز تقریباً مشابه بوده است و در فصل زمستان با کاهش دما، اختلاف بین آب آبی و آب سبز بیشتر می‌شود. همچنین شیب تغییرات آب آبی و سبز در مدل تلفیقی ملایم‌تر می‌باشد.

واژه های کلیدی: آب آبی، آب سبز، بیلان آب، دشت نیشابور، مدل SWAT-MODFLOW

مقدمه

تاکنون تحقیقات بسیاری مبنی بر افزایش خطر کمبود آب و آسیب‌پذیری منابع آب در مقیاس منطقه‌ای و جهانی صورت گرفته است. از آنجایی که بخش کشاورزی عمده‌ترین مصرف‌کننده‌ی آب می‌باشد، توجه عمده مطالعات انجام گرفته شده در مورد کمبود آب بر تأثیر آن بر امنیت غذایی و آبی می‌باشد (Faramarzi et al., 2009). دو اصطلاح آب آبی[۵] و آب سبز[۶] اولین بار توسط فالکن مارک معرفی گردید و سپس توسط سایر محققین توسعه یافت (Falkenmark., 1995). از نظر مفهومی، آب آبی به مجموع تغذیه آب‌های زیرزمینی عمیق و رواناب سطحی گفته می‌شود. در حالی که به رطوبت خاک در مناطق غیراشباع آب سبز می‌گویند. فالکن مارک و راکستروم آب سبز را شامل دو مؤلفه جریان آب سبز[۷] و منبع آب سبز[۸] دانسته‌اند(Falkenmark & Rockstrom., 2006). شول و همکاران عنوان ذخیره آب سبز[۹] را به جای منبع آب سبز به کار گرفته‌اند (Schuol et al., 2008). جریان آب سبز معادل تبخیر-تعرق واقعی[۱۰] است که در قالب تبخیر از سطح خاک و آب و تعرق از

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴- محقق، مرکز تحقیقات آب دانشگاه سلطان قابوس، مسقط، عمان
(* - نویسنده مسئول: Email: alizadeh@um.ac.ir)

5- Blue water
6- Green water
7- Green water flow
8- Green water resource
9- Green water storage
10- Actual Evapotranspiration (AET)

پوشش گیاهی وارد اتمسفر می‌شود و ذخیره آب سبز (رطوبت خاک) میزان آب موجود در پروفیل خاک در انتهای یک دوره زمانی است. به عبارتی کشاورزی دیم از آب سبز تغذیه می‌کند، در حالی که کشاورزی آبی از آب آبی مهارشده سیراب می‌شود.

تحقیقات بسیاری برای تعیین منابع آب آبی و آب سبز از زمان معرفی این مفاهیم انجام شده است. به عنوان مثال، گرتن و همکاران و همچنین رست و همکاران از مدل LPJ/LPJmL[1] به منظور تخمین میزان مصرف آب آبی و آب سبز جهانی طی سی سال گذشته استفاده کردند(Gerten et al., 2005 , Rost et al., 2008). شول و همکاران مدل SWAT[2] را برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های منابع آب شیرین شامل آب آبی، آب سبز و ذخیره‌ی آب سبز در سطح زیرحوضه و با دقت زمانی ماهیانه برای کل آفریقا به کار برد (Schoul et al., 2008). همچنین از نتایج این مطالعه برای محاسبه شاخص‌های کمبود آب استفاده کرد. فرامرزی و همکاران با استفاده از مدل SWAT مؤلفه‌های منابع آب قابل دسترس شامل آب آبی و آب سبز را در مقیاس کشوری و استانی و با دقت زمانی ماهانه برای کل ایران بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که عملیات آبیاری تأثیر چشم‌گیری در دقت محاسبه بیلان آب دارد، به طوری که بدون در نظر گرفتن آبیاری، مقدار تبخیر-تعرق خیلی کمتر از واقعیت تخمین زده می‌شود. این مطالعه اطلاعات خوب و جامعی را در مورد منابع آب آبی و سبز در کشور فراهم می‌نماید. ولی با توجه به اینکه در این مطالعه از نقشه‌های با مقیاس بزرگ، در سطح کشور، استفاده شده و امکان مطالعه جزئیات بیشتر به علت بزرگ بودن محدود مطالعاتی نبوده، در نتیجه دارای دقت مکانی کم در مقیاس زیرحوضه است. بنابراین جهت تعیین دقیق منابع آب موجود در سطح زیرحوضه‌های هر استان باید مطالعاتی با اطلاعات دقیق‌تر صورت گیرد (Faramarzi et al., 2009). لیو و همکاران، تأثیر تغییر کاربری و پوشش اراضی را بر آب آبی و آب سبز در شمال چین تعیین کردند (Liu et al., 2009). اخوان و همکاران (۱۳۸۹)، از مدل SWAT به منظور تخمین مؤلفه‌های منابع آب شامل آب آبی، آب سبز و ذخیره‌ی آب سبز در حوضه‌ی آبریز همدان – بهار استفاده کردند. به طور کلی در این مطالعه اطلاعات خوبی در مورد مؤلفه‌های منابع آب، هم از نظر توزیع مکانی و هم از نظر توزیع زمانی به همراه باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد به دست آمد. نتایج تحلیل عدم قطعیت مؤلفه‌های منابع آب در این تحقیق نشان داد که میانگین ماهانه عدم قطعیت مربوط به تخمین آب آبی بیشتر از سایر مؤلفه‌هاست، زیرا این مؤلفه به تعداد پارامترهای بیشتری حساس می‌باشد. ژانگ و همکاران، با استفاده از مدل SWAT، توزیع مکانی و زمانی جریان آب سبز و آب آبی را برای حوضه رودخانه هیهه شبیه سازی کردند. آن‌ها بیان کردند که مدل‌های هیدرولوژیکی می‌توانند دید دقیق‌تری نسبت به مکانیسم‌های سطح زمین و فرایندهای هیدرولوژیکی داشته باشند و به عنوان یک ابزار پر قدرت، جهت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آب از لحاظ فضایی به کار برده شوند (Zang et al., 2012). از میان مدل‌های مذکور، مدل SWAT می‌تواند در یک حوضه بزرگ مقیاس به منظور تعیین مقدار تغییرات مکانی و زمانی منابع آب به کار برده شود (Arnold et al. 1998).

در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران، به واسطه‌ی میزان کم بارندگی، تغییرات زیاد و پراکندگی غیر یکنواخت آن، منابع آب در آبخوان و رودخانه‌ها به تعداد زیادی، از مسیر اصلی خود منحرف یا بهره‌برداری می‌شود (Abrishamchi and Tajrishi, 2005). بر این اساس تغییرات انسانی ایجاد شده در جریان‌های آب باعث ایجاد چالش‌های بزرگی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی می‌شود. کشاورزی آبی، که بیش از ۹۰٪ کل آب برداشتی و بیش از ۶۰٪ کل منابع آب تجدیدپذیر در کشور را استفاده می‌کند (Alizadeh and Keshavarz, 2005; Keshavarz et al., 2005) ، تأثیر عمده‌ای بر بیلان آب هیدرولوژیکی می‌گذارد. بنابراین، ترکیب کردن شیوه‌های مدیریت آبی (به عنوان مثال ذخیره‌ی آب توسط سدها و آبیاری در کشاورزی) برای اطلاع از مقدار واقعی و دقیق‌تر منابع آب موجود در حوضه‌های مستقل و یا کل کشور ضروری می‌باشد (Faramarzi et al., 2009).

حوضه آبریز نیشابور در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرارگرفته است، بنابراین برای تأمین آب موردنیاز برای بخش کشاورزی در این منطقه اغلب از آب زیرزمینی استفاده می‌شود. دشت نیشابور از سال ۱۳۶۶ به علت برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و افت سریع سطح ایستابی ممنوعه بحرانی بوده است (وزارت‌نیرو، ۱۳۸۹). مطالعات متعددی در دشت نیشابور صورت گرفته است که در این رابطه، علیزاده و همکاران (۱۳۹۲) مدل مفهومی و نیمه توزیعی SWAT را برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس سال-حوضه به کار بردند. شفیعی و همکاران (۱۳۹۲) نیز به واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در حوضه آبریز نیشابور پرداخت و به این نتیجه رسید که به دلیل وجود منابع متعدد عدم قطعیت نمی‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی توزیعی حوضه آبریز در مناطق خشک و نیمه خشک انتظار زیادی داشت. ایزدی و همکاران (۲۰۱۵) از دو مدل SWAT و MODFLOW بصورت ترکیبی به منظور شبیه‌سازی توأمان جریان سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز نیشابور استفاده کردند. مدل ترکیبی توسط پارامترهای رواناب، محصول گندم، برداشت آب زیرزمینی و سطح ایستابی واسنجی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که توزیع مکانی تغذیه متأثر از عوارض طبیعی موجود در منطقه بوده و متوسط تغذیه سالانه ۳۹۰ میلیون مترمکعب می‌باشد.

تاکنون روش‌های زیادی جهت تخمین موجودیت منابع آب با

1- Lund-Potsdam-Jena managed Land
2- Soil and Water Assessment Tool

استفاده از الگوهای آب سطحی در ابعاد متفاوت زمانی و مکانی ارایه و به کار برده شده‌اند. با این حال، تا به امروز مطالعه‌ای به منظور آگاهی از رفتار متقابل آب سطحی و آب زیرزمینی بر تخمین موجودیت منابع آب صورت نگرفته است. هر دو مدلSWAT (به عنوان مدل آب سطحی) وMODFLOW (به عنوان مدل آب زیرزمینی) دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. مدل SWAT در مواجهه با جریان آب زیرزمینی به دلیل ماهیت" یکجا "بودن آن نمی‌تواند پارامترهای توزیعی آب زیرزمینی را شبیه‌سازی نماید. همچنین، مدل MODFLOW نیز به دلیل درنظرنگرفتن محیط غیراشباع قادر به محاسبه تغذیه آب زیرزمینی نمی‌باشد. بنابراین، با درنظرگرفتن ویژگی‌های برجسته دو مدل، می‌توان چرخه کامل هیدرولوژیکی را با تلفیق دو مدل شبیه‌سازی و کمی نمود. اگر تغذیه آب زیرزمینی محاسبه شده برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیک یا HRU[1] در مدل SWAT، به عنوان ورودی مدل MODFLOW درنظرگرفته شود و جریان آب زیرزمینی بین آبخوان و رودخانه در MODFLOW محاسبه و با SWAT مبادله گردد، در این صورت می‌توان خصوصیات زمانی و مکانی حوضه را به طور مناسبی نشان داد.

