ارزیابی مدل SWAT در تعیین مولفه‌های بیلان آب حوضه آبخیز گاماسیاب

محمد مهدی آرتیمانی[۱] حسین زینی وند[۲*] ناصر طهماسبی پور[۳] علی حقی‌زاده[۴]
۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان
۲و۳و۴- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵

چکیده

برای برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های مرتبط با آب، استفاده از مدل‌ها و روش‌های نوین در تعیین مولفه‌های بیلان آب حوزه‌های آبخیز ضروری می‌باشد. بر این اساس در حوضه آبخیز گاماسیاب (در جنوب استان‌های همدان و کرمانشاه) با به کارگیری مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی SWAT به کمک تکنیک‌های نرم‌افزاری همچون GIS مولفه‌های بیلان آب حوضه بر اساس طراحی شبکه سلولی شبیه‌سازی گردید. نقشه‌های رقومی کاربری اراضی، بافت خاک، ارتفاعی و سری‌های زمانی پیوسته دما، بارش، تبخیر و تعرق و دبی در گام زمانی روزانه ورودی‌های اصلی مدل می‌باشند. مدل در هر واحد پاسخ هیدرلوژیکی با توجه به پارامترهای موثر در بیلان آبی، موازنه بیلان آبی کل دوره را برقرار و در ادامه مولفه‌های بیلان خصوصا رواناب را در حوضه شبیه‌سازی می‌نماید. واسنجی مدل برای ۲۰ سال انتهایی دوره آماری (۱۳۷۰ تا ۱۳۸۹) و اعتبارسنجی مدل برای دوره ۵ ساله ابتدایی (۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹) لحاظ شده است. طبق نتایج شبیه سازی ۲۸ درصد کل بارش حوضه به صورت رواناب کل از حوضه خارج شده که با داده مشاهداتی در ایستگاه آبسنجی خروجی حوضه مطابقت دارد. در ادامه برای ارزیابی کارایی مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده در هر دو دوره آماری با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش، تبخیر و دبی مورد مقایسه قرار گرفت. مطابق معیارهای آماری از جمله معیار ارزیابی ناش- ساتکلیف (ضریب بالای ۶۰ درصد) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که مدل SWAT با دقت خوبی می‌تواند مولفه‌های بیلان آبی نظیر رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق را در این حوزه پیش‌بینی نماید.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی جریان، مدل SWAT، آمار روزانه، گاماسیاب

مقدمه

مدیریت منابع آب خصوصا در حوضه‌های بدون آمار، مستلزم شناخت فرآیندهای هیدرولوژیکی خصوصا رواناب به عنوان یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین فازهای چرخه هیدرولوژیکی می‌باشد. در پیش‌بینی وضع هیدرولوژیکی در مدل‌ها، مولفه‌های بیلان آبی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (مهدوی و آذرخشی، ۱۳۸۴). بیلان آبی حوضه جهت ثبت تغییرات آب در سیستم هیدرولوژیکی و سنجش کارایی مدل با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات میدانی کاربرد دارد (مرادی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰). در این خصوص مدل‌های هیدرولوژی نمایش ساده شده‌ای از سامانهٔ هیدرولوژی واقعی هستند که به بررسی کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژی کمک می‌کنند (زینی‌وند، ۱۳۸۹). استفاده از مدل‌ها در برآورد رواناب سالانه حوضه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه خشک که اکثراً فاقد ایستگاه آبسنجی هستند. از دیر باز مورد توجه محققین هیدرولوژی بوده است. مدل‌های ارائه شده حاصل تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به یک منطقه با شرایط خاص جغرافیایی بوده و در صورت واسنجی قابل تعمیم به سایر مناطق می‌باشد. مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی پیچیده‌ای نیز توسعه داده شده‌اند که به داده‌ها و اطلاعات اندازه‌گیری شده فراوانی نیاز دارند که در بسیاری از حوضه‌های آبریز بسیاری از کشورها از جمله کشور ایران، چنین داده‌های اندازه گیری شده‌ای وجود ندارد و این عامل، کاربرد این مدل‌ها را با مشکل مواجه ساخته است (متکان و همکاران، ۱۳۹۱). بنابراین در انتخاب مناسب‌ترین مدل جهت شبیه‌سازی فرآیندهای حوضه آبریز، باید

به مؤلفه‌هایی مانند ویژگی‌های حوضه آبخیز مورد مطالعه، توزیعی یا یکپارچه بودن، فیزیکی یا تجربی بودن ساختار آن، ساده یا پیچیده بودن و در دسترس بودن یا نبودن داده‌های مورد نیاز به عنوان ورودی مدل و یا واسنجی آن، توجه داشت. رئوف و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه بالخلوچای واقع در استان اردبیل رواناب ماهانه حوضه طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۸ توسط مدل SWAT شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که مدل SWAT با دقت مناسب مقادیر بهینه اجزاء بیلان آبی در این حوضه را برآورد می‌نماید. Memarian و همکاران (2012) در تحقیقی در حوضه Hulu Langat، کشور مالزی به کمک مدل SWAT به بررسی تاثیر تغییر کاربری اراضی به کمک سناریوهای مختلف بر میزان رواناب و رسوب در این حوضه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل SWAT در رابطه با شبیه‌سازی رواناب رودخانه و رسوب در این حوضه خوب عمل کرده است. غلامی و همکاران (۱۳۹۴) با شبیه‌سازی جریان رودخانه اترک با استفاده از مدل SWAT به این نتیجه رسیدند که این مدل با توجه به نتایج ارزیابی کارایی آن از روش‌های مختلف، با دقت قابل قبولی رواناب حوضه را شبیه‌سازی نموده است. در این تحقیق دوره زمانی شبیه‌سازی و اعتبارسنجی از قاعده خاصی تبعیت ننموده و مقادیر ضرایب ارزیابی کارایی در مرحله اعتبارسنجی از اعتبار کافی برخوردار نیست. آرتیمانی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی در حوضه آبخیز گاماسیاب به کمک مدل هیدرولوژیکی WetSpa تعیین نمودند که این مدل توانسته با دقت نسبتا خوبی (ضریب ناش بالای ۶۰ درصد) مولفه‌های بیلان آبی نظیر برگاب، ذخیره چالابی، نفوذ و مقدار رواناب خصوصا رواناب کل را در این حوضه پیش‌بینی نماید.

