شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه آبریز سملقان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT

شیما نصیری[۱*]، حسین انصاری[۲]، علی نقی ضیائی[۳]

تاریخ دریافت:۰۱-۱۰-۱۳۹۷ صص: ۵۶-۳۹ تاریخ پذیرش:۰۲-۱۰-۱۳۹۸

چکیده

توزیع ناهمگون زمانی و مکانی آب شیرین و رشد سریع جمعیت در دهه‌های اخیر، سبب بروز مشکلاتی در تأمین منابع آب مورد نیاز مصارف مختلف شده است. از این‌رو مدل‌های ریاضی جدیدی به‌منظور مطالعه فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی توسعه یافته اند. در این پژوهش، مدل SWAT در حوضه آبریز سملقان با مساحت ۱۱۴۸ کیلومترمربع برای شبیه‌سازی جریان مورد استفاده قرار گرفت. در فرآیند مدل‌سازی، حوضه به ۲۱ زیرحوضه و ۴۰۲ واحد هیدرولوژیک تقسیم گردید. به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های هیدرولوژیک کافی، مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز دارای عدم قطعیت‌هایی می‌باشد. بدین منظور واسنجی و اعتبار سنجی مدل با استفاده از الگوریتم SUFI2 به‌ترتیب برای سال‌های ۱۹۹۵تا ۲۰۱۲ و۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ انجام شد. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، پارامترهای RCHRG_DP (مقدار نفوذ به آبخوان عمیق)، GWQMN (مقدار آب در آبخوان کم‌عمق)، ALPHA_BF (ضریب عکس العمل آب زیرزمینی)، SOL_AWC (ظرفیت آب قابل دسترس خاک) و CN (شماره منحنیSCS) بیشترین تاثیر را داشتند. نتایج نشان داد که مقدار شاخص نش- ساتکلیف و ضریب R^2 در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۸۰ برای دوره واسنجی و ۰/۴۰ تا ۰/۶۵ در دوره اعتبار سنجی می‌باشد. از مجموع آب ورودی به حوضه، ۸۷ درصد صرف تبخیر و تعرق، ۳/۲ درصد رواناب سطحی، ۳/۰ درصد نفوذ و مابقی مرتبط با تغییرات و ذخیره رطوبت در خاک می‌باشد. از آنجا که تا کنون برآوردی از مولفه های بیلان آب در این حوضه از انجام نشده است، این تحقیق میتواند اطلاعات مفیدی را در مورد بیلان آبی حوضه فراهم نموده و به برنامه ریزی دقیق‌تر منابع آب، در این حوضه کمک نماید.

کلمات کلیدی: SUFI2، آنالیز حساسیت، واسنجی، رواناب، بیلان آب

[۱] دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
[۲] استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
[۳] دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
* نویسنده مسول مقاله: Sh_nasiri62@yahoo.com

مقدمه

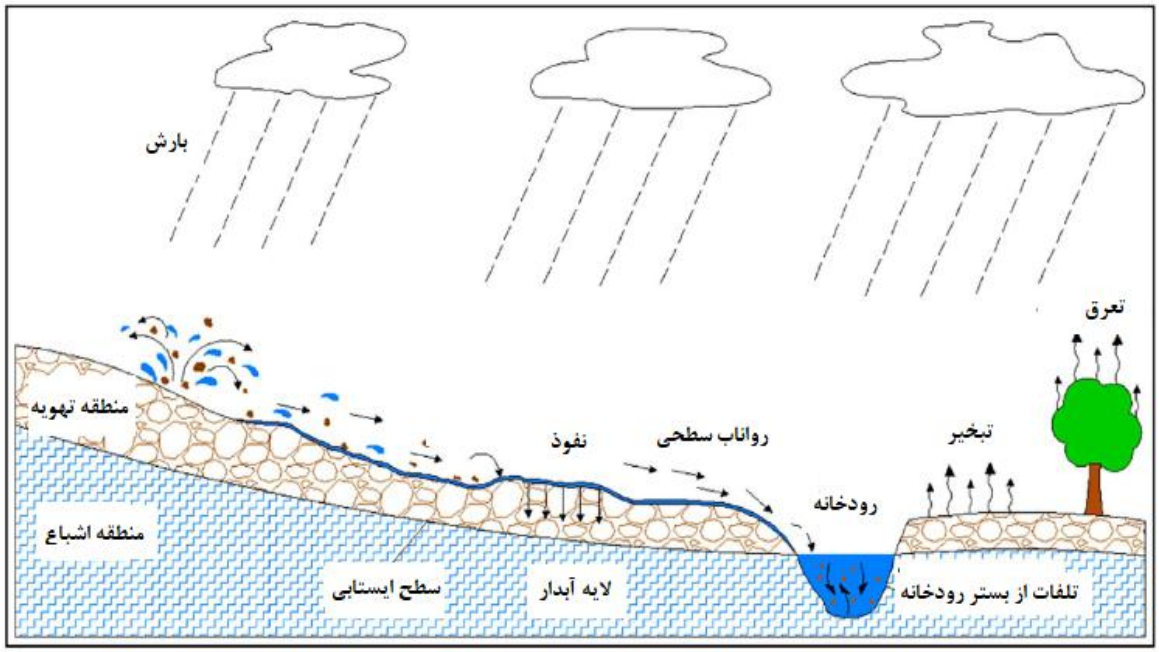
فرآیندهای مرتبط با چرخه آب در طبیعت دارای ارتباطات نسبتاً پیچیده و همچنین تغییرات زمانی و مکانی بسیار گسترده و متفاوتی هستند. به‌طوری که همواره چگونگی ارتباط بین آن‌ها و شناخت تغییرات زمانی ـ مکانی آن‌ها در مقیاس‌های مختلف به‌خصوص حوضه آبریز مورد توجه مدیران حوضه‌ها و محققین بوده است. در این زمینه مدل‌ها از مهم‌ترین ابزارهایی هستند که امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی چگونگی تغییرات چرخه آب در طبیعت و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب را مهیا می‌سازند. یکی از مهم‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین فرآیندها در حوضه‌های آبریز شناخت و پیش‌بینی تغییرات آب‌سطحی می‌باشد. اصلی‌ترین فرآیندهای مرتبط با آب سطحی شامل بارندگی، نفوذ، تبخیر از سطح آب، برگاب، تبخیر- تعرق و رواناب می‌باشند. با توجه به وجود روابط بسیار غیرخطی و پیچیده بین آن‌ها، محدودیت‌های اقتصادی در اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌ها و نیاز به داده‌ها و اطلاعات مختلف در شناخت فرآیندهای آب‌سطحی در حوضه‌ها، اصلی‌ترین راه حل در درک و پیش‌بینی این فرآیندها، کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی آب سطحی با توجه به اهداف مورد نظر می‌باشد. انتخاب مدل مناسب جهت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی به عوامل متعددی بستگی دارد. مهم‌ترین آن‌ها شامل موجودیت داده‌های منطقه، هدف شبیه‌سازی، مقیاس زمانی و مکانی مورد نظر و وضعیت اقلیمی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از جمله مهم‌ترین فرآیندها در تحقیق حاضر بحث محاسبات تبخیر ـ تعرق واقعی و محاسبه آب برگشتی کشاورزی در منطقه می‌باشد. به عبارت دیگر مدیریت کشاورزی منطقه (مانند میزان آبیاری یا الگوی کشت) نقش مؤثری در بیلان محدوده دارد. بنابراین مدل انتخابی می‌بایست قابلیت لحاظ کردن این موارد را داشته باشد. از موارد دیگر در انتخاب مدل، امکان دسترسی آزاد به کدهای رایانه‌ای آن‌ها می‌باشد. این مسئله در اتصال مدل آب سطحی به مدل آب‌زیرزمینی اهمیت بسیار زیادی دارد و امکان تغییر در متغیرها و مؤلفه‌های مدل از این طریق فراهم می‌باشد. متاسفانه ترکیب اثرات دو فرآیند برداشت آب‌زیرزمینی و آب برگشتی بر جریان رودخانه به خوبی توسط مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی استفاده می‌شوند ارائه نشده است. مقدار بسیار کمی از مدل های آب‌زیرزمینی اثرات آب برگشتی آبیاری را بر ارتباط بین آبخوان و رودخانه شبیه‌سازی می‌کنند. در حالی‌که مدل‌های هیدرولوژیکی معمولا اثرات برداشت‌های آب‌زیرزمینی بر جریان پایه را به درستی شبیه‌سازی نمی‌کنند. هر دو گروه از مدل‌های ذکر شده فقط توانایی شبیه‌سازی جنبه ای از پیچیدگی‌های موجود را دارند. برای مثال، تغذیه آبخوان و تبخیر- تعرق در مدل‌های آب‌زیرزمینی معمولا از طریق واسنجی تعیین شده و به عنوان پارامتری ثابت در کل دوره شبیه‌سازی وارد می‌شوند. این مدل‌ها معمولا پروفیل خاک را که نقش مهمی در تعیین رشد گیاه، تغذیه آب زیرزمینی و تبخیر - تعرق دارد شبیه سازی نمی‌کنند. از طرف دیگر برخی از مدل‌های سطحی هیدرولوژی اگر چه نیاز آبیاری گیاه و رطوبت خاک را در نظر می‌گیرند، اما معمولا مقدار آب برداشت شده از آبخوان برای استفاده آبیاری را بدون تاثیر بر منابع آب‌زیرزمینی فرض می‌کنند. در نهایت در این پژوهش با توجه به شرایط محدوده مطالعاتی و اهداف مدل‌سازی، مدل ارزیابی آب و خاک SWAT انتخاب گردید. این مدل درشبیه سازی رواناب، فرسایش و تولید رسوب یک حوضه آبریز، شبیه‌سازی مولفه های آب سطحی و زیرزمینی در سال‌های اخیر مورد توجه و استفاده زیادی قرار گرفته است. وان لیو و همکاران(۲۰۰۳) پیش‌بینی شدت جریان را به وسیله دو مدل سوات و HSPF در هشت حوضه کشاورزی در ایالات اوکلاهامای آمریکا(حوضه رودخانه Washita) مقایسه کردند. ایشان دریافتند که اختلاف دو مدل بیشتر دلیل اختلاف مکانیزم آن‌ها در محاسبه رواناب می‌باشد و نیز مدل SWAT در رابطه با پیش‌بینی شدت جریان، نتایج قابل اعتمادتری تحت شرایط آب و هوایی مختلف به دست می‌دهد. شول و همکاران (۲۰۰۶) از مدل SWAT به منظور تخمین مؤلفه‌های آب در آفریقا در سطح زیرحوضه و با دقت زمانی ماهانه استفاده کردند. به طور کلی نتایج مدل خوب و در تعدادی موارد عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها زیاد بود.

