

بررسی تغییرات جریان سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سمنان با استفاده از مدل SWAT

شیما نصیری^۱ و^۲، نگار فرهی^۱ و علی نقی ضیائی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۲۳)

چکیده

یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین فرایندها در حوضه‌های آبریز شناخت و پیش‌بینی تغییرات آب سطحی است. اصلی‌ترین فرایندهای مرتبط با آب سطحی شامل بارندگی، نفوذ، تبخیر- تعرق و رواناب هستند. در این پژوهش، از مدل نیمه‌توزیعی SWAT برای شبیه‌سازی تغییرات جریان سطحی و زیرزمینی برای حوضه آبریز سمنان در مقیاس ماهانه استفاده شد. به‌منظور مشخص کردن پارامترهای حساس مدل، آنالیز حساسیت انجام شد و میزان حساسیت پارامترهای مختلف بر چهار جزء مهم بیلان آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، آب زیرزمینی و تبخیر- تعرق مورد بررسی قرار گرفت. واسنجی مدل بر اساس داده‌های جریان رودخانه برای سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۴ و صحت‌سنجی نیز بر اساس آمار سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۴ صورت گرفت. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامترهای SoL_K (ضریب هدایت هیدرولیکی خاک)، CH_K2 (ضریب نفوذ از بستر رودخانه)، RCHRG_DP (مقدار نفوذ به آبخوان عمیق) و CN2 (شماره منحنی SCS) حساس‌ترین پارامترها هستند. دقت شبیه‌سازی با استفاده از شاخص‌های ارزیابی نش ساتکلیف (Ns) و ضریب همبستگی (R^2) برای سه ایستگاه هیدرومتری شه‌میرزاد، درجزین و حاجی‌آباد در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، به‌ترتیب در بازه ۰/۶ تا ۰/۸ و ۰/۸۰ تا ۰/۹۰ برآورد شد که حاکی از کارایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان است. بر اساس نتایج بیلان آب، از مجموع آب ورودی به حوضه حدود ۸۷/۶ درصد صرف تبخیر- تعرق، ۳ درصد رواناب سطحی، ۳ درصد نفوذ و مابقی مرتبط با تغییرات و ذخیره رطوبت در خاک است.

واژه‌های کلیدی: رواناب، نفوذ، الگوریتم SUFI2، آب زیرزمینی، بیلان آب

۱. کارشناس منابع آب مهندسین مشاور هیدروتک توس مشهد
۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: sh.nasiri.fum@gmail.com

مقدمه

فرایندهای مرتبط با چرخه آب در طبیعت دارای ارتباطی به نسبت پیچیده و همچنین تغییرات زمانی و مکانی بسیار گسترده و متفاوتی هستند. به منظور تعیین بیلان آبی در یک حوضه آبریز در دوره‌های مختلف زمانی و پیش‌بینی میزان جریان در خروجی حوضه، مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای زیادی توسعه داده شده است (۱۷). مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز برای درک بهتر نقش فرایندهای هیدرولوژی و ایجاد ابزارهای تصمیم‌گیری با توجه به نتایج مطلوب کیفیت آب به کار می‌روند، این مدل‌ها شامل تعداد زیادی از پارامترهایی هستند که برای بررسی رواناب سطحی و زیرسطحی، آب زیرزمینی، عمق نفوذ، تبخیر و تعرق، خصوصیات خاک، کاربری اراضی و بارندگی استفاده می‌شوند. انتخاب یک مدل مناسب وابسته به متغیرهای طراحی، دقت، داده‌های در دسترس و مقیاس زمانی و مکانی است و باید توانایی بررسی در مقیاس‌های کوچک تا جهانی را داشته باشد (۲۱). شبیه‌سازی بارش - رواناب یکی از موارد کلیدی در علوم هیدرولوژی و مدیریت محیط زیست به‌شمار می‌رود. در سال‌های اخیر نیاز به منابع آبی به‌سرعت در حال رشد است و افزایش تقاضای منابع آبی نیاز به مدیریت یکپارچه و پایدار آب در حوضه و درک درست از بیلان آبی دارد (۳). اندازه‌گیری اجزای بیلان آب در فاصله‌های زمانی مورد نیاز به‌خاطر وقت‌گیر و پرهزینه بودن مشکل است. روش‌های تدوین بیلان آب به‌عنوان یکی از موضوعات اصلی در علم هیدرولوژی، بیانگر روش حل مسائل مهم نظری و عملی هیدرولوژی هستند. بر پایه نگرش بیلان آب این امکان وجود خواهد داشت که بتوان ارزیابی کمی و کیفی منابع آب و تغییرات آنها را که بیشتر ناشی از فعالیت‌های بشر است انجام داد. لذا شبیه‌سازی مؤلفه‌های جریان و نیز درک صحیحی از بیلان آب برای بررسی چرخه هیدرولوژیکی بسیار مهم است (۱۰). مدل‌های هیدرولوژی با دو هدف اساسی طراحی می‌شوند. هدف اول درک بهتر

رفتارهای هیدرولوژیکی و نحوه تغییرات و اثرات آن و هدف دوم سنتز داده‌های هیدرولوژیکی به‌منظور طراحی منابع آب، کنترل سیل، تعدیل جریان آب و در کل، برنامه‌ریزی و پیش‌بینی جریان است (۱۲). یکی از مدل‌های نرم‌افزاری که به‌تازگی در نقاط مختلف جهان به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی عوامل هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز، مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ مدل هیدرولوژیکی SWAT است. این مدل یک مدل تحلیلی و با پیوستگی زمانی است که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا تهیه شده است (۴). پژوهشگران در کشورهای مختلف در زمینه‌های گوناگون از این مدل استفاده و نتایج متعددی را ارائه کرده‌اند. نومبا و همکاران (۱۵)، عملکرد مدل SWAT را در حوضه‌هایی با داده‌های کم در تانزانیا بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل می‌تواند در حوضه‌های بدون آمار برای مشخص کردن فاکتورها یا پارامترهای کنترل‌کننده هیدرولوژیکی در حوضه استفاده شود. مقدار ضریب تش ساتکلیف را برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب $0/546$ و $0/68$ برآورد کردند که نشان‌دهنده نتایج رضایت‌بخش مدل بود. همچنین نتیجه گرفتند که طول دوره شبیه‌سازی بر نتایج تأثیرگذار است. تامپی و همکاران (۲۰) رواناب حوضه رودخانه چالیار هندوستان را در دو مقیاس متفاوت منطقه‌ای با استفاده از مدل SWAT تخمین زدند، به‌طوری که پارامترهایی از قبیل نوع خاک، کاربری اراضی، توپوگرافی و فعالیت‌های مدیریتی در این مقیاس‌ها مشابه بودند. نتایج آنها نشان داد که مدل می‌تواند رواناب را در هر دو مقیاس به‌طور معقول و با اختلاف خیلی کم بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده برآورد کند و با افزایش اندازه حوضه عدم قطعیت مدل افزایش می‌یابد. حسینی و همکاران (۱۱)، با هدف پیش‌بینی رواناب و بررسی روند تغییرات جریان سطحی، زیرسطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز طالقان از مدل SWAT استفاده کردند، که این مدل در دوره‌های زمانی سالانه و ماهانه نتایج مطلوبی در برآورد مؤلفه‌های جریان در حوضه از خود نشان

