DOI: http://dx.doi.org/10.22092/ijwmse.2016.105976

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 8, Issue 1, 2016, Pages 80-92

نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۸، شماره ۱، ۱۳۹۵، صفحات ۸۰-۹۲

بررسی و برآورد جریان‌های زیرزمینی حوضه گل‌گل با استفاده از مدل SWAT

مجید حسینی*[۱] و زینب مکاریان[۲]

[۱] استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران و [۲] کارشناس ارشد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۱۶

چکیده

بزرگ‌ترین محدودیت منابع طبیعی در ایران آب و هوای خشک و نیمه‌خشک و کمبود منابع آب است. استفاده غیر اصولی از منابع طبیعی توازن و تعادل بین مولفه‌های آبی موجود و تقاضا را از بین خواهد برد. هدف اصلی این پژوهش، آزمون کارایی مدل و قابلیت استفاده از آن به‌عنوان شبیه‌ساز بیلان آب و برآورد میزان جریان زیرزمینی در حوضه گل‌گل با مساحت ۲۲۳/۹ کیلومترمربع در استان ایلام با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک SWAT و برنامه SUFI2 می‌باشد. اطلاعات ورودی مدل شامل نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و اطلاعات خاکشناسی و همچنین، اطلاعات آب و هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش، دما، رطوبت نسبی و آبدهی روزانه می‌باشد. به‌منظور مشخص کردن پارامترهای مهم و حساس مدل، تحلیل حساسیت پارامترها با استفاده از روش "هر بار یک پارامتر" (OAT) انجام شد و در آن اثر پارامترهای مختلف بر اجزاء بیلان آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق برای واسنجی مدل از الگوریتم SUFI2 استفاده شد. شبیه‌سازی مدل برای مدت ۱۳ سال از سال ۱۹۹۷ الی ۲۰۰۹ انجام شد که هشت سال اول آن (۲۰۰۴- ۱۹۹۷) برای واسنجی مدل و پنج سال بعدی (۲۰۰۹ - ۲۰۰۴) برای صحت‌سنجی نتایج مدل انتخاب شد. چهار شاخص آماری P_factor، d_factor، نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تبیین (R^2) به‌صورت ماهانه برای ارزیابی مدل انتخاب شدند. دقت شبیه‌سازی ماهانه با استفاده شاخص ارزیابی NS در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب معادل ۰/۶۵ و ۰/۴۹ می‌باشد. نتایج حاصل از تحقیق حاکی از کارایی رضایت‌بخش مدل SWAT در شبیه‌سازی مولفه های بیلان آب در حوزه آبخیز گل‌گل است. همچنین، مقادیر به‌دست آمده شاخص R^2 در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۵۱ می‌باشد که این موضوع نیز موید مطلوبیت نسبی مدل می‌باشد. بنابراین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که از مجموع ۵۰۳ میلی‌متر متوسط بارندگی سالانه، بیشترین مقدار متعلق به تبخیر و تعرق ۳۶۶ میلی‌متر (۷۲ درصد) متوسط سالانه در سطح حوضه می‌باشد. سهم مجموع جریان آب زیرزمینی و زیرسطحی معادل ۷۷ میلی‌متر (۱۵/۳ درصد)، جریان سطحی معادل ۴۷/۸ میلی‌متر (۹/۵ درصد) و تلفات سالانه نیز معادل سه درصد کل بارش است. بنابراین، سهم ۱۵/۳ درصدی جریان زیرسطحی و زیرزمینی از کل بارش پتانسیل خوبی برای برنامه‌ریزان حوضه به‌منظور اجرای برنامه‌های مدیریتی به حساب می‌آید.

واژه‌های کلیدی: ایلام، حوضه گل‌گل، OAT، SUFI2، SWAT

* مسئول مکاتبات: mjhossaini@gmail.com

مقدمه

محدودیت منابع آب و افزایش نیاز به آب که ناشی از افزایش جمعیت، توسعه شهرها و سیاست‌های جدید مدیریت جوامع بشری است و نیز استفاده بی‌رویه و غیر اصولی از این منابع، باعث بروز مشکلات و اختلافات روزافزونی در خصوص مدیریت منابع آب شده است. در برآورد مؤلفه‌های جریان و بیلان هیدرولوژیکی پارامترهای فیزیکی متعددی همچون بارندگی، درجه حرارت، باد، پوشش گیاهی، خاک و توپوگرافی مؤثر می‌باشد. با وجود ارزش بسیار زیاد داده‌های واقعی دستیابی به آن‌ها مستلزم صرف زمان طولانی اندازه‌گیری با دستگاه‌های اندازه‌گیری است و از طرف دیگر، داده‌های واقعی همواره در معرض تغییرات ایجاد شده به‌وسیله انسان در طبیعت هستند. لذا متخصصین هیدرولوژی روش‌های غیرمستقیم متعددی را برای شبیه‌سازی سیستم‌های طبیعی، برآورد دقیق‌تر، جامع تر و انجام محاسبات پیچیده‌تر با استفاده از کامپیوتر ابداع کرده‌اند.