بورا و همکاران(۲۰۰۷) پس از مقایسه مدل SWAT با چندین مدل دیگر نتیجه گرفتند که این مدل نتایج امیدوارکننده‌تری در شبیه‌سازی پیوسته حوضه‌های زراعی به دست می‌دهد. عباسپور و همکاران(۲۰۰۷) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی حوضه رودخانه تور، در شمال شرقی کشور سوئیس، با مساحتی حدود ۱۷۰۰

کیلومترمربع استفاده کردند. این مطالعه نتایج بسیار خوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نیترات داشت. فرامرزی و همکاران(۲۰۰۹) با استفاده از مدل SWAT مؤلفه های منابع آب قابل دسترس شامل آب آبی و آب سبز در مقیاس کشوری و استانی را 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 و تعرق خیلی کمتر از واقعیت تخمین زده میشود. آلانسی و همکاران (۲۰۰۹) اعتبار سنجی مدلSWAT برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان آبراهه‌ای مطالعه‌ای در مالزی انجام دادند که درآن نتایج شبیه‌سازی در مرحله واسنجی برای پایه زمانی ماهانه با استفاده از ضرایب کارایی R^2 و نش- ساتکلیف به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۶۲و در مرحله اعتبار سنجی۰/۹۳ و ۰/۹۲ به‌دست آمد. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از شاخص های آماری نشان داد که این مدل قابلیت بالایی در شبیه سازی رواناب روزانه و ماهانه دارد. آوان و اسماعیل(۲۰۱۴) از مدلSWAT برای برآورد مقدار تغذیه آب زیرزمینی تحت سناریوهای اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ استفاده کردند. این پژوهش نشان داده است با استفاده از داده‌های سنجش از دور برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی، مدل SWAT قادر به برآورد تغذیه با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاست. همچنین ایشان نشان دادند با استفاده از سناریو های تغییر اقلیم در شبیه سازی تغذیه آب زیرزمینی مدیران بخش آب می‌توانند پیش‌بینی کنند که افزایش و کاهش دما و بارش چه میزان بر تغذیه آب زیرزمینی در دهه آینده تاثیر می‌گذارد.

مک کالم و همکاران (۲۰۱۴) ارتباط بین رودخانه با آبخوان را در حوضه نیمه خشک مولس به مساحت ۱۵۰۰کیلومترمربع واقع در شمال غربی استرالیا مطالعه کردند. در این پژوهش داده های اندازه گیری شده بارش، تبخیر و تعرق، جریان رودخانه، سطح آب زیرزمینی و مقدار برداشت از آبخوان، جهت تعیین تغییرات مکانی و زمانی ارتباط رودخانه با آبخوان با استفاده از یک مدل ریاضی ساده و انجام تحلیل های آماری و هیدروگرافی استفاده شده است. در این پژ وهش همبستگی ۸۴/ ۰بین سطح آب زیرزمینی و و مقدار برداشت ها و همبستگی ۰/۹۲ بین سطح آب زیرزمینی و مقدار افت فصلی آبخوان نشان داد که افت ۳ متری آبخوان عمدتاً ناشی از افزایش برداشت‌ها بوده است. این مطالعه نشان داد در دوره افزایش برداشت‌های آب زیرزمینی بعد از ۱۰ سال نحوه ارتباط رودخانه با آبخوان از حالت تغذیه شونده به تغذیه کننده تغییر یافته است. در نتیجه کاهش برداشت ها از منابع آب زیرزمینی سریعاً باعث افزایش جریان پایه رودخانه نخواهد شد. وانگ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل SWAT به بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر جریان رودخانه در دو زیرحوضه دونگ و پولی در کشور چین با استفاده از تصاویر لندست برای سال‌های ۲۰۰۰،۲۰۰۵و۲۰۱۰ پرداختند. تحلیل تصاویر ماهواره‌ای نشان دهنده کاهش مرتع و جنگل طی دوره ده ساله و افزایش زمین‌های کشاورزی برنج بوده است. ایشان کاهش تبخیر و تعرق و افزایش مقدار رواناب، نفوذ و جریان پایه را ناشی از تغییرات کاربری اراضی در طی این سال‌ها گزارش کردند.جین و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی مقدار تغذیه آب‌زیرزمینی تحت شرایط اقلیمی متغیر توسط مدل SWAT پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی حدود ۳۳ درصد کل بارش‌ها را شامل می‌شود. همچنین در مقایسه با نوسانات سالانه بارش، نوسانات بزرگتری در مقدار رواناب و تغذیه آب‌زیرزمینی صورت می‌گیرد. رفیعی و همکاران (۲۰۱۵)، برای تخمین تغذیه آب زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه قزوین از ابزارهای ارزیابی آب و خاک استفاده کردند که مدل به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم SUFI2 و براساس دبی ماهانه رودخانه و عملکرد سالانه محصول واسنجی شده که این نتایج رضایت‌بخش بوده و ضریب نش ساتکلیف ۰/۵۳ تا ۰/۶۳ را نشان داد. زو و همکاران (۲۰۱۶)، تاثیر تغییرات اقلیم و کاربری اراضی بر روی رواناب و رسوب حوضه رودخانه ونگفوچوان در کشور چین را با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از کاهش رواناب و رسوب سالانه در این حوضه در نتیجه تغییرات بارندگی، درجه حرارت و تغییرات کاربری اراضی می‌باشد. کومار و همکاران (۲۰۱۷)، 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 اختصاص داده است و سهم رواناب و نفوذ به آبخوان عمیق به ترتیب ۳۴/۷ درصد و ۱۹/۵ درصد بود. کاویان و همکاران (۱۳۹۳)، مدل SWAT را برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز کچیک در استان

گلستان انتخاب کردند که با توجه به نتایج ارائه شده، پارامترهای شماره منحنی (CN)، جبران تبخیر از خاک (ESCO)، ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک (SOL-AWC) و هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع (SOL_K) به ترتیب جزء مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده دبی جریان در این حوضه بودند. گلشن و همکاران (۱۳۹۴)، کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی مقدار رواناب حوضه آبریز هراز را بررسی کردند و با استفاده الگوریتم SUFI2 تحلیل حساسیت برای پارامترهای مختلف را انجام دادند، نتایج آن‌ها نشان داد پارامتر CN به عنوان حساس‌ترین پارامتر بوده و مدل در ایستگاه‌های بررسی شده، زمان دبی اوج و مقدار دبی اوج را با کارایی بالا شبیه‌سازی کرده است. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۷)، با توجه به آمار رواناب چهار ایستگاه آب‌سنجی موجود در حوضه آبریز نکا و با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم SUFI2، رواناب این محدوده را واسنجی و اعتبارسنجی کردند و نتایج واسنجی حاکی از مقادیر ۰/۶۲ تا ۱۰/۷۶ برای ضریب NS است که نشان‌دهنده مناسب بودن این مدل در شبیه‌سازی رواناب محدوده مورد مطالعه می‌باشد. پارامترهای به کار رفته در فرایند شبیه‌سازی در مدل SWAT در شکل (۱) نشان داده شده است. باتوجه به اینکه تا کنون برآوردی از مولفه‌های بیلان آب در این حوضه از طریق مطالعات هیدرولوژیکی و مدل‌سازی انجام نشده است، هدف از این تحقیق بررسی کارایی مدل SWAT در شبیه سازی دبی ماهانه جریان رودخانه سملقان، جمع آوری داده ها و اطلاعات لازم، تهیه و تولید لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز و نهایتاً ایجاد پایگاه اطلاعاتی مکانی حوضه سملقان، بررسی ارتباط موجود بین جریان رودخانه و آبخوان، ارزیابی و تحلیل عدم قطعیت در نتایج مدل همچنین برآورد مؤلفه‌های بیلا ن آب در حوضه می‌باشد.