لحاظ کردن این موارد را داشته باشد. از موارد دیگر در انتخاب مدل، امکان دسترسی آزاد به کدهای رایانه‌ای آنها است. این مسئله در اتصال مدل آب سطحی به مدل آب زیرزمینی اهمیت بسیار زیادی دارد و امکان تغییر در متغیرها و مؤلفه‌های مدل از این طریق فراهم است. امروزه به‌کارگیری مدل SWAT به‌همراه برنامه SWAT-CUP در شبیه‌سازی جریان هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز به‌وسیله بسیاری از پژوهشگران توصیه شده است. این روش ضمن معرفی پارامترهای حساس در مبحث بارش- رواناب، توانایی بالایی در پیدا کردن محدوده بهینه برای پارامترها و متعاقب آن شبیه‌سازی دقیق‌تر رواناب حوضه‌های مختلف (از نظر تفاوت در کاربری‌ها، نوع خاک، توپوگرافی و ...) دارد (۵). در جدول (۱) برخی مدل‌های مفهومی به‌نسبت پرکاربرد و جدید ارائه و مقایسه شده‌اند. درنهایت با توجه به موارد و معیارهای گفته شده، مدل SWAT برای بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه آبریز سمنان انتخاب شد. بر این اساس هدف، بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات کمی منابع آب سطحی در مقیاس حوضه و نیز برآورد مؤلفه‌های معادله بیلان آب با استفاده از اطلاعات هواشناسی، مشخصات خاک، توپوگرافی، دبی مشاهده‌ای خروجی از حوضه، کاربری اراضی و انواع پوشش گیاهی است. با توجه به وضعیت برداشت منابع آب زیرزمینی در حوضه و افت تراز سطح ایستابی در دشت سمنان، نیاز به بررسی و پایش وضعیت آبخوان دشت است. از آنجا که یکی از مهم‌ترین عوامل هیدرولوژیکی که در تغذیه آبخوان نقش دارد میزان بارش است، نیاز به مدلی است که میزان جریان سطحی و رواناب و نفوذ به آب زیرزمینی را با در نظر گرفتن تمام عوامل هواشناسی و هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه برآورد کند، به‌طوری که بتوان مقدار این پارامتر را در گام‌های زمانی مختلف در مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW وارد کرده و از طریق تلفیق دو مدل سطحی و زیرزمینی میزان نوسانات تراز آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی را تخمین زد.

داد. گلشن و همکاران (۸) کارایی این مدل در شبیه‌سازی مقدار رواناب حوضه آبریز هراز را بررسی و با استفاده از الگوریتم SUFI2 تحلیل حساسیت برای پارامترهای مختلف را انجام دادند، نتایج آنها نشان داد که پارامتر CN به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر بوده و مدل در ایستگاه‌های بررسی شده، زمان دبی اوج و مقدار دبی اوج را با کارایی بالا شبیه‌سازی می‌کند.

مورتی و همکاران (۱۴) از مدل SWAT به‌منظور بررسی بیلان آب حوضه کن هند مرکزی استفاده کردند. نتایج آنها حاکی از ارزیابی قابل قبول هیدرولوژی این حوضه بود. رفیعی و همکاران (۱۸)، برای تخمین تغذیه آب زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه قزوین از مدل‌ابزار ارزیابی آب و خاک استفاده کردند. مدل به‌دست آمده بر اساس دبی ماهانه رودخانه و عملکرد سالانه محصول واسنجی و نتایج رضایت‌بخشی با ضریب نش- ساتکلیف ۰/۵۳ تا ۰/۶۳ ارائه کردند. هیمانشو و همکاران (۹)، بیلان آب در حوضه آبریز رودخانه هند را با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کردند که نتایج بیلان برآورد شده، ۴۴/۶ درصد از بارش سالانه را به تبخیر- تعرق، ۳۴/۷ درصد را به رواناب و ۱۹/۵ درصد را به نفوذ به آبخوان عمیق اختصاص داد.

هدف اصلی، شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژی محدوده سمنان و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب آن در مقیاس ماهانه و سالانه است. از آنجایی که از اهداف این پژوهش شناخت فرایندهای هیدرولوژی منطقه است. لذا کاربرد مدل‌های با مبنای مفهومی ارجحیت دارد. این مدل‌ها دارای طیف وسیعی هستند که با توجه به سطح محاسباتی آنها و فرایندهایی که قابلیت شبیه‌سازی آنها را دارند انتخاب و مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مهم‌ترین فرایندها در این پژوهش بحث محاسبات تبخیر- تعرق واقعی و محاسبه آب برگشتی کشاورزی در منطقه است. به‌عبارت دیگر مدیریت کشاورزی منطقه (مانند میزان آبیاری یا الگوی کشت) نقش مؤثری در بیلان محدوده دارد. بنابراین مدل انتخابی می‌بایست قابلیت

جدول ۱. مقایسه برخی مدل‌های مفهومی و پرکاربرد هیدرولوژی

نام مدل	مقیاس مکانی شبیه‌سازی	نیاز داده ورودی	امکان لحاظ کردن مدیریت کشاورزی	دسترسی به کد رایانه‌ای
mHM	توزیعی	زیاد	دارد	محدود
VIC	توزیعی	زیاد	ندارد	محدود
SWAT	نیمه‌توزیعی	زیاد/متوسط	دارد	آزاد
FLEX	نیمه‌توزیعی/ غیرتوزیعی	متوسط	ندارد	آزاد
HBV, Hymod	غیرتوزیعی	کم	ندارد	آزاد

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد پژوهش

محدوده مطالعاتی سمنان یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کویر مرکزی است که در مختصات جغرافیایی بین ۱۲' و ۵۳° تا ۸۲' و ۵۳° طول شرقی و ۱۲' و ۳۵° تا ۸۴' و ۳۵° عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت کلی محدوده ۲۱۵۰/۹ کیلومتر مربع است که از این مقدار سهم دشت و ارتفاعات به ترتیب ۷۴۶/۸ و ۱۴۰۴/۱ کیلومتر مربع است. حداکثر ارتفاع حوضه از سطح دریا ۴۰۳۶ متر و حداقل ارتفاع نیز ۶۴۵ متر است. متوسط بارش منطقه ۱۸۹/۵ و تغییرات متوسط دمای سالانه در این محدوده ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. این محدوده دارای سه ایستگاه هیدرومتری در جرزین، حاجی آباد سمنان و شه‌میرزاد است. مهم‌ترین رودخانه و زهکش اصلی این محدوده، رودخانه شورآب به طول تقریبی ۶۰ کیلومتر بوده که بر اساس گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی سمنان، متوسط سالانه دبی خروجی از این محدوده معادل ۱/۸۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است و جریان سطحی از این محدوده نیز به کویر سمنان وارد می‌شود. مشخصات و موقعیت ایستگاه‌های فعال واقع در محدوده مطالعاتی سمنان و اطراف آن که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول (۲) و شکل (۱) ارائه شده است. بر اساس آخرین آماربرداری سال ۱۳۸۸، از تعداد ۴۶۳ حلقه چاه، ۵۶ دهانه چشمه و ۱۱۱ رشته قنات آماربرداری شده و تخلیه سالانه کل آنها ۱۰۵ میلیون مترمکعب است که مصرف کشاورزی بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است (حدود ۷۵ درصد). همچنین میزان برداشت از نهرهای آب