هدف اصلی این تحقیق، برآورد آب آبی و آب سبز و موجودیت منابع آب در مقیاس HRU در دشت نیشابور با استفاده از دو مدل SWAT-MODFLOW (به عنوان مدل یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی) و مدل SWAT (به عنوان مدل آب سطحی) و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌باشد. همچنین، مشخص کردن توزیع زمانی و مکانی پارامترهای منابع آب از دیگر اهداف این مطالعه است. نتایج این مطالعه منجر به درک بهتر مفهوم منابع آب آبی و آب سبز شده و اطلاعات مفیدی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی در حوضه نیشابور در اختیار سیاست‌گذاران و مسؤولان اجرایی قرار خواهد داد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

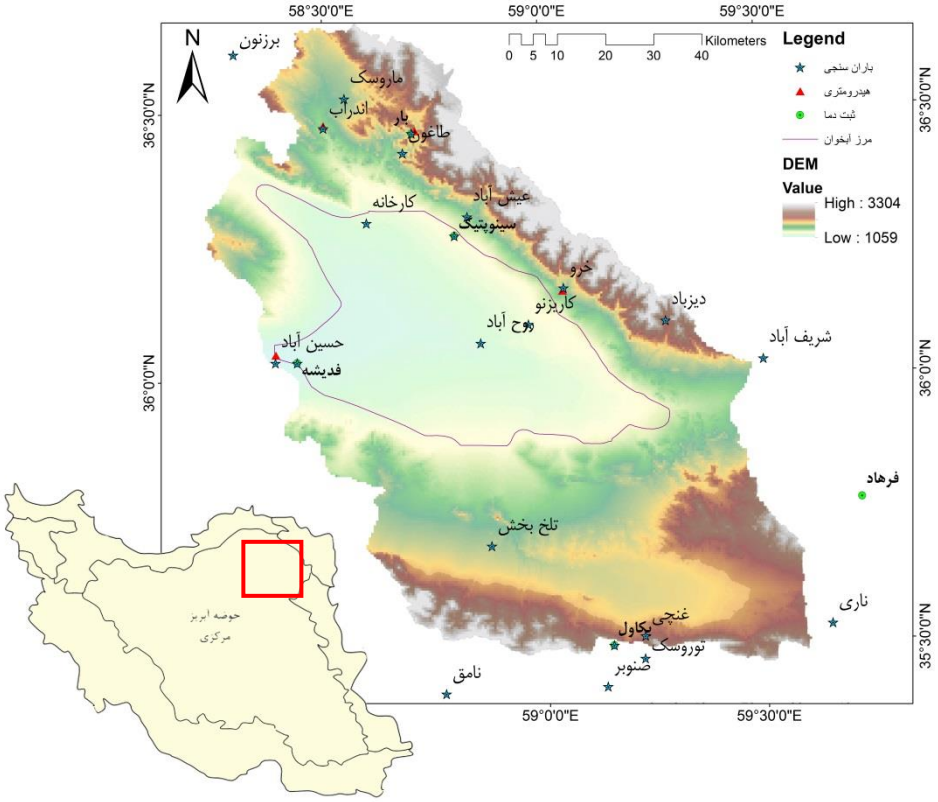
منطقه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، دشت نیشابور واقع در حوضه آبریز نیشابور است که بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی می‌باشد. این حوضه با وسعت کل ۹۱۵۷ کیلومتر مربع در بین عرض‌های شمالی '۴۰ °۳۵ تا '۳۹ °۳۶ و طول‌های شرقی' ۱۳ °۵۸ تا ۳۰ °۵۹ قرار گرفته است. حوضه آبریز نیشابور از شمال به خط الرأس ارتفاعات بینالود، از شرق به بلندی‌های لیلاجوق و یال پلنگ، از جنوب به تپه ماهورهای نیزه بند، سیاه کوه و کوه نمک و از غرب به حوضه آبریز دشت سبزوار محدود می‌شود (ولایتی و توسلی، ۱۳۷۰). شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بلندترین نقطه منطقه در ارتفاعات بینالود واقع شده که از سطح دریا ۳۳۰۵ متر ارتفاع دارد. پایین‌ترین نقطه در محل خروجی رودخانه اصلی در جنوب غربی حوضه و منطقه حسین‌آباد جنگل قرار گرفته است که حدود ۱۰۵۶ متر از سطح دریا بلندتر می‌باشد. آب و هوای منطقه برّی، نیمه خشک تا خشک است. میانگین دمای ماهانه در ایستگاه بار (معرف مناطق کوهستانی) ۱۳ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه محمدآباد – فدیشه (معرف مناطق دشتی) ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین متوسط بارندگی و تبخیر سالانه حوضه به ترتیب حدود ۲۳۴ و ۲۳۳۵ میلی‌متر می‌باشد (ولایتی و توسلی، ۱۳۷۰).

مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوضه‌ای می‌باشد که توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا (Agricultural Research Service) برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است (Neitsch et al., 2002). ناهمگنی‌های مکانی در منطقه مورد مطالعه با تقسیم حوضه به زیرحوضه‌هایی بررسی می‌شود. زیرحوضه‌ها به تعدادی واحدهای کوچکتر (واحدهای پاسخ هیدرولوژیک) تقسیم می‌شوند، این واحدها دارای ترکیبات یکسانی از خاک، پستی و بلندی و کاربری اراضی می‌باشند. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاهان، عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد (رستمیان، ۱۳۸۷). رابطه‌ی بیلان آبی خاک، مبنای مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. در SWAT اجزای بیلان آب و مدیریت در سطح واحدهای واکنش هیدرولوژیک محاسبه و سپس برای زیرحوضه‌ها میانگین‌گیری وزنی می‌شود. همچنین فرآیندهای شبیه‌سازی شده در مدل SWAT شامل رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر، مصرف آب گیاه، جریان جانبی و نفوذ به آبخوان کم عمق و عمیق می‌باشد. رواناب سطحی توسط روش شماره منحنی SCS اصلاح شده با استفاده از بارندگی روزانه و بر اساس گروه هیدرولوژیک، خصوصیات پوشش زمین و کاربری اراضی و رطوبت اولیه‌ی خاک تخمین زده می‌شود (Arnold et al., 1998).

در این مطالعه، تبخیر–تعرق پتانسیل (PET) با استفاده از روش هارگریوز (Hargreaves et al., 1985) با توجه به داده‌های هواشناسی موجود، تخمین زده شده است. همچنین، پتانسیل تبخیر آب خاک، به صورت تابعی از تبخیر–تعرق پتانسیل و شاخص سطح برگ تخمین زده می‌شود. تبخیر واقعی از سطح خاک توسط توابع نمایی با توجه به میزان رطوبت و عمق خاک قابل محاسبه است. میزان تعرق گیاهان به صورت تابعی خطی از تبخیر–تعرق پتانسیل، شاخص سطح برگ و عمق ریشه تخمین زده می‌شود و می‌تواند بوسیله مقدار آب خاک محدود شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۲).

1- Hydrologic Response Unit



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز نیشابور در ایران و ایستگاه‌های مستقر در سطح حوضه

ساختار مدل SWAT

برای اجرای مدل، از داده‌های روزانه ۲۳ ایستگاه باران‌سنجی، ۴ ایستگاه تبخیرسنجی و ۳ ایستگاه تابش‌سنجی در یک دوره ۱۳ ساله (۲۰۱۲-۱۹۹۷) مستقر در منطقه استفاده شد. همچنین حوضه آبریز نیشابور با استفاده از مدل رقومی– ارتفاعی[1] STRM با اندازه سلول ۹۰ متر، نقشه واحدهای اراضی خاک با دقت ۱:۱۰۰۰۰۰ و دارای ۴۱ واحد ارضی، نقشه کاربری اراضی با دقت ۱:۱۰۰۰۰۰ دارای ۱۴ کلاس اصلی به ۲۴۸ زیرحوضه و ۶۵۷۹ واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) تقسیم شد. از آنجایی که حوضه آبریز نیشابور یک حوضه کشاورزی است، مدیریت گیاه، به شدت فرآیندهای مؤلفه‌های بیلان آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. لذا داده‌های مدیریتی برای دوره‌ی شبیه‌سازی از ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹ محصولات گندم آبی و دیم مطابق با مطالعه ایزدی و همکاران به مدل وارد گردید (Izady et al., 2015). اجرای مدل بر اساس گام زمانی روزانه از اول ژانویه ۱۹۹۸ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۱ صورت گرفت. سه سال اول به منظور سازگاری مدل با شرایط موجود و تعیین اولیه ضرایب پارامترها[2] مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری اندرآب، بار اریه، خرو مجموع، عیش‌آباد، روح آباد و حسین‌آباد جنگل برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شد. به منظور اینکه مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی جریان پایه رودها در کوهستان باشد، چشمه‌های موجود به عنوان منابع نقطه‌ای وارد مدل شدند. از آنجایی که آبیاری تأثیر بسزایی در بیلان هیدرولوژیکی حوضه‌ی رودخانه دارد (Faramarzi et al., 2009)، فعالیت‌های انسانی از جمله منحرف کردن آب به منظور برداشت از رودها برای کشاورزی، جهت کاهش عدم قطعیت در مدل‌سازی، به مدل وارد گردید.

واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت

پس از جمع‌آوری داده‌های هیدرومتئورولوژی، ژئومورفولوژی، کشاورزی، خاک‌شناسی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی منطقه، ابتدا مدل SWAT به صورت ماهانه اجرا شد و سپس واسنجی انجام گردید. ۹ سال از کل داده‌های موجود برای هر ایستگاه در مرحله واسنجی و دو سال داده برای مرحله اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. در این تحقیق از روش SUFI2 جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل SWAT استفاده شد. این برنامه در بسته نرم افزاری SWAT-CUP

1- DEM
2- Warm-up

به مدل SWAT لینک شده است. در الگوریتم بهینه‌سازی SUFI2، هدف در برگرفتن بیشترین مقادیر داده مشاهده شده، با کمترین ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵ درصد می‌باشد. برای به کمیت درآوردن عدم قطعیت در روش SUFI2، ضرائب p-factor و r-factor پیشنهاد شده است که به ترتیب برای به کمیت در آوردن قدرت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت می‌باشند. p-factor درصدی از داده‌های مشاهده شده است که در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند و مقدار ایده‌آل آن زمانی است که تمامی داده‌های مشاهده در محدوده باند قرار بگیرند (p-factor=1). از طرف دیگر r-factor برابر میانگین فاصله بین حدود بالا و پایین باند ۹۵ درصد است که با تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهده شده نرمال شده است (Abbaspour, 2007).

همچنین علاوه بر آن، آماره‌های R^2[1]، NS[2] و MSE[3] نیز به منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب به کار برده شد. ضریب R^2 (ضریب تشخیص، تبیین یا تعیین) نشان‌دهنده همخوانی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی است و دامنه آن بین صفر تا یک است. ضریب نش–ساتکلیف (NS) نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱ هماهنگی دارد. مقدار این آماره بین ۱ و منفی بینهایت متغیر است و مقادیر بین صفر و یک به‌عنوان سطح عملکرد قابل قبول و مقدار یک مقدار بهینه است (Moriasi et al., 2007). در این تحقیق ضریب نش–ساتکلیف (NS) به عنوان تابع هدف و ۲۳ پارامتر مؤثر بر میزان رواناب انتخاب شدند. به این ترتیب که ابتدا ۷ پارامتر که در سطح کل حوضه در SWAT محاسبه می‌گردد (مانند پارامترهای ذوب برف[4]، ضریب تأخیر رواناب[5] و اتلاف آب از طریق انتقال جریان[6])، برای کل حوضه واسنجی و ثابت نگه داشته شد، سپس ۱۶ پارامتر که به صورت مکانی در هر زیرحوضه یا واحد HRU قابل تعریف است برای واسنجی جداگانه ایستگاه‌های هیدرومتری شامل اندرآب، بار اریه، خرو مجموع، عیش‌آباد، روح‌آباد و حسین‌آباد جنگل واسنجی شدند. پس از آن ۵۰۰ مرحله شبیه‌سازی در چندین مرحله تکرار انجام پذیرفت. دامنه پارامترها پس از هر تکرار اصلاح شد و عدم قطعیت پارامترها در هر مرحله کاهش یافت. بعد از این که دامنه پارامترها تا حدودی کاهش یافت، تحلیل حساسیت مطلق (تغییر یک پارامتر به شرط ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها) انجام گردید و به این ترتیب تأثیر هر پارامتر در میزان رواناب شبیه‌سازی شده به وسیله مدل سنجیده شد. در این مرحله دو ایستگاه روح‌آباد و عیش‌آباد به دلیل جواب‌های نامناسب، که می‌توانند ناشی از خطای اندازه‌گیری رواناب در حوضه و یا برداشت‌های غیرقانونی از بالادست رود باشد که در ورودی مدل وارد نشده است، حذف گردیدند. پس از آن مدل با مجموعه جدید پارامترها مجدداً در ۵۰۰ مرحله شبیه‌سازی اجرا شد و در هر تکرار دامنه پارامترها تعدیل گردید. پس از آن کل حوضه، با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولوژی ثابت برای ایستگاه‌های مذکور، واسنجی شد.

1- Coefficient of determination
2- Nash-Sutcliffe
3- Mean Square Error
4- SFTMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN, TIMP
5- SURLAG
6- TRNSRCH

مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW

مدل SWAT-MODFLOW یک مدل تلفیقی توسعه یافته است که توسط بیلی و همکاران، با استفاده از ترکیب کردن آخرین نسخه‌ی مدل‌های SWAT 2012 و MODFLOW-NWT ارائه شده است. در این مدل، SWAT کلیه‌ی فرایندهای مرتبط با سطح زمین، رشد گیاه، جریان رود و فرایندهای ناحیه‌ی خاک و MODFLOW-NWT جریان سه بعدی آب زیرزمینی و تمامی منابع و چشمه‌های مرتبط (مانند تغذیه، پمپاژ، بازگشت آب به زهکش‌ها و تعامل با شبکه‌ی رودخانه‌ها) را محاسبه می‌کند. کدهای هر دو مدل با یکدیگر در یک کد فورترن ترکیب شده‌اند و با هم در قالب یک واحد اجرا می‌شوند. پس از فراخوانی داده‌های ورودی برای هر دو مدل SWAT و MODFLOW، شبیه‌سازی از طریق فرایند تکراری روزانه‌ی محاسبات HRU در SWAT، انتقال داده‌ها به MODFLOW، اجرای MODFLOW، انتقال داده‌ها به SWAT و مسیریابی آب از طریق جریان شبکه حوضه، انجام می‌شود. مرحله‌ی اصلی در لینک کردن دو مدل SWAT و MODFLOW ورود نفوذ عمقی محاسبه شده توسط HRU (برای مثال آبی که در زیر پروفیل یا ستون خاک موجود است) به عنوان تغذیه به سلول‌های شبکه[7] MODFLOW می‌باشد. پس از این مرحله آب زیرزمینی توسط پمپاژ از سلول‌های شبکه MODFLOW به جریان ورودی SWAT واگذار می‌شود. با این هدف، SWAT حجم تغذیه حاصل از آبیاری و MODFLOW حجم جریان برداشت شده آب زیرزمینی توسط پمپاژ به زمین‌های کشاورزی را محاسبه می‌کند. (Bailey et al. 2016).

ساختار مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW

به منظور مدل‌سازی تلفیقی، محدوده‌ی سطحی توسط مدل واسنجی شده SWAT که شامل ۲۴۸ زیرحوضه و ۶۵۷۹ HRU است و محدوده‌ی زیرسطحی توسط مدل MODFLOW شامل یک لایه با ۲۰۲۴۰ سلول فعال (۱۷۶ سلول افقی و ۱۱۵ سلول عمودی)، اجرا گردید. این محدوده به ۲۴ زون برای پارامتر کردن مدل تقسیم

7- Grid cells of MODFLOW

گردید. شرایط مرزی مدل‌سازی آبخوان‌های حوضه مشابه مطالعه‌ی ایزدی و همکاران (۲۰۱۵) در نظر گرفته شده است. محدوده‌های شمال و شمال شرقی و بخشی از جنوب و جنوب غربی مرزهای زیرزمینی دارای شرایط مرزی با بار مشخص[1] می‌باشند که جریان آب زیرزمینی را به ترتیب از کوه‌های بینالود در شمال، ارتفاعات لیلاجوق و یال پلنگ در شرق و تپه ماهورهای نیزه‌بند، سیاه کوه و کوه نمک در جنوب دریافت کرده و از مرزهای حسین‌آباد در جنوب غربی از آبخوان خارج می‌کنند. هد اولیه‌ی مرزی براساس سطح ایستابی آب زیرزمینی مشاهده‌ای نزدیک مرز تخمین زده شده است. شرایط بدون جریان نیز به عمده‌ی مرزهای زیرزمینی جنوب غربی و شمال غربی اعمال شده است. اطلاعات سطح مقطع رودها از نتایج SWAT استخراج شده و با استفاده از نرم‌افزار Google earth بررسی گردید. بعد از جمع‌آوری همه‌ی داده‌های مورد نیاز، مدل با استفاده از ابزارهای خارجی شامل ArcGIS و ModelMuse راه‌اندازی شد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل و آنالیز عدم قطعیت

پس از تکمیل مدل، پارامترهای مدل به منظور اطمینان از دقت مطلوب نتایج نهایی، باید واسنجی و اعتبارسنجی گردد. دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۹۸ به منظور سازگاری مدل با شرایط موجود و تعیین اولیه‌ی پارامترها (warm-up) مورد استفاده قرار گرفت و در تجزیه تحلیل‌ها در نظر گرفته نشد. همچنین مدل SWAT برای حوضه آبریز نیشابور بر اساس دبی ماهانه رودخانه، برای ۹ سال (۲۰۰۹-۲۰۰۱) واسنجی و ۲ سال بعد (۲۰۱۱-۲۰۱۰) نیز صحت‌سنجی گردید. در شکل ۲ مقایسه بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و همچنین باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد آن‌ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل، زمان رسیدن به حداکثر رواناب را به خوبی شبیه‌سازی نموده است. در جدول ۱ مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل برای دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی آورده شده است. مقادیر r-factor حاصل از واسنجی رواناب ماهیانه بین ۰/۰۶ تا ۰/۵۵ می‌باشد. مقادیر نسبتاً کوچک r-factor بیانگر واسنجی خوب رواناب در این حوضه آبریز است. از طرفی، مقادیر p-factor که نشان دهنده درصد داده‌های مشاهده‌ای در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد می‌باشد، بین ۰/۰۷ و ۰/۳۷ به دست آمد. این مقادیر کوچک بوده و نشان‌دهنده عدم قطعیت زیاد در پیش‌بینی‌هاست. یکی از دلایل کم بودن مقادیر p-factor این است که در اکثر ایستگاه‌ها جریان پایه توسط مدل کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی شده است (شکل ۲). در نتیجه مقادیر مشاهده‌ای، خارج از باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد واقع شده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که در ایستگاه‌های اندرآب، بار اریه و خرو مجموع که در قسمت کوهستانی حوضه آبریز قرار گرفته‌اند، مدل در تخمین حداکثر جریان رواناب ضعیف عمل کرده که شاید یکی از دلایل آن مربوط به ضعف مدل SWAT در ذوب برف برای ایستگاه‌های کوهستانی باشد (Fontaine et al. 2002). علاوه بر این بر اساس فرضیات فیزیکی پایه مدل SCS، این روش نمی‌تواند به خوبی رواناب حاصل از ذوب یخ یا بارندگی روی زمین‌های یخ‌زده را پیش‌بینی کند (Maidment, 1992). بدیهی است که در نظر گرفتن خصوصیات بارندگی، برای حوضه‌های نیمه خشکی مثل نیشابور که بارش‌های کوتاه مدت و شدید رخ می‌دهد، ضروری می‌باشد. به علاوه، پارامترهای ذوب برف و اتلاف آب از طریق انتقال جریان که حساس‌ترین پارامتر در دوره واسنجی هیدرولوژی است، برای کل حوضه در SWAT یک مقدار در نظر گرفته می‌شود که از نقاط ضعف مدل است و بهتر است به صورت مکانی در هر زیر حوضه یا واحد HRU تعریف شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۲). لازم به ذکر است که مدل‌سازی دبی جریان در نواحی خشک و نیمه خشک نسبت به مناطق مرطوب بسیار طاقت فرساست، به دلیل اینکه جریان در این مناطق کم و در اکثر مواقع گسسته می‌باشد و تنها برای بارش‌های با مقادیر زیاد پیوستگی جریان برقرار است (Poff and Ward, 1989; Walker and Thoms, 1993). در جدول ۱ مشاهده می‌شود که مقدار ضریب R^2 بین ۰/۵۲ تا ۰/۸۶ قرار گرفته است که کمترین آن مربوط به ایستگاه خرو مجموع و بیشترین آن مربوط به حسین آباد جنگل (خروجی حوضه آبریز) است. همچنین ضریب نش-ساتکلیف (NS) بین ۰/۴۱ تا ۰/۸۵ بود. با توجه به این مقادیر، واسنجی مدل در خروجی حوضه از دقت بسیار خوبی برخوردار است که نشان‌دهنده این است که حوضه آبریز نیشابور به طور کلی خوب شبیه‌سازی شده است.