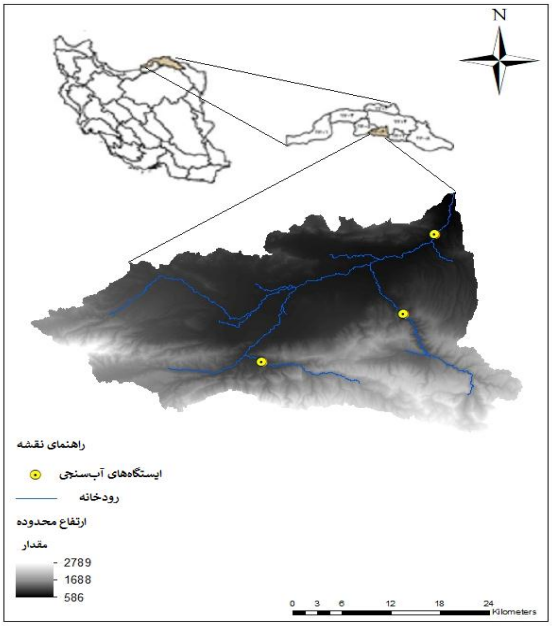
شکل ۱- چرخه هیدرولوژی در مدل SWAT (کافاس و همکاران ۲۰۱۸)

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی سملقان با وسعتی معادل ۱۱۴۸ کیلومترمربع در حوضه آبریز اترک و در استان خراسان شمالی واقع شده است که مساحتی در حدود ۹۲۷ کیلومترمربع آن ارتفاعات و مابقی شامل محدوده دشت و آبخوان می‌باشد. این محدوده بین مختصات جغرافیایی '۲۵ ـ°۵۶ الی '۰۶ ـ°۵۷ طول شرقی و '۲۱ ـ°۳۷ الی '۳۹ ـ°۳۷ عرض شمالی واقع شده است. مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقاط از سطح دریا به ترتیب ۲۶۸۰ و ۶۰۰ متر می‌باشد. رودخانه سملقان رودخانه اصلی و زهکش اصلی این محدوده بوده و رودخانه‌های شیرآباد و درکش از سرشاخه‌های آن می‌باشند. این رودخانه از جنوب‌غرب دشت سملقان به سمت شمال‌شرق این دشت جریان دارد. رودخانه‌های درکش و شیرآباد از جنوب دشت سملقان به

رودخانه سملقان می‌پیوندد و در نهایت از شمال‌شرق دشت خارج و به رودخانه اترک می‌ریزند. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی سملقان در حوضه آبریز اترک در استان خراسان شمالی، در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی سملقان

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT، مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی ـ کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی شده است. این مدل، مدلی مفهومی و فرآیندمحور می‌باشد. به جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، این مدل نیازمند اطلاعاتی در مورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه می‌باشد. فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، رسوبات، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی در این مدل به طور مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند. مزایای این روش عبارتند از: الف) حوضه‌هایی که فاقد داده-های برداشت شده می‌باشند، نیز قابل شبیه‌سازی‌اند. ب) تأثیر نسبی اطلاعات ورودی (تغییر در روش های مدیریتی، آب و هوا بر روی کیفیت آب و دیگر متغیرهای ورودی) قابل کمی کردن هستند. مدل از نظر محاسباتی بسیار کارآمد است. به طور کلی این نکته را نیز باید مد نظر داشت که این مدل برای شبیه‌سازی‌های فرآیندهای مختلف در طولانی‌مدت می‌باشد و برای شبیه‌سازی‌های یک واقعه (مانند سیلاب) مناسب نیست. این مدل یک مدل با کد با[1] می‌باشد و مرتب در حال توسعه و بهبود می‌باشد. در کشورهای پیشرفته جهان نظیر آمریکا و چین از این مدل برای بررسی و ارزیابی پروژه‌های بزرگ ملی استفاده شده است. این مدل دارای رابط گرافیکی قدرتمند به نام ARC SWAT در نرم‌افزار ARC GIS می‌باشد به طوری که اغلب داده‌ها را از این طریق دریافت و پردازش می‌کند.

بیلان آب در مدل SWAT

مدل SWAT در شبیه‌سازی چرخه‌ی هیدرولوژیک از معادله بیلان آب (رابطه۱) استفاده می‌کند، فرآیندهای هیدرولوژیکی که شبیه‌سازی می‌شوند شامل تبخیر ـ تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی و جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیرسطحی می‌باشد. در شکل(۳) فرآیند مدل‌سازی با این مدل ارائه شده است.

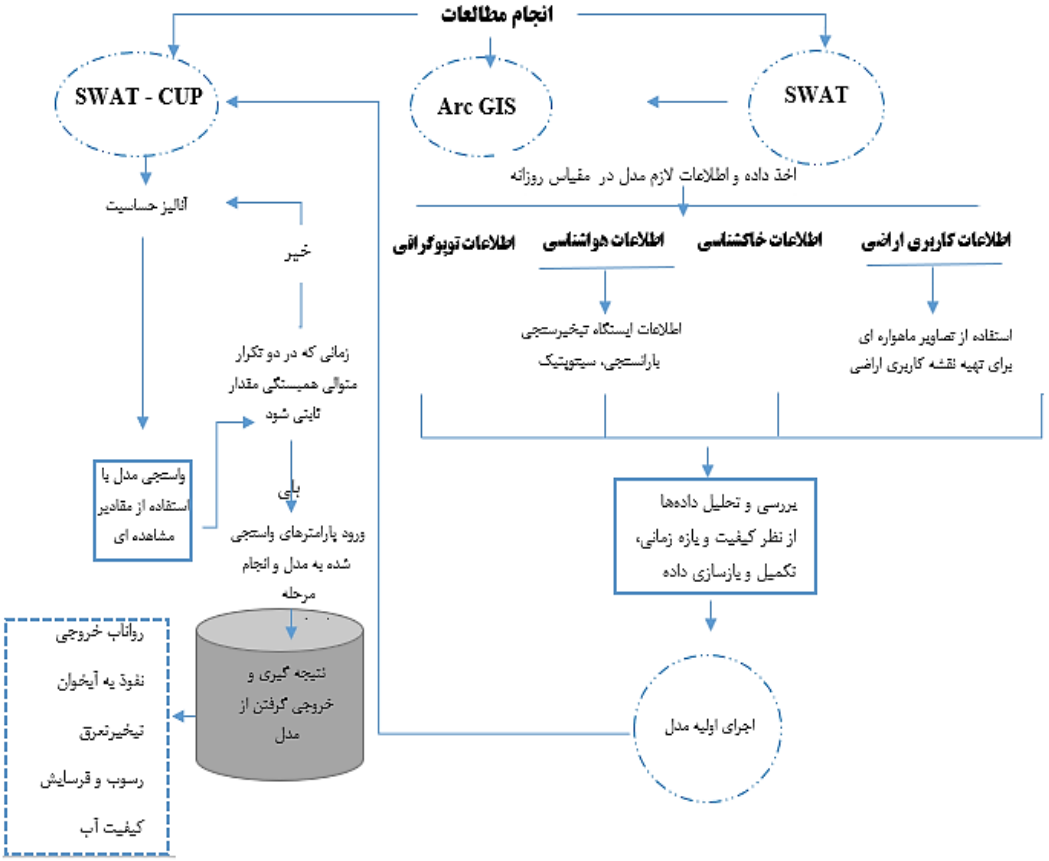
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \qquad (۱)$$

[1] Open Source

در این رابطه:

SW_t: مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0: مقدار اولیه آب در خاک در روز i اُم (میلی‌متر)، R_{day}: مقدار بارندگی در روز i اُم (میلی‌متر)، Q_{surf}: مقدار رواناب سطحی در روز i اُم (میلی‌متر)، E_a: مقدار تبخیر و تعرق در روز i اُم (میلی‌متر)، W_{seep}: مقدار آبی که به پروفیل خاک (منطقه غیر اشباع خاک) در روز i اُم وارد می‌شود (میلی‌متر)، Q_{gw}: مقدار جریان برگشتی در روز i اُم (میلی‌متر)، می‌باشند.

در این مدل، حوضه به تعدادی زیرحوضه و زیرحوضه‌ها به تعدادی واحدهای کوچکتر (واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRU)،[1] تقسیم می‌شوند. این واحدها تا حد امکان مشابه هستند و دارای ترکیبات یکسانی از خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی می‌باشند. در مدل بر حسب شرایط و مشخصات حوضه، مسیرهای مختلفی جهت حرکت آب در حوضه پیش‌بینی شده است. ابتدا با توجه به دمای هوا، سایر داده‌های ورودی تنظیم کننده میزان بارش و ذوب برف، مقدار ذوب برف و تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود. مجموع باران، برف ذوب شده و آب آبیاری کشاورزی، رواناب سطحی یا نفوذ را تشکیل می‌دهند. به دلیل اینکه محاسبه رواناب سطحی به روش شماره منحنی (SCS) بر اساس گام‌های زمانی روزانه می‌باشد، این مدل قادر نیست به طور مستقیم مقدار نفوذ را محاسبه کند، لذا مقدار نفوذ از تفاوت بارش (بارش+ ذوب برف) و رواناب سطحی به‌دست می‌آید. کل رواناب سطحی تولید شده برحسب شرایط تعریف شده می‌تواند به مخازن یا آبگیرها، آبخوان‌ها و یا جریان رودخانه بپیوندد. در صورت وجود آبگیر یا سد، قسمتی از رواناب سطحی به این مخازن وارد می‌شود. آب وارد شده به این مخازن صرف آبیاری، تبخیر و تعرق و نفوذ به آبخوان‌های آب زیرزمینی می‌شود. آب مازاد بر حجم مخزن نیز به جریان‌های رودخانه در پایین دست می‌پیوندد. بخشی از رواناب سطحی که به آبراهه‌های فرعی می‌رسد، بسته به مقدار هدایت هیدرولیکی مؤثر از طریق بستر رودخانه‌های غیردائمی و یا فصلی به هدر می‌رود. آب منتقل شده از این طریق به سفره‌های آب زیرزمینی وارد می‌شوند.



