

برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس سال - حوضه با استفاده از SWAT

امین علیزاده^۱، عزیزا... ایزدی*^۲، کامران داوری^۳، علی نقی ضیایی^۴، سمیرا اخوان^۵ و زهرا حمیدی^۶

چکیده

هدف از این مطالعه کاربرد مدل مفهومی و نیمه‌توزیعی SWAT برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس سال - حوضه در حوضه آبریز نیشابور می‌باشد. بدین منظور، ابتدا مدل SWAT با استفاده از جریان رودخانه و عملکرد گیاه برای دوره ۷ ساله (مهر ۱۳۷۹ تا شهریور ۱۳۸۶) و ۳ ساله (مهر ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۸۹) به ترتیب واسنجی و صحت‌سنجی شد. به دلیل ارتباط مستقیم تبخیر-تعرق واقعی با عملکرد گیاه، واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ‌مقیاس با استفاده از عملکرد گیاه و دبی رودخانه، دارای سطح اعتماد بیشتری در رابطه با تفکیک آب موجود در خاک به ذخیره‌ی خاک، تبخیر-تعرق واقعی و تغذیه‌ی آبخوان می‌باشند. نتایج نشان داد عملکرد مدل جهت پیش‌بینی جریان رودخانه و عملکرد گیاه کاملاً رضایت‌بخش بود به طوری که مقادیر عملکرد مدل در ایستگاه هیدرومتری حسین‌آباد جنگل به عنوان خروجی حوضه در دوره واسنجی ($R^2 = 0.82$, $NS=0.79$) و اعتبارسنجی ($R^2 = 0.71$, $NS=0.71$) بیانگر این موضوع می‌باشند. همچنین مقادیر RMSE و t -factor، برای پیش‌بینی عملکرد گندم آبی به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۹۷ تن بر هکتار بدست آمد. در نهایت تبخیر-تعرق واقعی برآورده شده به وسیله مدل کالیبره شده مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. متوسط ده ساله تبخیر-تعرق واقعی و بارندگی به ترتیب برابر با ۲۳۰ و ۲۷۰ میلی‌متر محاسبه گردید. نسبت متوسط ده ساله تبخیر-تعرق واقعی به بارندگی در کوهستان در سال‌های مختلف با وضعیت هیدرولوژیکی مختلف، متفاوت بود به طوری که در طی سال‌های خشک (۲۰۰۱-۲۰۰۷) نرمال (۲۰۰۲-۲۰۰۴) و تر (۲۰۰۵-۲۰۰۷ و ۲۰۰۶-۲۰۰۷) به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۸۰ درصد می‌باشد. در سطح دشت به دلیل اینکه علاوه بر بارندگی، آبریز زمینی نیز نقش عمده‌ای در تامین آب آبیاری و به تبع آن تبخیر-تعرق از سطوح فاریاب دارد، نسبت مذکور نشان‌دهنده نسبت کل تبخیر-تعرق واقعی (ناشی از بارش یا آبیاری) به بارش می‌باشد. بدیهی است در بعضی سال‌ها به خصوص سال‌های خشک این نسبت در دشت می‌تواند بیشتر از یک نیز گردد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق واقعی، SWAT، جریان رودخانه، عملکرد گیاه، حوضه نیشابور

مقدمه

اصلی تعیین تبخیر-تعرق نظیر روش لایسیمتر و نسبت بوون برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق در مقیاس مزرعه به کار برده می‌شوند (Baldocchi et al., 2001; Brotzge and Kenneth, 2003; Yunusa et al., 2004; Gentine et al. 2007). روش‌های مذکور به دلیل ناهمگنی سطح زمین قادر به اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق در مقیاس حوضه نمی‌باشند. (Gao and Long, 2008). ماهواره‌ها می‌توانند توزیع مکانی مناسبی از داده‌های موردنیاز برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی مانند آلبيدو سطح، کاربری اراضی و دمای سطح زمین فراهم نمایند. این داده‌ها در ترکیب با مدل‌های بر مبنای سنجش از راه دور تجربی یا فیزیکی می‌توانند برآوردی از تبخیر-تعرق واقعی داشته باشند (Bastiaanssen et al., 1998a; Bastiaanssen, 2000; Jiang and Islam, 2001; Su, 2002; Wang et al., 2006). نشان داده شده است که ماهواره‌ها می‌توانند برآورد مناسبی از توزیع تبخیر-تعرق واقعی در محدوده وسیعی از کاربری‌های اراضی مختلف داشته باشند (Jiang and Islam, 2001; Batra et al., 2006). با این وجود مقدار تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده در مقیاس پیکسل با این روش با تردید روبرو است مگر آنکه

بدلیل تغییرات قابل توجه مؤلفه‌های سیکل هیدرولوژی در مقیاس زمان و مکان، آگاهی از مؤلفه‌های کلیدی کنترل‌کننده تغییرات زمانی و مکانی بیابان آب سطحی بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیت شایانی برخوردار می‌باشد (Milly, 1994; Wolock and McCabe, 1999). تبخیر-تعرق با بیابان آب و خاک مرتبط بوده و دارای نقش کلیدی در تعاملات آب و هوا - خاک - پوشش گیاهی می‌باشد (Yang et al., 2007). انجام تحقیقات و مطالعات گسترده در زمینه مدیریت منابع آب، کشاورزی و محیط زیست مستلزم آگاهی از تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس زمانی و مکانی می‌باشد. روش‌های

۱، ۳ و ۴ - به ترتیب استاد، دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲ و ۶ - به ترتیب دانشجوی دکتری و ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(Email: az.izady@gmail.com)

* نویسنده مسئول:

۵ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی همدان

رودخانه و عملکرد گیاه واسنجی و سپس عدم قطعیت آن با استفاده از ابزار SUFI2 (Abbaspour 2007) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در نهایت با توجه به مدل چندگانه صحت‌سنجی شده، تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس سال - حوضه برآورد و تحلیل‌های مربوط به آن از زوایای مختلف انجام گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز نیشابور با وسعت کل حوضه ۹۱۵۷ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۱۷° ۵۸' تا ۳۰° ۵۹' و عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۰' تا ۳۹° ۳۶' واقع شده و از شمال به خط‌الرأس ارتفاعات بینالود، از شرق به بلندی‌های لیلاجوق و بال‌پلنگ، از جنوب به تپه ماهورهای نیزه‌بند، سیاه‌کوه و کوه نمک و از غرب به حوضه آبریزدشت سبزواری محدود می‌شود (شکل ۱). با توجه به تقسیمات زمین‌شناسی ایران، محدوده مورد مطالعه در گستره یال جنوبی ساختار زمین‌شناسی بینالود و حد شمال شرقی زون مثلثی شکل ایران مرکزی واقع شده است. بلندترین نقطه منطقه در ارتفاعات بینالود بوده که از سطح دریا ۳۳۰۰ متر ارتفاع دارد. پایین‌ترین نقطه در محل خروجی دشت (حسین‌آباد جنگل) قرار دارد که حدود ۱۰۵۰ متر از سطح دریا بلندتر است. آب و هوای منطقه نیمه خشک تا خشک بوده و میانگین دمای ماهانه در ایستگاه بار (معرف مناطق کوهستانی) ۱۳ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه محمدآباد - فدیشه (معرف مناطق دشتی) ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد است. متوسط دبی روزانه برای دوره زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۹ در محل ایستگاه هیدرومتری حسین‌آباد جنگل ۰/۳۶ متر مکعب می‌باشد. متوسط بارندگی در کل حوضه معادل ۲۳۴ میلی‌متر و متوسط تبخیر برای کل حوضه حدود ۲۳۳۵ میلی‌متر در سال گزارش شده است (ولایتی و توسلی، ۱۳۷۰).

داده‌های مورد استفاده و اجرای مدل SWAT

در این بخش ابتدا به معرفی مدل SWAT پرداخته، سپس داده‌های مورد استفاده در مدل به تفکیک توضیح داده شده و در نهایت به ساختار مدل و نحوه کالیبراسیون و تحلیل عدم‌قطعیت آن اشاره خواهد شد.

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT، مدلی در مقیاس حوضه آبریز است و شبیه‌سازی را در مقیاس روزانه انجام می‌دهد. ناهمگنی‌های مکانی در منطقه مورد مطالعه با تقسیم حوضه به زیرحوضه‌هایی بررسی می‌شود. زیرحوضه‌ها به تعدادی واحدهای کوچکتر (واحدهای واکنش هیدرولوژیک، HRU^۱) تقسیم می‌شوند، این واحدها دارای ترکیبات یکسانی از خاک،

واسنجی دقیقی بر روی مقادیر تخمین زده شده صورت گیرد (Su et al., 2005; Gao and Long, 2008).

استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ-مقیاس برای برآورد مولفه‌های بیلان آب و تبخیر-تعرق واقعی، مستلزم واسنجی مناسب آن‌ها می‌باشد. (Bastiaanssen et al., 1998b; Kite and Droogers, 2000). در مدل SWAT (Arnold et al., 1998) به دلیل اینکه اجزاء اساسی فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند بارندگی و رواناب به صورت اندازه‌گیری شده وارد مدل می‌شوند مقدار تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار می‌باشد (Gao and Long, 2008). مدل SWAT، مدل مفهومی، نیمه-توزیعی و در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد. این مدل در گام‌های زمانی ساعتی و روزانه قابل اجرا بوده و از قابلیت شبیه‌سازی تمامی مؤلفه‌های بیلان آب برخوردار می‌باشد (Arnold et al., 1998). در مطالعه‌ای، از تبخیر-تعرق تخمین زده شده به وسیله مدل SWAT به عنوان مرجع برای ارزیابی نتایج حاصل از ماهواره استفاده شده است (Gao and Long, 2008). مدلی که تنها بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه واسنجی می‌گردد، ممکن است نتایج نادرستی برای زیرحوضه‌ها و کاربری اراضی‌های مختلف تولید کند (Abbaspour et al., 2007). در واقع، خصوصیات جریان تنها در خروجی حوضه بیانگر کل حوضه نبوده و بایستی بمنظور افزایش دقت نتایج مدل، فرآیند واسنجی را در چندین ایستگاه انجام داد. همچنین، اگر این مدل‌ها تنها با دبی رودخانه واسنجی گردند ممکن است برای برآورد تمام مولفه‌های بیلان آب سطحی، قابلیت اطمینان کافی نداشته باشند (Faramarzi et al., 2009). بدین منظور، واسنجی چندمعیاره از سوی عباسپور و همکاران (۲۰۰۷) برای برآورد دقیق‌تر مولفه‌های مختلف بیلان آب سطحی و همچنین به عنوان روشی برای کاهش عدم قطعیت موجود در این مدل‌ها پیشنهاد شد. به دلیل رابطه مستقیم بین تبخیر-تعرق واقعی و عملکرد گیاه (Jensen, 1968; FAO, 1986)، واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ-مقیاس با استفاده از عملکرد گیاه و دبی رودخانه، دارای سطح اعتماد بیشتری در رابطه با تفکیک آب موجود در خاک به ذخیره‌ی خاک، تبخیر-تعرق واقعی و تغذیه‌ی آبخوان می‌باشد (Faramarzi et al., 2009; Srinivasan et al., 2010; Akhavan et al., 2010; Nair et al., 2011). در واقع، تبخیر-تعرق یک مولفه اصلی بیلان آب در حوضه‌های کشاورزی واقع در نواحی خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود (Wight and Hanson 1990). لذا برای برآورد دقیق‌تر مولفه‌های اصلی بیلان آب لازم است مدیریت گیاه را در مدل‌سازی این حوضه‌ها در نظر گرفت.