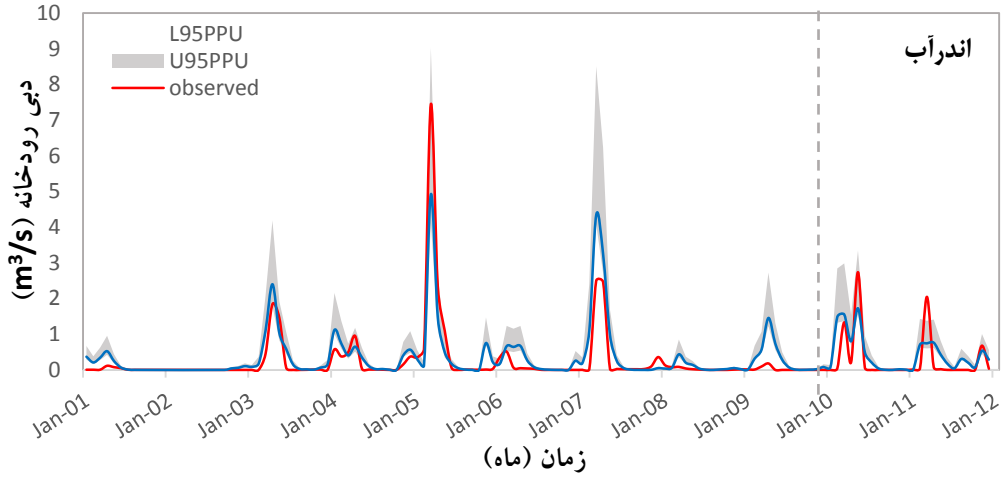
نتایج اعتبارسنجی برای ایستگاه‌های اندرآب، بار اریه، خرو مجموع و حسین آباد جنگل در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. در مرحله اعتبارسنجی رواناب ماهانه، محدوده پارامتر p-factor بین ۴ و ۲۹ درصد به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های اندرآب و حسین آباد جنگل به دست آمد. مشاهده می‌شود که مقادیر r-factor در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از ۱ بوده که بیانگر اعتبارسنجی خوب رواناب در این حوضه آبریز می‌باشد. ضریب R^2 به دست آمده در مرحله اعتبارسنجی رواناب ماهانه بین ۰/۳۴ تا ۰/۷ است که کمترین آن مربوط به ایستگاه خرو مجموع و بیشترین آن مربوط به حسین آباد جنگل می‌باشد. بازه تغییرات ضریب نش- ساتکلیف به دست آمده در مرحله اعتبار سنجی بین ۰/۳۱ تا ۰/۶۵ است که کمترین و بیشترین مقدار آن به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های بار اریه و حسین آباد جنگل می‌باشد. نتایج اعتبارسنجی جریان نشان می‌دهد که آماره‌های p-factor و r-factor مشابه با نتایج واسنجی بودند که نشان‌دهنده

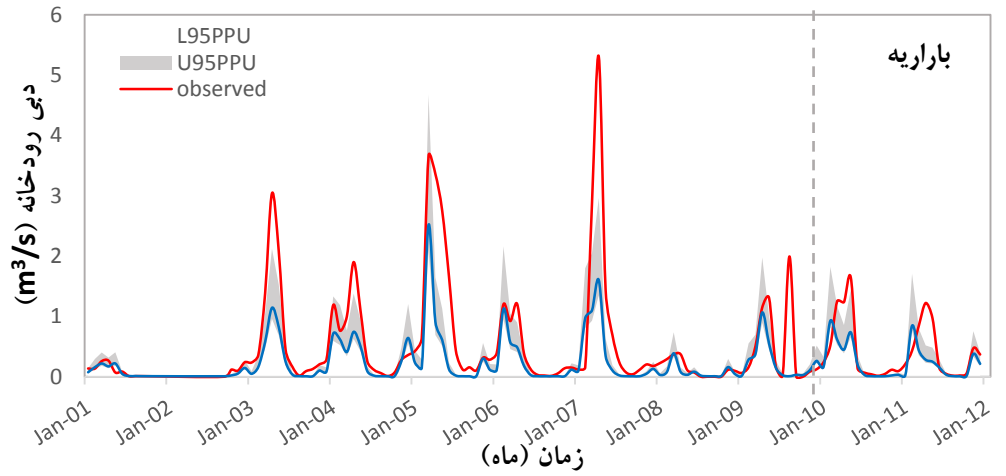
1- Specified head boundaries

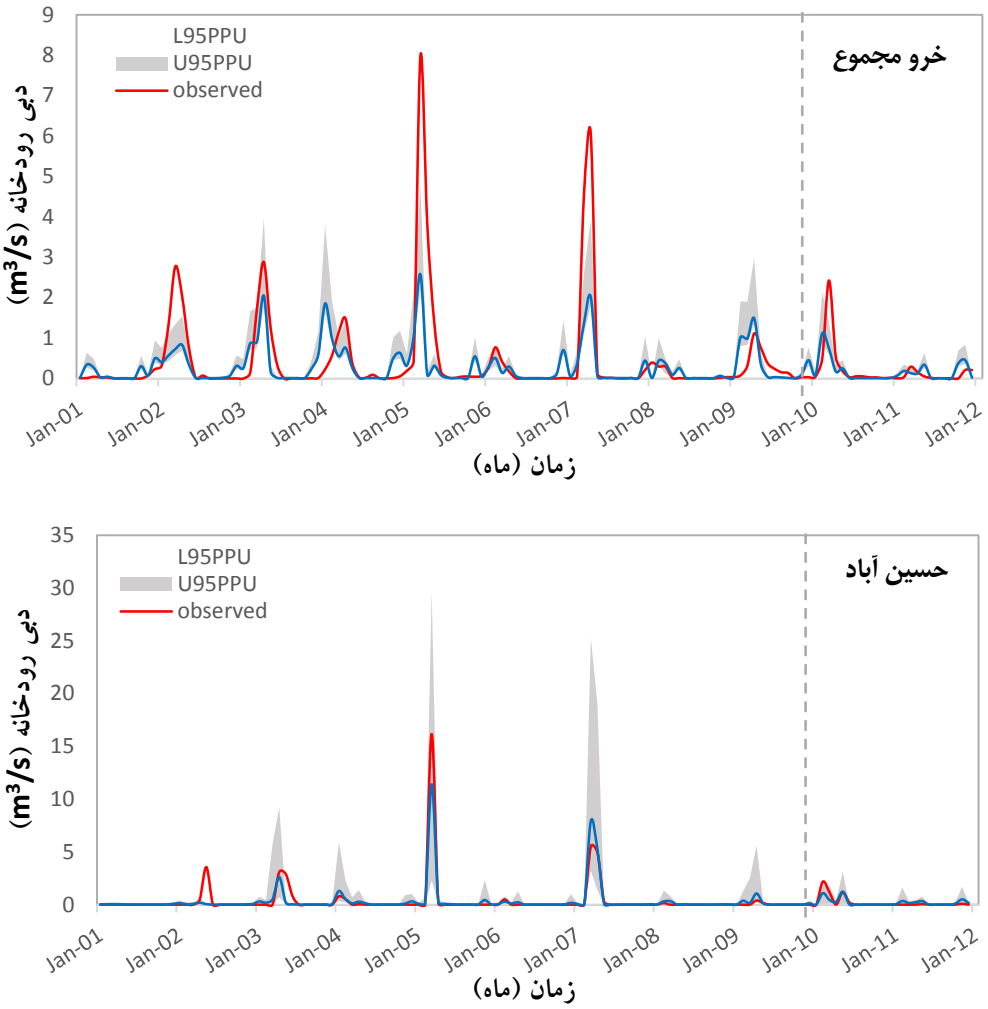
سازگاری دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌هاست. با این حال، شبیه‌سازی جریان در ایستگاه خروجی حوضه (حسین‌آباد جنگل) بهتر از سایر ایستگاه‌ها انجام شده است. به طور کلی، دقت شبیه‌سازی مدل برای دوره اعتبارسنجی رضایت بخش است که مؤید آن است که می‌توان از مدل SWAT برای تجزیه و تحلیل آب آبی و سبز در حوضه آبریز نیشابور استفاده کرد.