شکل ۳- فرآیند مدل‌سازی با مدل SWAT (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۷)

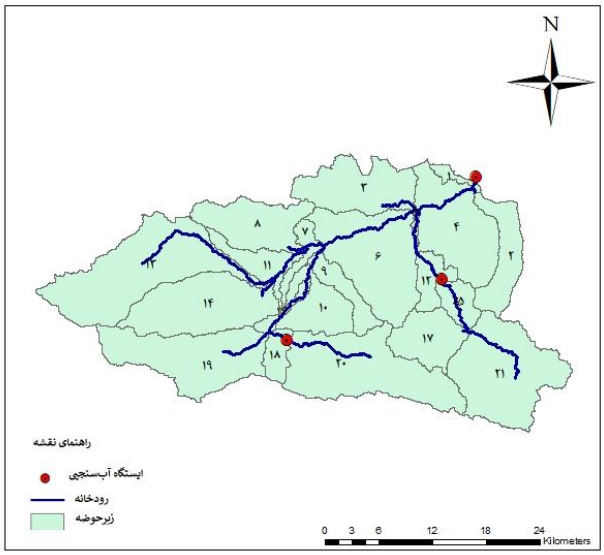
[1] Hydrologic Response Unit

آماده‌سازی و تنظیم داده‌های ورودی مدل

مراحل آماده‌سازی و تنظیم داده‌های ورودی در مدل، شامل تقسیم محدوده به زیرحوضه‌ها و استخراج شبکه آبراهه‌ها بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی، تعیین واحدهای واکنش هیدرولوژیک مبتنی بر ورود داده‌های کاربری اراضی و خاک، داده‌های اقلیمی، تغییرات ارتفاع، داده‌های مدیریت کشاورزی می‌باشد که در ادامه موارد ذکر شده تشریح شده‌اند.

مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و استخراج زیر حوضه‌های آبریز و شبکه آبراهه

به‌منظور بررسی فرآیندهای مختلف در حوضه‌ی آبریز در مدل نیاز به تقسیم حوضه به زیرحوضه‌هایی می‌باشد که این کار با تعیین حد آستانه‌ای برحسب واحد سطح (هکتار) در رابط گرافیکی مدل در نرم‌افزار ArcGIS امکان پذیر است. دقت تقسیم حوضه به زیرحوضه‌های مختلف تابعی از دقت مکانی مدل رقومی ارتفاعی مورد استفاده می‌باشد. در واقع، دقت DEM به‌طور قابل ملاحظه‌ای پیش‌بینی جریان آب سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت مکانی ۳۰ متر، به‌دلیل کمتر بودن ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، به‌عنوان مدل تراز ارتفاعی پایه انتخاب گردید. بدین‌ترتیب ۲۱ زیرحوضه در محدوده‌ی مطالعاتی ایجاد گردید (شکل۴).

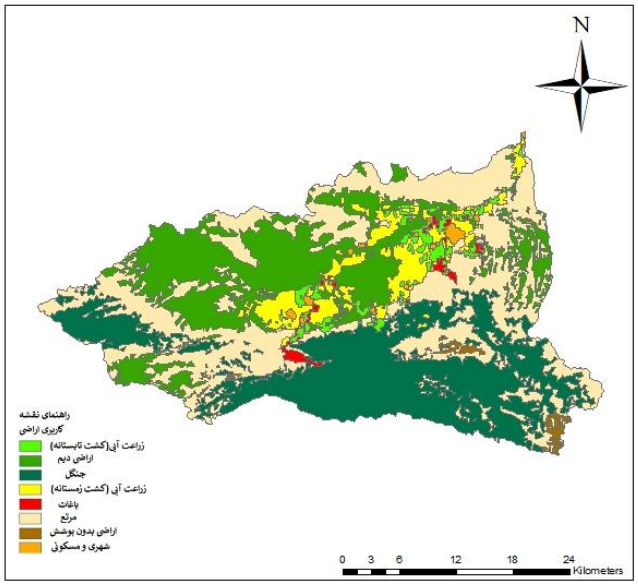


شکل ۴- زیرحوضه‌های ایجاد شده در محدوده مطالعاتی

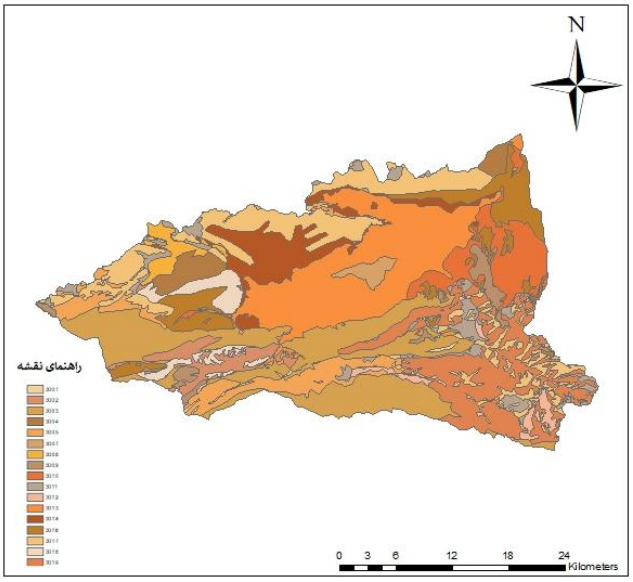
کاربری اراضی در مدل

کاربری اراضی با تأثیر بر مقدار باران‌گیرش توسط پوشش‌های گیاهی[1]، تبخیر ـ تعرق و هدایت هیدرولیکی خاک سطحی، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر مقدار رواناب سطحی، دبی رودخانه‌ها و حمل و انتقال رسوبات رودخانه‌ای می‌باشد (مونوز ویلرز و مکدونال، ۲۰۱۳)، (شفلر و همکاران۲۰۱۱). از این‌رو یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی به مدل که در تعریف واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRUs) نقشی اساسی را ایفا می‌کند، نقشه‌ی کاربری اراضی است. در این مطالعه لایه اطلاعاتی مکانی کاربری اراضی محدوده مطالعاتی سلمقان که توسط اداره منابع طبیعی استان خراسان شمالی تهیه شده، با استفاده از داده‌های سنجش از دور و تصاویر سری ماهواره‌ای لندست تدقیق شده و این نقشه در قالب لایه‌ی رستری با دقت مکانی ۳۰ متر به مدل وارد شده است. در پایگاه داده مدل سوات در حدود ۱۲۰ نوع کاربری اراضی و پوشش گیاهی تعریف شده است (وینچل و همکاران،۲۰۱۳). با توجه به طبقات کاربری اراضی در حوضه، تعداد هشت کلاس کاربری اراضی برای مدل تعریف گردید (شکل۵ الف).

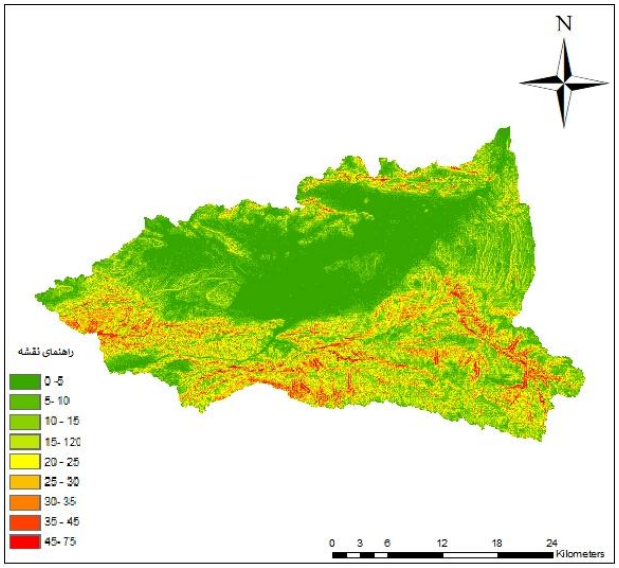
[1] Interception



الف)



ب)



ج)

شکل۵- لایه های کاربردی در مدل برای تولید واحدهای هیدرولوژیکی الف) کاربری اراضی ب) خاک ج) شیب

ویژگی‌های خاک در مدل

داده‌های مرتبط با خاک، از مهم‌ترین ورودی‌ها برای هر مدل شبیه‌ساز هیدرولوژیکی می‌باشند. این داده‌ها می‌توانند به دو دسته‌ی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی شوند که در واقع خصوصیات فیزیکی در حرکت آب و هوا در منافذ و مسیرهای خاک حائز اهمیت هستند و تأثیر به‌سزایی در چرخه‌ی آب در واحدهای هیدرولوژیک دارند. همچنین در بررسی ویژگی‌های خاک مانند بافت خاک و لایه‌بندی آن از داده‌های جهانی مبتنی بر سنجش از دور و گزارش‌های موجود خاک‌شناسی در منطقه استفاده شد. در نهایت ۱۷ واحد خاک در محدوده‌ی مطالعاتی تعیین شد که در قالب لایه‌ی رستری با دقت مکانی ۳۰ متر به مدل وارد شده است (شکل۵ ب).

ایجاد واحدهای هم واکنش هیدرولوژیک در زیرحوضه‌ها

در مدل SWAT زیرحوضه‌ها به واحدهایی تقسیم می‌شوند که دارای خصوصیات مشترکی از خاک و کاربری اراضی می‌باشند. یک زیرحوضه می‌تواند به چندین واحد هم‌واکنش هیدرولوژیک تقسیم شود. در واقع واحدهای هم‌واکنش هیدرولوژیک واحدهای محاسباتی مدل می‌باشند. علت استفاده از واحدهای هم‌واکنش هیدرولوژیک این است که آن‌ها از طریق یکجا کردن [۱]تمام خاک‌ها و کاربری اراضی‌های مشابه در یک واحد مجزا، به اجرای ساده‌تر و راحت‌تر مدل به‌خصوص در حوضه‌های بزرگ کمک می‌کند (نیچ و همکاران،۲۰۰۵). لازم به‌ذکر است که در مفهوم واحد هم‌واکنش هیدرولوژیک این فرض وجود دارد که هیچ ارتباطی بین واحدهای هیدرولوژیک در یک زیرحوضه وجود ندارد. رواناب و هر آنچه با رواناب حمل و جابه‌جا می‌شود، در هر واحد واکنش هیدرولوژیک به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود و سپس مجموع آن‌ها برای زیرحوضه لحاظ می‌شود. اگر ارتباط یک مساحت کاربری اراضی در منطقه با دیگری مهم باشد، ترجیحاً آن کاربری اراضی‌ها که واحدهای هیدرولوژیک هستند را می‌بایست به‌صورت زیرحوضه تعریف کرد. چون فقط در سطح یک زیرحوضه روابط مکانی قابل تعیین است. در مطالعه‌ی حاضر ۴۰۲ واحد محاسباتی بر اساس نقشه کاربری اراضی، خاک و طبقه‌بندی شیب تعریف شد. شکل (۵) لایه‌های کاربردی در مدل برای تولید واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد.