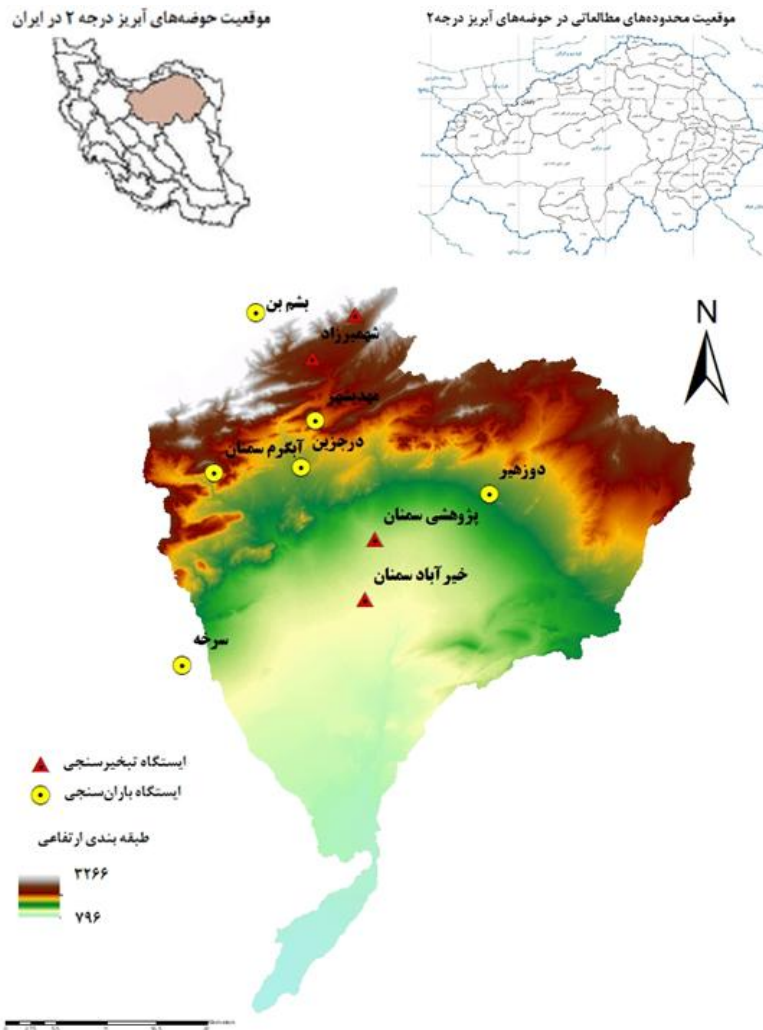
رودخانه نیز در مجموع ۴/۲ میلیون مترمکعب بوده که تمام آب برداشت شده به مصرف کشاورزی می‌رسد. (شکل ۲). به‌منظور تعیین نوسانات سطح آب زیرزمینی، آبنمود معرف (هیدروگراف واحد) با توجه به موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای برای سال‌های آبی ۷۴-۱۳۷۳ تا ۹۷-۱۳۹۶ با توجه به اطلاعات تغییرات سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای دریافت شده از آب منطقه‌ای استان سمنان تهیه شد. بر اساس این نمودار مشاهده شد که تراز سطح آب زیرزمینی دشت در طی ۲۳ سال آبی اخیر حدود ۱۶/۵ متر و به‌طور متوسط سالانه بالغ بر ۰/۷ متر افت داشته است.

معرفی مدل SWAT

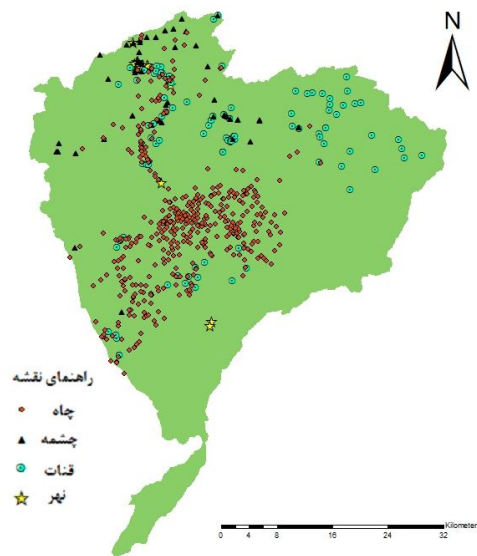
مدل SWAT (Soil and Water Assessment Tool)، مدلی در مقیاس حوضه آبریز است که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه‌های پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است. این مدل به‌منظور شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیک از معادله بیلان آب (رابطه ۱) استفاده می‌کند، فرایندهای هیدرولوژیکی که شبیه‌سازی می‌شوند شامل تبخیر-تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی، جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیرسطحی هستند:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{sep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

در این رابطه، SW_t مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک در روز i ام (میلی‌متر)، R_{day} مقدار



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز سمnan و ایستگاه‌های واقع در محدوده مطالعاتی و اطراف آن



شکل ۲. منابع آب زیرزمینی و سطحی در محدوده مطالعاتی

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در محدوده مطالعاتی سمنان

سال تأسیس	نوع ایستگاه	ارتفاع ایستگاه (متر)	عرض شمالی	طول شرقی	نام ایستگاه
۱۳۶۱	باران‌سنج معمولی	۱۳۸۰	۳۹۴۹۵۱۹	۷۱۱۴۷۱	درجزین
۱۳۶۱	باران‌سنج معمولی	۱۷۰۰	۳۹۵۴۵۸۹	۷۱۲۷۷۰	مهدیشهر
۱۳۷۲	باران‌سنج معمولی	۱۶۰۰	۳۹۴۸۲۵۰	۷۰۲۱۰۰	آبگرم سمنان
۱۳۶۱	باران‌سنج معمولی	۱۱۵۰	۳۹۲۷۳۶۵	۶۹۹۸۶۸	سرخه
۱۳۶۵	باران‌سنج معمولی	۲۱۸۰	۳۹۶۵۹۱۰	۷۰۵۵۰۸	بشم بن
۱۳۶۱	باران‌سنج معمولی	۱۷۰۰	۳۹۴۷۸۵۲	۷۳۲۲۱۲	دوزهیر
۱۳۶۷	باران‌سنج معمولی	۲۳۳۰	۳۹۵۴۷۵۲	۶۸۳۱۸۹	گنداب بشم
۱۳۴۶	تبخیرسنجی	۱۰۹۵	۳۹۳۵۶۰۴	۷۱۹۳۸۱	خیرآباد سمنان
۱۳۷۱	تبخیرسنجی	۲۳۰۰	۳۹۶۶۳۱۴	۷۱۶۴۱۹	ده صوفیان
۱۳۶۰	تبخیرسنجی	۱۱۴۰	۳۹۴۲۱۲۵	۷۲۰۱۰۵	پژوهشی سمنان
۱۳۶۵	تبخیرسنجی	۲۰۵۰	۳۹۶۱۳۱۵	۷۱۱۹۷۶	شهمیرزاد
۱۳۸۵	تبخیرسنجی	۱۶۰۰	۳۹۴۰۶۰۹	۶۸۶۴۷۱	افتر
۱۳۶۱	هیدرومتری	۱۲۸۰	۳۹۴۳۷۸۰	۷۱۴۰۱۹	درجزین
۱۳۸۷	هیدرومتری	۲۰۵۴	۳۹۶۱۳۴۰	۷۰۹۳۸۵	شهمیرزاد
۱۳۶۱	هیدرومتری	۸۷۰	۳۹۲۵۱۷۵	۷۲۱۸۷۵	حاجی آباد سمنان