جدول ۱- مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل SWAT برای دوره‌ی واسنجی (صحت‌سنجی)

ایستگاه	MSE	NS	R^2	r-factor	p-factor
اندرآب	۲/۸ (۲/۱)	۰/۷۳ (۰/۴۳)	۰/۷۵ (۰/۴۷)	۰/۱ (۰/۱۳)	۰/۱۲ (۰/۰۴)
بار	۱/۶ (۵/۰)	۰/۴۱ (۰/۳۱)	۰/۶۷ (۰/۴۶)	۰/۰۶ (۰/۱)	۰/۱۳ (۰/۰۸)
خرو	۱/۶ (۸/۳)	۰/۴۱ (۰/۳۴)	۰/۵۲ (۰/۳۴)	۰/۰۷ (۰/۱)	۰/۰۷ (۰/۱۳)
حسین‌آباد	۴/۷ (۹/۵)	۰/۸۵ (۰/۶۵)	۰/۸۶ (۰/۷۰)	۰/۵۵ (۰/۸۳)	۰/۳۷ (۰/۲۹)







شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده رواناب و همچنین باند عدم قطعیت دبی شبیه‌سازی شده (قسمت خاکستری رنگ) در دوره واسنجی (اول سال میلادی ۲۰۰۱ تا انتهای سال میلادی ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (اول سال میلادی ۲۰۱۱ تا انتهای سال میلادی ۲۰۱۲) در چهار ایستگاه هیدرومتری اندرآب، بار اریه، خرو مجموع و حسین آباد جنگل

ارزیابی منابع آب آبی و آب سبز

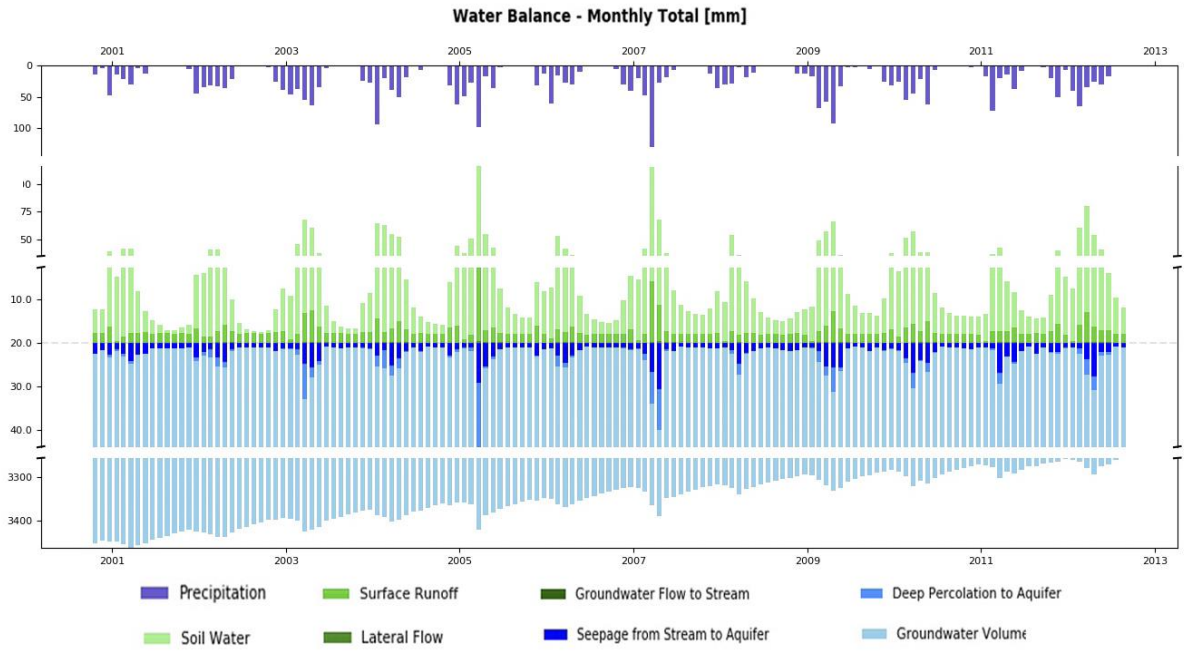
پس از واسنجی مدل SWAT برای حوضه آبریز نیشابور، مدل آب سطحی SWAT با مدل آب زیرزمینی MODFLOW لینک شده و نتایج مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW به صورت دستی و از طریق تغییر پارامترهای هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (Sy) در مدل MODFLOW، برای بدست آوردن بهترین تطابق سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده با مقدار مشاهده‌ای واسنجی گردید. سپس مقادیر متوسط سالانه منابع آب آبی و آب سبز خروجی هر دو مدل در این حوضه، در سال‌های ۲۰۰۹- ۲۰۰۱ محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است. مجموع پارامترهای WYLD و DA_RCHG می‌توانند به عنوان آب آبی بدست آید و آب سبز معادل مجموع جریان آب سبز (ET) و ذخیره آب سبز (SW) می‌باشد. با توجه به جدول ۱، در مدل SWAT-MODFLOW حدود ۱۱۲ میلی‌متر آب آبی و ۲۶۷ میلی‌متر آب سبز در سال تخمین زده شده است لذا میزان آب سبز دو برابر آب آبی می‌باشد. همچنین در مدل SWAT از این میزان بارندگی، حدود ۱۰۰ میلی‌متر آب آبی و مقدار ۲۲۷ میلی‌متر آب سبز بدست آمده است لذا میزان آب سبز ۲/۲۷ برابر آب آبی تخمین زده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان آب سبز در دو مدل SWAT و SWAT-MODFLOW تقریباً برابر است ولی میزان آب آبی در مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW بیشتر از مدل SWAT تخمین زده شده است که به دلیل تخمین بهتر جریان زیرزمینی توسط مدل MODFLOW بوده است.

جدول ۱- میانگین بارندگی و مؤلفه‌های منابع آب در حوضه آبریز نیشابور

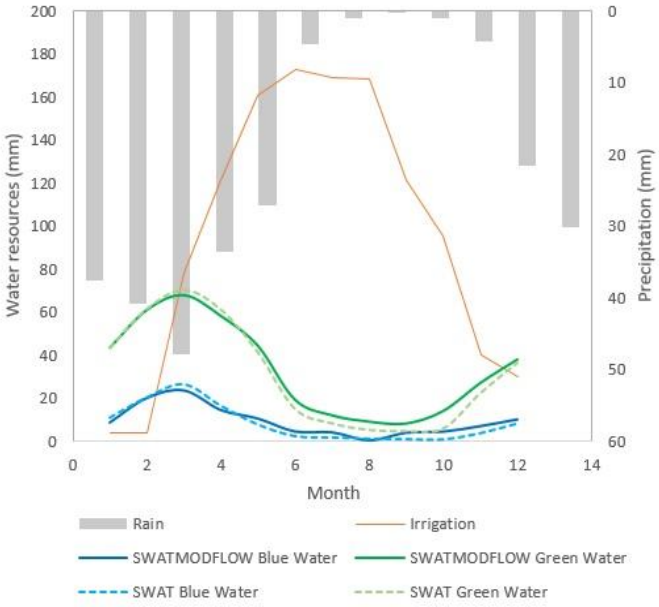
پارامتر	SWAT	SWAT-MODFLOW
بارندگی (میلی‌متر در سال)	۲۴۹/۲	۲۴۹/۲
جریان آب سبز (میلی‌متر در سال)	۲۰۶/۰۳	۲۰۴/۷
ذخیره آب سبز (میلی‌متر در سال)	۲۰/۶۵	۲۲/۹۸
آب آبی (میلی‌متر در سال)	۹۹/۸۷	۱۱۲/۱۵

توزیع زمانی تغییرات آب آبی و آب سبز

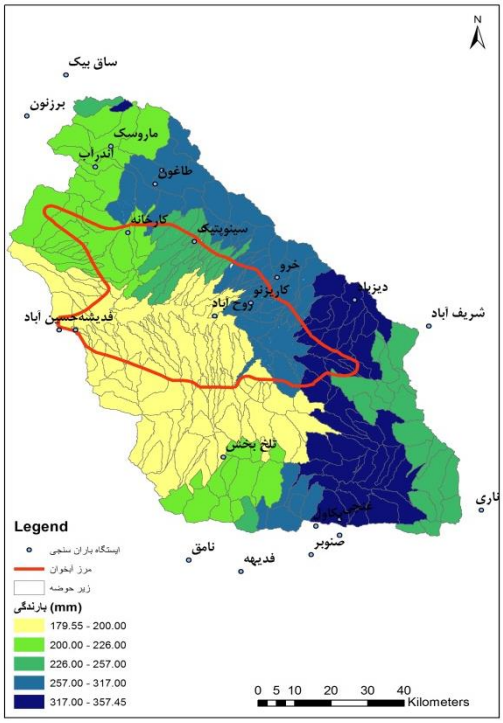
در شکل ۳ روند تغییرات هر یک از مؤلفه‌های منابع آب موجود برای میانگین ماهانه کل حوضه آبریز برای سال آبی ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۶ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) که توسط مدل SWAT-MODFLOW بدست آمده، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار آب آبی و آب سبز در طول سال به طور نامنظم تغییر می‌کند و روند آن با بارندگی همراه است. بیشترین مقدار متوسط دوازده ساله بارش در فصل زمستان (۴۲ میلی‌متر) و کمترین مقدار آن در فصل تابستان (۰/۸ میلی‌متر) است. روند تغییرات بارندگی و به تبع آن آب آبی و سبز از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ افزایشی و سپس روند کاهشی داشته است، ولی این روند یکسان نبوده و دو سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ کمترین میزان بارش را تجربه کرده است و همچنین سال ۲۰۰۹ پر بارش‌ترین سال در دوره مورد بررسی بوده است. همچنین این شکل گویای این مطلب است که منابع آب آبی و سبز در تابستان کم می‌باشد. این کمبود نه تنها با کاهش بارش ارتباط دارد، بلکه دمای هوا نیز یکی دیگر از عوامل مهم این کاهش می‌باشد چرا که با افزایش دما، اختلاف بین آب آبی و آب سبز در ماه تیر به بیشترین مقدار می‌رسد. دلیل آن این بوده که دمای بالاتر، باعث تبخیر-تعرق بیشتر می‌شود و در تابستان به دلیل گرما و آبیاری بیشتر، کشت بیشتری داریم و آبیاری نیز باعث افزایش رطوبت خاک می‌شود. بنابراین بارش تابستان به طور عمده توسط تبخیر-تعرق از بین می‌رود. همچنین در شکل ۴ متوسط تغییرات ماهیانه آب آبی و آب سبز در سال و مقایسه مقادیر محاسبه شده توسط مدل سطحی SWAT و مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW با میزان بارندگی و آبیاری نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که میزان آب آبی و آب سبز بدست آمده توسط مدل تلفیقی شیب ملایم‌تری نسبت به مدل سطحی به تنهایی دارد و اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار آب آبی و آب سبز، در مدل تلفیقی کمتر از مدل سطحی می‌باشد.