یکی از این روش‌ها مدل‌سازی یا شبیه‌سازی هیدرولوژیک است. مدل‌های هیدرولوژی ابزاری مهم در مطالعه اقلیم و فرایندهای هیدرولوژیک حوضه‌ها هستند. این مدل‌ها باید قادر به شبیه‌سازی دقیق فرایندهای هیدرولوژیک سطح زمین به‌منظور بهبود مدیریت منابع آب باشند. همچنین، به‌منظور تعیین بیلان آبی در یک حوزه آبخیز در دوره‌های مختلف زمانی و پیش‌بینی میزان جریان درخروجی حوضه، مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای زیادی توسعه داده شده است. استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در بسیاری از موارد می‌تواند دقت و سرعت انجام محاسبات را افزایش داده، امکان تلفیق داده‌ها و خصوصیات مکانی را در قالب یک پایگاه داده فراهم نماید (Portoghes و همکاران، ۲۰۰۵).

یکی از مدل‌های نرم‌افزاری که اخیرا در نقاط مختلف جهان به‌طور گسترده‌ای جهت شبیه‌سازی عوامل هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز، چه از نظر کمی و کیفی، مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل هیدرولوژیک SWAT می‌باشد. مدل SWAT یک مدل تحلیلی، کیفی و با پیوستگی زمانی است که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی امریکا تهیه شده است (Arnold و همکاران، ۱۹۹۸). همچنین، مدل فوق یک مدل نیمه توزیعی بوده که برای شبیه‌سازی حوزه آبخیز به‌صورت پیوسته در مقیاس روزانه عمل می‌کند و برای پیش‌بینی اثر روش‌های مدیریتی متفاوت زمین بر روی جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌های زراعی بزرگ با خاک و کاربری اراضی متغیر برای بازه‌های زمانی طولانی تهیه و توسعه یافته است. این مدل مبنای فیزیکی دارد و قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای GIS را دارا بوده و محدودیتی از نظر ورود حجم وسیعی از اطلاعات در مورد حوضه‌های وسیع وجود ندارد.

Amani و همکاران (۲۰۰۶) در پژوهشی شبیه‌سازی جریان در دو زیرحوضه ماهیدشت و سنجابی از زیرحوضه‌های رودخانه کارون را با استفاده از اطلاعات مشاهده‌ای دو ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی زیرحوضه‌ها به‌صورت جداگانه با استفاده از مدل SWAT در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی انجام دادند که نتایج حاکی از کارایی مناسب مدل در حوضه مذکور بود. واسنجی مدل مقدار ضریب R^2 شبیه‌سازی جریان ماهانه دو حوضه ماهیدشت و سنجابی را به‌ترتیب ۸۹ و ۸۱ درصد، و اعتبارسنجی مدل مقدار R^2 را به‌ترتیب ۹۰ و ۸۷ درصد نشان داد.

Hosseini (۲۰۱۰) در تحقیقی تاثیرات تغییر کاربری روی بیلان آبی و رسوبات معلق در حوزه آبخیز طالقان را مورد پژوهش قرار داد. ایشان در واسنجی و اعتبارسنجی مدل، از دو برنامه SUFI2 و Parasol به‌منظور برآورد بیلان آبی در بالادست حوضه (زیرحوضه جوستان) و پایین‌دست حوضه (زیرحوضه گلینک) استفاده نمود که نتایج حاصل حاکی از عدم اختلاف معنی‌دار دو برنامه در نتایج تحقیق بود. نتایج تحقیق نشان داد که میزان تبخیر و تعرق در بالادست حوضه ۳۸ درصد و در پایین‌دست حوضه ۴۹ درصد کل بارش می‌باشد و به همین ترتیب رواناب حوضه در بالادست ۲۱ درصد و در پایین‌دست ۳۳ درصد کل بارش را تشکیل می‌دهد.

Alansi و همکاران (۲۰۰۹) اعتبارسنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان آبراهه‌ای مطالعه‌ای در مالزی انجام دادند که در آن نتایج شبیه‌سازی در مرحله واسنجی برای پایه زمانی ماهانه

با استفاده از ضرایب کارایی R^2 و نش-ساتکلیف به‌ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۶۲ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۹۳ و ۰/۹۲ به‌دست آمد. مدل SWAT در تحقیق آن‌ها توانست به خوبی در تشخیص زیرحوضه‌های دارای شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد.