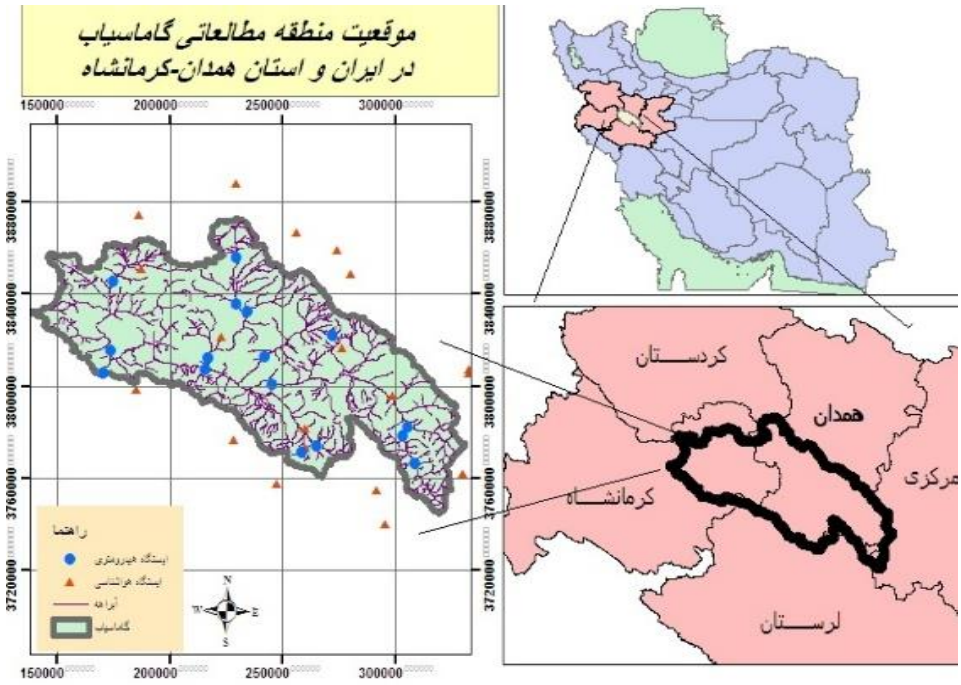
Singh و همکاران (2004) مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی HSPF و SWAT را برای حوضه‌های از رودخانه ایروکیز در شرق ایالات ایلینوی امریکا مورد استفاده قرار دادند. در هر دو مدل، داده‌های ورودی و پردازش داده‌ها با استفاده از رابط نرم‌افزاری به نام ArcView GIS انجام شده است. بر اساس داده‌های هواشناسی، ۹ سال دوره ۱۹۸۷-۱۹۹۵ برای واسنجی مدل استفاده شده و یک دوره ۱۵ ساله از ۱۹۷۲-۱۹۸۶ برای اعتبارسنجی مدل به کار گرفته شده است. بر اساس نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی، توانایی هر دو مدل HSPF و SWAT در پیش‌بینی روزانه، متوسط جریان ماهانه و سالانه جریان نزدیک به جریان مشاهده‌شده یکسان بوده است. Huang و همکاران (2015) جهت پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی در سال آبی ۲۰۱۴ در کالیفرنیا از مدل SWAT برای زیرحوضه‌هایی با مشخصات عمدتاً متفاوت از لحاظ وسعت و ارتفاع، طبق سناریو از سری‌های زمانی بارش روزانه استفاده نمودند. نتایج نشان داد این مدل به خوبی شبیه‌سازی روزانه را انجام داده است و با مقایسه با سال‌های تاریخی مهم خشک (۱۹۷۶، ۱۹۷۷، ۱۹۲۴ و ۱۹۳۱) به طور قابل ملاحظه‌ای برای تصمیم‌گیری مدیریت خشکسالی مناسب است. با توجه به لزوم بررسی فرآیند دبی روزانه و تعیین بیلان آبی حوضه گاماسیاب در جهت کمک به شناخت و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب در حوضه سعی بر این است که در این تحقیق با استفاده از مدل هیدرولوژیک توزیعی – مکانی SWAT جریان روزانه حوزه شبیه‌سازی شده و مولفه‌های بیلان آب سطحی و زیرزمینی و تبخیر و تعرق مشخص شود. بنابراین لازم است که ابتدا مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی مورد واسنجی و اعتبار سنجی قرار گیرد تا میزان کارایی مدل مشخص شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گاماسیاب در غرب ایران و در مناطق شمالی و مرکزی رشته‌کوه زاگرس در محدوده جغرافیائی ۴۷ درجه ۴ دقیقه تا ۴۹ درجه ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه ۴۹ دقیقه تا ۳۴ درجه ۵۷ دقیقه عرض شمالی با مساحت ۱۰۷۳۰ کیلومتر مربع قرار دارد. محدوده پژوهش در شمال شرقی حوضه سد کرخه و عمدتا در محدوده استان‌های همدان و کرمانشاه قرار گرفته است. مناطق کوهستانی این حوضه عمدتا در بخش‌های شمالی و جنوبی متمرکز و نقاط

پست و دشت‌های آن غالبا در بخش‌های میانی و جنوب شرقی حوضه قرار دارند. شکل (۱) موقعیت حوضه آبخیز گاماسیاب را در ایران و استان نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت حوضه مطالعه

تئوری و ساختار مدل SWAT

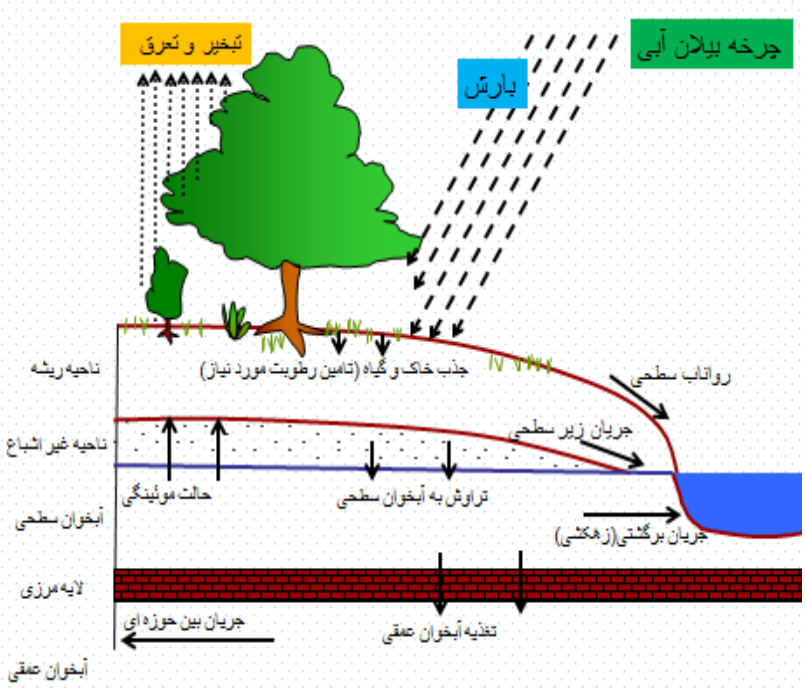
SWAT مخفف Soil and Water Assessment Tool است که اولین بار در سال 1992 توسط دکتر جف آرنولد در سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه‌گذاری شد. این مدل در مقیاس حوضه آبخیز می‌باشد که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی شده است. این مدل امکان شبیه‌سازی داده‌های خروجی هیدرومتریک را برای دوره طولانی فراهم می‌سازد که از نظر آماری اهمیت فراوانی دارد. از نظر زمانی نیز فرایندهای مختلف بیان شده را می‌توان در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و یا سالانه شبیه‌سازی کرد. اجرای این مدل در محیط مشترک با نرم‌افزار ArcGIS باعث کاربرد آسان و افزایش قابلیت‌های این مدل شده است (Neitsch et al., 2005). مدل SWAT از معادله بیلان آبی به منظور شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی استفاده می‌نماید. معادله بیلان آبی در هر زیرحوضه همگن در مدل، شامل ذخیره و تبخیر آب در گیاهان، تعیین اثر بارش، ذوب برف، مبادله آب در رواناب سطحی و لایه‌های خاک، نفوذ آب به داخل لایه‌های عمیق‌تر، تبخیر و تعرق، جریان زیرسطحی، جریان زیرزمینی و ذخیره آب می‌شود. چرخه هیدرولوژیکی که توسط مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر اساس معادله بیلان در رابطه (۱) است (Arnold et al., 1998).

$$SWt = SWo + \sum_{t=1}^{t}(P - Ri - ETi - Wi - QRi) \qquad (۱)$$

که در آن:

SWt : آب ذخیره شده در خاک، SWo: رطوبت پایه خاک، ETi : تبخیر و تعرق واقعی، Ri : رواناب سطحی، P: بارش روزانه، Wi : آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیراشباع وارد می‌شود، QRi: جریان آب زیرزمینی خروجی به

رودخانه و t: زمان (روز) است. در شکل (۲) چرخه هیدرولوژیکی و مؤلفه‌های تعادل آب در مدل SWAT ارائه شده است.