شکل ۳- روند تغییرات هر یک از مؤلفه‌های منابع آب موجود برای میانگین ماهانه کل حوضه آبریز برای سال آبی ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۶ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲)



شکل ٤- متوسط ۹ ساله (۲۰۰۹-۲۰۰۱) تغییرات ماهیانه بارندگی، آبیاری، آب آبی و آب سبز در طول سال میلادی



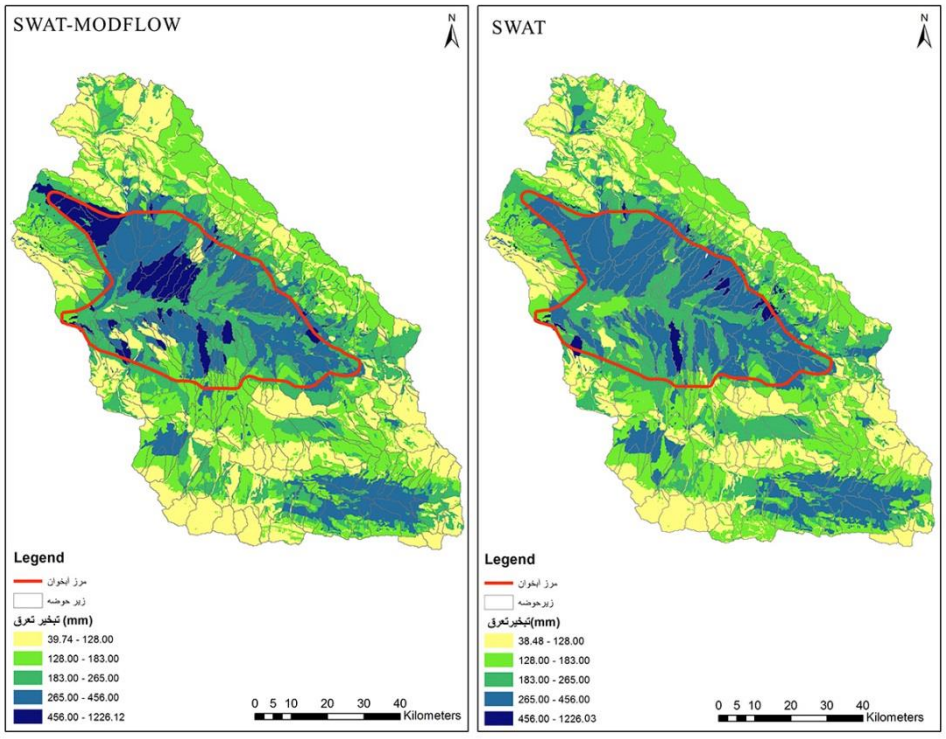
شکل ٥- توزیع مکانی میانگین بارندگی سالانه (در دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۱) در حوضه نیشابور

توزیع مکانی تغییرات منابع آب آبی و آب سبز

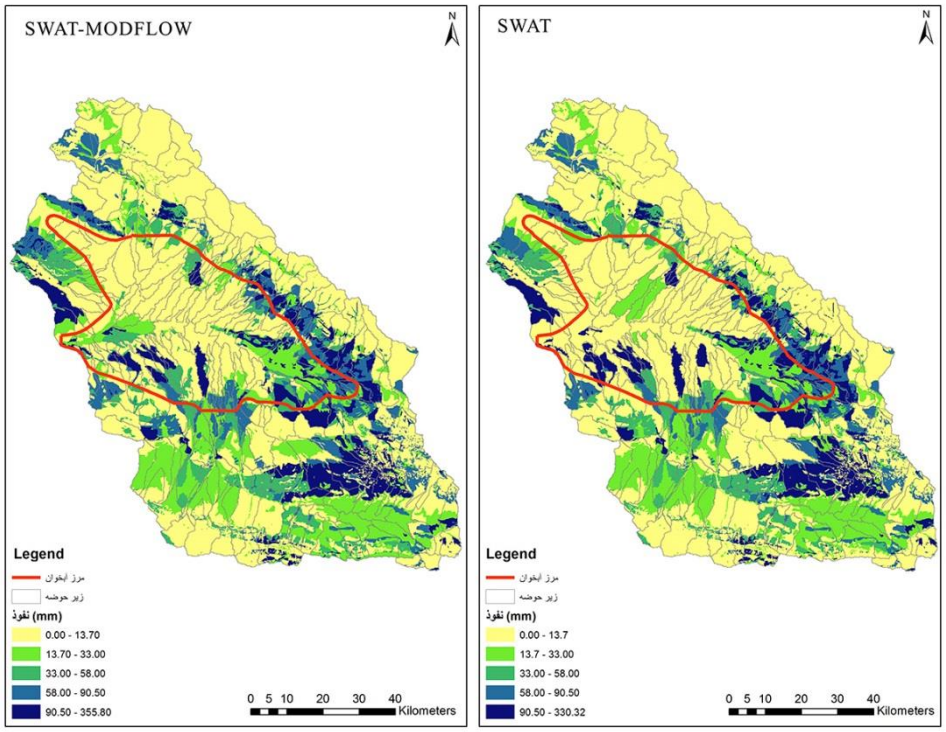
علاوه بر اطلاعاتی که این تحقیق در مقیاس زمانی ماهانه برای تمام مؤلفه‌های منابع آب در دوره مورد مطالعه فراهم می‌کند، مقادیر و تغییرات مکانی مؤلفه‌های آب در هر زیرحوضه نیز تخمین زده شده است. میانگین سالانه بارندگی در ۲۴۸ زیر حوضه محاسبه و توزیع مکانی آن در شکل ۵ نشان داده شده است. توزیع مکانی بارش نشان می‌دهد که میانگین بارندگی سالانه در جنوب شرقی و غرب محل مورد مطالعه به ترتیب ۳۴۰ و ۱۹۰ میلی‌متر می‌باشد که روند کاهشی از شرق و شمال شرق به غرب و جنوب غرب را دارد. این روند بر اساس تغییر مناطق کوهستانی به دشت می‌باشد که در عرض و طول جغرافیایی بالاتر منجر به بارش بیشتری می‌شود.