داده‌های اقلیمی ورودی مدل

آب و هوای حوضه، مقدار انرژی و آبی را که بیلان آبی حوضه را کنترل می‌کنند، مهّیا نموده و اهمیت نسبی اجزاء مختلف چرخه‌ی هیدرولوژیکی را مشخص می‌کند. متغیرهای مربوط به آب و هوا که در مدل مورد نیاز می‌باشند عبارتند از: بارش روزانه، حداکثر و حداقل دمای روزانه، تابش خورشیدی روزانه، متوسط سرعت باد روزانه و متوسط رطوبت نسبی روزانه. این مقادیر یا باید به‌صورت داده‌های ورودی به مدل داده شوند و یا توسط مدل شبیه‌سازی شوند. مدل SWAT دارای WXGEN مدل مولد داده‌های اقلیمی است (شارپلی ویلیامز،۱۹۹۰) که جهت تولید داده‌های اقلیمی یا بازسازی آمار مفقود به‌کار می‌رود. مقادیر روزانه‌ی پارامترهای اقلیمی از روی متوسط‌های ماهیانه تولید می‌شوند. مدل مجموعه‌ای از اطلاعات مربوط به آب و هوا را برای هر زیرحوضه تولید می‌کند. مقادیر مربوط به هر زیرحوضه به‌صورت جداگانه تولید شده و هیچ همبستگی مکانی بین مقادیر تولید شده برای زیرحوضه‌های مختلف وجود ندارد (نیچ و همکاران،۲۰۰۵). در این بخش به‌منظور ورود داده‌های بارش روزانه به مدل از آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی درکش، دربند سملقان، شیرآباد و ایستگاه تبخیرسنجی رسالت در مقیاس روزانه (از سال آبی ۷۰ ـ ۱۳۶۹ الی ۹۴ ـ ۱۳۹۳) استفاده شده است. همچنین جهت ورود داده‌های روزانه‌ی دمای حداقل و حداکثر، از آمار روزانه‌ی ایستگاه‌های تبخیرسنجی رسالت و آغمزار استفاده شده است. سایر پارامترهای اقلیمی توسط مدل با استفاده از مولد پارامترهای اقلیمی براساس آمار نزدیکترین ایستگاه سینوپتیک (که نقش ایستگاه مولد داده را دارد) شبیه‌سازی می‌شود. به‌منظور استفاده از مولد پارامترهای اقلیمی برای تولید داده‌های هواشناسی روزانه که لازم است شبیه‌سازی شود و نیز برای بازسازی آمار مفقود روزانه، می‌بایست چند ایستگاه هواشناسی، معمولاً سینوپتیک که کامل‌ترین پارامترهای آماری اقلیمی را دارد، در پایگاه داده مدل به‌کار گرفته شود. این پارامترها باید برای هر ماه در ایستگاه مورد نظر محاسبه شوند و در نهایت

[۱] lumping

در فایلی با عنوان User wgn در پایگاه داده مدل وارد می-شود. در این مطالعه ایستگاه سینوپتیک مشهد و بجنورد به‌کار گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که مدل برای شبیه‌سازی یا بازسازی از آمار نزدیک‌ترین ایستگاه به هر زیرحوضه استفاده می‌کند.

داده‌های مدیریت کشاورزی

جهت اعمال مدیریت گیاهی در مدل ، بررسی الگوی کشت و شناسایی محصولات غالب، تاریخ کشت محصولات، دور آبیاری و عمق آبیاری از اطلاعات اصلی می‌باشد که ورود آن به مدل موجب افزایش دقت مدل در تخمین مؤلفه‌های بیلان آب به خصوص تبخیر ـ تعرق واقعی و تغذیه آب زیرزمینی می‌شود. بدین‌منظور بر اساس بررسی آمار اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی خراسان شمالی، نقشه‌های کاداستر آب و بازدیدهای میدانی، اطلاعات مورد نیاز جهت ورود به مدل استخراج شد.

اجرا، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

برای شبیه‌سازی حوضه با توجه به محدودیت‌های موجود از قبیل نقص در داده‌ها و عدم تطابق زمانی داده-های روزانه‌ی درجه حرارت، بارندگی و آب‌سنجی، یک دوره ۲۵ ساله انتخاب شد. اجرای مدل براساس گام زمانی روزانه طی سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۴ صورت گرفت. در پنج سال اول شبیه‌سازی به مدل اجازه داده شد تا با شرایط محیطی متعادل (warm up) شود. واسنجی براساس سال-های ۱۹۹۵ الی ۲۰۱۲ و اعتبارسنجی در طول سال‌های انتهایی (۲۰۱۲ الی ۲۰۱۴) انجام گرفت. در این مطالعه به‌منظور بهبود کیفیت واسنجی مدل به همراه تحلیل عدم قطعیت نتایج آن از روش SUFI2 (عباسپور،۲۰۰۹)، در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. برنامه SUFI2 واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب کرده و سعی می‌کند پارامترهای دارای عدم قطعیت را به‌نحوی تعیین کند که اکثر داده‌های مشاهده‌ای در ناحیه اطمینان تعیین شده قرار گیرند. در عین حال سعی می‌کند کوچک‌ترین طیف عدم قطعیت ممکن را ایجاد نماید. در این نرم‌افزار، یک دامنه‌ی بزرگ اولیه عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا، داده‌های مشاهده‌ای در سطح قابل قبول احتمال ۹۵ درصد (95ppu) قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی، کاهش می‌یابد تا دو شرط زیر برقرار شود تا زمانی که اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ppu واقع شوند و فاصله متوسط بین حد بالا و پایین در طیفِ ۹۵ درصد عدم قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (به عبارتی کمترین ضخامت باند عدم قطعیت حاصل شود).

انتخاب پارامترهای واسنجی مدل

به‌منظور انجام واسنجی در ابتدا، پارامترهای مدل جهت واسنجی انتخاب می‌شوند. معمولاً پارامترهایی که در مدل از حساسیت بالاتری برخوردار هستند جهت واسنجی مدل انتخاب می‌شوند. حساسیت پارامترها توسط روش-های مختلف تحلیل حساسیت و یا بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات و مطالعات انجام شده برای حوضه‌های مختلف که به برخی از آنها پیشتر اشاره شد، انتخاب می‌شوند. در این پژوهش نیز از نتایج مطالعات انجام شده در محدوده‌های مطالعاتی مجاور و همچنین نتایج تحقیقات اخیر در ایران و جهان استفاده شده است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۲; فرامرزی و همکاران،۲۰۰۹ ; آرنولد و همکاران،۲۰۱۲; عباسپور و همکاران،۲۰۱۵)لازم به‌توضیح است که، در مدل SWAT نیاز است که مقدار پارامترهای ورودی، در بازه‌ی مجاز تعیین شده در مدل قرار داشته باشد. چنانچه برای برخی از پارامترهای ورودی که در شبیه‌سازی رواناب، ذوب برف، رسوب و آب زیرزمینی مؤثر می‌باشند مقدار اولیه در نظر گرفته نشود، این مقادیر بر اساس مدل رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی و نوع خاک به-صورت پیش‌فرض توسط مدل در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است چنانچه مقدار اولیه‌ی پارامترهای ورودی منطبق با واقعیت منطقه به مدل وارد گردد، نتایج مدل پس از واسنجی نیز انطباق بیشتری با واقعیت‌های منطقه خواهد داشت. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، پارامترهای RCHRG_DP (مقدار نفوذ به آبخوان عمیق)، GWQMN (مقدار آب در آبخوان کم‌عمق جهت تولید جریان پایه)، ALPHA_BF (ضریب عکس العمل آب زیرزمینی)، SOL_AWC (ظرفیت آب قابل دسترس خاک) و CN (شماره منحنیSCS) بیشترین تاثیر را روی پارمترهای بیلان داشتند.

معیارهای سنجش واسنجی مدل

در این مطالعه جهت مقایسه نتایج مدل و داده‌های مشاهداتی (عملکرد واسنجی مدل) از چهار معیار ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش- ساتکلیف[۱] (NS) ، P-factor و R-factor استفاده شد. (جدول ۱)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]}{\sum_{i=1}^{n}[(O_i - \bar{O})\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2]} \quad (۲)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۳)$$

جدول ۱- پارامترهای ارزیابی آماری متوسط جریان ماهانه در حوضه.