شکل (۲): مؤلفه‌های تعادل آب مدل SWAT

شبیه‌سازی اجزای بیلان آب حوضه

در این پژوهش برای شبیه‌سازی داده‌های خروجی هیدرومتریک حوضه آبخیز گاماسیاب در بازه روزانه در مدل SWAT از برنامه الحاقی در نرم‌افزار ArcGIS به نام ArcSWAT 2012.10_3.18 BATA، استفاده شده است. در ابتدا داده‌هایی نظیر نقشه مدل رقومی – ارتفاعی (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک در قالب رستری وارد مدل می‌شوند (اکبرزاده و همکاران، ۱۳۹۴). برای رسیدن به اهداف شبیه‌سازی در این مدل با واردکردن نقشه مدل رقومی ارتفاعی و تعیین حداقل مساحت بر اساس حداقل مساحت ایستگاه هیدرومتری محدوده پژوهش توسط کاربر، حوضه به زیرحوضه‌های با مشخصات فیزیکی تقسیم می‌شود. در این مرحله نرم‌افزار با دریافت موقعیت ایستگاه‌های خروجی (هیدرومتری) مشخصات و پارامترهای فیزیکی را برای زیرحوضه‌ها برآورد می‌نماید. برای برآوردهای هیدرولوژیک حوضه استفاده از زیرحوضه‌های همگن در شبیه‌سازی، به خصوص زمانی که مناطق مختلف حوضه دارای خاک و کاربری‌های گوناگونی هستند می‌تواند بسیار مفید باشد. بنابراین نقشه کاربری اراضی با ۱۰ نوع طبقه کاربری و نقشه بافت خاک با ۱۰ نوع کلاس بافت خاک به کمک فایل‌های متنی تعریف شده اجزاء این نقشه‌ها و تقسیم‌بندی شیب به ۵ طبقه، وارد مدل می‌شوند که روی هم اندازی آن‌ها منجر به تولید واحدهای همگن پاسخگوی هیدرولوژیکی به نام HRU می‌گردد. روندیابی جریان در مدل با دو روش ذخیره متغیر و ماسکینگام[1] و رواناب سطحی با دو روش شماره منحنی اصلاح شده[2] و روش نفوذ گرین آمپ[3] می‌تواند محاسبه شود (Neitsch et al., 2005). برای این پژوهش در نرم‌افزار ArcSWAT برای محاسبه روندیابی جریان از روش ماسکینگهام و برای محاسبات دبی از روش شماره منحنی استفاده می‌شود. پس از تعریف HRUها (واحدهای کاری)، مدل SWAT برای اجرا به داده‌های هواشناسی نیاز دارد.

[1] Muskingum
[2] SCS USDA
[3] Green & Ampt

برای آمار سرعت باد، رطوبت نسبی و تشعشع از آمار ایستگاه مرجع استفاده خواهد شد. ایستگاه مرجعی که در این قسمت به مدل معرفی می‌گردد باید دارای آمار بلندمدت از تمامی پارامترهای هواشناسی از قبیل: بارندگی، حداقل و حداکثر درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی باشد که عموماً در کشور ما محدود به ایستگاه‌های سینوپتیک می‌باشند (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). مدل دارای مولد داده‌های اقلیمی Weather Generator (WXGEN) می‌باشد که از آن، جهت تولید داده‌های روزانه و بازسازی آمار مفقود شده استفاده می‌شود. برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل[۴] روش‌های متعددی وجود دارد که سه روش پنمن مونتیث[۵]، پریستلی- تیلور[۶] و روش هارگریوز[۷] در مدل SWAT گنجانده شده است. با توجه به تجربیات محاسبه تبخیر و تعرق در کشور، روش مناسب برای تبخیر و تعرق پتانسیل در این پژوهش روش پنمن مونتیث انتخاب شد (غفوری و همکاران، ۱۳۹۰). برای شبیه‌سازی، از منوی SWAT Simulation در نرم‌افزار جانبی ARCSWAT در محیط ArcMap، بر اساس دوره زمانی شروع و پایان واسنجی، نوع توزیع بارش در مدل (روزانه یا ساعتی)، نوع زمانی خروجی واسنجی (روزانه، ماهانه و یا سالانه) و سال‌های لازم برای گرم کردن مدل استفاده می‌شود (کوچک‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱).

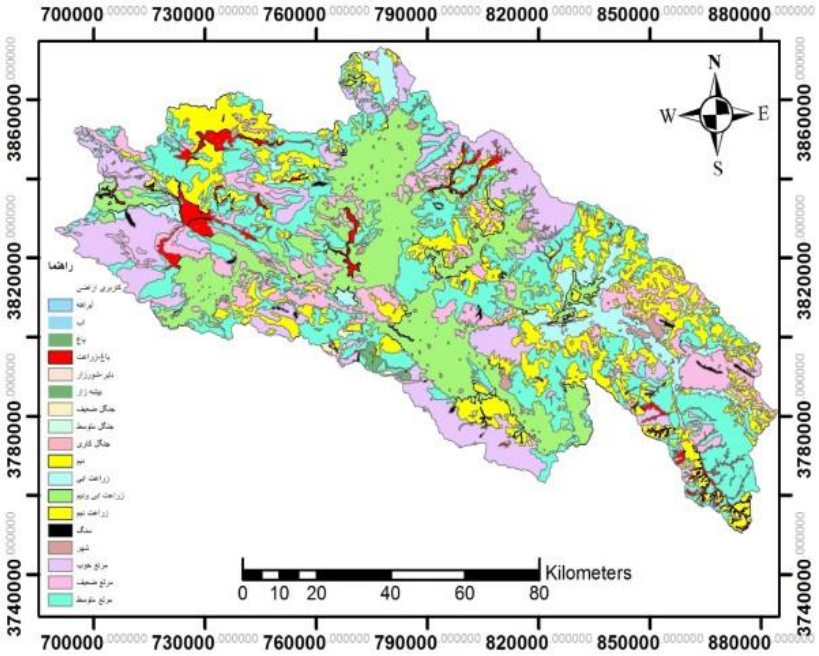
در این تحقیق از یک نرم‌افزار واسط به نام SWAT - CUP[۸] برای انجام خودکار مراحل واسنجی مدل استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از برنامه SUFI-2[۹] در محیط SWAT – CUP به طور خودکار حساسیت سنجی انجام می‌شود (Abbaspour, 2008). با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل، عوامل مهم و مؤثر شناسایی شده و در بهینه کردن پارامترها و مراحل بعدی اجرای مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش دوره واسنجی ۲۰ سال (از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۱ میلادی) با دوره زمانی گرم کردن مدل (Warm-up) برابر ۵ سال (۱۹۸۶ تا ۱۹۹۰ میلادی) در خروجی حوزه (ایستگاه هیدرومتری پل چهر) در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از مقادیر پارامترهای بهینه شده در مرحله واسنجی، مدل جهت اعتبارسنجی در دوره ۵ سال (از سال ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۱ میلادی) اجرا می‌گردد.