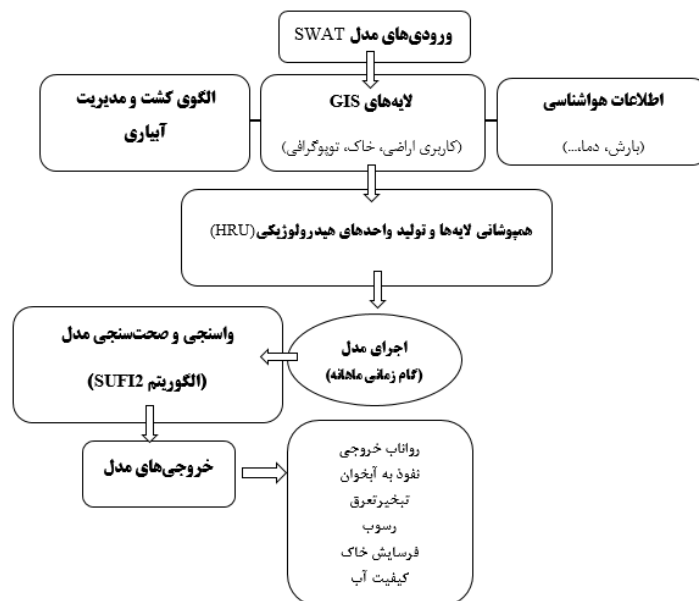
$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]}{\sum_{i=1}^n [(O_i - \bar{O}) \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2]} \quad (2)$$

$$Ns = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{(O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$Rfactor = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^t (\gamma_{ti,97.5\%}^\mu - \gamma_{ti,2.5\%}^\mu)}{\sigma_{obs}} \quad (4)$$

در این روابط R^2 ضریب همبستگی، Ns ضریب نش-ساتکلیف، n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده شده و پیش بینی شده هستند، \bar{O} و \bar{P} نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده هستند. $\gamma_{ti,97.5\%}^\mu$ ، $\gamma_{ti,2.5\%}^\mu$ و σ_{obs} به ترتیب محدوده بالا و پایین باند عدم قطعیت و انحراف استاندارد داده‌های مشاهده‌ای هستند. در شکل (۳) فرایند مدل‌سازی با مدل SWAT نشان داده شده است.

بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آبی که به پروفیل خاک (منطقه غیر اشباع خاک) در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر)، Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر) است. برای واسنجی داده‌های خروجی مدل SWAT از برنامه SWAT-CUP و الگوریتم‌های مختلف از جمله SUFI2 که در این پژوهش به کار رفت، استفاده می‌شود. این الگوریتم توانایی انجام تحلیل حساسیت پارامترها، واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل را دارد. اجرای مدل عدم قطعیت بر اساس تابع هدف به‌وسیله باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) صورت می‌گیرد (۱ و ۲). در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی اجرای صحیح این الگوریتم در شبیه‌سازی پارامترهای مدل، از چهار عامل R -factor، P -factor، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (Ns) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد:



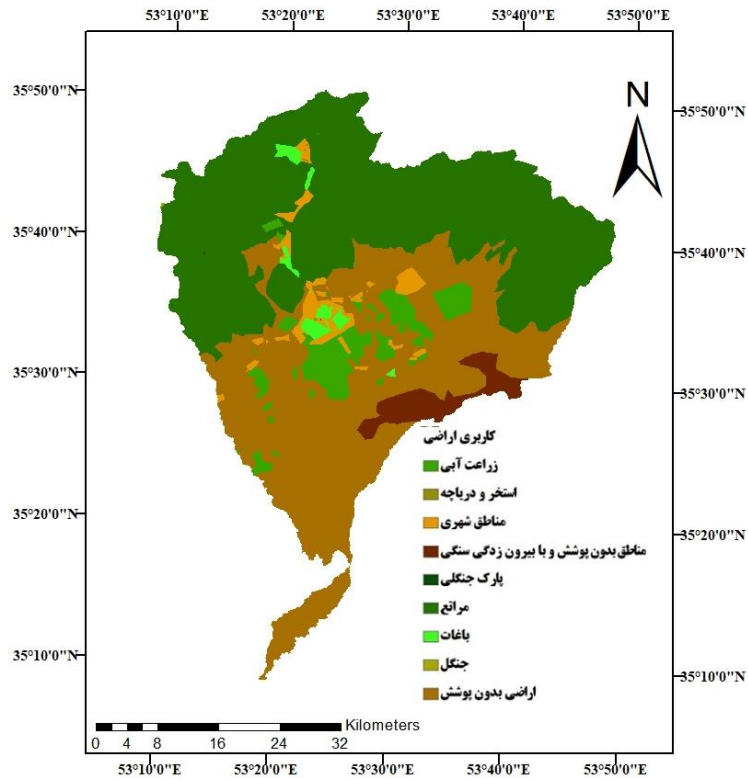
شکل ۳. فرایند مدل‌سازی با مدل SWAT

آماده‌سازی و تنظیم داده‌های ورودی مدل

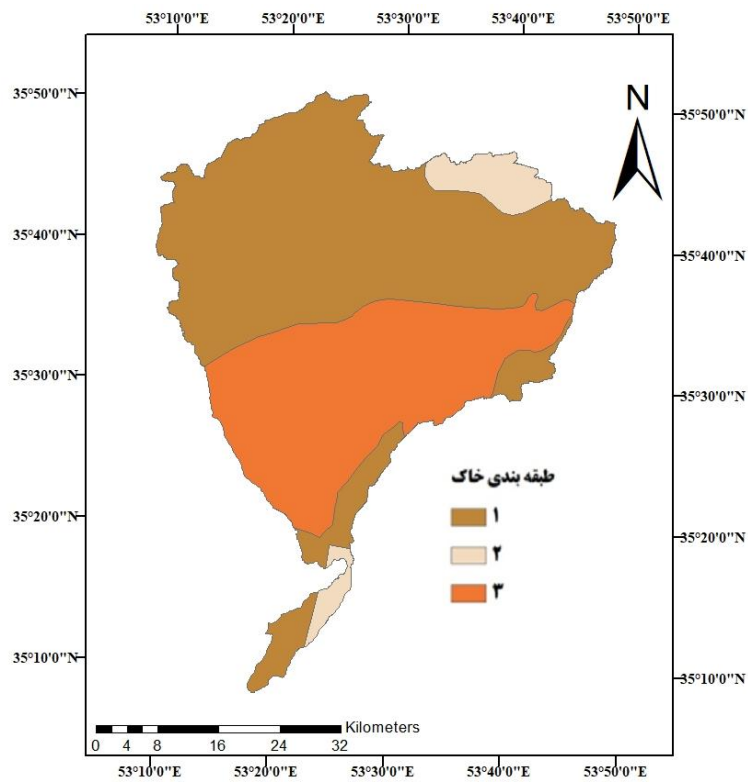
به منظور ارزیابی دقیق‌تر و شناسایی هرچه بیشتر حوضه آبریز اصلی، می‌توان آن را به واحدهای هیدرولوژیکی کوچک‌تر (زیرحوضه) تقسیم‌بندی کرده و هر یک را به‌طور مجزا مورد بررسی قرار داد. مطابق با شبکه آبراهه‌های هر حوضه، یکی از آبراهه‌ها که معمولاً طولانی‌ترین آنها نیز است آبراهه اصلی و بقیه آبراهه‌های فرعی هستند. همچنین زیرحوضه‌ها به تعدادی واحدهای کوچک‌تر، واحدهای واکنش هیدرولوژیکی، HRU (Hydrologic Response Unit) تقسیم می‌شوند. این واحدها تا حد امکان مشابه هستند و دارای ترکیبات یکسانی از خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی هستند و از همپوشانی لایه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب به‌دست می‌آیند. کاربری اراضی با تأثیر بر مقدار باران گیرش توسط پوشش‌های گیاهی (Interception) - تبخیر و تعرق و هدایت هیدرولیکی خاک، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر مقدار رواناب سطحی، دبی رودخانه‌ها و حمل و انتقال رسوبات رودخانه‌ای است (۱۳ و ۱۹). در این مطالعه بر اساس مدل ارتفاعی رقومی با تفکیک مکانی ۳۰ متر و با توجه به مرز حوضه اصلی، زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ها تعیین شدند. بدین

ترتیب تعداد ۲۴ زیرحوضه استخراج شد. همچنین نقشه واحدهای خاک منطقه و لایه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی که توسط اداره منابع طبیعی استان سمنان تهیه شده، با استفاده از داده‌های سنجش از دور و تصاویر سری ماهواره‌ای لندست مطابقت داده شده و در قالب لایه‌ی رستری با دقت مکانی ۳۰ متر به مدل وارد شد. هر یک از پوشش‌های گیاهی تعریف شده در مدل SWAT به‌صورت یک کُد چهار حرفی در جدول اطلاعاتی لایه وارد می‌شوند (۱۹) که در جدول (۳) مشخصات کاربری اراضی و کد انتخاب شده برای مدل نشان داده شده است. شکل (۴) لایه‌های به‌کار رفته در مدل برای تولید واحدهای هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد.