نام ایستگاه	ضرایب							
	دوره واسنجی(۲۰۱۲-۱۹۹۵)				دوره اعتبارسنجی(۲۰۱۴-۲۰۱۲)			
	P-factor	R-factor	R^2	Ns	P-factor	R-factor	R^2	Ns
دربند سملقان	۰/۷۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۶۴	۰/۶۲
شیرآباد	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۶۴	۰/۶۰
درکش	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۴۰	۰/۴۰

که n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشند، $\bar{O}$ و $\bar{P}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشند. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. از طرفی ضریب NS مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱ (خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد. تا کنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نگردیده است. اما موریاسی و همکاران (۲۰۰۷)، پیشنهاد می‌کنند که مقادیر NS بهتر است بزرگتر از ۰/۵ باشد تا بتوانیم در مقیاس ماهانه، نتایج مدل برای مطالعات هیدرولوژیک و همچنین شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با انتقال آلاینده‌ها قابل قبول قلمداد گردند که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیارهای سنجش عدم قطعیت در این مطالعه در روش SUFI2 از آنجایی که روشی تصادفی است، استفاده از برخی پارامترهای آماری مانند ضریب تعیین و یا ضریب نش ـ ساتکلیف که برای مقایسه دو سیگنال کاربرد دارند، عملی نمی‌باشد. در عوض در این روش باند عدم قطعیت ۹۵ درصد برای متغیرها محاسبه می‌شود. کیفیت برازش با تعیین درصد مربوط به متغیرهای مشاهده شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند (P-factor) و همچنین متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین (R-factor) تعیین می‌شود. بهترین نتیجه (واسنجی با اطمینان بالا) زمانی حاصل می‌شود که تمام داده‌ها درون باند عدم قطعیت قرار گیرند و متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین به صفر نزدیک باشد. معیار قابل قبول برای P-factor حداقل ۵۰ درصد است. همچنین عباس‌پور و همکاران (۲۰۰۷)، گزارش کرده‌اند که اگر داده‌های اندازه‌گیری شده از کیفیت خوبی برخودار باشند، باید ۸۰ ـ ۱۰۰ درصد داده‌های مشاهداتی در داخل باند اطمینان قرار گیرند. برای معیار R-factor نیز مقدار کمتر از ۱ بهترین حالت معرفی شده است یا در برخی حوضه‌ها با منابع مختلف عدم قطعیت یا پیچیدگی‌های زیاد حتی مقدار ۲ تا ۳ نیز گزارش شده است.

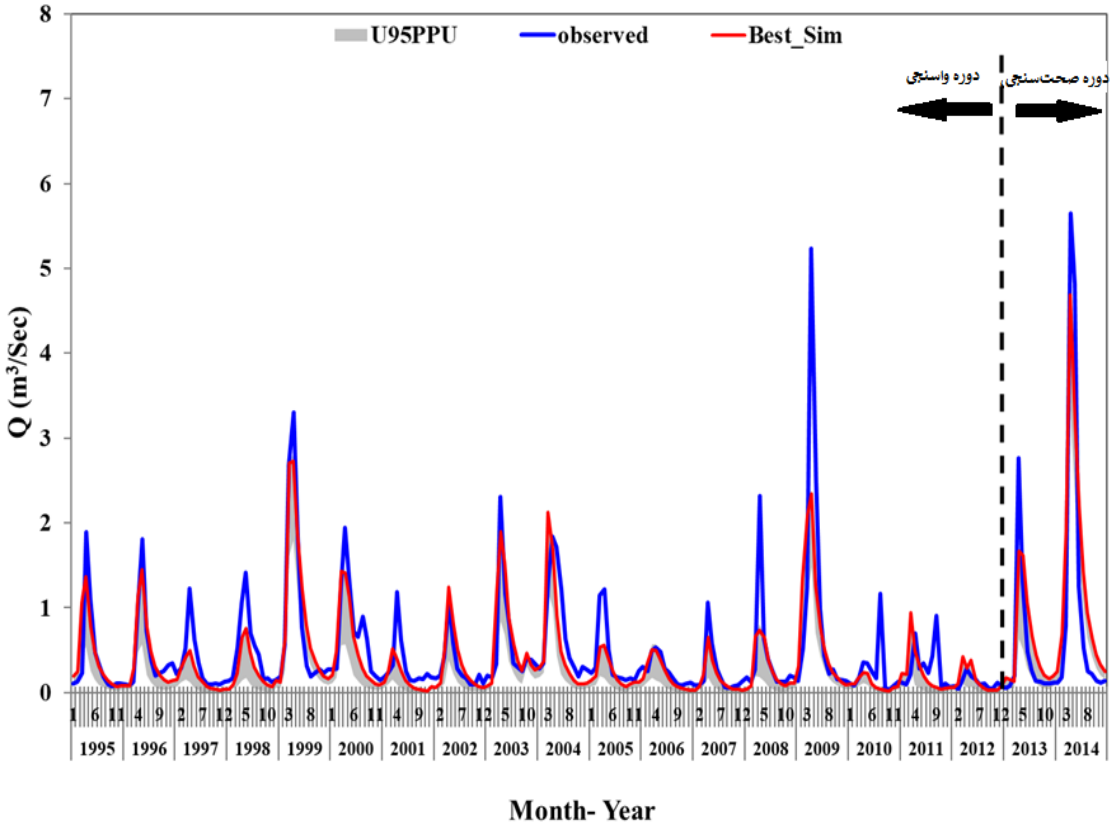
نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

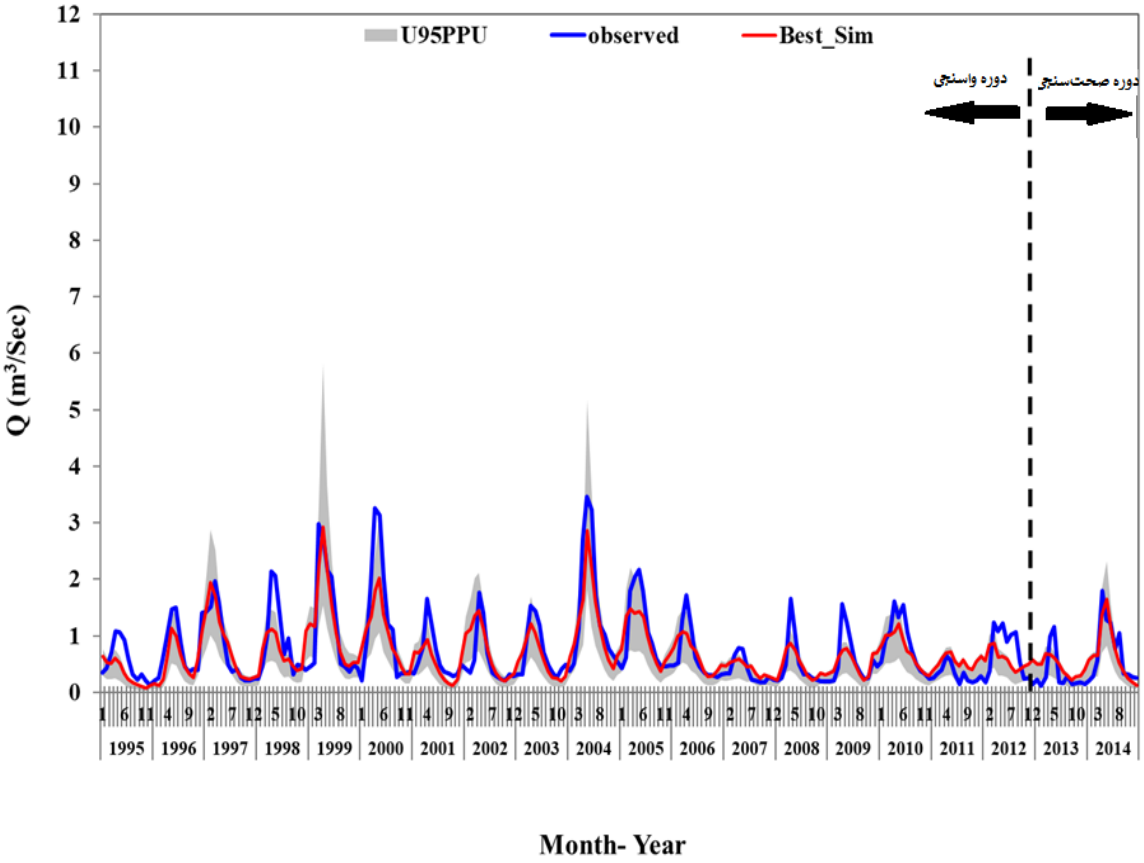
واسنجی براساس داده‌های مشاهداتی در هر ایستگاه آب‌سنجی و منطبق بر دوره شبیه‌سازی منتخب انجام شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای معیارهای سنجش واسنجی و اعتبارسنجی، در ایستگاه درکش، مدل به‌خوبی توانسته تغییرات جریان در رودخانه درکش را شبیه‌سازی کند. نتایج نشان می‌دهد که در بعضی سال‌ها مدل در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر موفق نبوده است و کم‌برآورد داشته است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش برداشت‌ها از آب سطحی در بالادست باشد. اختلاف جریان