داده‌ها

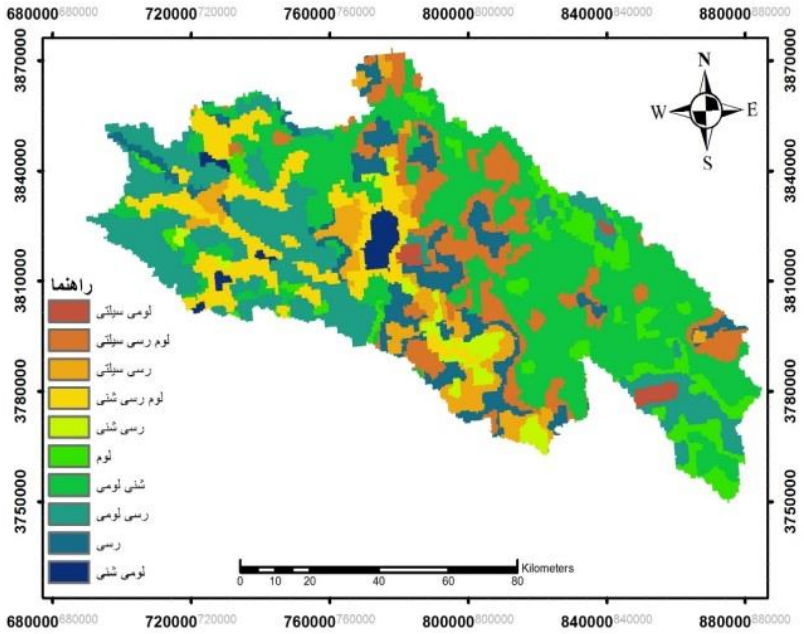
داده‌های اصلی ورودی به مدل هیدرولوژیکی SWAT شامل نقشه‌های رقومی توپوگرافی، بافت خاک و کاربری اراضی حوضه و سری‌های زمانی پیوسته دبی، بارش، تبخیر و دما می‌باشند (شکل‌های ۳ تا ۶).

جهت تعیین پارامترهای هوا و اقلیم مورد نیاز مدل در حوضه گاماسیاب از ۲۵ ساله داده روزانه ۳ ایستگاه سینوپتیک، ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی، ۴ ایستگاه دماسنجی و ۴ ایستگاه تبخیرسنجی منطقه استفاده شد. با توجه به این آمار، میانگین بارش سالانه در ایستگاه‌های مختلف از ۳۰۰ میلیمتر در ایستگاه خنداب استان مرکزی تا ۵۳۰ میلیمتر در ایستگاه وراینه همدان متغیر می‌باشد. متوسط درجه حرارت سالانه حوضه ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با استفاده از آمار و اطلاعات تبخیر ایستگاه‌های هواشناسی مجاور حوضه میزان تبخیر پتانسیل سالانه این حوضه ۱۳۰۰ میلی‌متر به دست آمده است. پس از انتخاب ۱۴ ایستگاه هواشناسی مراحل انجام همگنی و صحت‌سنجی داده‌ها و سپس بازسازی نواقص آماری اقدام شد. در ادامه داده‌های روزانه دبی ۱۰ ایستگاه هیدرومتری پل چهر به عنوان خروجی حوضه آبخیز گاماسیاب نیز برای دوره آماری ۲۵ ساله (۲۰ سال جهت واسنجی و ۵ سال برای اعتبار سنجی مدل) به فرمت مورد نیاز مدل تهیه گردید.

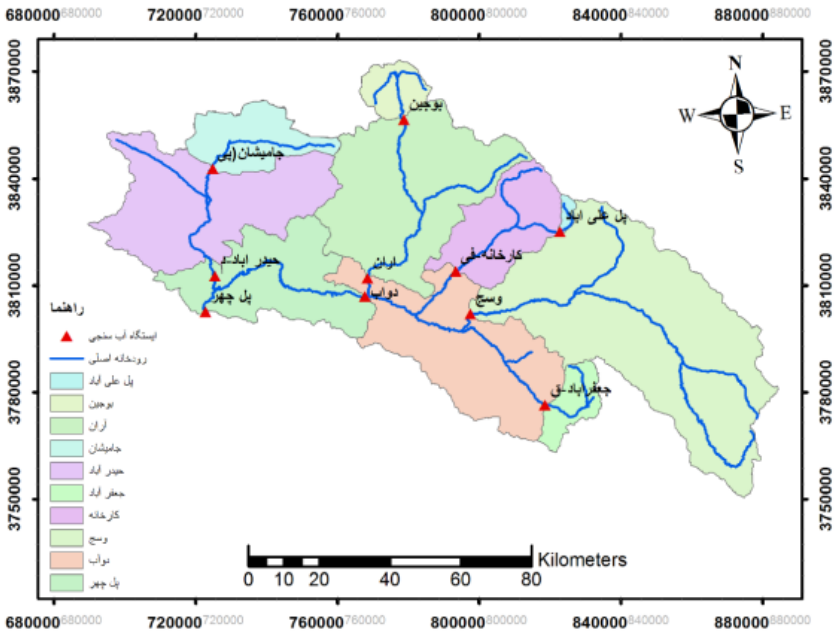
[4] Potential evapotranspiration
[5] Monteith
[6] Taylor & Priestley
[7] Hargreaves
[8] SWAT Calibration and Uncertainty Programs
[9] Sequnitial Uncertainty Fitting



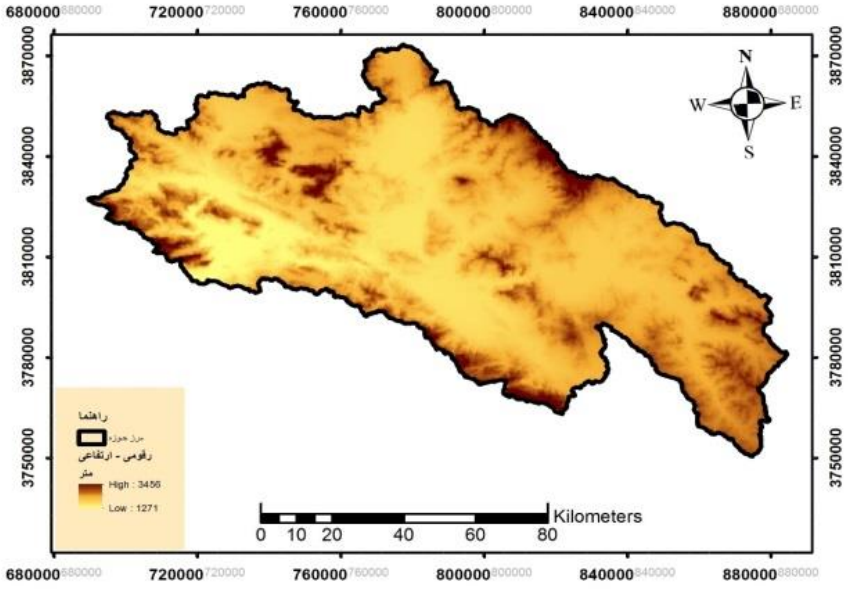
شکل(۳): نقشه کاربری اراضی گاماسیاب



شکل (۴): نقشه بافت خاک حوضه گاماسیاب



شکل (۵): نقشه ایستگاه‌های آبسنجی حوضه آبخیز گاماسیاب



شکل (۶): نقشه رقومی – ارتفاعی حوضه آبخیز گاماسیاب

ارزیابی مدل در شبیه‌سازی دبی جریان

برای ارزیابی کیفی و کمی نتایج شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های جریان رودخانه هم از روش گرافیکی و هم از روش آماری استفاده می‌گردد. در روش گرافیکی، هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده، با هیدروگراف جریان مشاهداتی، مورد مقایسه قرار می‌گیرد و در روش آماری نیز با استفاده از معیارهای آماری از جمله انحراف مدل، قابلیت اعتماد مدل، معیار ناش- ساتکلیف و غیره، مقادیر دبی رودخانه شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری، مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند. برای ارزیابی نتایج خروجی مدل از معیارهای آماری زیر استفاده می‌شود:

معیار ناش- ساتکلیف (NS)

Nash و Sutcliffe (1970) یک ضریب بی‌بعد به نام کارایی مدل NS ارائه دادند. این معیار که به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود، نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی مدل بوده و شامل استاندارد واریانس باقی مانده‌ها می‌شود. این معیار از مقادیر منفی تا ۱ تغییر می‌کند و هر چه به ۱ نزدیکتر شود نشان‌دهنده تناسب بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه-سازی شده می‌باشد.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Qs_i - Qo_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Qo_i - \overline{Qo}\right)^2} \qquad (۲)$$

معیار ضریب تعیین (R^2)

$$R = \frac{N\Sigma Q_{si}Q_{oi} - \Sigma Q_{si}\Sigma Q_{oi}}{[\{N\Sigma {Q_{Si}}^2 - (\Sigma Q_{si})^2\}\{N\Sigma {Q_{Oi}}^2 - (\Sigma Q_{oi})^2\}]^{1/2}} \qquad (۳)$$

در این روابط Qs دبی شبیه‌سازی شده، Qo دبی مشاهداتی و N تعداد سال آماری می‌باشد (Memarian et al., 2012).

روش تجمعی AM

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی، به کارگیری روش AM است که حاصل جمع سه پارامتر اریب (MB)، ناش (NS) و ضریب تعدیل اصلاح شده (Rmod) می‌باشد که طبق رابطه شماره (۴) و جدول (۱) این معیار محاسبه و شبیه‌سازی مدل از طریق این معیار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$AM = \frac{R\,\mathrm{mod} + NS + (1 - |MB|)}{3} \qquad (۴)$$

جدول (۱): طبقه بندی معیار ارزیابی NS و AM

معیار تجمعی	معیار ناش - ساتکلیف	طبقه
>۰/۸۵	>۰/۸۵	عالی
۰/۷۰-۰/۸۵	۰/۶۵-۰/۸۵	خیلی خوب
۰/۵۵-۰/۷۰	۰/۵۰-۰/۶۵	خوب
۰/۴۰-۰/۵۵	۰/۲۰-۰/۵۰	ضعیف
< ۰/۴۰	< ۰/۲۰	خیلی ضعیف

نتایج و بحث

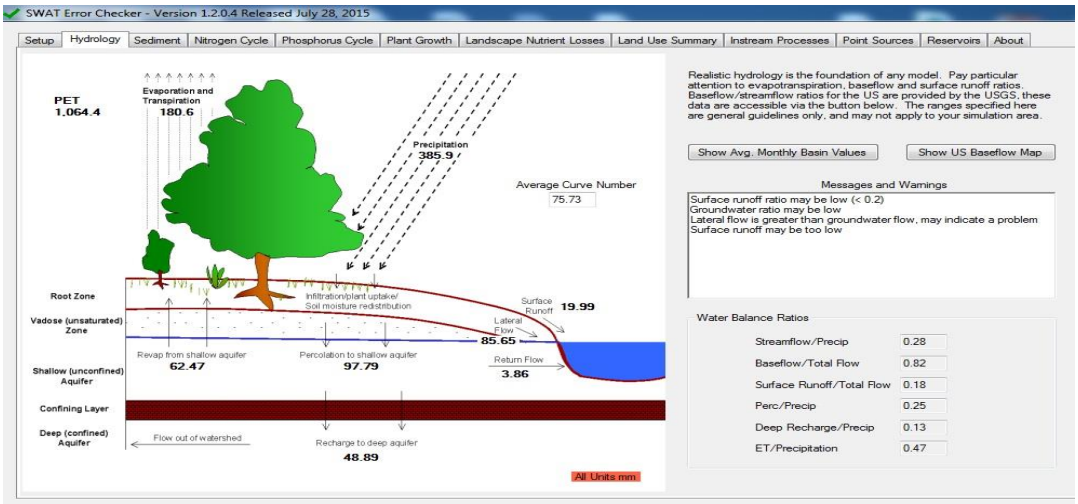
در این تحقیق مدل SWAT جهت شبیه‌سازی جریان روزانه و تعیین بیلان آبی حوضه گاماسیاب با استفاده از نقشه‌های توزیعی- مکانی، پارامترهای هیدرولوژیک و سری‌های زمانی دوره آماری منتخب، اجرا شد. نتایج مقایسه هیدروگراف‌های تولیدی از مدل در دوره دبی اوج در حوضه آبریز گاماسیاب نشان‌دهنده کارایی خوب مدل برای شبیه-سازی جریان می‌باشد. بر اساس معیار ناش-ساتکلیف کارایی مدل در برآورد دبی جریان در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۶۰ درصد و ۷۵ درصد می‌باشد. با توجه به معیار تجمعی AM (۷۶ و ۷۳ درصد) سطح عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی جریان در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. در جدول (۲) نتایج ارزیابی مدل در شبیه‌سازی جریان در آبخیز گاماسیاب آمده است. در مدل‌های بارش- رواناب، رسیدن به دقت‌های بالای ۰/۵۵ می‌تواند بسیار رضایت‌بخش باشد چرا که میزان دقت مکانی و زمانی که در این شبیه‌سازی‌ها لحاظ می‌شود به مراتب سخت‌گیرانه‌تر از

مدل‌های یکپارچه سنتی است. همچنین مقایسه ظاهری هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، یکسان بودن زمان رسیدن به دبی اوج در هر دو هیدروگراف را نشان می‌دهد به طوری که زمان رسیدن به دبی اوج در هر دو هیدروگراف در یک روز بوده است. در مورد ویژگی‌های مهم هیدروگراف نظیر دبی پیک لحظه‌ای، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج، بین دو هیدروگراف در این حوضه تطابق مناسبی وجود دارد. پیش‌بینی ۲۸ درصدی رواناب کل در مقابل ۲۱/۹ درصدی رواناب مشاهداتی قابلیت بالای مدل در شبیه‌سازی مولفه رواناب در بیلان آبی را نشان می‌دهد. که با یافته‌های حسینی و همکاران (۱۳۹۰) در حوضه آبخیز طالقان، جباری و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز سنجابی، باستانی و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز کردان همخوانی دارد.