هدف از این مطالعه، برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس سال - حوضه با استفاده از SWAT در حوضه آبریز نیشابور می‌باشد. برای این منظور، ابتدا مدل SWAT با استفاده از معیارهای چندگانه دبی

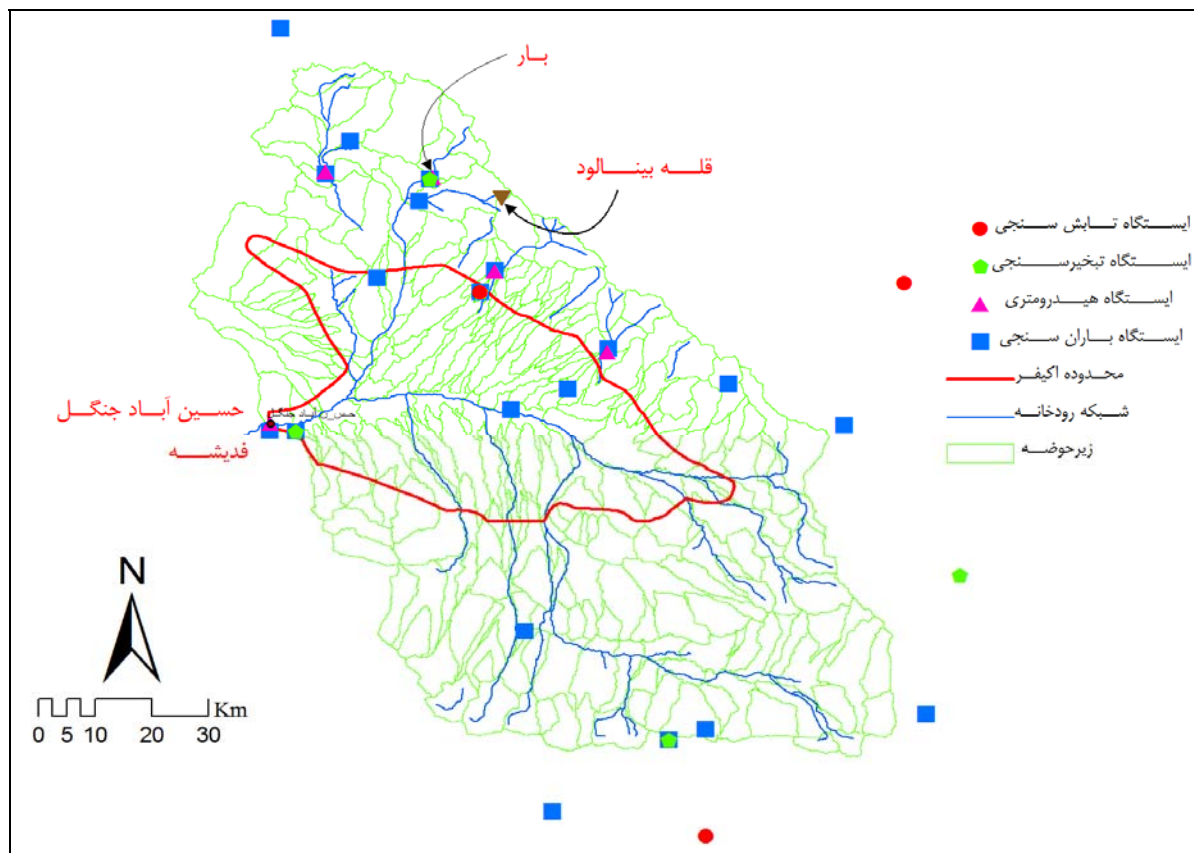
1- Hydrologic Response Unit

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 بوسیله‌ی مقدار آب خاک محدود شود.

داده‌های موردنیاز مدل SWAT

داده‌های موردنیاز مدل شامل مدل رقومی ارتفاعی، نقشه‌ی کاربری اراضی، نقشه‌ی نوع خاک، داده‌های بارندگی، دما و تابش خورشیدی در مقیاس روزانه و شیوه‌های مدیریت گیاه می‌باشند. بررسی و تحلیل کاملی جهت گردآوری و صحت داده‌های موردنیاز صورت گرفت که در زیر آورده شده است.

پستی و بلندی و کاربری اراضی می‌باشند. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، رشد گیاه، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان است. اجزاء بیلان آب و مدیریت در سطح واحدهای واکنش هیدرولوژیک محاسبه و سپس برای زیرحوضه‌ها میانگین-گیری وزنی می‌شود. مدل SWAT برای داده‌های اقلیمی از نزدیک-ترین ایستگاه به مرکز ثقل زیرحوضه استفاده می‌کند. روندیابی جریان توسط روش‌های ذخیره متغیر و ماسکینگام قابل محاسبه است. رواناب سطحی از بارندگی روزانه توسط روش شماره منحنی اصلاح شده محاسبه می‌شود (Arnold et al., 1998). ذوب برف روزانه در مدل زمانی روی می‌دهد که حداکثر دما از دمای آستانه‌ای که از قبل تعریف شده بیشتر شود. در مدل SWAT تبخیر از خاک و گیاه به طور جداگانه محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل توسط روش‌های پنمن-مونتیث (Monteith 1965)، پریستلی-تایلور (Priestley and Taylor 1972) و هارگریوز (Hargreaves and Samani 1985) می‌تواند صورت گیرد. پتانسیل تبخیر آب خاک، به صورت تابعی از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز نیشابور در استان خراسان رضوی به همراه ایستگاه‌های اقلیمی، شبکه رودخانه‌ها، محدوده اکیفر و زیرحوضه‌های تولید شده به وسیله SWAT

مدل رقومی ارتفاعی (DEM)

کلاس اصلی می‌باشد (مهندسين مشاور سازآب شرق، ۱۳۸۷). این کلاس‌ها شامل زراعت آبی، دیم، باغات آبی، مراتع کم تراکم، مراتع نیمه تراکم، مراتع متراکم، جنگل‌های دست کاشت، جنگل طبیعی، بیشه‌زار و درختچه‌زار، اراضی توده سنگی و فاقد پوشش، رسوبات بستر مسیل، تپه‌های ماسه‌ای و شنی، مناطق مسکونی و صنعتی و سطوح آبی می‌باشد. عمده‌ی محصولات کشت‌شده در حوضه را گندم و جو آبی، چغندرقد، پنبه، یونجه و گندم دیم تشکیل می‌دهند. حدود ۴۷ درصد سطح حوضه را اراضی کشاورزی اعم از زراعت آبی، دیم و باغ‌ها می‌پوشانند (شکل ۲).

داده‌های اقلیمی

داده‌های ۲۳ ایستگاه باران‌سنجی، ۴ ایستگاه تبخیرسنجی و ۳ ایستگاه تابش‌سنجی در یک دوره‌ی ۱۴ ساله (۸۹-۱۳۷۶) در مدل-سازي با SWAT مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). رطوبت نسبی و سرعت باد با استفاده از مولد داده‌های اقلیمی SWAT تولید گردیدند. لازم به ذکر است که قبل از استفاده از داده‌های مذکور، داده‌کاوای گسترده‌ای صورت گرفت. معلوم گردید که ۴۵٪، ۲۳٪، ۲۰٪ و ۱۲٪ بارش‌ها به ترتیب در فصول زمستان، بهار، پاییز و تابستان رخ می‌دهند. رابطه‌ی میان بارش با ویژگی‌های جغرافیایی و توپوگرافی در حوضه شامل ارتفاع، عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، فاصله تا رشته کوه بینالود، ارتفاع متوسط، شیب و دیگر متغیرهای توپوگرافیک و فیزیوگرافی حوضه در دوره‌های زمانی روزانه، رخداد، ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از رگرسیون یک و چندمتغیره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر این واقعیت بود که فقط در مقیاس سالانه با استفاده از رگرسیون‌های یک و چندمتغیره می‌توان به نتایج مطلوبی دست یافت. از آنجا که SWAT قادر به نمایش تغییرپذیری زمانی و مکانی اقلیم در مقیاس حوضه آبریز نمی‌باشد، میزان افت‌آهنگ بارش نسبت به ارتفاع با استفاده از متوسط بارش سالانه‌ی ایستگاه‌های مذکور محاسبه گردید. در نرم افزار SWAT می‌توان ده باند ارتفاعی در هر زیرحوضه تعریف نمود. تابش خورشیدی با استفاده از معادله‌ی تجربی انگسترم-پریسکات (Angstrom, 1924) برآورد شد. این معادله برای هر مکان خاص دارای یک ضریب تجربی است که خوشبختانه این ضرایب برای منطقه مورد مطالعه توسط علیزاده و خلیلی (۲۰۰۹) تعیین شده‌اند.

داده‌های مدیریت گیاهی

حوضه آبریز نیشابور یک حوضه‌ی کشاورزی است. از این رو، فرآیندهایی که مولفه‌های بیلان آب را در یک حوضه کشاورزی تحت تاثیر قرار می‌دهند به شدت متأثر از مدیریت گیاه می‌باشند.