[۱] Nash-Sutcliffe

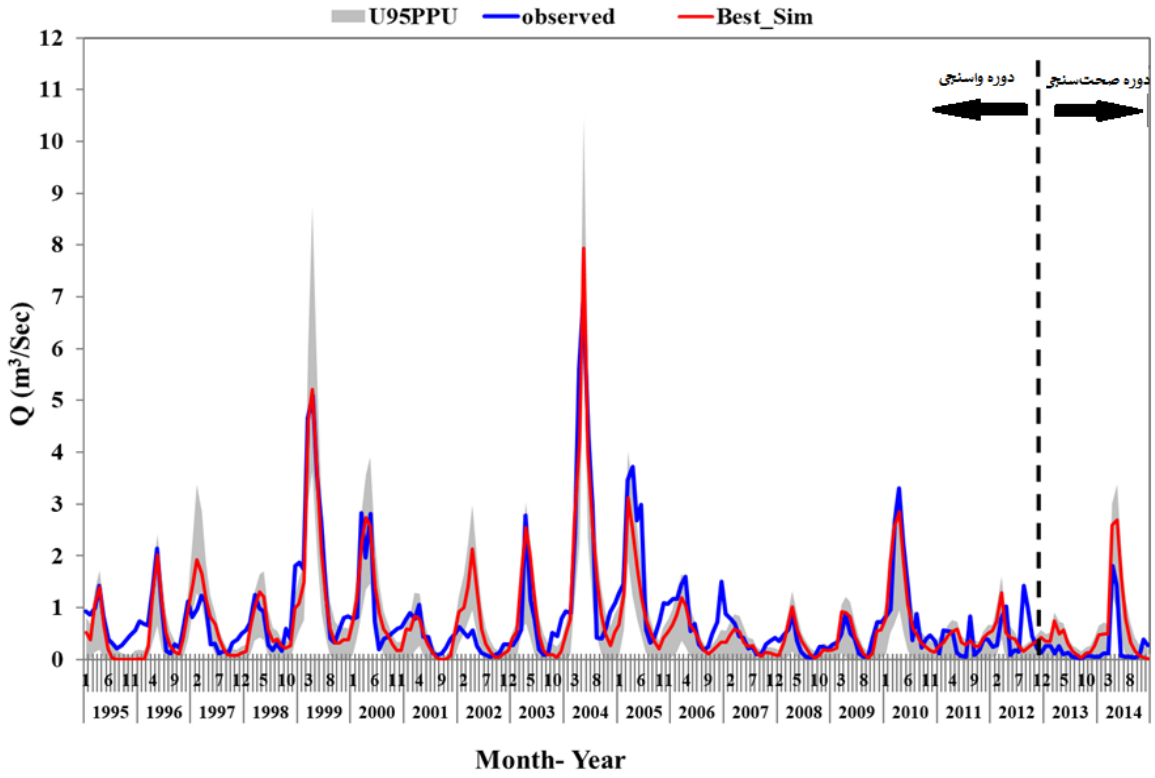
واقعی و شبیه‌سازی در اولین سال احتمالا به دلیل خطای اندازه‌گیری در جریان می‌باشد (شکل۶). در ایستگاه شیرآباد، مطابق با نتایج به‌دست آمده و مقادیر محاسبه شده برای معیارهای کنترلی، مدل در حد قابل قبولی توانسته تغییرات جریان در رودخانه شیرآباد را شبیه‌سازی کند. نتایج نشان می‌دهد که مدل برخی جریان‌های حداکثر را به خوبی شبیه‌سازی نکرده است. مشکل اصلی در نتایج مدل در این حوضه کم برآورد کردن جریان‌های حداقل (جریان پایه) در بیشتر سال‌ها می‌باشد. از آنجایی که در واسنجی مدل، تمامی پارامترهای موثر در محاسبه جریان پایه تا حد امکان برای حل این مسئله تعدیل شده‌اند، بنابراین این امر می‌تواند در اثر نامناسب بودن تجهیزات اندازه‌گیری جریان در ایستگاه باشد (شکل۷). در ایستگاه سملقان نیز که در خروجی حوضه واقع شده است، مشاهده شد که در برخی سال‌ها مدل کم برآورد داشته است،که این امر به سبب پیچیده بودن وقایع و دستکاری‌های بشر در حوضه می‌باشد. از طرفی در مسیر رودخانه اصلی برداشت‌های متعدد آب انجام شده و از طرفی بازگشت آب (آب بازگشتی) در فواصل مختلف به رودخانه نیز صورت می‌گیرد (شکل۸). در جدول (۱) پارامترهای آماری ارزیابی مدل نشان داده شده است که با توجه به بازه قابل قبول ارائه شده توسط موریاسی و همکاران(۲۰۰۷) مدل به خوبی توانسته مقادیر رواناب را شبیه سازی نماید.



شکل ۶- نتایج واسنجی ـ صحت‌سنجی مدل در ایستگاه آب‌سنجی درکش



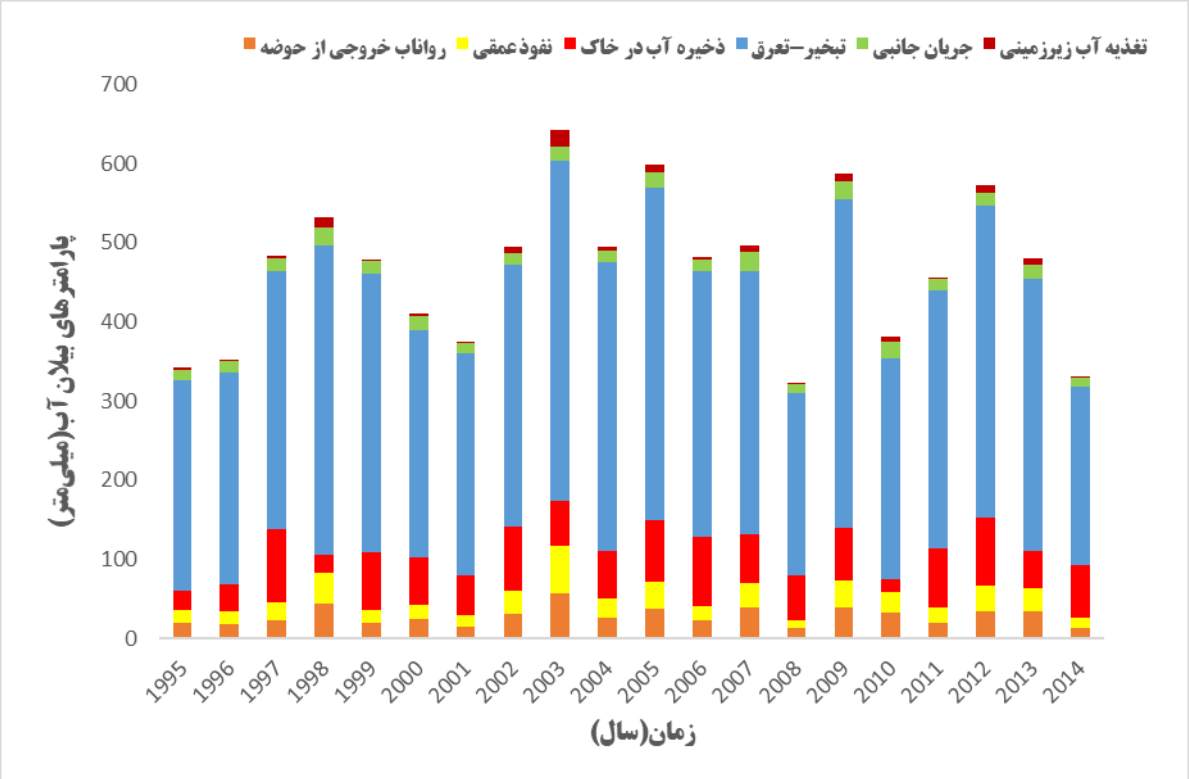
شکل ۷- نتایج واسنجی ـ صحت‌سنجی مدل در ایستگاه آب‌سنجی شیرآباد



شکل ۸- نتایج واسنجی ـ صحت‌سنجی مدل در ایستگاه آب‌سنجی دربند سملقان

بررسی بیلان آب حوضه

پس از واسنجی مدل، می‌توان نتایج خروجی مدل به‌خصوص مؤلفه‌های بیلان را ارزیابی کرد. مقادیر سالانه مؤلفه‌های بیلان آب سطحی در دوره شبیه‌سازی توسط مدل در سطح حوضه آبریز سملقان در شکل (۹) ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از مدل، از مجموع آب ورودی (بارندگی و آبیاری) حدود ۸۷/۰ درصد صرف تبخیر ـ تعرق، ۳/۲ درصد رواناب سطحی، ۳ درصد نفوذ و مابقی مرتبط با تغییرات و ذخیره رطوبت در خاک می‌باشند. در واقع بیشترین سهم پارامترهای بیلان را تبخیر تعرق در برمی‌گیرد و سهم تغذیه آبخوان از طریق رودخانه تنها ۳ درصد می‌باشد.



شکل ۹- پارامترهای معادله بیلان آب در دوره مدل‌سازی در حوضه

نتیجه گیری

در این مطالعه با توجه به شرایط محدوده مطالعاتی و اهداف مدل‌سازی، از مدل نیمه‌توزیعی SWAT در مقیاس حوضه آبریز، به‌منظور شبیه‌سازی چرخه‌ی هیدرولوژیک و برآورد مولفه‌های بیلان آب سطحی استفاده شد. با توجه به ورودی‌های مدل تعداد ۲۱ زیرحوضه و ۴۰۲ واحد واکنش هیدرولوژیک در محدوده‌ی مطالعاتی ایجاد گردید. پس از انجام مراحل آماده‌سازی و تنظیم داده‌های ورودی اجرای مدل در مقیاس زمانی روزانه طی سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۴ صورت گرفت. به‌منظور انجام واسنجی مدل و بهبود کیفیت آن و تحلیل عدم قطعیت نتایج، روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP به‌کار گرفته شد. در محدوده مطالعاتی سملقان با توجه به وجود سه ایستگاه سنجش جریان رودخانه در محدوده، مدل برای کل محدوده مطالعاتی برای سه ایستگاه، طی سال‌های ۱۹۹۵ الی ۲۰۱۲ واسنجی و سپس برای سال‌های ۲۰۱۲ الی ۲۰۱۴ اعتبارسنجی گردید و عملکرد واسنجی مدل توسط معیارهای ضریب تعیین و ضریب نش- ساتکلیف ، P-factor و R-factor مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، پارامترهای RCHRG_DP (مقدار نفوذ به آبخوان عمیق)، GWQMN (مقدار آب در آبخوان کم‌عمق جهت تولید جریان پایه)، ALPHA_BF (ضریب عکس العمل آب زیرزمینی)، SOL_AWC (ظرفیت آب قابل دسترس خاک) و CN (شماره منحنی SCS) بیشترین تاثیر را داشتند. در ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مشاهده شد که معیارهای کنترلی در تمام موارد در دامنه‌ی مجاز و قابل قبولی قرار دارد و مدل در مجموع در هر یک از ایستگاه‌ها و همچنین در خروجی حوضه توانسته

است تغییرات جریان را به‌خوبی شبیه‌سازی نماید. ایستگاه دربند سملقان که در خروجی حوضه واقع شده است با مقادیر ضریب هبستگی ۰/۸ و ضریب نش ساتکلیف ۰/۷۸ ، مقدار P-factor و R-factor به ترتیب ۰/۷ و ۰/۹ ، نسبت به دو ایستگاه دیگر که در سر شاخه‌های رودخانه قرار گرفته اند موفق‌تر عمل کرده است، بعد از آن ایستگاه درکش با مقادیر ۰/۷۳ و ۰/۷۲و سپس ایستگاه شیرآباد با مقادیر ۰/۶۶ و ۰/۶۵ به ترتیب برای ضرایب R^2 و ضریب NS عمکرد قابل قبولی داشتند.