جدول (۲): نتایج ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان در ایستگاه هیدرومتری پل چهر

معیار ارزیابی	مشخصه	مرحله واسنجی	مرحله اعتبارسنجی
معیار ناش-ساتکلیف (جریان عادی)	NS	۰/۶	۰/۷۵
معیار تعدیل اصلاح شده	Rmod	۰/۸	۰/۷۵
معیار تجمعی	AM	۰/۷۶	۰/۷۳

در بررسی بیلان تمامی مولفه‌های بیلان آبی نظیر بارش، ذوب برف، تغذیه آبخوان، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر- تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیر سطحی و جریان آب زیرزمینی در حوضه با این مدل شبیه‌سازی شد (شکل ۷). بعد از روندیابی جریان، دبی روزانه رودخانه در خروجی تمامی زیر حوضه‌ها در گام زمانی روزانه به دست آمد. در ادامه با پارامترهای حاصله از مرحله واسنجی، مدل در دوره آماری مد نظر اعتبار سنجی شد. یکی از خروجی‌های مدل تولید پارامترهای توزیعی پس از واسنجی و اعتبارسنجی به طور مجزا بوده که از مزیت‌های این مدل می‌باشد. هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جریان و مقادیر شبیه‌سازی اجزاء بیلان آبی برای زیرحوضه ایستگاه خروجی حوضه (پل چهر) و کل حوضه در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) و جداول شماره (۳) و (۴) آورده شده است. طبق مقادیر مندرج در جدول (۵) در خصوص بیلان آبی منطقه، از ۳۸۶ میلی‌متر بارش سالانه حوضه نزدیک به ۴۷ درصد صرف تبخیر و تعرق، ۲۸ درصد به صورت رواناب سطحی و زیرسطحی وارد رودخانه شده و از ۲۶ درصد آب وارده به لایه‌های خاک قریب به ۱۰ درصد آن به سفره آب زیرزمینی می‌پیوندد.



شکل (۷): نتایج بیلان آبی کل حوضه گاماسیاب در ایستگاه پل چهر در مدل SWAT

جدول (۲): سری زمانی روزانه بیلان آبی شبیه‌سازی شده مدل SWAT در کل حوضه گاماسیاب

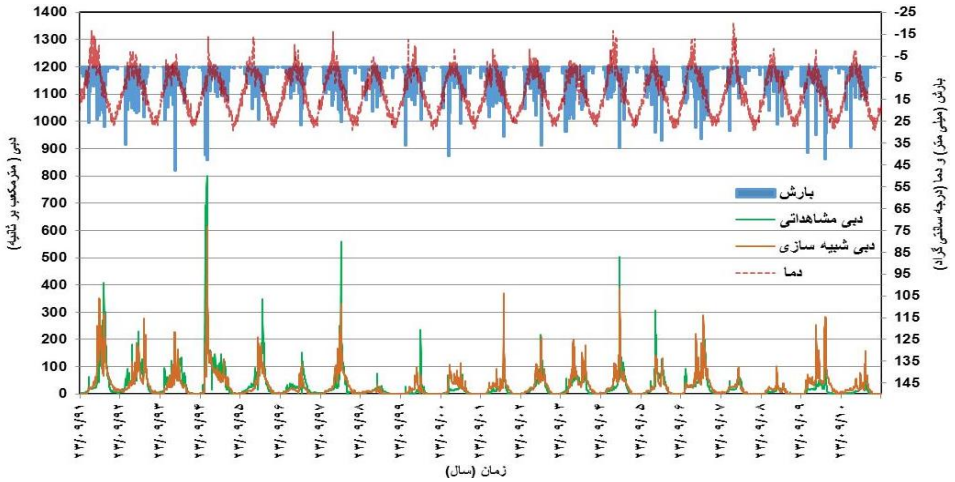
سال	ماه	روز	بارش	رواناب سطحی	جریان زیرسطحی	جریان زیر زمینی	رطوبت خاک	نفوذ عمقی	تبخیر تعرق	تبخیر تعرق	رواناب کل
۲۰۰۴	۲	۱	۶۹/۳	۱۸/۶۱	۸/۸۸	۲/۶۷	۱۴۹/۴۷	۸/۰۲	۷/۹۷	۹/۷۲	۲۹/۴۷
۲۰۰۴	۲	۲	۰/۴۱	۳/۵۹	۰/۲۳	۰/۱	۱۴۹/۷۲	۰/۵۱	۱/۱۸	۱/۴۶	۴/۰۸
۲۰۰۴	۲	۳	۳/۸۴	۱/۱۵	۱/۱۷	۰/۱۱	۱۵۰/۲۵	۰/۹۷	۰/۹۵	۱/۰۸	۲/۷۶
۲۰۰۴	۲	۴	۰/۰۱	۰	۰/۵۵	۰/۱۱	۱۴۷/۲۷	۱/۵۳	۰/۹۶	۱/۱۴	۰/۹
۲۰۰۴	۲	۵	۳/۸۵	۰/۰۱	۰/۵۵	۰/۱۱	۱۴۷/۷۳	۰/۵۴	۰/۴	۰/۵۱	۰/۷۶
۲۰۰۴	۲	۶	۱/۹۹	۰/۷۴	۰/۳۵	۰/۱۱	۱۴۸/۱۸	۰/۹	۰/۵۹	۰/۶۸	۱/۱۶
۲۰۰۴	۲	۷	۲/۴۸	۰	۰/۵۵	۰/۱۲	۱۴۸/۴۸	۰/۴۵	۰/۴	۰/۴۶	۰/۷۴

*مقادیر به میلی‌متر

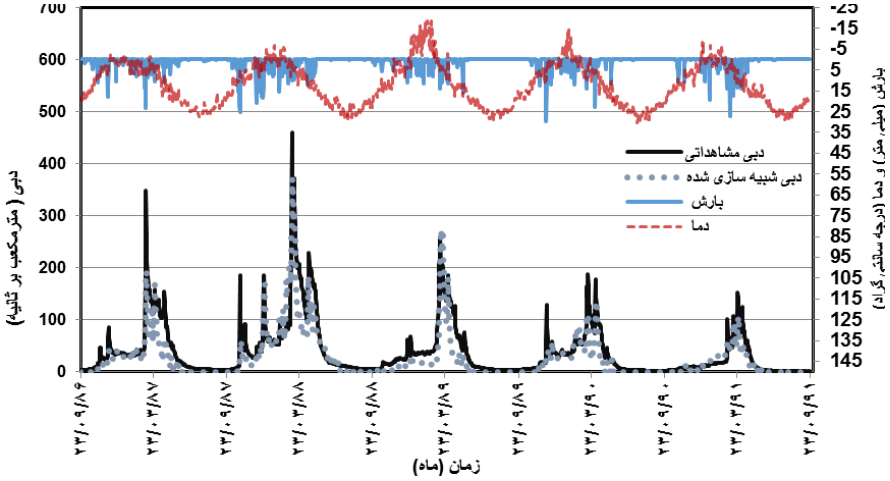
جدول (۳): مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی شده بیلان آبی سالانه حوضه گاماسیاب

ردیف	توضیحات	نام پارامتر	مقدار
۱	بارندگی سالانه	PRECIP	۳۸۵/۹
۲	بارش معادل برف، یخچه و تگرگ در سال	SNOW FALL	۳۲/۹۸
۳	بارش معادل ذوب برف، یخچه و تگرگ در سال	SNOW MELT	۳۱/۹۳
۴	تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه	PET	۱۰۶۴/۴
۵	تبخیر و تعرق واقعی سالانه	ET	۱۸۰/۶
۶	تغذیه آبخوان سطحی آب زیرزمینی	GW_RCHG	۹۷/۷۹
7	تغذیه آبخوان عمیق آب زیرزمینی	DA_RCHG	۴۸/۸۹
۸	میزان تولید رواناب سطحی سالانه	SURQ_GEN	۱۹/۹۹
۹	رواناب زیر سطحی متصل شده به کانال اصلی	LATQ	۸۵/۶۵
۱۰	میزان آب زیر زمینی آبخوان سطحی که به کانال اصلی می‌پیوندد	GW_Q	۳/۸۶
۱۱	کل رواناب داخل کانال اصلی	R_T	۱۰۹.۵