دقت تقسیم حوضه به زیرحوضه‌های مختلف تابعی از دقت مکانی DEM مورد استفاده می‌باشد. در واقع، دقت DEM بطور قابل-ملاحظه‌ای پیش‌بینی جریان آب سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مطالعه حاضر صحت نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ مربوط به سازمان جغرافیایی، ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری و همچنین DEM‌های SRTM90^۱ و ASTER30^۲ بررسی گردید. برای این امر از تراز ارتفاعی تعیین شده برای هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای موجود در دشت بوسیله شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی استفاده گردید. نتایج نشان داد که اختلاف زیادی در رقوم تراز برخی از پیزومترها در مقایسه با رقوم بدست آمده از دو نقشه ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰ وجود دارد. لذا دوباره تراز ارتفاعی پیزومترهای مذکور با تراز حاصل از DEM‌های SRTM90 و ASTER30 مقایسه گردید. در نهایت مدل رقومی ارتفاعی SRTM با اندازه سلول ۹۰ متر به دلیل کمتر بودن ریشه مربعات خطا بعنوان مدل تراز ارتفاعی پایه انتخاب گردید (ریشه مربعات خطا برای نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰، ۱:۲۵۰۰۰ و DEM‌های SRTM، و ASTER به ترتیب ۸/۸۲، ۵/۱۲، ۴/۳۳ و ۹/۴۴ بود).

شبکه رقومی رودخانه

این شبکه توسط مرکز ملی نقشه‌برداری (NCC) در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تولید گردیده است. نقشه مذکور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نرم افزار Google Earth و دانش افراد خبره محلی مورد بررسی قرار گرفت و در برخی نقاط تغییر یافت.

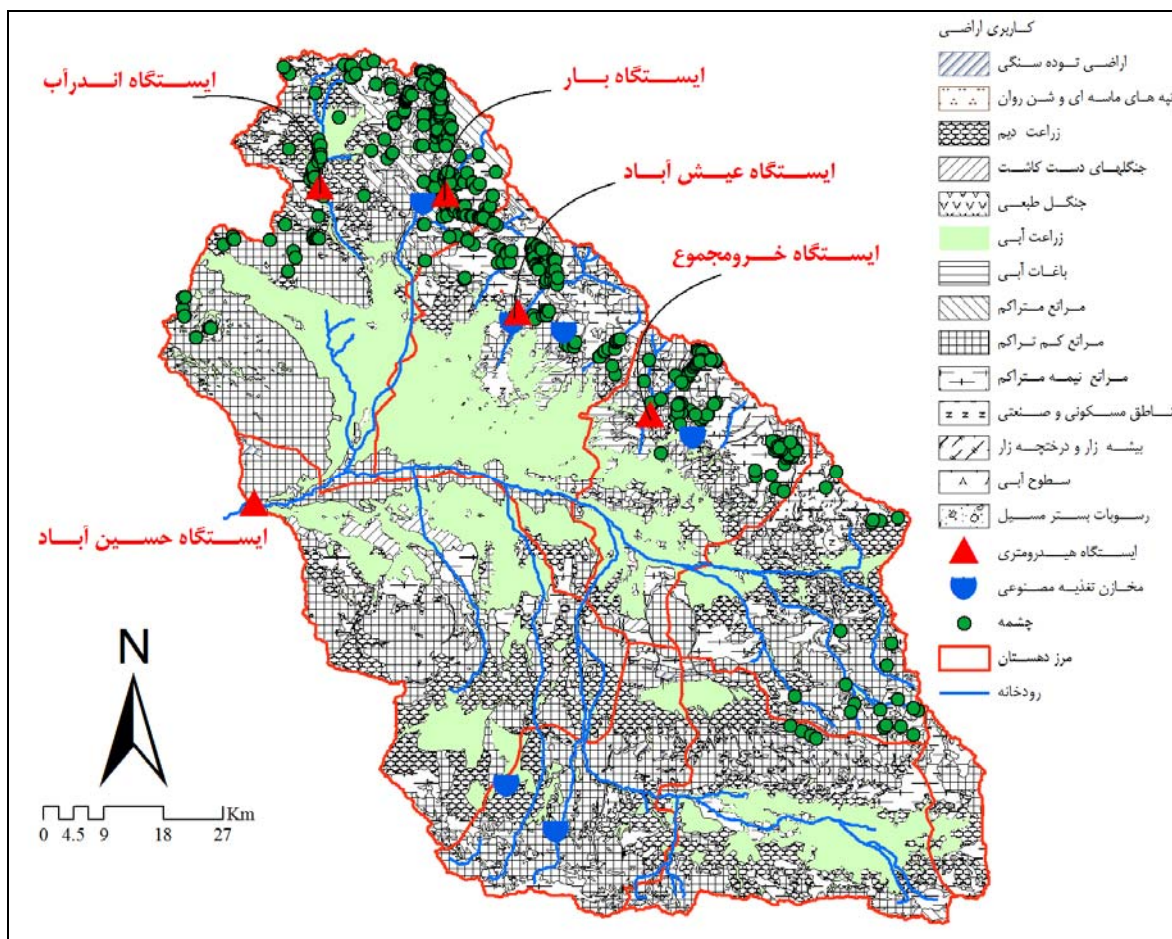
نقشه خاک

نقشه واحدهای اراضی خاک اخذ شده با دقت ۱:۱۰۰,۰۰۰ دارای ۴۱ واحد اراضی می‌باشد (مهندسين مشاور سازآب شرق، ۱۳۸۷) مهم-ترین پارامترهای مورد نیاز برای هر لایه از پروفیل خاک شامل افت خاک، درصد ذرات خاک، درصد سنگریزه، قابلیت هدایت هیدرولیکی اشباع و مقدار کربن آلی خاک می‌باشد. برخی از این داده‌ها از گزارش‌های تفصیلی خاکشناسی-آبخیزداری استخراج گردید. سایر پارامترها توسط نرم افزار RetC (van Genuchten et al., 1991) تخمین زده شده است.

نقشه کاربری اراضی

نقشه کاربری اراضی اخذ شده با دقت ۱:۱۰۰,۰۰۰ دارای ۱۴

- 1- Shuttle Radar Topography Mission
- 2- Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوضه کشاورزی نیشابور، موقعیت چشمه‌ها، مرز دهستان‌ها و مخازن تغذیه‌ی مصنوعی

در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که بدلیل عملیات شخم متفاوت محلی، سه نوع گاواهن مختلف به پایگاه اطلاعات نرم‌افزار SWAT اضافه شد.

داده‌های هیدرومتری و عملکرد گیاه

از اطلاعات ۵ ایستگاه هیدرومتری موجود در محدوده (سال‌های آماری ۸۰-۱۳۷۹ تا ۸۹-۱۳۸۸) که داده‌های آن‌ها از اطمینان قابل-توجهی برخوردارند از جمله بار، اندراب، خرومجموع دورود، عیش اباد فاروب رومان و حسین آباد جنگل، استفاده گردید (شکل ۱). به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل، داده‌های عملکرد گیاه برای دوره‌ی ۱۱ و ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ از کتاب سال آماری اداره جهاد کشاورزی و در مصاحبه با کارشناسان محلی و کشاورزان بزرگ مالک جمع‌آوری شدند.

لذا، برای دوره‌ی شبیه‌سازی از ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹ محصولات گندم آبی و دیم مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های مدیریتی معمول از قبیل محصولات عمده کشت شده، انواع کودهای مورد استفاده، عملیات کاشت و برداشت برای هر نوع کاربری اراضی از اداره جهاد کشاورزی استان اخذ گردید و همچنین با مراجعه به مراکز ۲۰ دهستان موجود در محدوده مورد مطالعه و از طریق مصاحبه با کارشناسان محلی و کشاورزان بزرگ مالک به تفکیک هر دهستان اطلاعات موردنیاز تکمیل گردید. شیوه‌های مدیریتی مورد استفاده برای کشت گندم دیم و آبی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ برای دهستان میان‌رخ از بخش جلگه‌رخ و دهستان ریوند از بخش مرکزی نشان داده شده‌اند. قابل ذکر است داده‌های مذکور بر مبنای داده‌های متوسط طولانی‌مدت می‌باشند، یعنی فرض گردیده در طی ۱۴ سال شبیه‌سازی چنین عملیاتی به طور متوسط در منطقه رایج بوده است. لازم به ذکر است که گندم دیم، غالباً یک سال درمیان کشت می‌گردد. بنابراین، مدیریت گیاهی برای این محصول بصورت کشت یک سال در میان

جدول ۱- شیوه‌های مدیریتی برای گندم آبی (دهستان ریوند از بخش مرکزی)

سال	نوع عملیات	تاریخ	توضیحات
۱	شخم زنی	۲۶ شهریور	-
۱	ماله کشی	۲۷ شهریور	-
۱	کاشت	۱۲ مهر	-
۱	کوددهی	۱۳ مهر	فسفات، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار
۱	آبیاری خودکار	۱۴ مهر	-
۱	کوددهی	۱۲ اسفند	اوره، ۵۰ کیلوگرم در هکتار
۲	کوددهی	۲۰ فروردین	اوره، ۵۰ کیلوگرم در هکتار
۲	کوددهی	۱۰ اردیبهشت	اوره، ۵۰ کیلوگرم در هکتار
۲	برداشت	۴ تیر	-

جدول ۲- شیوه‌های مدیریتی برای گندم دیم (دهستان میان‌رخ از بخش جلگه‌رخ)

سال	نوع عملیات	تاریخ	توضیحات
۱	شخم زنی	۲ آذر	-
۱	ماله کشی	۳ آذر	-
۱	کاشت	۱۶ آذر	-
۱	کوددهی	۱۷ آذر	فسفات، ۵۰ کیلوگرم در هکتار
۱	کوددهی	۱۷ آذر	اوره، ۵۰ کیلوگرم در هکتار
۲	برداشت	۲۶ تیر	-

ساختار مدل

نرم‌افزار Arc-SWAT نسخه 2009.93.7b (Winchell et al., 2009) بعنوان واسط گرافیکی برنامه SWAT مورد استفاده قرار گرفت. اجرای مدل براساس گام زمانی روزانه از ۷ مهر ۱۳۷۶ (۲۳ سپتامبر ۱۹۹۷) تا ۸ مهر ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) صورت گرفت. سه سال اول به منظور سازگاری مدل با شرایط موجود و تعیین اولیه ضرایب پارامترها^۱ مورد استفاده قرار گرفت (در تجزیه-تحلیل‌ها در نظر گرفته نشد). ۷ سال آبی برای واسنجی و ۳ سال آبی نیز برای صحت‌سنجی استفاده شد. به دلیل مدیریت بهتر داده‌های گیاهی، تصمیم بر آن گرفته شد که هر زیر حوضه یک HRU در نظر گرفته شود. برای تقسیم بندی حوضه به زیر حوضه‌های مختلف مراحل زیر طی گردید. ابتدا با کمترین آستانه مساحت ممکن زیرحوضه‌ها حاصل گردید. سپس تمامی محل خروج رواناب زیرحوضه‌ها حذف و با استفاده از محدودیت‌های مرز کوه و دشت، مرز محصولات باغی و زراعی، مرز دهستان‌ها و همچنین ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در سطح دشت سعی شد خروجی‌های متناسب با آنها در نظر گرفته شده و دوباره زیرحوضه‌ها تولید شوند. البته محدودیت در نظر گرفتن مساحت هر یک از زیرحوضه‌ها به اندازه یک درصد کل حوضه نیز برای کاهش عدم قطعیت ناشی از تغییرات زیاد کاربری اراضی و خاک نیز

در تولید زیرحوضه‌ها اعمال گردید. بعد از آزمون خطاهای بسیار زیاد، زیرحوضه‌هایی مطابق شکل (۱) حاصل گردید که تعداد آنها ۲۴۸ زیرحوضه می باشد.