ابراهیمی و همکاران(۱۳۹۷) برای حوضه آبریز نکا ضرایب R^2 و NS را ۰/۶۲ تا ۰/۷۶ برآورد نمودند. زارع و همکاران (۱۳۹۵) برای حوضه آبریز قره سو گلستان مقدار ضرایب NS و R^2 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. حاجی حسینی و همکاران(۱۳۹۴) نیز برای حوضه رودخانه هیرمند مقدار ضریب R^2 را برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی ۰/۷۶ و ۰/۷ برآورد کردند. علی‌رغم مناسب بودن مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در حوضه آبریز سملقان، در برخی از سال‌ها مقدار جریان شبیه‌سازی شده نسبت به جریان اندازه‌گیری شده بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد شده است و در برخی از سال‌ها نیز مقدار دبی پایه، کم برآورد داشته 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 پیچیده‌ی فرایندهای غالب هیدرولوژیک در منطقه و همچنین فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی در چرخه‌ی هیدرولوژیکی در حوضه می‌باشد. به‌عنوان مثال عوامل متعددی از جمله برداشت‌های پنهان آب در مسیر رودخانه خصوصاً در مناطق بالادست و در فواصل نامعلوم از رودخانه، وجود بند انحرافی پس از ایستگاه شیرآباد و مصرف کل آب خروجی از این زیرحوضه قبل از پیوستن به رودخانه اصلی، 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 آب‌سنجی 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 (فونتین و همکاران،۲۰۰۲) یکسان در نظر گرفتن ضریب تخلخل برای کل لایه‌های پروفیل خاک نیز می‌توانند منجر به عدم انطباق کامل جریان شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده گردد. ارزیابی نتایج خروجی مدل نشان داد از مجموع آب ورودی به حوضه، ۸۷ درصد صرف تبخیر و تعرق، ۳/۲ درصد رواناب سطحی، ۳/۰ درصد نفوذ و مابقی مرتبط با تغییرات و ذخیره رطوبت در خاک می‌باشد. در واقع بیشترین سهم پارامترهای بیلان را تبخیر تعرق در برمی‌گیرد و سهم تغذیه آب زیرزمینی از طریق آب سطحی تنها ۳ درصد می‌باشد که با توجه به این مقدار نفوذ به آبخوان باید میزان حجم برداشتی از حوضه را کنترل نمود.

در مجموع نتایج تحقیق حاکی از این است که مدل SWAT قابلیت شبیه سازی بیلان آبی حوضه‌های آبخیز با شرایط پیچیده و ناهمگن را با دقت مناسب دارا می‌باشد. 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 هر چه بیشتر معرف شرایط واقعی حوضه باشد. این مطالعه اطلاعات مفیدی را در مورد جریان رودخانه و بیلان آبی حوضه سملقان فراهم نموده و به برنامه ریزی دقیق‌تر پروژه‌های منابع آب کمک می‌نماید. از نتایج این پژوهش میتوان برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه که به صورت سناریوهایی به مدل ارائه می‌شود، استفاده نمود.

منابع

۱) ابراهیمی پ، سلیمی ج، محسنی م، 1397. واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در شبیه سازی رواناب. مطالعه موردی حوزه آبخیز نکا. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز. (10) :266-279

۲) حاجی حسینی ح.ر، حاجی حسینی م.ر، مرید س، دلاور م،1394. مدلسازی هیدرولوژیکی بالادست حوضه فرامرزی هیرمند با استفاده از مدل SWAT. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم اب و خاک. -255 267: (72)

۳) ضازاده م س، بختیاری ب، عباسپورک، احمدی م،1397. شبیه سازی رواناب رسوب و تبخیرتعرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب با استفاده

از مدل SWAT. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران 41-50: (40)12:

۴) زارع گاریزی الف، طالبی ع،1395. شبیه سازی بیلان آب حوضه آبخیز قره سو استان گلستان با استفاده از مدل SWAT. مجله مهندسی منابع آب.(9):50-37

۵) فیعی م، انصاری ح، داوری ک، قهرمان ب، 1392. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت یک مدل نیمه‌توزیعی در یک منطقه نیمه‌خشک، مطالعه موردی حوضه آبریز نیشابور. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک 17(64) : 148-137

۶) ویان ا، بهرامی م، روحانی ح، 1393. ارزیابی کارایی مدل SWAT در تخمین رواناب سطحی حوزه آبخیز کچیک استان گلستان. نشریه پژوهش های آبخیزداری-22 32: (103)27

۷) لشن م، کاویان ا، روحانی ح، ااسمعلی ا، 1394. شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوزه آبخیز رودخانه هراز مازندران با بهره‌گیری از الگوی SWAT . مجله تحقیقات خاک و آب ایران(46) :303-293

8) Abbaspour K.C. 2009. User Manual for SWAT-CUP2, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland. 95 pp.

9) Abbaspour K.C. Rouholahnejad, E, Vaghefi, S, Srinivasan R, Yang H, and Kløve B. 2015. continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology, 524: 733-752.

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

11) Alansi, A.W., Amin, M.S.M., Abdul Halim, G., Shafri, H.Z.M. and Aimrun, W., 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 6(6), pp.7581-7609.

12) Arnold J.G. Moriasi D.N. Gassman, P.W. Abbaspour K.C. White M.J. Srinivasan R., Santhi, C., van Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K, 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. Trans. ASABE 55 (4), 1491–1508.

13) Awan, U.K. and Ismaeel, A., 2014. A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. Journal of Hydrology, 519, pp.1368-1382

14) Borah D.K, Arnold J.G, Bera M, Krug C.E, and Liang, X.Z. 2007. Storm event and continuous hydrologic modeling for comprehensive and efficient watershed simulations. Transaction of the ASCE, 6 (605): 605-617.

15) Faramarzi, M, Abbaspour K.C. Schulin R, Yang H, 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrol. Process. 23, 486–501.

16) 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.

17) Jin. G, Shimizu Y, Onodera S, Saito M and Matsumori, K. 2015. Evaluation of drought impact on groundwater recharge rate using SWAT and Hydrus models on an agricultural island in western Japan. Proceeding of the International Association of Hydrological Science. 371. P. 143.

18) affas K, Hrissanthou V, Sevatas S,2018. Modelling hydro morphological processes in a mountainous basin using a composite mathematical model and Arc 162:108-129Catena.SWAT.

19) Kumar Himanshu S, Pandey A, Shrestha P. 2017. Application of SWAT in an Indian river basin for modeling runoff, sediment and water balance. Environ Earth Sei, 76:3.

20) 14-McCallum, A.M., Andersen, M.S., Rau, G.C., Larsen, J.R. and Acworth, R.I., 2014. Riveraquifer interactions in a semiarid environment investigated using point and reach measurements. Water Resources Research, 50(4), pp.2815-2829

21) 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

22) Munoz-Villers L.E, McDonnell J.J. 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17: 3543-3560

23) Neitsch, S.L, Arnold J.G. Kiniry,J.R. Williams J.R. 2005. Soil and water assessment tool, theoretical documentation Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment station and USDA Agricultural Research Service. Available online, www.brc.tamus.edu

24) Rafiei Emam A, Kappas M, Akhavan S, Hosseini S. Z. Abbaspour K. C. 2015. Eatimation of groundwater recharge and its relation to; and degration: case study of a semi-arid river basin in Iran. Environmental Earth Sciences, 74: 6791-6803.

25) Scheffler R, Neill C, Krusche A.V. Elsenbeer H. 2011. Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. Agric. Ecosyst. Environ. 144: 281-289.

26) Schuol J. Abbaspour K.C.2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model

(SAWT) applied to West Africa. Advances in Geoscience. 9:137-143.
27) Sharpley A.N. Williams J.R. eds. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.
28) Van Liew M.W, Arnold J.G. Garbrecht J.D.2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. Transaction of the AEAE. 46(6): 1539-1551.
29) Wang G, Yang H, Wang L, Xu Z, Xue B. 2014. Using the SWAT model to access impacts on land use changes on runoff generation in headwaters. Hydrological process. 28(3). pp.1032-1042.
30) Winchell M, Srinivasan R, Di luzio M,Arnold. J. 2013. ARCSWAT INTERFACE FOR SWAT2012, USER'S GUIDE. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment station and USDA Agricultural Research Service. Available online, www.tamus.edu
31) Zuo, D, Xu Z, Yao W, Jin, S, Xiao P, Ran D. 2016. Assessing the effects of changes in landuse and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. Science of the Total Environment, 544: 238-250.