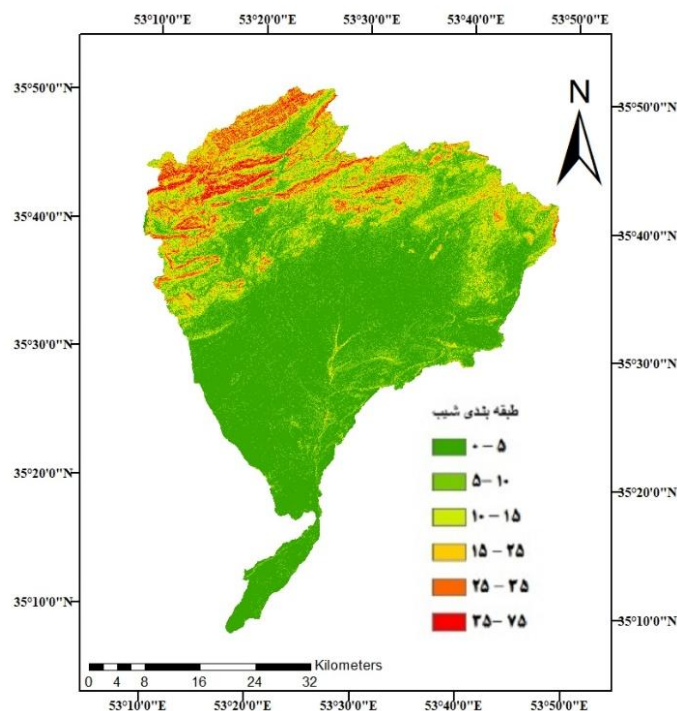
برای اعمال مدیریت گیاهی در مدل، بررسی الگوی کشت و شناسایی محصولات غالب، تاریخ کشت محصولات، دور آبیاری و عمق آبیاری از اطلاعات اصلی است که ورود آن به مدل موجب افزایش دقت مدل در تخمین مؤلفه‌های بیلان آب به خصوص تبخیر - تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی می‌شود. محاسبه عمق آبیاری با استفاده از برداشت‌های انجام شده از منابع آب سطحی و زیرزمینی با توجه به الگوی کشت غالب منطقه و تعداد دفعات آبیاری به مدل اعمال شد. به‌منظور



الف) کاربری اراضی



ب) خاک



ج) شیب

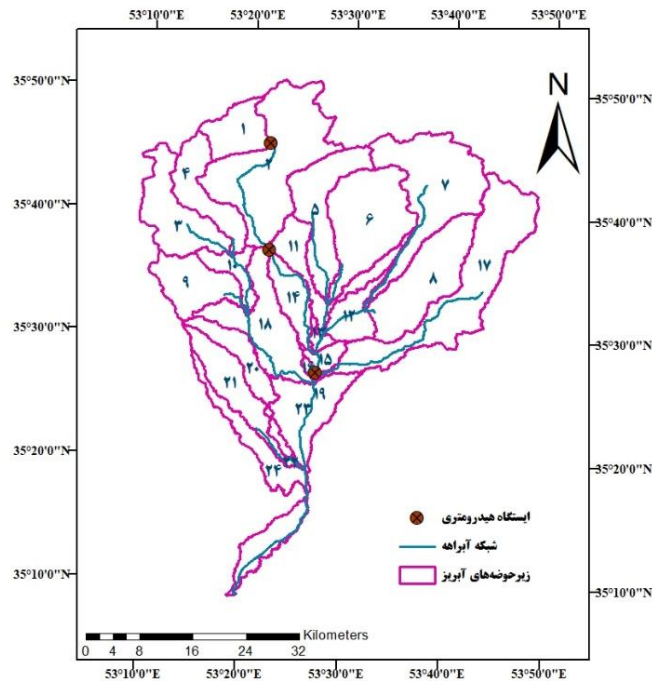
شکل ۴. لایه‌های ورودی به مدل: الف) کاربری اراضی، ب) خاک و ج) شیب

جدول ۳. طبقه‌بندی کاربری اراضی محدوده مطالعاتی

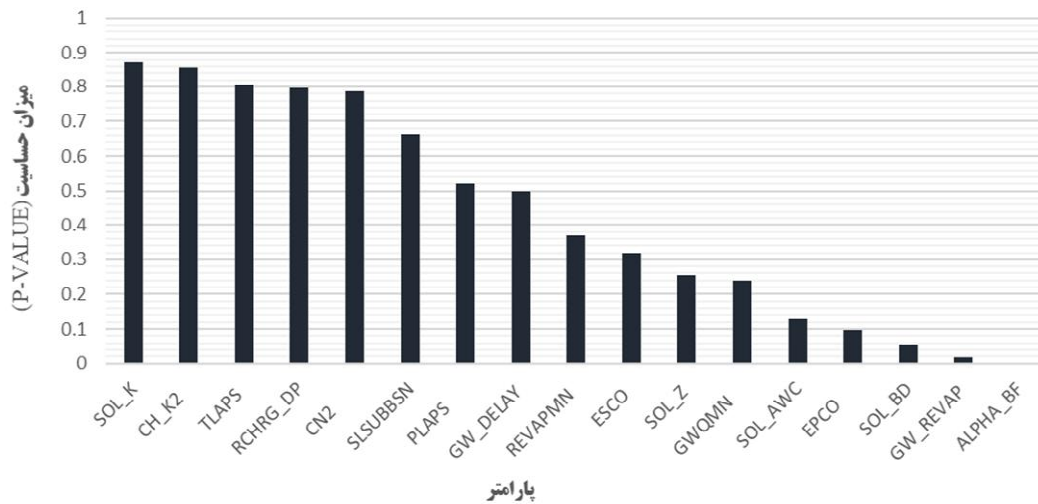
کد	کلاس‌های کاربری اراضی
WWHT	زراعت آبی (گندم زمستانه)
WATR	حوضچه و استخر
URNB	مناطق مسکونی و شهری
TUBG	مناطق بدون پوشش و با برون‌زدگی سنگی
PINE	پارک جنگلی
PAST	مراتع
ORCD	باغات
FRST	جنگل
BARR	مناطق بدون پوشش

تا ۲۰۱۶ انجام شد. به منظور واسنجی مدل به همراه تحلیل عدم قطعیت نتایج آن از روش SUFI2، (۱ و ۲) در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. با توجه به وجود سه ایستگاه هیدرومتری در محدوده، مدل برای کل محدوده بر اساس داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هیدرومتری واسنجی و اعتبارسنجی شد.