*مقادیر به میلی‌متر



شکل(۸) نمودار دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی در ایستگاه هیدرومتری پل چهر

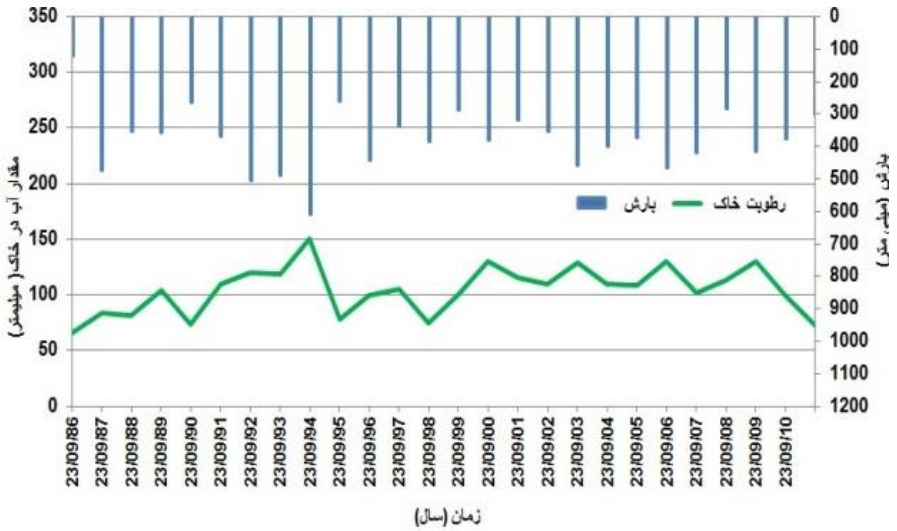


شکل(۹): نمودار دبی شبیه‌سازی در دوره اعتبارسنجی

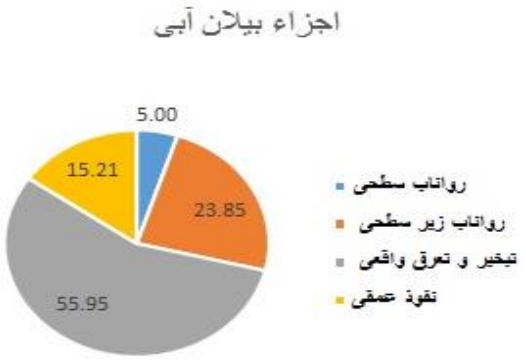
جدول (۴): مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برخی اجزای بیلان آب در حوضه گاماسیاب

مولفه بیلان	مشاهده شده (mm)	درصد نسبت به بارش (٪)	شبیه‌سازی شده (mm)	درصد نسبت به بارش (٪)
بارش	۳۸۶	۱۰۰	۳۸۶	۱۰۰
تبخیر و تعرق واقعی	۲۶۴	۶۸	۱۸۰	۴۷
رواناب کل	۸۲	۲۱/۹	۱۰۹.۵	۲۸

با اجرای مدل SWAT بیلان آبی برای سال‌های دوره آماری بررسی شد. طبق معادله بیلان (رابطه ۱) مقدار آب موجود در خاک محاسبه شد. برای کمک به تجزیه و تحلیل آماری از مقادیر بارش سالانه در حوضه گاماسیاب استفاده گردید. در شکل (۵) تغییرات سالانه رطوبت خاک بر حسب میلیمتر به تفکیک سال نشان داده شده است. بر این اساس در سال‌های که تغییرات آب موجود در خاک روند افزایشی داشته باشد بیلان آب مثبت و در سال‌های نظیر ۱۹۹۵و ۱۹۹۸ میلادی که نمودار رطوبت خاک روند کاهشی داشته باشد بیلان منفی است. ضمنا سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ میلادی در مرز بیلان منفی قرار داشته‌اند. در شکل (۶) متوسط درصد سهم هر یک از اجزای بیلان آب حوضه گاماسیاب در کل دوره آماری نشان داده شده است.



شکل(۵): روند مقدار آب در خاک حوضه



شکل (۶): درصد اجزاء بیلان آب حوضه

نتیجه‌گیری

امروزه مدل‌ها به عنوان ابزار مناسب و کارآمد برای درک و شبیه‌سازی عکس‌العمل هیدرولوژیکی یک حوضه آبخیز در نقاط مختلف دنیا به کار گرفته می‌شود. در این تحقیق شبیه‌سازی بیلان آبی و رواناب روزانه حوضه گاماسیاب توسط مدل SWAT به عنوان یک مدل بارش- رواناب با به کارگیری داده‌های اقلیمی و تلفیق نقشه‌های بافت خاک، پوشش گیاهی و رقومی-ارتفاعی صورت گرفت. رواناب سطحی و اجزای بیلان آبی حوضه بر اساس پارامترهای موثر در مدل، در گام زمانی روزانه با دقت مناسبی به دست آمد و هیدروگراف اولیه رواناب استخراج گردید. در مرحله واسنجی جهت بهبود شبیه‌سازی و تطابق بهتر بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی نسبت به کالیبره کردن پارامترهای موثر در مدل اقدام گردید. تعداد نسبتا کم پارامترهای عمومی در واسنجی از مزایای مدل محسوب می‌شود که اجرای بهتر در زمان کمتر، عدم قطعیت کمتر و عدم نیاز به انجام آنالیز حساسیت پارامترها قبل از اجرا برای گزینش پارامترهای حساس را به دنبال خواهد داشت. با مطالعه اجزاء بیلان آبی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT نتیجه شد که بدون در نظر گرفتن رطوبت موجود در خاک در اکثر سال‌های دوره آماری به غیر از سال‌های ۱۹۹۱، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ میلادی منفی است. زیرا مجموع مقادیر تلفات ناشی از تبخیر و تعرق واقعی، رواناب کل و نفوذ عمقی بیشتر از مقدار بارش در این سال‌هاست. بیلان منفی آب نشان‌دهنده هدر رفت ذخائر آب موجود در خاک و منابع آب زیرزمینی حوضه از طریق نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق می‌باشد که در این حوضه سهم تبخیر و تعرق در هدر رفت آب نسبت به سایر اجزاء بیلان از نسبت بیشتری برخوردار است. نتایج ارزیابی مدل در حوضه گاماسیاب نشان‌دهنده شبیه‌سازی قابل قبول مدل SWAT در برآورد رواناب و تعدادی از اجزای بیلان آبی حوضه بوده است. با توجه به این که این مدل در حوضه نسبتا وسیعی در ۱۰ زیر حوضه با خصوصیات متفاوت در پارامترهای هیدرولوژیکی نظیر توپوگرافی، اقلیمی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، خاک و سنگ با ایستگاه آب سنجی اجرا شده است، می‌توان از نتایج این مدل در زیر حوضه‌های متفاوت جهت تعمیم به سایر نقاط مشابه استفاده کرد. همچنین نتایج این تحقیق می‌تواند برای مطالعات مناطق مختلف به خصوص مطالعات هیدرولوژی، مدیریت و برنامه‌ریزی در زمینه منابع طبیعی، محیط زیست و منابع آب به کار گرفته شود.