مقادیر افت‌آهنگ بارندگی و دما در هر کیلومتر به ترتیب ۱۶۰ میلیمتر و ۶ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. سپس برای هر زیرحوضه ۵ باند ارتفاعی با در نظر گرفتن افت‌آهنگ محاسبه شده اعمال شد. میزان تابش خورشیدی با استفاده از معادله‌ی پریسکات-انگستروم (Angstrom, 1924) بجای استفاده از مولد داده‌های اقلیمی SWAT بخاطر تاثیر زیاد آن روی عملکرد گیاه (Neitsch et al., 2009) برآورد گردید. برای محصولات گندم و جو آبی و گندم دیم داده‌های مدیریتی مربوط به آنها نیز وارد مدل گردید. روش هارگریوز برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در مدل استفاده شد. همچنین از روش ذخیره متغیر برای روندیابی جریان در مدل استفاده شد. در این تحقیق روش آبیاری خودکار برای مدیریت گیاه انتخاب شد؛ زیرا تعیین اینکه کشاورزان چه موقعی و برای چه مدت زمانی در دوره‌ی شبیه‌سازی از آبیاری استفاده می‌کنند، دشوار است.

واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل

در این تحقیق از روش SUFI2 جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل SWAT استفاده شد. کارایی این روش در

1- Warm-up period

واسنجی شد. پس از واسنجی هیدرولوژی کل ایستگاه های هیدرومتری موجود در حوضه، زیرحوضه های تحت کاربری گندم دیم و آبی بطور جداگانه مورد واسنجی قرار گرفتند. همانطور که پیش تر گفته شد، گندم دیم غالباً یک سال در میان از سوی کشاورزان کشت می گردد لذا تنها برای سال هایی که دارای عملکرد شبیه سازی شده بود، واسنجی انجام شد. بعد از آن کل حوضه با استفاده از پارامترهای ثابت عملکرد گیاه برای زیرحوضه های مذکور، واسنجی شد. در نهایت نیز با استفاده از مجموع پارامترهای هیدرولوژی و گیاهی نهایی، واسنجی هیدرولوژی کل ایستگاه های هیدرومتری موجود در حوضه دوباره انجام گردید. معیارهای مختلفی جهت ارزیابی اثربخشی مدل و قابلیت آن در پیش بینی های دوره های واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد که عبارتند از عامل P، عامل R، ضریب تعیین R^2 ، ضریب NS (Nash and Sutcliffe, 1970)، و ریشه میانگین مربعات خطا. عامل P و عامل R قبلاً تعریف شدند، سایر معیارهای مذکور از معیارهای متداولی هستند. معیار NS نیز به صورت رابطه ی ذیل می باشد:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - O_{avg})^2} \quad (1)$$

که در آن N، تعداد مقادیر و P_i و O_i به ترتیب مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی شده می باشند. NS نشان می دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱ هماهنگی دارد. مقدار این آماره بین $-\infty$ و یک (مقدار بهینه) متغیر است. مقادیر بین صفر و یک بعنوان سطح عملکرد قابل قبول و مقادیر کوچکتر از صفر نشانگر سطح عملکرد غیرقابل قبول هستند (Moriasi et al., 2007).

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

جدول (۳) پارامترهای نهایی انتخاب شده در فرآیند واسنجی، حدود اولیه و نهایی آنها و مقدار حساسیت آنها را نشان می دهد. مقدار t بیانگر حساسیت (هرچه مقدار آن بزرگتر، میزان حساسیت بیشتر) و مقدار p معنی داری (هر چه کوچکتر، میزان معنی داری بیشتر) را نشان می دهد (Abbaspour, 2007). تحلیل حساسیت نشان می دهد که ۲۱ پارامتر هیدرولوژی به دبی رودخانه حساس بوده و تمام پارامترهای گیاهی نیز به عملکرد گیاه حساس بودند.

اتلاف آب از طریق انتقال جریان^۲ حساس ترین پارامتر در دوره واسنجی هیدرولوژی بود. بخاطر اتلاف زیاد جریان از طرق بستر

مطالعات زیادی نشان داده شده است (Abbaspour et al., 2007; Schuol and Abbaspour 2006; Yang et al., 2007; Faramarzi et al., 2009; Akhavan et al., 2010). الگوریتم بهینه سازی SUFI2 به این صورت است که در گام نخست تابع هدف تعریف می شود. در گام بعد محدوده های مجاز یا دامنه ی اولیه برای هر پارامتر تعیین می شود. در تعیین حدود اولیه بهتر است که تا حد امکان بزرگ و در عین حال معنی دار باشند. سپس با در نظر گرفتن حدود اولیه عدم قطعیت پارامترها، نمونه برداری به روش لاتین هایپرکیوب به تعداد زیاد انجام می شود. در هر بار نمونه گیری از حدود پارامترها، مقادیر انتخاب شده به مدل معرفی و اجرا می شود و متعاقباً مقدار تابع هدف محاسبه می گردد. بعد از هر بار نمونه گیری، اجرای مدل و محاسبه مقدار تابع هدف دامنه ی هر پارامتر کاهش می یابد، تا زمانی که دو شرط برآورده شوند: الف) اکثر داده های مشاهده ای در محدوده ی 95PPU (پیش بینی عدم قطعیت ۹۵ درصد) واقع شوند و ب) متوسط حد بالا و پایین باند عدم قطعیت 95PPU کوچک شود. برقراری شرایط ذکر شده به کیفیت داده های اندازه گیری شده بستگی دارد. بنابراین در SUFI2 هدف در برگرفتن بیشترین مقادیر مشاهده شده با کمترین ضخامت باند می باشد. برای به کمیت در آوردن عدم قطعیت در روش SUFI2، ضرایب p-factor و d-factor پیشنهاد شده است که به ترتیب برای به کمیت در آوردن قدرت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت می باشند. P-factor درصدی از داده های مشاهده شده است که در محدوده باند عدم قطعیت 95PPU قرار گرفته اند و با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ۲/۵ درصد به عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد به عنوان حد بالا در توزیع احتمال تجربی مربوط به متغیرهای شبیه سازی شده بدست می آید. مقدار ایده آل P-factor زمانی است که تمامی داده های مشاهده در محدوده باند عدم قطعیت 95PPU قرار بگیرند ($P-factor \rightarrow 1$). از طرف دیگر d-factor برابر میانگین فاصله بین حدود بالا و پایین باند 95PPU است که با تقسیم بر انحراف معیار داده های مشاهده شده نرمال شده است (Abbaspour, 2007).

واسنجی و صحت سنجی مدل براساس داده های دبی ۵ ایستگاه هیدرومتری و داده های عملکرد گیاه گندم آبی و دیم به ترتیب به مدت ۷ سال آبی برای دوره ی مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۶ (۳۰ سپتامبر ۲۰۰۷) و ۳ سال آبی از مهر ۱۳۸۶ (اول اکتبر ۲۰۰۷) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) انجام شد. در ابتدا SWAT با پارامترهای هیدرولوژی واسنجی گردید و سپس این پارامترها برای واسنجی عملکرد گیاه ثابت گردید. بدین منظور، ایستگاه های هیدرومتری واقع در نواحی کوهستانی حوضه شامل اندراب، بار، عیش آباد و خرو مجموع و خروجی حوضه (حسین آباد جنگل) بطور جداگانه واسنجی شدند. پس از آن کل حوضه، با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولوژی ثابت برای ایستگاه های مذکور،

1- t-value

2- TRNSRCH

هیدرولیکی موثر و مقدار ضریب مانینگ از پارامترهای موثر در فرایند نفوذ از بستر رودخانه هستند. در حقیقت، این پارامترها، اتلاف آب از بستر رودخانه را کنترل می‌کنند. جریان پایه شاخصی از واکنش جریان آب زیرزمینی به تغییرات تغذیه است. به کمیت درآوردن جریان پایه در حوضه‌های با اقلیم نیمه خشک که مقدار جریان کم و در طی مدت کوتاهی اتفاق می‌افتد حائز اهمیت می‌باشد (Bako and Hunt 1988). همچنین، پارامترهای برف (عامل ذوب برف در ۲۱ دسامبر و دمای پایه‌ی ذوب برف) از جمله پارامترهای حساس بودند. دلیل حساسیت پارامترهای برف این است که ناحیه‌ی شرقی حوضه‌ی نیشابور کوهستانی است و ذوب برف، جریان در این قسمت از حوضه آبریز را کنترل می‌کند.