شبیه‌سازی حوضه، یک دوره ۱۵ ساله انتخاب شد. اجرای مدل بر اساس گام زمانی روزانه طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ صورت گرفت. در دو سال اول شبیه‌سازی به مدل اجازه داده شد تا با شرایط محیطی متعادل (warm up) شود. واسنجی بر اساس سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴، و اعتبارسنجی در طول دو سال انتهایی ۲۰۱۴



شکل ۵. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و شبکه آبراهه در حوضه



شکل ۶. نتایج آنالیز حساسیت مدل

همان‌طور که شکل (۶) نشان می‌دهد، نتایج آنالیز حساسیت مدل حاکی از این است که پارامترهای SoL_K (ضریب هدایت هیدرولیکی خاک)، CH_K2 (ضریب هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه اصلی)، $RCHRG_DP$ (مقدار نفوذ به آبخوان عمیق)، $CN2$ (شماره منحنی رواناب SCS)، زمان تأخیر انتقال آب از آخرین لایه پروفیل خاک به سطح آب زیرزمینی (GW_DELAY)، تأثیر ویژه‌ای در نتایج به‌دست آمده دارند و جزء

شکل (۵) موقعیت زیرحوضه‌های محدوده را به‌همراه ایستگاه‌های هیدرومتری نشان می‌دهد.

نتایج

پس از اجرا و واسنجی مدل SWAT خروجی‌های مدل شامل مؤلفه‌های رواناب، جریان زیرسطحی، آب زیرزمینی، تبخیر-تعرق و سایر مؤلفه‌ها به‌صورت فایل متنی حاوی اطلاعات به‌دست آمد.

جدول ۴. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی رواناب ماهانه در ایستگاه‌های هیدرومتری

دوره صحت‌سنجی				دوره واسنجی				نام ایستگاه
R ²	Ns	r-factor	p-factor	R ²	Ns	r-factor	p-factor	
۰/۸۰	۰/۶۵	۰/۵۵	۱/۸	۰/۸۶	۰/۷۵	۰/۵۸	۱/۰	شهمیرزاد
۰/۸۲	۰/۶	۰/۴۸	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۸۱	درجزین
۰/۸۲	۰/۷۰	۰/۳۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۷۲	۰/۲۳	۰/۷۱	حاجی‌آباد

تعدیل شده‌اند، بنابراین این امر می‌تواند در اثر نامناسب بودن تجهیزات اندازه‌گیری جریان در ایستگاه‌ها و یا به سبب پیچیده بودن وقایع و دستکاری‌های بشر در حوضه باشد. از طرفی در مسیر رودخانه اصلی برداشت‌های متعدد آب انجام شده و برگشت آب در فواصل مختلف به رودخانه نیز صورت می‌گیرد. در شکل (۷) نتایج واسنجی اعتبارسنجی مدل در مقیاس ماهانه و سالانه برای ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داده شده است.

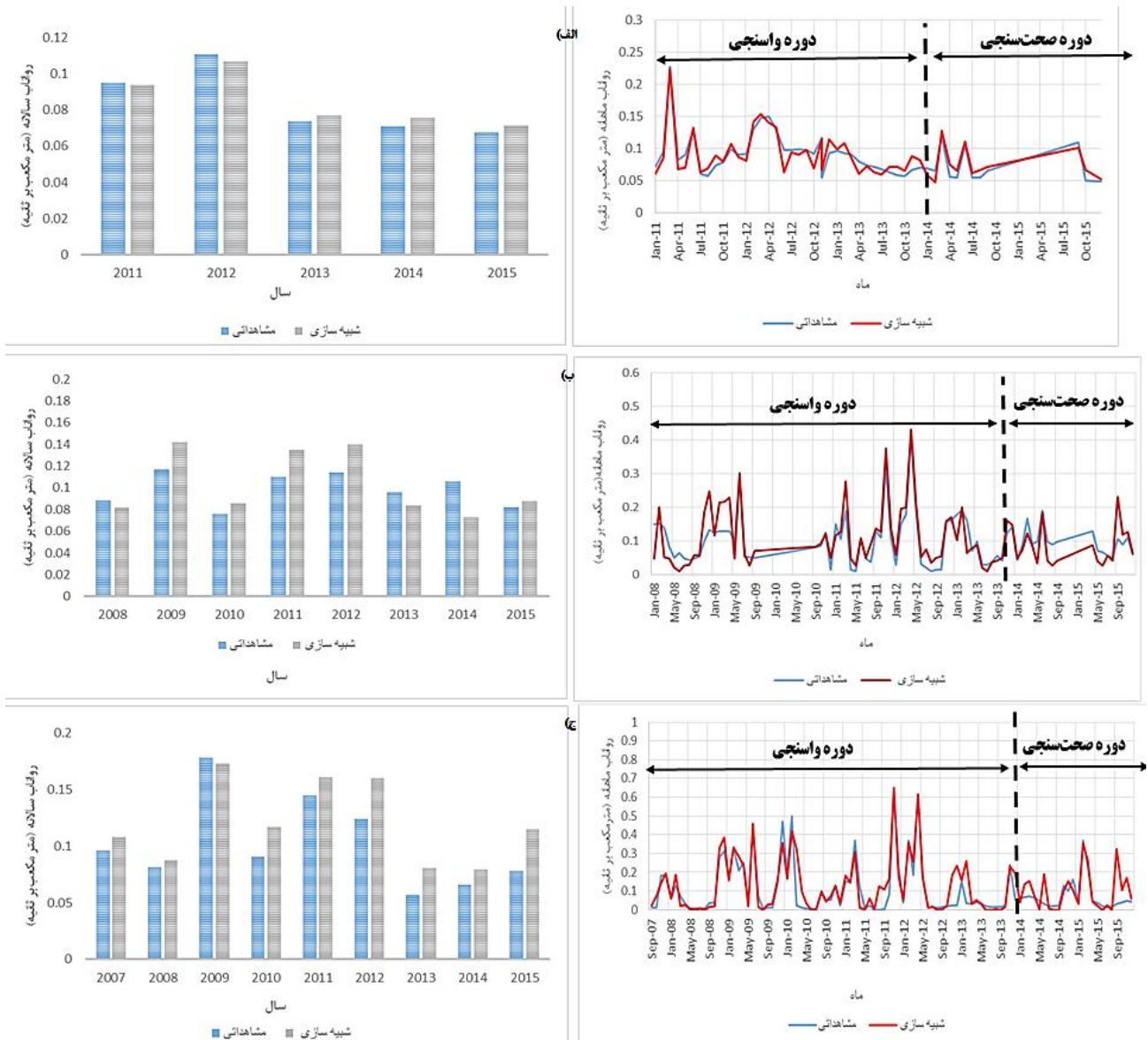
بیان آب

پس از واسنجی مدل می‌توان نتایج خروجی مدل به خصوص مؤلفه‌های بیان را ارزیابی کرد. گفتنی است که فرایند واسنجی انجام شده نسبت به جریان رودخانه بوده است. مقادیر مؤلفه‌های بیان آب سطحی برای تمام سال‌ها در دوره شبیه‌سازی توسط مدل در سطح حوضه آبریز در شکل (۸) ارائه شده است که نشان می‌دهد در هر سال سهم هر یک از مؤلفه‌ها چه میزان بوده است. با توجه به شکل می‌توان تغییرات بارش در سال‌های مختلف و تأثیر تغییرات اقلیمی را بر میزان جریان سطحی و زیرزمینی و دیگر عوامل با توجه به سال‌های ترسالی و خشکسالی مشاهده کرد. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که از مجموع آب ورودی (بارندگی و آبیاری) حدود ۸۷/۶ درصد صرف تبخیر - تعرق می‌شود، ۳ درصد رواناب سطحی، ۳ درصد نفوذ به آب زیرزمینی و مابقی مرتبط با تغییرات و ذخیره رطوبت در خاک هستند. در جدول (۵) مقادیر جریان خروجی از حوضه از طرق مختلف آورده شده است.