شکل ۶ میانگین ۹ ساله تبخیر-تعرق، نفوذ، آب آبی و آب سبز

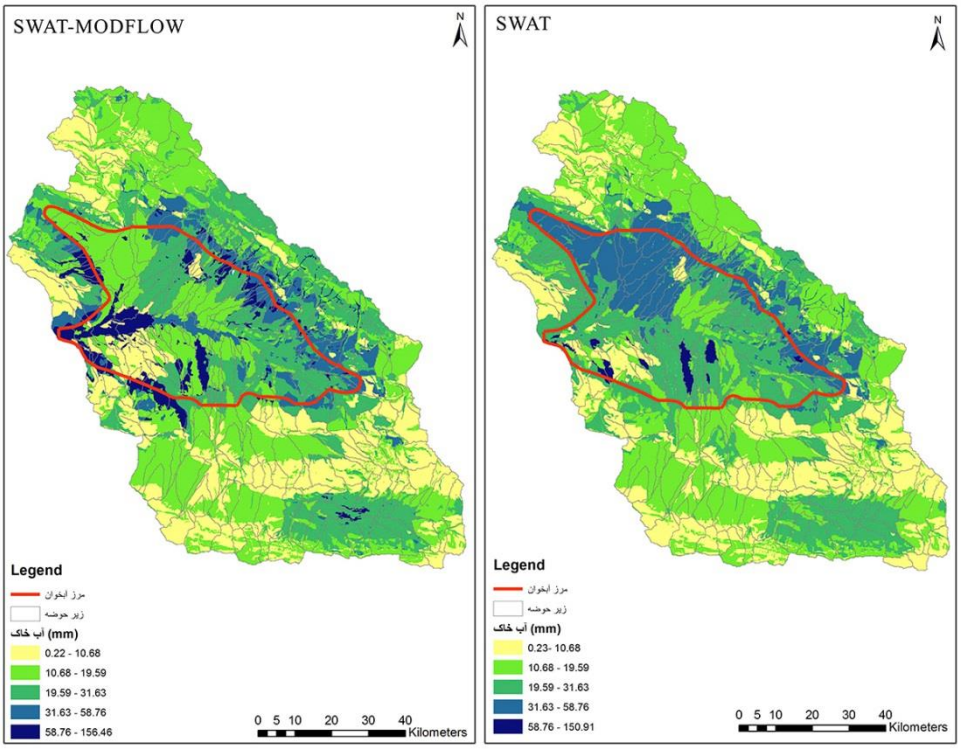
که توسط دو مدل SWAT و SWAT-MODFLOW محاسبه شده است و توزیع مکانی آن در سطح حوضه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل۶ (الف) دیده می‌شود، الگوی توزیع مکانی تبخیر-تعرق در سطح حوضه نیشابور در هر دو مدل مشابه بدست آمده است و بیشترین میزان تبخیر و تعرق واقع در محدوده دشت و زیرحوضه‌هایی است که تحت کشت آبی قرار گرفته‌اند. همچنین مطابق این شکل، مقدار حداکثر جریان سبز حدود ۱۲۲۶ میلی‌متر در سال و در هر دو مدل یکسان بدست آمده است که به علت کشت و آبیاری زیاد در محدوده دشت می‌باشد. شکل۶ (ب)، میزان و توزیع نرخ نفوذ عمقی شبیه‌سازی شده توسط دو مدل را نشان می‌دهد. با توجه با این شکل، هر دو مدل محدوده تغییرات و توزیع مشابهی در سطح حوضه را نشان می‌دهند که بیشترین نرخ نفوذ عمقی مربوط به قسمت آبرفتی دامنه‌ی ارتفاعات دشت نیشابور به خصوص در شمال و جنوب شرقی حوضه می‌باشد. در واقع با توجه به ویژگی‌های دانه‌بندی آبرفتی در دامنه ارتفاعات حاشیه و تعدد مسیل‌های منتهی به دشت در این نواحی، بخش قابل توجهی از جریان‌های سیلابی صرف تغذیه آبخوان در این مناطق می‌گردد. شکل۶ (ج)، نشان دهنده ذخیره آب سبز (میانگین بلند مدت مقدار رطوبت خاک در زیر حوضه‌های مختلف) است. این شکل فارغ از نوع خاک، اطلاعات خوبی برای مدیریت محصولات دیم فراهم می‌کند. بدین صورت می‌توان نتایج مدل را با شکل ۷ که واقعیتی از وضعیت کشت فعلی در منطقه است مقایسه کرد. اگرچه نتایج دو مدل با یکدیگر اندک تفاوتی دارد ولی می‌توان مشاهده کرد که دامنه ارتفاعات نسبت به سایر حوضه می‌تواند محل مناسب تری جهت کشت دیم باشد. مطابق شکل۶ (د)، مقدار آب آبی بدست آمده توسط دو مدل و توزیع مکانی آن در سطح حوضه متفاوت بوده و همانطور که مشاهده می‌شود، در مدل SWAT-MODFLOW، محدوده‌ی تغییرات آب آبی تقریباً دو برابر بیشتر از مدل SWAT و توزیع مکانی آن بیشتر در سطح دشت اتفاق افتاده است. این اختلاف می‌تواند به دلیل قابلیت بهتر مدل SWAT-MODFLOW در شبیه‌سازی فرایندهای مختلف از جمله تغذیه آب‌های زیرزمینی و نفوذ منطقه غیراشباع باشد. همچنین شکل ۶ (ه)، مقدار آب سبز و توزیع مکانی آن در سطح حوضه که توسط دو مدل بدست آمده، مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به این شکل، محدوده تغییرات و توزیع مکانی آن در سطح حوضه تقریباً مشابه یکدیگر بوده و بیشترین مقدار آب سبز در قسمت دشت نیشابور است.



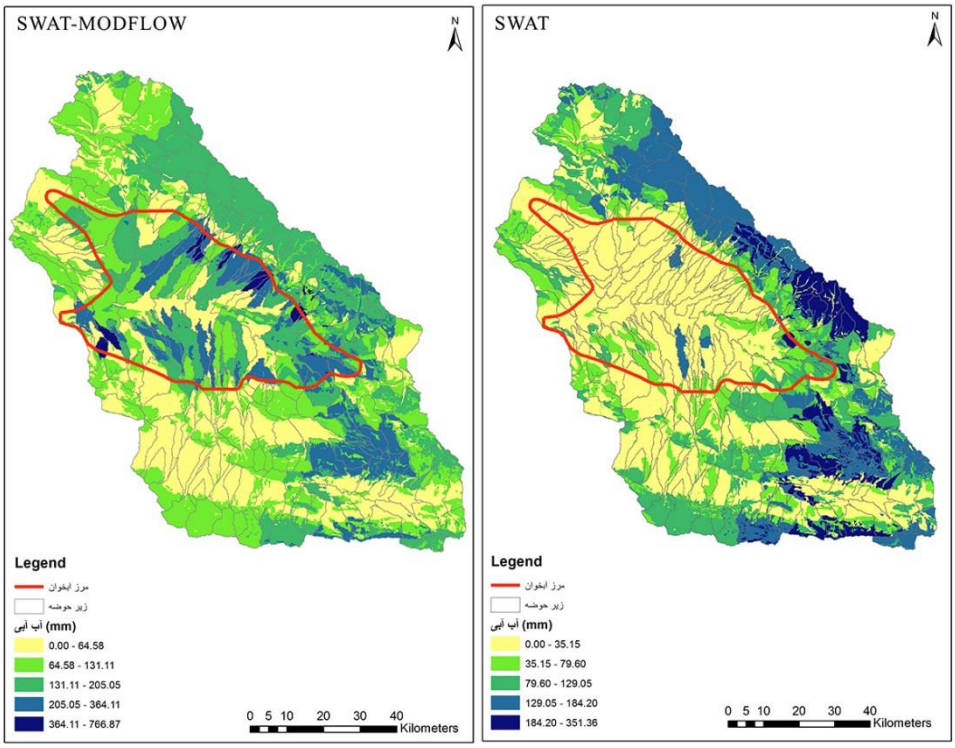
(الف)


SWAT-MODFLOW
SWAT
Legend
مرز آبخوان
زیر حوضه
نفوذ (mm)
0.00 - 13.70
13.70 - 33.00
33.00 - 58.00
58.00 - 90.50
90.50 - 355.80
0.00 - 13.7
13.7 - 33.00
33.00 - 58.00
58.00 - 90.50
90.50 - 330.32
0 5 10 20 30 40
Kilometers

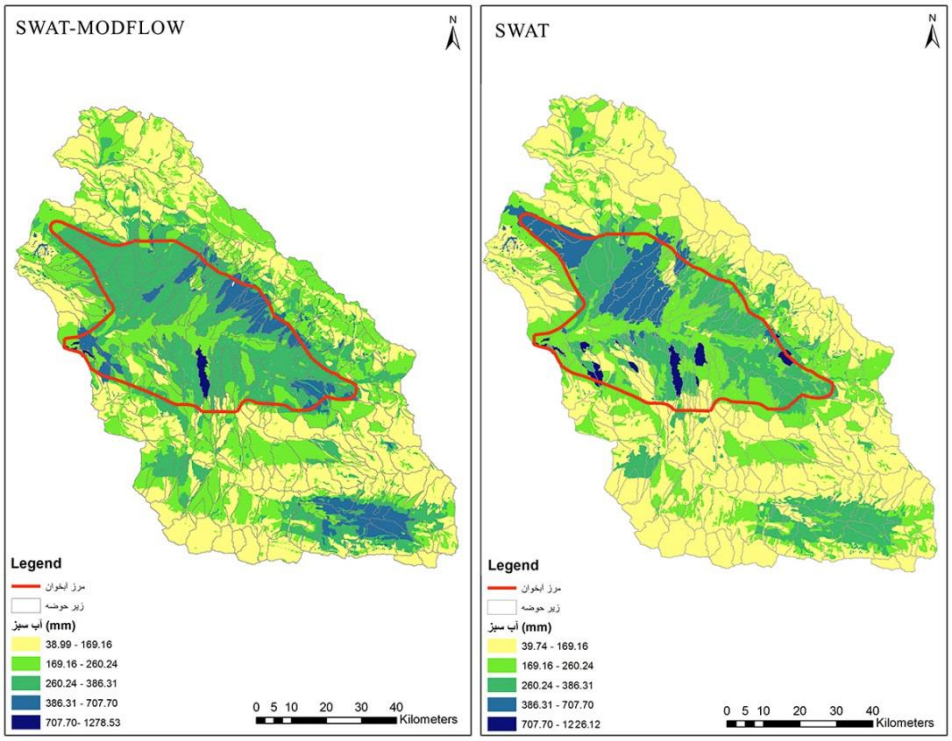
(ب)


SWAT-MODFLOW
SWAT
Legend
مرز آبخوان
زیر حوضه
آب خاک (mm)
0.22 - 10.68
10.68 - 19.59
19.59 - 31.63
31.63 - 58.76
58.76 - 156.46
0.23- 10.68
10.68 - 19.59
19.59 - 31.63
31.63 - 58.76
58.76 - 150.91
0 5 10 20 30 40
Kilometers

(ج)

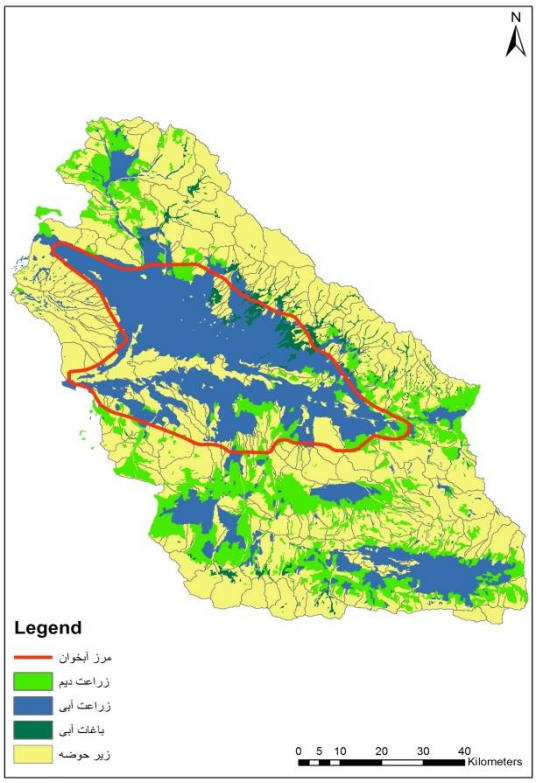


(د)



(ه)

شکل ٦- میانگین مقادیر سالانه (در دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۱) (الف) تبخیر-تعرق، (ب) نفوذ، (ج) آب خاک، (د) آب آبی و (ه) آب سبز که توسط دو مدل SWAT (شکل سمت راست) و مدل SWAT-MODFLOW (شکل سمت چپ) شبیه‌سازی شده است



شکل ۷- وضعیت موجود نواحی کشت آبی و دیم حوضه آبریز نیشابور

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از مدل مفهومی SWAT و مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW در محیط ArcGIS، و نیز از الگوریتم تحلیل عدم قطعیت SUFI2 در برنامه SWAT-CUP، برای شبیه‌سازی رواناب و تخمین مقدار مؤلفه‌های منابع آب (آب آبی، جریان آب سبز و ذخیره آب سبز) حوضه آبریز نیشابور در مقیاس ماهانه و توزیع مکانی HRU استفاده شد. در این مطالعه برخلاف مطالعات گذشته اطلاعات مربوط به برداشت و مصارف آب از رودخانه‌ها وارد شده است که منجر به تخمین بهتر جریان پایه رودخانه‌ها می‌گردد. نتیجه واسنجی در حسین‌آباد جنگل به عنوان خروجی حوضه که در اکثر مواقع بدون جریان و یا جریان کم بود، بسیار خوب بوده، به طوری که مقدار RMSE و NS به ترتیب برابر با ۴/۸ مترمکعب بر ثانیه و ۰/۸۵ تخمین زده شد.