منابع

۱. ادارات کل هواشناسی استان‌های همدان، کرمانشاه، مرکزی و لرستان، گروه آمار، (۱۳۹۵).
۲. اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کرمانشاه (۱۳۸۹). مطالعات توجیهی آبخیزداری و منابع طبیعی تجدیدشونده حوضه آبخیز دینور، جلد چهارم: خاکشناسی و ارزیابی تناسب اراضی، مشاور سامان آب سرزمین.

۳. اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان (۱۳۸۵). مجموعه گزارشات مطالعات توجیهی حوضه گاماسیاب، مشاور زومار.
۴. آرتیمانی، م.م.، ح. زینی‌وند، ن. طهماسبی‌پور و ع. حقی‌زاده (۱۳۹۶). ارزیابی و تعیین مولفه‌های بیلان آب حوضه آبخیز گاماسیاب، مجله علمی – ترویجی سامانه‌های سطوح ابگیر باران، دوره چهارم، جلد ۱۳، زمستان ۱۳۹۵.
۵. اکبرزاده، م.ر.، س.ر. خداشناس و ک. اسماعیلی (۱۳۹۴). مدل‌سازی رواناب حوزه آبخیز اترک با استفاده از الگوریتم SUFI-۲ مدل SWAT، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵، جلد ۹.
۶. باستانی اله آبادی، آ.، ع.ر. تلوری و م. حسینی (۱۳۹۱). کاربرد مدل SWAT2009 در شبیه‌سازی رودخانه، نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز-خوزستان.
۷. جباری، پ.، م. حسینی و ا. خسروجردی (۱۳۹۱). بررسی حساسیت پارامترهای جریان در حوضه سنجابی با استفاده از مدل SWAT، سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۸. حسینی، م.، م. غفوری، م.ر. طباطبایی، م. گودرزی و س.ا. حجازی (۱۳۹۱). ارزیابی مولفه‌های جریان با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز طالقان، نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۷، شماره ۴۵، صفحه ۴۱۷۳-۲۷.
۹. دولت‌آبادی، س. و م.ع. زمردیان (۱۳۹۲). شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد با استفاده از مدل SWAT، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره چهاردهم.
۱۰. رئوف، م.، ج. عزیزی مبصر و آ. سلحشور (۱۳۹۵). تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT، مطالعه موردی: حوضه بالخلوچای، نشریه دانش آب و خاک، جلد 26 شماره۴/۲، ص. ۱۷۳ تا ۱۸۵.
۱۱. زینی‌وند، ح. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب در مقیاس حوضه آبخیز. ششمین همایش ملی علوم ومهندسی آبخیزداری. دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس.
۱۲. غلامی، ش.ع. و م. نصیری (۱۳۹۴). شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه اترک با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی حوضه مراوه‌تپه استان گلستان)، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۷، شماره ۲.
۱۳. کوچک‌زاده، م.ح. و ف. نصیری صالح (۱۳۹۱). ارزیابی منطقه‌ای عوامل مؤثر در شبیه‌سازی دبی رودخانه بیاتون در استان لرستان با استفاده از مدل عددی SWAT، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه ۱۳۹۱، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
۱۴. متکان، ع.ا.، ح. زینی‌وند، ب. بیات، ع.م. غفوری روزبهانی و ب. میر باقری (۱۳۹۱). شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه و تحلیل تاثیرات تغییر کاربری بهینه روی آن با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS، مطالعه موردی: حوضه آبریز مرک استان کرمانشاه. فصلنامه سنجش از دور و GIS ایران، سال چهارم، شماره یک.
۱۵. مرادی‌پور، ش.، ح. زینی‌وند، ع.ر. بهره مند و ع. نجفی‌نژاد (۱۳۹۰). شبیه‌سازی بیلان آبی در مقیاس حوضه آبخیز با استفاده از مدل هیدرولوژیکی- توزیعی و GIS، هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۱۶. مهدوی، م. و م. آذرخشی (۱۳۸۴). تعیین بیلان آبی مناسب ماهانه در حوضه‌های آبخیز کوچک کشور (مطالعه موردی: استان‌های آذربایجان شرقی و شمال خراسان)، مجله علمی و پژوهشی منابع طبیعی ایران، دانشگاه تهران.
۱۷. مهندس مشاور زومار وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۸۰). مطالعات توجیهی حفاظت خاک و آبخیزداری حوضه آبخیز گاماسیاب. گزارش خاکشناسی. سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، دفتر مطالعات و تحلیل آبخیزها.

۱۸.وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۸۹). مطالعات توجیهی آبخیزداری و منابع طبیعی تجدیدشونده حوضه آبخیز دینور، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور دفتر مطالعات و تحلیل آبخیزها، جلد چهارم، خاکشناسی و ارزیابی تناسب اراضی ، مشاور سامان آب سرزمین.

19. Abbaspour K.C. *(2008). SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual.* Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modeling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95pp.
20. Arnold J.G., Srinivasan R. Muttiah R.S. and Williams J.R. *(1998). Large Area Hydrologic And Assessment. part I: Model Development*. Journal of the American Water Resources Assoclation. *vol 34. No 1.*
21. Memarian H., Balasundram S.K., Talib J., Teh Boon Sung C., Sood A.M., Abbaspour K.C. and Haghizadeh A. *(2012). Hydrologic Analysis of a Tropical Watershed using KINEROS2*. Environment Asia.
22. Nash J.E. and Sutcliffe J.V. *(1970). River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion ofprinciples.* Journal of Hydrology. *10(3): p. 282-290.*
23. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry, J.R. and Williams. J.R. *(2005). Soil and Water ssessment Tool Theoretical Documentation*. Version 2005. Temple. Tex.: USDA-ARS Grassland. Soil andWater Research Laboratory. Available at: www.brc.tamus.
24. Sing J., Knapp V. and Demissie M. *(2004). Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT*. Illinois Department of Natural Resources.
25. Huang G. and Chung F. *(2015). Hydrology Forecasting using SWAT Hydrologic Models for the 2014 California Drought*. CA Department of Water Resources. CWEMF Annual Meeting.

Performance evaluation of SWAT model to determine water balance components in the Gamasiab basin

Mohamad Mahi Artimani[1], Hosein Zeinivand[2], Naser Tahmasebipour[3], Ali Haghizadah[4]
[1] PhD student, Watershed Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
[2, 3, 4] Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 2017/05
Accepted: 2017/08

Abstract

For planning and implementing water-related projects, applying new models and methods is necessary to determine water balance components in basins. Therefore, in this research daily runoff of the Gamasiab basin in the south of Hamadan and Kermanshah provinces was simulated based on cellular network using the spatially semi-distributed SWAT hydrological model in a GIS environment. Digital maps of elevation (DEM), land use, and soil texture and continuous time series of temperature, precipitation, evapotranspiration and discharge were the main model inputs. The model simulates all water balance components in each hydrologic response unit (HRU) and sub-basin using rainfall, temperature and evaporation data. Calibration of model parameters was done for the last 20 years of the studied period (1990-2009) and validation of the model was performed for the first 5 years (1984 to 1989). Based on the results of the simulation, 28% of the area's total rainfall is discharged from the basin as runoff which nearly matches the data observed at the hydrometric outlet station. Subsequently, to evaluate the model's performance, simulated values of precipitation, evaporation and discharge were compared with observed data. There was a good agreement between observed and simulated data based on the Nash-Sutcliffe efficiency index (0.6). Hence, it can be concluded that, this model is able to simulate surface and subsurface runoff, deep infiltration and evapotranspiration in the Gamasiab basin.

Keywords: Flow simulation, SWAT model, Daily statistics, Gamasiab