رودخانه‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک، عمده‌ی نفوذ از این طریق صورت می‌گیرد. بنابراین، رواناب عمدتاً بوسیله‌ی عامل اتلاف آب از طریق انتقال جریان در این نواحی کنترل می‌گردد (Sorman and Abdulrazzak 1993; Scanlon et al., 2002; De Vries and Simmers 2002; Sophocleous 2005; Scanlon et al., 2006; Wheater 2010; Edmunds 2010; Yin et al., 2011). با این وجود، حساسیت شماره منحنی (CN2) در حوضه آبریز نیشابور نیز به اندازه‌ی حساسیت اتلاف آب از طریق انتقال جریان می‌باشد. لازم به ذکر است که پارامتر اتلاف آب از طریق انتقال جریان برای کل حوضه در SWAT محاسبه می‌گردد. بنابراین، به نظر می‌رسد که این مورد از نقاط ضعف SWAT بوده و بهتر است که این پارامتر بصورت مکانی در هر زیرحوضه یا واحد HRU تعریف شود. هدایت

جدول ۳- پارامترهای نهایی انتخاب شده در فرآیند واسنجی، حدود اولیه و نهایی آنها و مقدار حساسیت آن‌ها

محدوده نهایی	محدوده اولیه	p-value	t-value	توضیحات	پارامتر ^a
[-۰/۳۲, ۰/۵۷]	[۰, ۱]	۰	۱۹/۹۲	تلفات انتقال آب	v_TRNSRCH.bsn
[-۰/۴۲, ۰/۲۱]	[-۰/۵, ۰/۵]	۰	۱۸/۳۱	شماره منحنی	r_CN2.mgt
[۳۵, ۴۷]	[۰, ۱۵۰]	۰	۸/۲۴	هدایت هیدرولیکی آبراهه اصلی (میلیمتر بر ساعت)	v_CH_K2.rte
[۰/۳, ۰/۳۹]	[۰, ۱]	۰	۳/۰۲	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی	v_ALPHA_BF.gw
[۰/۱۹, ۰/۲۲]	[۰, ۰/۳]	۰	۱/۶۳	ضریب مانینگ آبراهه اصلی در هر زیرحوضه	v_CH_N2.rte
[۰/۰۳, ۰/۰۴]	[۰/۰۲, ۰/۲]	۰/۱۳	۱/۵	ضریب "Revap"	v_GW_REVAP.gw
[۰/۲۱, ۲/۴۷]	[۰, ۱۰]	۰/۲۳	۱/۲۱	عامل ذوب برف در ۲۱ دسامبر (درجه سانتیگراد)	v_SMFMN.bsn
[-۴/۲۱, -۲/۱۶]	[-۵, ۵]	۰/۲۵	۱/۱۶	دمای ذوب توده برف (درجه سانتیگراد)	v_SMTMP.bsn
[۰/۷۵, ۰/۸۱]	[۰/۰۱, ۱]	۰/۳۵	۰/۹۳	ضریب تصحیح جذب آب از خاک توسط گیاه	v_EPCO.hru
[-۰/۰۶, ۰/۰۶]	[-۰/۵, ۰/۵]	۰/۳۷	۰/۹	هدایت هیدرولیکی خاک (میلیمتر بر ساعت)	r_SOL_K().sol
[۳۴, ۴۳]	[۱۰, ۱۵۰]	۰/۳۹	۰/۵۷	متوسط طول شیب (متر)	v_SLSUBBSN.hru
[۴۷۱, ۴۸۴]	[۰, ۵۰۰]	۰/۴۲	۰/۵۴	زمان تاخیر تغذیه آب زیرزمینی (روز)	v_GW_DELAY.gw
[۰/۳, ۰/۴۷]	[۰, ۱]	۰/۴۴	۰/۵۴	درصد تغذیه آبخوان عمیق	v_RCHRGP_DP.gw
[۴/۸۷, ۹/۴۸]	[۰, ۱۰]	۰/۶۵	۰/۴۵	عامل ذوب برف در ۲۱ جولای (درجه سانتیگراد)	v_SMFMX.bsn
[-۰/۴۱, -۰/۳۳]	[-۰/۵, ۰/۵]	۰/۶۷	۰/۴۲	چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	r_SOL_BD().sol
[۰/۲۷, ۳/۴۲]	[-۵, ۵]	۰/۷	۰/۳۹	دمای برف (درجه سانتیگراد)	v_SFTMP.bsn
[۰/۷۲, ۰/۷۹]	[۰/۰۱, ۱]	۰/۷۳	۰/۳۵	ضریب تصحیح تبخیر از خاک	v_ESCO.hru
[۰/۲۳, ۰/۳۴]	[-۰/۵, ۰/۵]	۰/۸۴	۰/۲	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (میلی‌متر در میلی‌متر)	r_SOL_AWC().sol
[۱, ۷]	[۱, ۲۴]	۰/۸۵	۰/۱۸	ضریب تاخیر رواناب سطحی	v_SURLAG.bsn
[۰/۰۶, ۰/۶۷]	[۰/۰۱, ۱]	۰/۸۸	۰/۱۵	ضریب تاخیر دمای توده برف	v_TIMP.bsn
[۲۳۸۸, ۲۸۱۲]	[۰, ۵۰۰۰]	۰/۸۹	۰/۱۴	حداقل مقدار جریان در آبخوان برای جریان پایه	v_GWQMN.gw
[۳۷۹۸, ۴۱۳۱]	[۵۰۰, ۵۰۰۰]	-	-	واحد گرمای پتانسیل لازم برای رشد کامل گیاه	v_HEAT_UNITS.mgt (Irrigated wheat)
[۰/۵۲, ۰/۶۳]	[۰, ۱]	-	-	شاخص برداشت	v_HI_TARG.mgt (Irrigated wheat)
[۰/۸۶, ۰/۹]	[۰, ۱]	-	-	شاخص استرس آب که باعث آبیاری می‌شود	v_AUTO_WSTRS.mgt (Irrigated wheat)
[۲۳۴۱, ۲۷۳۵]	[۵۰۰, ۵۰۰۰]	-	-	-	v_HEAT_UNITS.mgt (Rainfed wheat)
[۰/۱۳, ۰/۲۶]	[۰, ۱]	-	-	-	v_HI_TARG.mgt (Rainfed wheat)

^a v و r نشان دهنده تغییرات نسبی (ضرب در مقادیر پارامتر به صورت درصد) و مطلق (جایگزین مقادیر پارامتر) می‌باشند.

واسنجی هیدرولوژی و تحلیل عدم قطعیت

خروجی حوضه را نیز به تنهایی به خوبی شبیه‌سازی نماید. بعد از واسنجی ایستگاه‌های موجود به صورت جداگانه، کل حوضه با در نظر گرفتن پارامترهای ثابت هیدرولوژی برای این ایستگاه‌ها واسنجی گردید. تعداد کل پارامترها که بر اساس نوع خاک، کاربری اراضی و زیرحوضه‌های مختلف تفکیک شده بود ۶۶ پارامتر بود. بعد از انجام آنالیز حساسیت ۲۱ پارامتر حساس به جریان شناسایی گردید (جدول ۳). همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است SWAT توانست جریان را با توجه به معیارهای عملکرد (R2, NS و RMSE) بخوبی شبیه‌سازی نماید. معیار عملکرد ضریب تعیین که همبستگی خطی بین مقدار جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را ارزیابی می‌کند برای تمام ایستگاه‌ها در بازه‌ی قابل-قبولی قرار داشت. NS که مقدار نسبی واریانس باقیمانده به واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده را تعیین می‌کند، در بازه‌ی قابل-قبولی که از سوی موریسی و همکاران (۲۰۰۷) پیشنهاد شده، قرار داشت. آماره‌ی RMSE که معیاری از برآزش بین مقدار جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است، باتوجه به بازه‌ی دبی جریان در ایستگاه‌های مختلف منطقی بود.

با توجه به شکل (۳)، مدل توانسته است روند جریان را در تمامی ایستگاه‌ها به خوبی شبیه‌سازی نماید. با این وجود عدم قطعیت بسیار زیادی روی مقادیر پیک جریان در ایستگاه‌های اندرآب (شکل ۳الف) و خرو مجموع (شکل ۳ب) وجود دارد. به طور خاص، مدل بخاطر دلایلی که برای ایستگاه‌های بار و عیش آباد ذکر شد، توانست بطور مناسبی دبی پیک جریان در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت را شبیه‌سازی کند. لازم به ذکر است که مدل‌سازی دبی جریان در نواحی خشک و نیمه‌خشک 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). با این وجود نتیجه‌ی واسنجی جریان در حسین آباد جنگل بعنوان خروجی حوضه که در اکثر مواقع هم بدون جریان و هم با جریان کم بود بسیار خوب می‌باشد. مهم‌ترین دلیل دستیابی به این نتیجه در نظر گرفتن دقیق مدیریت گیاه در حوضه می‌باشد. بایستی بخاطر داشت که تبخیر-تعرق یک مولفه‌ی اصلی بیلان آب سطحی در حوضه‌های کشاورزی واقع در نواحی خشک و نیمه‌خشک است و در نظر گرفتن مدیریت گیاه بطور قابل توجهی نتایج را بهبود می‌بخشد.

نتایج اعتبارسنجی جریان در جدول ۴ و شکل ۳ نشان داده شده-اند. آماره‌های p-factor و d-factor مشابه با نتایج واسنجی بودند که نشان‌دهنده‌ی سازگاری دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل هاست. با این حال، شبیه‌سازی جریان در حسین آباد جنگل اندکی بهبود یافت.

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در نواحی کوهستانی حوضه شامل اندرآب، بار، عیش آباد و خرو مجموع و خروجی حوضه (حسین آباد جنگل) بطور جداگانه واسنجی گردیدند. در اولین واسنجی، SWAT قادر به پیش‌بینی جریان پایه برای ایستگاه‌های بار، عیش آباد و خرومجموع نبود. به دلیل اینکه جریان پایه در این ایستگاه‌ها از چشمه‌های موجود در زیرحوضه همان ایستگاه یا ایستگاه‌های بالادست آن تامین می‌شود، چشمه‌های موجود به عنوان منابع نقطه‌ای^۱ وارد مدل شدند (شکل ۲). با این وجود مدل توانست فقط جریان پایه در ایستگاه خرومجموع را به خوبی شبیه‌سازی نماید. دلایل متعددی می‌تواند برای نتایج نامناسب در ایستگاه‌های بار و عیش‌آباد دخیل باشند. این ایستگاه‌ها در قسمت کوهستانی حوضه واقع شده‌اند که دارای تغییرات ارتفاعی بسیار شدید می‌باشند لذا در نظر گرفتن فقط یک ایستگاه باندگی برای شبیه‌سازی جریان در این دو قسمت نتوانسته معرف بارندگی این قسمت باشد هر چند باند ارتفاعی در این زیرحوضه‌ها تعریف گردید. همچنین فعالیت‌های انسانی در نظر گرفته نشده در مدل‌سازی می‌تواند بر هیدرولوژی محلی منطقه در طولانی مدت تاثیر گذار باشد. به طور مثال، احداث مخازن تغذیه مصنوعی متعدد در نزدیکی این ایستگاه‌ها می‌تواند شبیه‌سازی جریان را کاملاً تحت تاثیر قرار دهد (شکل ۲). این از مهم‌ترین و اغلب یکی از منابع فراموش شده عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس می‌باشد. در واقع همگام با افزایش توسعه در مدیریت منابع آب، مدل‌سازی هیدرولوژی سخت‌تر بوده و به دسترس بودن جزئیات فعالیت‌های مدیریتی وابسته خواهد بود. مدل SWAT، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم-بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی ذوب برف (Fontaine et al. 2002) می‌توان نتیجه گرفت که ممکن است مدل در شبیه‌سازی ذوب برف در کوهستان‌هایی که سرچشمه جریان در رودخانه بار و خرومجموع هستند ضعیف عمل کرده و جریان را نتوانسته شبیه‌سازی نماید. عامل دیگر می‌تواند ناشی از پایه فیزیکی روش SCS باشد. این روش نمی‌تواند رواناب حاصل از ذوب برف و آب یخ‌زده روی زمین را شبیه‌سازی کند. همچنین روش مذکور مدت و شدت بارندگی را هم در نظر نمی‌گیرد. در نظر گرفتن این خصوصیات بارندگی، برای حوضه‌های نیمه‌خشکی مثل نیشابور که بارش‌های کوتاه مدت و شدید رخ می‌دهد ضروری بوده و توصیه شده است (Maidment, 1992). لذا با توجه به نتایج بد حاصله در این دو ایستگاه هیدرومتری بار و خرومجموع، ایستگاه‌های مذکور از دوره‌ی واسنجی حذف گردیدند. قابل ذکر است مدل توانست جریان در