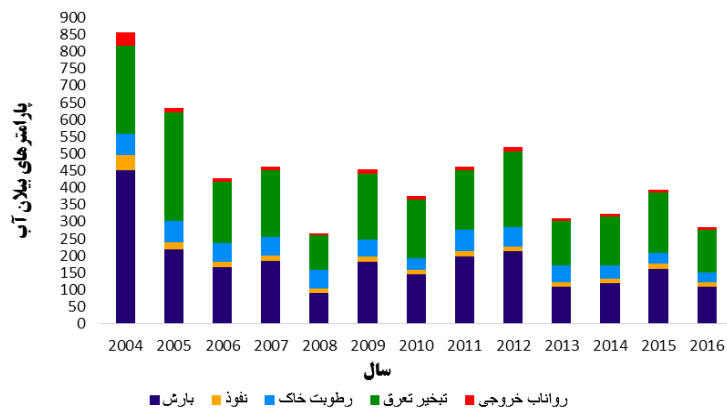
حساس‌ترین پارامترها هستند. مطابق شکل با افزایش مقدار عدد منحنی جریان پایه کاهش یافته و رواناب سطحی افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش عدد منحنی مقدار نفوذ کاهش یافته و باعث افزایش رواناب سطحی می‌شود و بالعکس. در واقع می‌توان گفت مدل بیشتر تحت تأثیر پارامترهای آب زیرزمینی (تغذیه به آبخوان) و پارامترهای خاک (عمق و نگهداشت آب در خاک) بوده و مقدار رواناب در حوضه بیشتر به این مقادیر وابسته است به طوری که تغییر هر یک از آنها در نتایج مدل تأثیرگذار بوده است.

اجرا، واسنجی (Calibration) و اعتبارسنجی (Validation) مدل

با توجه به نتایج به دست آمده برای معیارهای سنجش واسنجی و اعتبارسنجی که در جدول (۴) ارائه شده است، مدل به خوبی توانسته تغییرات جریان در رودخانه را شبیه‌سازی کند. برای سال‌های ابتدایی، شبیه‌سازی در ایستگاه‌ها مطلوب بوده است، نتایج نشان می‌دهد که در بعضی سال‌ها مدل در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر موفق نبوده است و کم‌برآورد داشته است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش برداشت‌ها از آب سطحی در بالادست باشد. غیرعادی بودن و اختلاف جریان واقعی و شبیه‌سازی در بعضی سال‌ها احتمالاً به دلیل خطای اندازه‌گیری در جریان است. برای ایستگاه حاجی‌آباد که نزدیک به خروجی حوضه واقع شده است، مدل عملکرد بهتری داشته است. البته در این حوضه مشکل کم برآورد کردن جریان‌های حداقل در برخی سال‌ها نیز وجود دارد. از آنجایی که در واسنجی مدل تمامی پارامترهای مؤثر در محاسبه جریان پایه تا حد امکان برای حل این مسئله



شکل ۷. نتایج واسنجی - صحت‌سنجی مدل در مقیاس ماهانه و سالانه: الف) ایستگاه شهیرزاد، ب) ایستگاه درجزین وج) ایستگاه حاجی‌آباد (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸. مؤلفه‌های سالانه معادله بیلان آب در حوضه

جدول ۵. مؤلفه‌های خروجی مدل SWAT برحسب میلی‌متر

بارش	رواناب سطحی	جریان جانبی	نفوذ به آبخوان	رواناب خروجی از حوضه	تبخیر- تعرق واقعی
۱۸۳/۵	۱/۵۰	۱۰/۱۰	۱۷/۳۰	۱۱/۴	۱۵۴/۶

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پارامترهای جریان در مدل SWAT در حوضه آبریز سمنان، با استفاده از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP واسنجی و حساسیت‌سنجی شد. برای واسنجی و ارزیابی مدل از داده‌های جریان رودخانه ثبت شده در سه ایستگاه هیدرومتری شه میرزاد، در جزین و حاجی‌آباد در سطح حوضه استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، پارامترهای SOL_K، CH-K2، RCHRG_DP و CN2 حساس‌ترین پارامترها بودند. نتایج شاخص نش ساتکلیف (NS) و ضریب تبیین (R^2) برای ایستگاه شه میرزاد واقع در ارتفاعات به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸۶، ایستگاه حاجی‌آباد ۰/۷۲ و ۰/۸۵ و ایستگاه در جزین ۰/۶۵ و ۰/۸۳ در دوره واسنجی برآورد شد. ابراهیمی و همکاران (۶) برای حوضه آبریز نکا ضرایب R^2 و NS را ۰/۶۲ تا ۰/۷۶ برآورد کردند. زارع و طالبی (۲۲) نیز برای حوضه آبریز قره‌سو مقدار این ضرایب را ۰/۳۶ و ۰/۶ برای دوره واسنجی و ۰/۶۲ و ۰/۶۵ برای دوره صحت‌سنجی و همچنین ضرایب P-factor و R-factor را ۰/۷۷ و ۱/۲۳ برای دوره واسنجی و ۰/۹۷ و ۱/۷۳ برای دوره صحت‌سنجی به دست آوردند. برای حوضه آبریز شفارود مقادیر این ضرایب آماری ۰/۸۵ و ۰/۷۴ توسط نوحه‌گر و همکاران (۱۶) تخمین زده شد. مقایسه با نتایج مطالعات انجام شده در حوضه‌های مختلف حاکی از عملکرد رضایت‌بخش مدل در محدوده است. با وجود مناسب بودن مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در حوضه، در برخی از سال‌ها مقدار جریان شبیه‌سازی شده نسبت به جریان اندازه‌گیری شده بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد شده است که البته روند مشخصی در این خصوص مشاهده نمی‌شود. لذا این عدم انطباق‌ها میان جریان شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده ناشی از خطای سیستماتیک نیست، بلکه مرتبط با ماهیت پیچیده فرایندهای

غالب هیدرولوژیک در منطقه و همچنین فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی در چرخه هیدرولوژیکی در حوضه است. به‌عنوان مثال عوامل متعددی از جمله برداشت‌های پنهان آب در مسیر رودخانه به‌خصوص در مناطق بالادست و در فواصل نامعلوم از رودخانه، مشخص نبودن مقدار دقیق آب برگشتی به رودخانه، عدم وجود آمار دقیق در مقیاس زمانی مناسب از برداشت‌های انجام شده از منابع آب سطحی، عدم وجود آمار دقیق و مدون از مدیریت کشاورزی در منطقه و ضعف در اندازه‌گیری دقیق جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری از سایر منابع ایجاد عدم قطعیت در خروجی مدل هستند. از طرف دیگر برخی از کاستی‌های مدل از جمله ضعف مدل در شبیه‌سازی ذوب برف و سهم آن در تشکیل دبی پایه در مناطق مرتفع نیز می‌توانند منجر به عدم انطباق کامل جریان شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شود (۷). ارزیابی نتایج خروجی مدل نشان داد از مجموع آب ورودی به حوضه، ۸۷/۶ درصد صرف تبخیر و تعرق، ۳/۰ درصد رواناب سطحی، ۳/۰ درصد نفوذ عمقی و مابقی مرتبط با تغییرات و ذخیره رطوبت در خاک است. در واقع بیشترین سهم پارامترهای بیلان را تبخیر تعرق در برمی‌گیرد و سهم تغذیه آب زیرزمینی از طریق آب سطحی تنها ۳ درصد است که با توجه به این مقدار نفوذ به آبخوان باید میزان حجم برداشتی از حوضه را کنترل کرد. در مجموع نتایج تحقیق حاکی از این است که مدل SWAT قابلیت شبیه‌سازی بیلان آبی حوضه‌های آبخیز با شرایط پیچیده و ناهمگن را با دقت مناسب دارا است. البته به شرط اینکه داده‌های ورودی با دقت مناسب در مدل‌سازی استفاده شوند و نیز دقت و توجه کافی در واسنجی مدل صورت گیرد تا مدل هرچه بیشتر معرف شرایط واقعی حوضه باشد. این مطالعه اطلاعات مفیدی را در مورد جریان رودخانه و بیلان آبی حوضه سمنان فراهم کرده و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر

سیاسگزاری

این تحقیق بخشی از طرح پژوهشی تصویب شده در وزارت نیرو است که بدین وسیله از این نهاد قدردانی و سپاسگزاری می‌شود.

پروژه‌های منابع آب کمک می‌کند. از نتایج این پژوهش می‌توان برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه که به‌صورت سناریوهایی به مدل ارائه می‌شود و همچنین استفاده از نتایج آن برای تلفیق با مدل‌های آب زیرزمینی به‌منظور بررسی وضعیت آبخوان‌ها استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K. C., J. Yang and R. Maximov Siber. 2007. Modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333: 413-430.
2. Abbaspour, K. C., M. Vejdani and S. Haghghat. 2007b. SWATCUP calibration and uncertainty programs for SWAT. Proceeding of International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'2007), Melbourne, Australia.
3. Anwar, N. S. 2010. Simulated Impact of land use dynamics on Hydrology during a 20-year-Preiod of deles basin in Ethiopia. TRITA-LWR Master Thesis, Department of Land and Water Resources Engineering Royal Institute of Technology (KTH).
4. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Mutiah and J. R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part 1. Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 73-89.
5. Azari, M., H. R. Moradi, B. Saghafian and M. Faramarzi. 2013. Assessment of hydrological effects of climate change in Gorganroud river basin. *Journal of Water and Soil* 27(3): 537-547. (In Farsi).
6. Ebrahimi, P., J. Salimi and M. Mohseni. 2018. Calibration and validation of SWAT model in runoff simulation, case study: Neka Watershed. *Watershed Engineering and Management* 10: 266-279.
7. Fontaine, T. A., T. S. Cruickshank, J. G. Arnold and R. H. Hotchkiss. 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology* 262: 209-223.
8. Golshan, M., A. Kavian, H. Rohani and A. Asmali. 2013. Calibration of runoff in Haraz watershed with SWAT model. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46: 293-303. (In Farsi).
9. Himanshu, S. k., A. Pandey and P. Shrestha. 2017. Application of SWAT in an Indian river basin for modeling runoff, sediment and water balance. *Environmental Earth Sciences* 76(3): 1-18.
10. Hosseini, M. 2010. Effect of land-use changes on water balance and suspended sediment yield of Taleghan Catchment, Iran. Ph.D Thesis, University Putra Malaysia.
11. Hosseini, M., M. Ghafouri, M. R. Tabayabaei, M. Goudarzi and S. A. Hejazi. 2012. Evaluation of flow components with SWAT model in Taleghan Watershed. *Journal of Geography and Planning* 45: 27-41. (In Farsi).
12. Khalighi, S. Sh. T., T. Z. Shoaie, A. Salajegheh, A. Kohandel and Q. Mortezaei. 2009. Precipitation and runoff simulation by semi distributed method in river basins with deficit date, case study: Layan Basin. Proceedings of the 5th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering, Gorgan. (In Farsi).
13. Munoz-Villers, L. E. and J. J. McDonnell. 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 3543-3560.
14. Murty, P. S., A. Pandey and S. Suryavanshi. 2014. Application of semi-distributed hydrological model for basin level water balance of the Ken basin of Central India. *Hydrological Processes* 28(13): 4119-4129.
15. Ndomba, P., F. Mtalo and A. Killingtveit. 2008. SWAT Model Application in a Data Scarce Tropica Complex Catchment in Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth* 33: 632-626.
16. Nohegar, H., A. Malekian, M. Hosseini, A. Helisaz and E. Taghvaye salami. 2017. Difference between Sufi2 and Glue algorithms in simulation of run off in forest catchment in Shafarood watershed. *Caspian Journal of Environmental Sciences* 8(4): 389-399. (In Farsi)
17. Portoghes, I., V. Uricchio and M. Vurro. 2005. A GIS tool for hydrological water balance evaluation on a regional scale in semi-arid environments. *Computers & Geoscience* 31: 15-27.
18. Rafei Emam, A., M. Kappas, S. Akhavan, S. Z. Hosseini and K. C. Abbaspour. 2015. Estimation of groundwater recharge and its relation to; and degraation: case study of a semi-arid river basin in Iran. *Environmental Earth Sciences* 74: 6791-6803.
19. Scheffler, R., C. Neill, A. V. Krusche and H. Elsenbeer. 2011. Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. *Agriculture, Ecosystem and Environment Journal* 144: 281-289.

20. Thampi, S., K. Raneesh and T. V. Surya. 2010. Influence of scale on SWAT model calibration for stream flow in a river basin in the humid tropics. *Water Resources Management* 24(15): 4567-4578.
21. Yapo, P. O., H. V. Gupta and S. Sorooshian. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology* 181: 23-48.
22. Zare Garizi, A. and A. Talebi. 2016. Simulation of water budget in Ghareh sou watershed using swat model. *Journal of Water Resources Engineering* 9: 97-50. (In Farsi)

Investigating of Surface and Ground Water Changes in Semnan Watershed using the SWAT Model

Sh. Nasiri ^{1, 2*}, N. Farrahi ¹ and A. N. Ziaei ²

(Received: August 27-2019; Accepted: December 14-2019)

Abstract

One of the most important and complex processes in the watersheds is the identification and prediction of surface water changes. The main processes associated with surface water include precipitation, percolation, evapotranspiration and runoff. In this research, the semi-distributed model, SWAT, was used to simulate ground water and surface water in Semnan catchment in a monthly scale. A sensitivity analysis was performed to evaluate and demonstrate the influence of the model parameters on the four major components of water budget including surface runoff, lateral flow, groundwater and evapotranspiration. River discharge data from 2004 to 2014 were used for the calibration and those of 2014 to 2016 were applied for the validation. The results of sensitivity analysis showed that the most sensitive parameters were: SoL_K (Saturated hydraulic conductivity), CH_K2 (Effective hydraulic conductivity in main channel), RCHRG_DP (Deep aquifer percolation fraction) and CN2 (Moisture condition II curve number). The simulation accuracy using Nash-Sutcliffe and coefficient of determination for Shahrmirzad, Darjazin, and Haji Abad hydrometric stations was about 0.60 to 0.80 and 0.80 to 0.90 for the calibration and validation period, respectively, showing a good performance in the simulation of river flow. According to the water balance results, about 87.6% of the total inflow into the watershed was actual evapotranspiration, 3% was surface run off, 3% was percolation, and the rest was related to the soil moisture storage.

Keywords: Runoff, Percolation, Sufi2 algorithm, Groundwater, Water balance

1. Water Resources Expert, Hydrotech Toos Consulting Engineers Co. Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*: Corresponding author, Email: sh.nasiri.fum@gmail.com