تغییرات سالانه آب آبی و آب سبز و بارندگی، نشان‌دهنده یک روند مشابه بوده و سال‌های با مقدار بارندگی بیشتر دارای مقدار آب آبی و سبز بیشتری هستند که مؤید آن است که بارندگی عامل اصلی در محاسبه میزان آب آبی و آب سبز می‌باشد. همچنین تغییرات ماهانه جریان آب آبی در سرشاخه‌های حوضه آبریز زیاد است و این تغییرات همروند با میزان بارندگی بوده و در زمستان به حداکثر و در تابستان به حداقل خود می‌رسد که این اختلاف در نتایج خروجی مدل SWAT-MODFLOW کمتر و دارای شیب ملایم‌تری می‌باشد. با بررسی تغییرات مکانی مقادیر تخمین زده شده مؤلفه‌های مختلف منابع آب توسط دو مدل، می‌توان دریافت که بیشترین اختلاف در توزیع مکانی آب آبی مشاهده می‌شود و سایر مؤلفه ها از جمله جریان آب سبز، ذخیره آب سبز و نفوذ دارای توزیع مکانی تقریباً مشابه بوده است. به طور کلی تغییرات مکانی آب آبی و بارندگی اساساً مشابه بوده و از ارتفاعات به سمت دشت روند کاهشی دارد و در قسمت آبرفت رودخانه‌ها نسبت به سایر قسمت‌ها بیشتر می‌باشد. به علاوه، زیرحوضه‌های با مقدار بارندگی بیشتر، دارای منابع آب آبی بیشتر است. نتایج کلی به دست آمده در این تحقیق برای استفاده مؤثر و تخصیص منابع آب و برنامه ریزی برای فصل کشت در حوضه آبریز نیشابور با ارزش بوده و می‌تواند به عنوان مرجعی برای مدیریت بهینه منابع آب در این منطقه بحرانی در نظر گرفته شود.

منابع

اخوان، س.، عابدی کوپایی، ج.، موسوی، س. ف.، عباسپور، ک.، افیونی، م و اسلامیان، س. ۱۳۸۹. تخمین آب آبی و آب سبز با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان- بهار. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. ۱۴. ۵۳: ۹-۲۳.

رستمیان، ر.، موسوی، س. ف.، حیدرپور، م.، افیونی، م. و عباسپور، ک. ۱۳۸۷. کاربرد مدل SWAT2000 در تخمین رواناب و رسوب حوضه بهشت آباد از زیرحوضه‌های کارون شمالی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲. ۴۶: ۵۱۷-۵۳۱.

شفیعی، م.، انصاری، ح.، داوری، ک. و قهرمان، ب. ۱۳۹۲. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت یک مدل نیمه توزیعی در یک منطقه نیمه خشک، مطالعه موردی حوضه آبریز نیشابور. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. ۱۷. ۶۴: ۱۳۷-۱۴۸.

علیزاده، ا.، ایزدی، ع.، داوری، ک.، ضیایی، ع. ن.،اخوان، س و حمیدی، ز. ۱۳۹۲. برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس سال‌حوضه با استفاده از SWAT. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۷ .۲: ۲۵۸-۲۴۳.

وزارت‌نیرو, ۱۳۸۹, گزارش نهایی تمدید ممنوعیت: خراسان رضوی شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی دفتر مطالعات پایه منابع آب. P.69.

ولایتی، س. و توسلی، س.(۱۳۷۰). منابع و مسائل آب خراسان. مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

Abrishamchi, A., Tajrishi, M. 2005. Interbasin water transfer in Iran. In Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop, The National Academies Press: Washingon, D.C.; 252–271.

Alizadeh, A., Keshavarz, A. 2005. Status of agricultural water use in Iran. In Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop, The National Academies Press: Washingon, D.C.; 94–105.

Ardakanian, R. 2005. Overview of water management in Iran. In Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop, The National Academies Press: Washingon, D.C.; 18–33.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. 1998: Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development, J. Am. Water Resour. Assoc., 34, 73–89

Bailey, R.T., Wible, T.C., Arabi, M., Records, R. M., and Ditty, J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. Hydrol. Process. 30: 4420–4433.

Falkenmark, M. 1995. Coping with water scarcity under rapid population growth, Conference of SADC Ministers, Pretoria.

Falkenmark, M. and J. Rockstrom. 2006. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. ASCE, J. Water Resour. Plan. Manag. 132(3): 129–132.

Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., and Yang, H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological. Processes. 23: 486-501.

Gerten, D., et al. 2005. Contemporary "green" water flows: Simulations with a dynamic global vegetation and water balance model. Physics and Chemistry of the Earth 30(6–7), 334–338.

Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. 1985, Estimating Potential Evapotranspiration. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 108(3)225-230.

Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A., Akhavan, S., Alipoor, A., Joodavi, A., Brusseau, M. 2015. Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboor plain, Iran. Hydrogeol J 23(1):47–68.

Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A., Alipoor, A., Joodavi, A., Brusseau, M. 2014. A framework toward developing a groundwater conceptual model. Arabian Journal of Geosciences 7(9):3611–3631.

Keshavarz, A., Ashrafi, SH., Hydari, N., Pouran, M., Farzaneh, EA. 2005. Water allocation and pricing in agriculture of Iran. In Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop, The National Academies Press: Washingon, D.C.; 153–172.

Liu, X., et al. 2009. Quantifying the effect of land use and land cover changes on green water and blue water in northern part of China. Hydrology and Earth System Sciences 13(6), 735–747.

Maidment, D.R. 1992. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, Co., New York.

Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King. 2002. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.

Rost, S., et al. 2008 Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. Water Resources Research 44, W09405.

Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyuni, S. F. Mousavi, M. Heidarpour, A. Jalalian and K. C. Abbaspour. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. Hydrol. Sci. J. 53(5): 977-988.

Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., Srinivasan R., and Zehnder. A. J. B. 2008. Modelling blue and green water availability in Africa. Water Resources. Research. 44: 1-18.

Xu, Z. and Zuo, D. 2014. Simulation of blue and green water resources in Wei River basin, China. Evolving

Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions Proceedings of ICWRS2014, Bologna, Italy, June 2014 (IAHS Publ. 364, 2014). 486-491

Zang, C. F., et al. 2012. Assessment of spatial and temporal patterns of green and blue water flows under natural conditions in inland river basins in Northwest China. Hydrology and Earth System Sciences 16(8), 2859–2870.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 13, Oct.-Nov. 2019, p. 1113-1129

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۳، مهر - آبان ۱۳۹۸، ص. ۱۱۲۹-۱۱۱۳

Estimation and Comparison of Blue and Green Water Using SWAT and SWAT-MODFLOW Models in the Neishabour Watershed

A.Saadatpour[1], A.Alizadeh[2]*, A.N.Ziaei[3], A.Izady[4]
Recived: Oct.21, 2018 Accepted: Dec.23, 2018

Abstract

The total amount of water resources severely affects socioeconomic development of a region or watershed, which means that accurate quantification of the total amount of water resources is vital for the area, especially for the arid and semi-arid regions. Traditional evaluation of water resources only focused on the qualification of blue water, while the importance of green water was not fully considered. Therefore, the blue and green water resources in the Neishabour basin were evaluated by the SWAT and SWAT-MODFLOW models in this study. Furthermore, the Sequential Uncertainty Fitting program (SUFI2) which is one of the programs interfaced with SWAT, in the package SWAT-CUP (SWAT Calibration Uncertainty Programs), was used to calibrate and validate Neishabour hydrologic model based on river discharges. In this paper, results of calibration and validation are given for the river monthly discharge. Runoff data for four hydrometric stations in 2001-2011 were used to calibrate and validate this basin. The results show that p-factor, r-factor, R^2 and NS, which were used to evaluate the ability of SWAT model, are about 0.37, 0.55, 0.86 and 0.85 and for validation are about 0.29, 0.83, 0.7 and 0.65 respectedly. The results show that the components of water resources, except for blue water, which SWAT-MODFLOW model estimates more, are similar in other cases. Therefore, two models were used to investigate the spatial variations of blue water in the watershed. The main difference was within the Neishabour plain, which could be due to the integrated ability of the model to simulate different processes, such as groundwater recharge and infiltration of the non-saturated zone. Moreover, the spatial distribution of the green water indicates that the amount of green water increases gradually towards Neishabur plain. The study of interannual variability of the blue and green water shows that the trends in precipitation, blue and green water have a relatively similar characteristic during the same period and in the winter, the lower temperature, the greater difference between the blue and green water. Also, the trend of the blue and green water changes is milder in the integrated model.

Keywords: Blue water, Green water, Neishabour basin, SWAT-MODFLOW model, Water budget

1- Ph.D Student, Water Science and Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad
2- Professor of Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
3- Associate Professor of Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
4- Research Scientist, Water Research Center, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman
(*- Corresponding Author: alizadeh@gmail.com)