جدول ۴- مقادیر معیارهای عملکرد مدل برای دوره واسنجی (صحت‌سنجی)

نام ایستگاه	P-factor	R-factor	R ²	NS	RMSE
اندرآب	۰/۴۲ (۰/۳۶) ^۱	۰/۳۵ (۰/۴۱)	۰/۸۵ (۰/۷۹)	۰/۸۴ (۰/۷۹)	۰/۲۱۲ (۰/۰۰۵)
خرومجموع	۰/۴۵ (۰/۴۲)	۰/۳۷ (۰/۶۱)	۰/۸۷ (۰/۷۴)	۰/۷۷ (۰/۶۶)	۰/۳۲۶ (۰/۰۳۶)
حسین‌آباد (خروجی)	۰/۳۷ (۰/۴۲)	۰/۶۸ (۰/۶۳)	۰/۸۲ (۰/۷۱)	۰/۸۲ (۰/۷۱)	۰/۳۳۱ (۰/۰۰۴)

^۱مقادیر داخل پرانتز مربوط به دوره صحت‌سنجی جریان هستند

واسنجی عملکرد گیاه و تحلیل عدم قطعیت

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، واسنجی مدل هیدرولوژیکی بزرگ-مقیاس - ۹۱۵۹ کیلومتر مربع- تنها با جریان رودخانه نمی‌تواند دارای دقت مناسبی برای برآورد مولفه‌های بیلان آب سطحی باشد (Abbaspour et al., 2007). به دلیل رابطه‌ی مستقیم بین تبخیر-تعرق واقعی و عملکرد گیاه (Jensen, 1968; FAO, 1986)، واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ‌مقیاس با استفاده از عملکرد گیاه و دبی رودخانه، دارای سطح اعتماد بیشتری در رابطه با تفکیک آب موجود در خاک به ذخیره‌ی خاک، تبخیر-تعرق واقعی و تغذیه‌ی آبخوان می‌باشد (Faramarzi et al., 2009; Srinivasan et al., 2011; Nair et al., 2010; Akhavan et al., 2010). همچنین، دلیل دیگر در نظر گرفتن واسنجی عملکرد گیاه، ناکافی بودن ایستگاه-های هیدرومتری حوضه بویژه در مرکز آن می‌باشد. درحقیقت، بیشتر فعالیت‌های کشاورزی در مرکز حوضه که آبخوان اصلی واقع شده است صورت می‌گیرد. جدول (۳) پارامترهای نهایی انتخاب شده در فرآیند واسنجی عملکرد گندم آبی و دیم، حدود اولیه و نهایی آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقادیر معیارهای عملکرد مدل برای دوره واسنجی (صحت‌سنجی)

گیاه	R-factor	RMSE (ton ha ⁻¹)
گندم آبی	۰/۹۷ (۰/۵۷)	۰/۰۸ (۰/۰۱۲)
گندم دیم	۱/۱۶ (۱/۲۱)	۰/۰۴۵ (۰/۰۳۹)

مقادیر داخل پرانتز مربوط به دوره صحت‌سنجی هستند

شاخص‌های عملکرد دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. با توجه به جدول مذکور، SWAT بصورت رضایت‌بخشی قادر به پیش‌بینی عملکرد برای گندم آبی بود که به ترتیب مقادیر RMSE و عامل R، ۰/۰۸ و ۰/۹۷ تن بر هکتار بدست آمد. با این حال، مقدار عدم‌قطعیت (عامل R) برای گندم دیم، بیشتر از گندم آبی بود. یک دلیل عمده‌ی این نتایج خوب برای واسنجی عملکرد، گردآوری دقیق و صحیح داده و اطلاعات شیوه‌های مدیریتی (از قبیل نوع شخم، کود شیمیایی و تاریخ کاشت) در مقیاس

مزرعه می‌باشد. در حقیقت، حوضه نیشابور شامل ۲۰ دهستان می‌باشد و اطلاعات مذکور از طریق مصاحبه با کارشناسان محلی و کشاورزان بزرگ‌مالک به تفکیک هر دهستان حاصل گردید. با این وجود، در بعضی نقاط حوضه مشکلاتی مربوط به کالیبراسیون عملکرد وجود داشت که ناشی از مقیاس بزرگ حوضه می‌باشد. همچنین داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده برای این قسمت‌ها شاید دارای دقت مناسبی به اندازه سایر دهستان‌ها نبوده‌اند. شکل (۴) مقادیر مشاهده‌ی و شبیه-سازی شده‌ی عملکرد محصول را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که عملکرد شبیه‌سازی شده برای گندم آبی و دیم درون باند عدم‌قطعیت قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده‌ی نتایج خوبی است. با این حال، عدم قطعیت گندم دیم بسیار بیشتر از گندم آبی است که در بالا دلایل آن ذکر گردید. نتایج صحت‌سنجی عملکرد گیاه در جدول ۵ و شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج مشابهی مانند دوره واسنجی برای گندم آبی و دیم در این دوره بدست آمد که قابلیت اعتماد مدل را نشان می‌دهد.

برآورد و تحلیل تبخیر-تعرق واقعی

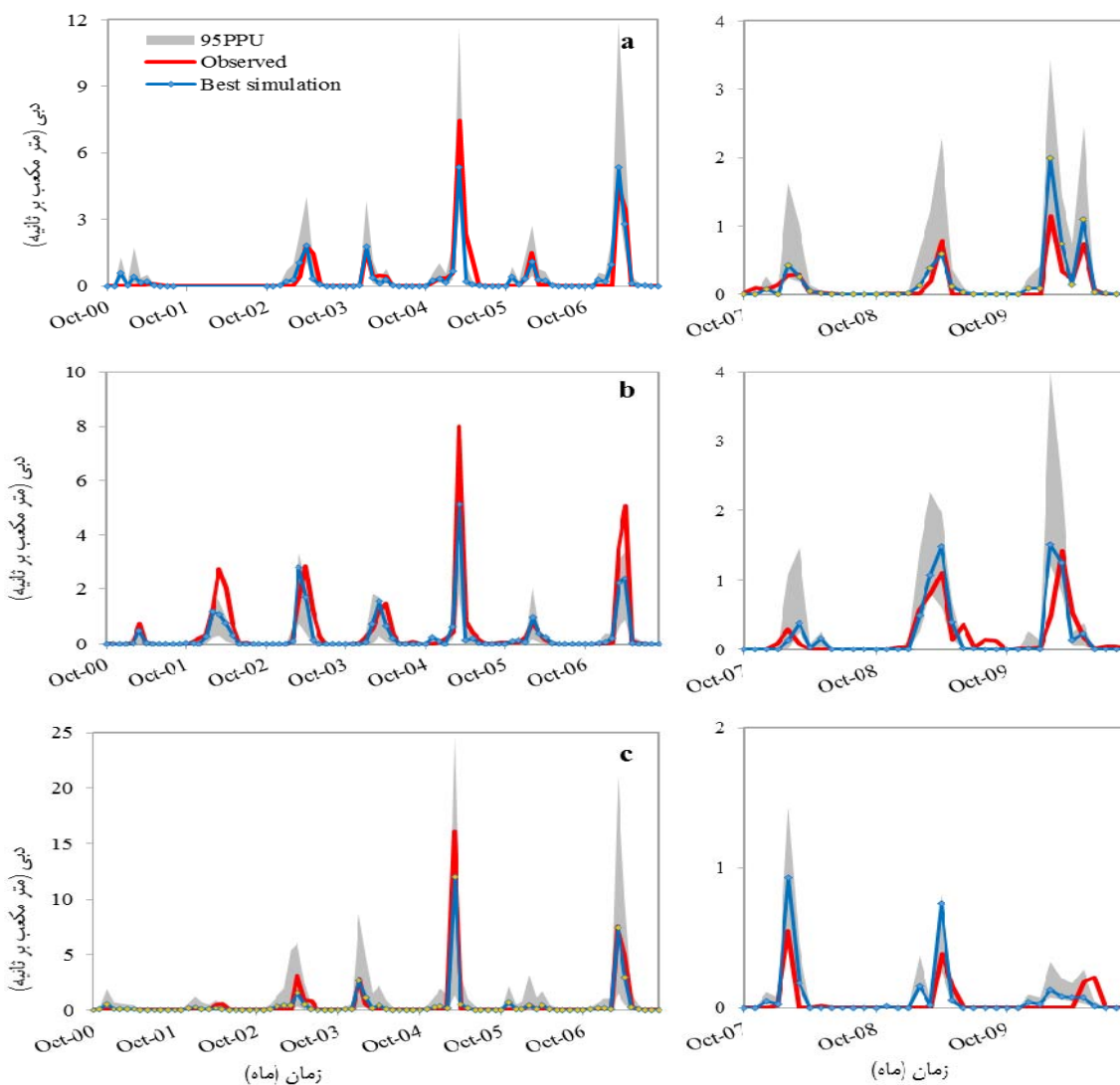
نتایج نشان داد که مدل دارای کارایی بالایی در پیش‌بینی جریان رودخانه و عملکرد محصول می‌باشد. بنابراین، می‌توان از مدل کالیبره شده مذکور برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس سال-حوضه استفاده نمود. از آنجایی که بارندگی و تبخیر-تعرق واقعی اصلی‌ترین مؤلفه‌ها بیلان آب‌های سطحی می‌باشند در شکل (۵) متوسط بارندگی در مقایسه با تبخیر-تعرق واقعی در سال‌های شبیه‌سازی آورده شده است. متوسط ده ساله تبخیر-تعرق واقعی و بارندگی به ترتیب برابر با ۲۳۰ و ۲۷۰ میلی‌متر می‌باشد. نسبت متوسط ده ساله تبخیر-تعرق واقعی به بارندگی برابر با ۰/۸۵ می‌باشد. یعنی اینکه ۸۵ درصد از نزولات جوی به صورت تبخیر-تعرق از دسترس خارج می‌شود. بدیهی است عدد مذکور میانگینی برای کل حوضه می‌باشد. برای این منظور، ابتدا زیرحوضه‌های مربوط به کوهستان و دشت از یکدیگر تفکیک گردیدند تا بتوان با دقت بیشتر درباره مقدار کسر این دو مقدار اظهار نظر نمود. در زیرحوضه‌هایی که در کوهستان قرار داشتند این نسبت در سال‌های مختلف با وضعیت هیدرولوژیکی مختلف، متفاوت بود به طوری که در طی سال‌های خشک (۲۰۰۱-

تبخیر-تعرق واقعی (ناشی از بارش یا آبیاری) به بارش می‌باشد. بدیهی است در بعضی سال‌ها به خصوص سال‌های خشک این نسبت در دشت می‌تواند بیشتر از یک نیز گردد.

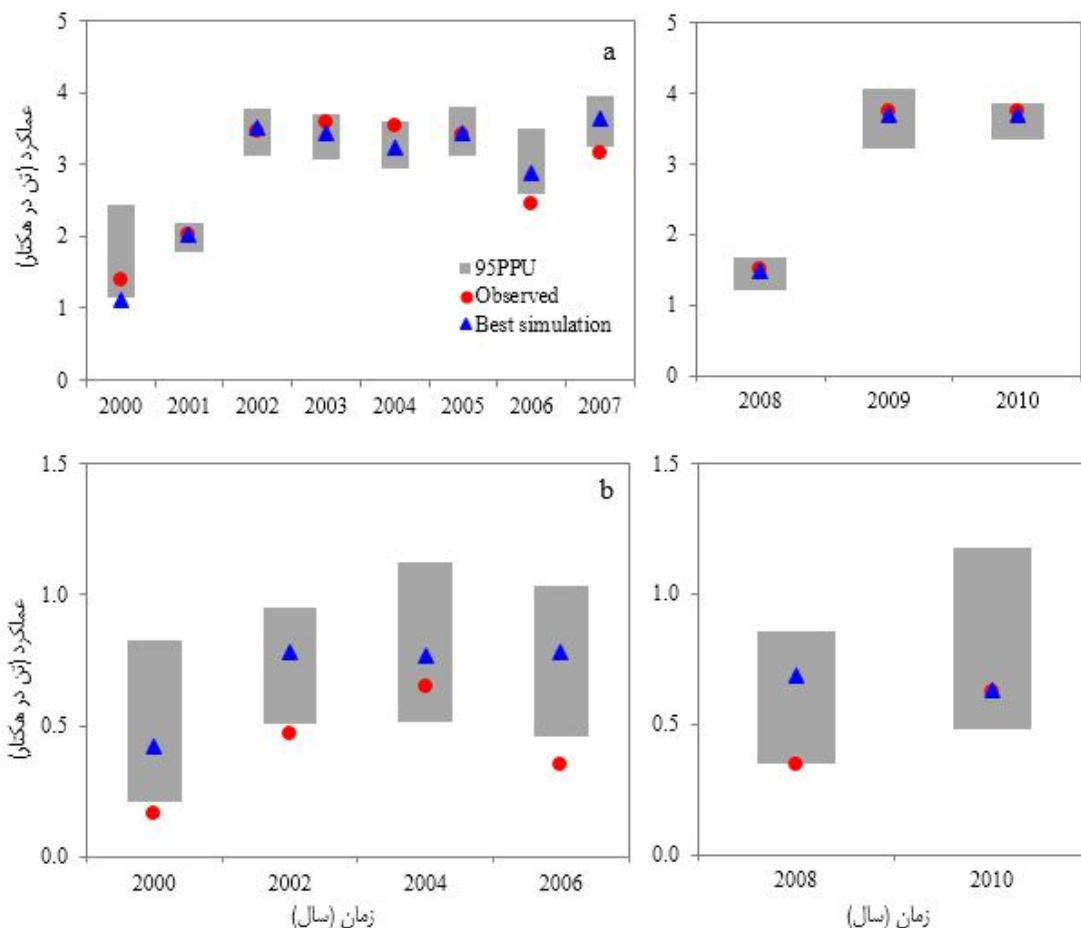
نتیجه‌گیری

در این مطالعه اهمیت یک روش واسنجی دوگانه جریان رودخانه و عملکرد محصول برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس سال-حوزه مورد بررسی قرار گرفت.

۲۰۰۰ و ۲۰۰۸-۲۰۰۷)، نرمال (۲۰۰۱-۲۰۰۲) و تر (۲۰۰۴-۲۰۰۵) و ۲۰۰۶-۲۰۰۷) به ترتیب ۹۹، ۸۰ و ۷۷ درصد می‌باشد. این روند نشان دهنده این واقعیت است که با افزایش عمق بارش سهم تبخیر-تعرق واقعی کاهش یافته و رواناب سهم بیشتری خواهد داشت. به دلیل اینکه در قسمت کوهستانی حوضه، کشت آبی قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد این نسبت صرفاً نشان دهنده نسبت تبخیر-تعرق واقعی به بارندگی است. در سطح دشت به دلیل اینکه علاوه بر بارندگی، آب-زیرزمینی نیز نقش عمده‌ای در تامین آب آبیاری و به تبع آن تبخیر و تعرق از سطوح فاریاب دارد، نسبت مذکور نشان‌دهنده نسبت کل



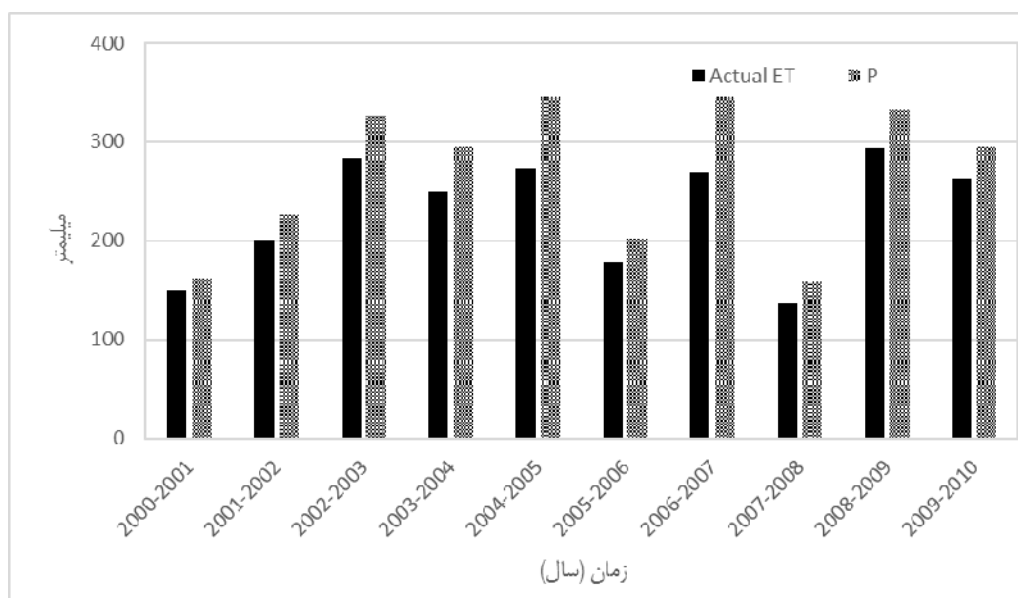
شکل ۳- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (گراف سمت چپ: مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۶ (۳۰ سپتامبر ۲۰۰۷) و صحت‌سنجی (گراف سمت راست: مهر ۱۳۸۶ (اول اکتبر ۲۰۰۷) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) به ترتیب برای ایستگاه هیدرومتری (a) اندراب، (b) خرومجموع و (c) حسین‌آباد جنگل



شکل ۴- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (گراف سمت چپ: ۱۳۷۹ (۲۰۰۰) تا ۱۳۸۶ (۲۰۰۷) و صحت‌سنجی (گراف سمت راست: ۱۳۸۷ (۲۰۰۸) تا ۱۳۸۹ (۲۰۱۰) به ترتیب برای ایستگاه هیدرومتری (a) گندم آبی، (b) گندم دیم. قابل ذکر است که گندم دیم یک سال در میان کشت می‌شود لذا فقط برای سال‌های دارای کشت کالیبراسیون انجام شده است.

آبی بود که به ترتیب مقادیر RMSE و عامل R، ۰/۰۸ و ۰/۹۷ تن بر هکتار بدست آمد. در نهایت تبخیر-تعرق واقعی برآورده شده به وسیله مدل کالیبره شده مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. متوسط ده ساله تبخیر-تعرق واقعی و بارندگی به ترتیب برابر با ۲۳۰ و ۲۷۰ میلی‌متر می‌باشد. نسبت متوسط ده ساله تبخیر-تعرق واقعی به بارندگی در کوهستان در سال‌های مختلف با وضعیت هیدرولوژیکی مختلف، متفاوت بود به طوری که در طی سال‌های خشک (۲۰۰۱-۲۰۰۰ و ۲۰۰۸-۲۰۰۷)، نرمال (۲۰۰۲-۲۰۰۱) و تر (۲۰۰۵-۲۰۰۴ و ۲۰۰۶) به ترتیب ۹۹، ۸۰ و ۷۷ درصد می‌باشد. در سطح دشت به دلیل اینکه علاوه بر بارندگی، آب‌ریزمینی نیز نقش عمده‌ای در تامین آب آبیاری و به تبع آن تبخیر-تعرق از سطوح فاریاب دارد، نسبت مذکور نشان‌دهنده نسبت کل تبخیر-تعرق واقعی (ناشی از بارش یا آبیاری) به بارش می‌باشد.

واسنجی عملکرد محصول باعث می‌شود رطوبت موجود در خاک با دقت بیشتری به مولفه‌های تبخیر-تعرق واقعی، تغذیه‌ی آبخوان و سایر مولفه‌های بیلان آب سطحی تفکیک گردد. عملکرد مدل برای حوضه‌ی خشک نیشابور که تعامل بین رواناب و جریان زیرسطحی به دلیل مقدار کم بارندگی در این مناطق پیچیده می‌باشد کاملاً رضایت‌بخش بود. اتلاف آب از طریق انتقال جریان (TRNSRCH) حساس‌ترین پارامتر در دوره واسنجی هیدرولوژی بود. با این وجود، حساسیت شماره منحنی (CN2) نیز به اندازه‌ی حساسیت اتلاف آب از طریق انتقال جریان بود. نتیجه‌ی واسنجی جریان در حسین آباد جنگل بعنوان خروجی حوضه که در اکثر مواقع هم بدون جریان و هم با جریان کم بود بسیار خوب بود به طوری که مقدار RMSE و NS به ترتیب برابر با ۰/۳۲۱ متر مکعب بر ثانیه و ۰/۸۲ بود. همچنین بصورت رضایت‌بخشی قادر به پیش‌بینی عملکرد برای گندم



شکل ۵- متوسط تبخیر-تعرق واقعی و بارندگی در مقیاس سال-حوضه در دوره شبیه‌سازی

Akhavan, S., Abedi-Koupaia, J., Mousavia, S.F., Eslamiana, S.S., and Abbaspour, K.C. (2010), Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4)675-688.

Angstrom, A. (1924), Solar and terrestrial radiation, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 50:121-126.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998), Large area hydrologic modeling and assessment—Part 1. Model development. *Journal of the American water resources association (JAWRA)* 34:73-89.

Bako, M.D. and Hunt, D.N. (1988), Derivation of baseflow recession constant using computer and numerical analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 33(4)357-367.

Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., et al. (2001), Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(11)2415-2434.

Bastiaanssen, W.G.M. (2000), SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229:87-1000.

Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., and Holtslag, A.A.M. (1998a), A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 198-212.

Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., Van der Val, T. (1998b), A remote sensing surface energy balance

بدیهی است در بعضی سال‌ها به خصوص سال‌های خشک این نسبت در دشت می‌تواند بیشتر از یک نیز گردد. بررسی منابع نشان می‌دهد از تبخیر-تعرق برآورد شده به وسیله مدل SWAT می‌توان به عنوان مرجعی برای ارزیابی نتایج حاصل از تکنیک سنجش از راه دور استفاده کرد (Gao and Long, 2008). لذا مطالعه حاضر می‌تواند در راستای مطالعاتی که در این زمینه با استفاده از تکنیک سنجش از راه دور صورت می‌گیرد راهگشا بوده و به عنوان مبنایی برای واسنجی و افزایش دقت آن‌ها به کار رود.

مراجع

علیزاده، ا. و خلیلی، ن. (۱۳۸۸). تعیین ضرایب مدل آنگستروم و توسعه یک مدل رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی: منطقه مشهد). *مجله علوم و صنایع کشاورزی (آب و خاک)*، جلد ۲۳، شماره ۱، ۲۲۹-۲۳۸.

مهندسين مشاور سازآب شرق، (۱۳۸۷). گزارش مطالعات جامع منابع آب حوضه آبریز کالشور.

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

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. (2007), Modelling hydrology and water quality in the pre- alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4)413-430.

- the average annual water balance, *Water Resources Research*, 30:2143–2156.
- Monteith, J.L. (1965), *Evaporation and environment*. In the state and movement of water in living organisms, XIXth Symposium Society for Exp Biol, Swansea, Cambridge University Press
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007), Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3)885–900.
- Nair, S.S., King, K.W., Witter, J.D., Sohngen, B.L., and Fausey, N.R. (2011), Importance of crop yield in calibrating watershed water quality simulation tools. *Journal of the American water resources association (JAWRA)*, 47(6):1285–1297.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970), River flow forecasting through conceptual models, part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10:282–290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2009), Soil and water assessment tool. In: *Theoretical Documentation: Version 2009*. TWRI TR-191, College Station, TX.
- Poff, N.L., and Ward J.V. (1989), Implications of streamflow variability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow pattern. *Canadian Journal of Fish and Aquatic Sciences*, 46:1808–1818.
- Priestley, C.H.B., and Taylor R.J. (1972), On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly weather review*, 100:81-92.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., and Cook, P.G. (2002), Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10:18–39.
- Scanlon, B.R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, W.M., and Simmers, I. (2006), Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20(15)3335–3370.
- Schuol, J., and Abbaspour, K.C. (2006), Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Advances in Geosciences*, 9:137–143.
- Sophocleous, M.A. (2005), Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal*, 13(2)351–365.
- Sorman, A.U. and Abdulrazzak, M.J. (1993), Infiltration–recharge through wadi beds in arid regions. *Hydrological sciences journal*, 38(3)173–186.
- Srinivasan, R., Zhang, X., and Arnold, J. (2010), SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi river basin. *Transactions of the ASABE*, 53(5)1533-1546.
- Su, H., McCabe, M.F., Wood, E.F., Su, Z., and Prueger, J.H. (2005), Modeling evapotranspiration during algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 213–229.
- Batra, N., Islam, S., Venturini, V., Bisht, G., and Jiang, L. (2006), Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 103:1–15.
- Brotzge, J.A., and Kenneth, C.C. (2003), Examination of the surface energy budget: A comparison of eddy correlation and Bowen ration measurement systems. *Journal of Hydrometeorology*. 4(2)160–178.
- De Vries, J.J., and Simmers, I. (2002), Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10:5–17.
- Edmunds, W. M. (2010), Conceptual models for recharge sequences in arid and semi-arid regions using isotopic and geochemical methods. *Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*, 1st ed. Howard S. Wheeler, Simon A. Mathias and Xin Li. Published by Cambridge University Press, 21-37.
- FAO, Food and Agriculture Organization, (1986), Yield response to water. In: *Irrigation and Drainage Paper 33*. FAO, Rome, Italy.
- 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.
- Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G. and Hotchkiss, R.H. (2002), Development of a snowfall–snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology* 262(1-4)209-223.
- Gao, Y., and Long, D. (2008), Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on SWAT. *Hydrological Processes*, 22(25)4850-4869.
- Gentine, P., Entekhabi, D., Chehbouni, A., Boulet, G., and Duchemin, B. (2007), Analysis of evaporative fraction diurnal behavior. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143:13–29.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985), Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3)225-230.
- Jensen, M.E. (1968), Water Consumption by Agricultural Plants. In *Water Deficits in Plant Growth* (1). Academic Press, New York, pp. 1–22.
- Jiang, L., and Islam, S. (2001), Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2)329–340.
- Kite, G.W., and Droogers, P. (2000), Comparing evapotranspiration estimates from satellites hydrological models and field data. *Journal of Hydrology*, 229:3–18.
- Maidment, D.R. (1992), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Co., New York.
- Milly, P.C.D. (1994), Climate, soil water storage, and

- for Rangeland. *Journal of Range Management*, 43(6):482-485.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., and Arnold, J.G. (2009), ArcSWAT Interface for SWAT2005–User’s Guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Station and Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, Temple, TX.
- Wolock, D. and McCabe, G. (1999), Estimates of Runoff Using Water-Balance and Atmospheric General Circulation Models. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1341-1350.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., and Yang, H. (2007), Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference. *Journal of Hydrology*, 340:167–182.
- Yin, L., Hu, G., Huang, J., Wen, D., Dong, J., Wang, X., and Li, H. (2011), Groundwater-recharge estimation in the Ordos Plateau, China: comparison of methods. *Hydrogeology Journal*, 19:1563–1575.
- Yunusa, I.A.M., Walker, R.R., and Lu, P. (2004), Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127: 93–107.
- SMACEX02: Comparing two approaches for local and regional scale prediction. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6):910–922.
- Su, Z. (2002), The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1):85–99.
- van Genuchten, M., Leij, F., and Yates, S. (1991), The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Technical Report EPA/600/2-91/065, US Environmental Protection Agency
- Walker, K., and Thoms, M.C. (1993), Environmental effects of flow regulation on the lower river Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management*, 8:103–19.
- Wang, K., Li, Z., and Cribb, M. (2006), Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley-Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment*, 102:293–305.
- Wheater, H.S. (2010), Hydrological processes, groundwater recharge and surface-water/groundwater interactions in arid and semi-arid areas. *Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*, 1st ed. Howard S. Wheeler, Simon A. Mathias and Xin Li. Published by Cambridge University Press, 5-37.
- Wight, J.R., and Hanson, C.L. (1990), Crop Coefficients

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۶

Estimation of Actual Evapotranspiration at Regional – Annual scale using SWAT

A. Alizadeh¹, A. Izady*², K. Davary³, A.N. Ziaei⁴, S. Akhavan⁵ and Z. Hamidi⁶

Abstract

The aim of this study was to estimate actual evapotranspiration at regional – annual scale using semi-distributed Soil, Water Assessment Tools (SWAT) model in the Neishaboor watershed. For this reason, SWAT calibration and validation was done based on river discharge data from 5 gauging stations, rainfed and irrigated wheat yield data for the period Oct. 2000 to Sep. 2007 and Oct. 2007 to Sep. 2010, respectively. Because of the direct relationship between crop yield and evapotranspiration, calibration of watershed models using crop yield along with river discharge gives more confidence on the partitioning of water between soil storage, actual evapotranspiration, aquifer recharge. The results showed that SWAT provided satisfactory predictions on hydrologic budget and crop yield. Specifically, calibration ($R^2 = 0.82$, $NS=0.79$) and validation ($R^2 = 0.71$, $NS=0.71$) periods were quite suitable for the outlet of watershed. It also was able to predict crop yield satisfactorily for irrigated wheat in which R-factor and RMSE values were 0.97 and 0.08 ton ha⁻¹, respectively. The multi-objective calibrated model was then used to estimate and analyze the actual evapotranspiration. Mean ten-year actual evapotranspiration and precipitation was estimated 230 and 270 mm, respectively. The ten-year actual evapotranspiration to precipitation ratio at mountainous part of watershed was 99%, 80% and 77% for 2000-2001 as a dry year, 2001-2002 as a normal year and 2004-2005 as a wet year, respectively. Groundwater is an important source of water supply in the Neishaboor plain. Therefore, estimation of this ratio is not as simple as mountainous part of watershed due to uncertainties in the crop pattern data and their water requirements. It is obvious that this ratio could be more than one in some years especially dry years.

Keywords: Actual evapotranspiration, SWAT model, river discharge, crop yield, Neishaboor watershed

1,3,4- Professor, Associate and Assistance Professor of Water Engineering Dept., College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively

6,2- PhD and MSc student of Water Engineering Dept., College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively. (*Corresponding Author Email: az.izady@gmail.com)

5- Assistance Professor of Water Engineering Dept., College of Agriculture, Buali Sina University