مقایسه مدل SWAT با چندین مدل دیگر که در مقیاس حوضه‌ای کاربرد دارند، نشان داد که مدل SWAT در شبیه‌سازی پیوسته حوضه‌های تحت کشاورزی نسبت به سایر مدل‌ها از کارایی بالاتری برخوردار است (Borah و Bera، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴).

در راستای طرح محاسبه توزیع زمانی و مکانی مقدار آب قابل دسترس جهانی، از مدل SWAT برای تخمین کل آب قابل استفاده غرب آفریقا استفاده شد که نتایج حاصل حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه-سازی بیلان هیدرولوژی می‌باشد (Schuol و همکاران، ۲۰۰۶).

مدل SWAT همچنین در حوضه‌ای از نواحی خشک و نیمه‌خشک شمال چین با مساحت ۱۵۸۰۰ کیلومترمربع برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در دوره آماری شش ساله به‌کار برده شد (Xu و همکاران، ۲۰۰۹). در این تحقیق شبیه‌سازی رواناب و رسوب در مقیاس ماهانه نتایج بهتری نسبت به شبیه‌سازی آن در دوره روزانه داشته است. در این تحقیق مهمترین پارامترهای حساس برای دبی جریان پارامترهای شماره منحنی، شاخص برگشت آب پایه، عامل جبران تبخیر خاک، آب قابل دسترس خاک و زمان تأخیر جریان سطحی بودند.

به‌طور کلی مطالعه ساختار بیلان آب و نیز درک صحیحی از بیلان آب برای بررسی‌های چرخه هیدرولوژیکی بسیار مهم است. مطالعات گوناگونی برای بررسی این ساختار در گذشته انجام و نتایج متعددی در این زمینه ارائه شده است. با اذعان به اقلیم خشک و نیمه‌خشک منطقه ایران و محدودیت منابع آب، ضرورت انجام این‌گونه پژوهش‌ها مشخص است. این پژوهش با هدف اصلی ایجاد منابع جدید آب و با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک SWAT و بررسی معادله بیلان در بالادست حوضه برای برآورد میزان جریان زیرزمینی حوضه گل‌گل در استان ایلام صورت گرفته است و امیدواریم با توجه به اهمیت بررسی این مسأله، تحقیق پیش‌رو بتواند گام مؤثری در این خصوص بردارد.

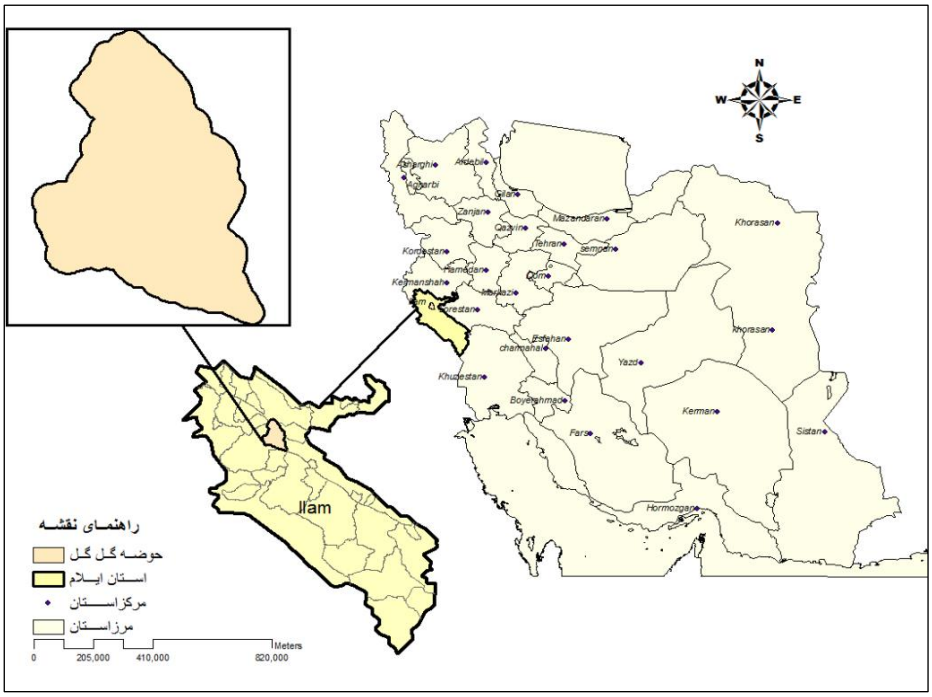
مواد وروش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز گل‌گل در جنوب شرقی شهرستان ایلام در موقعیت جغرافیایی ″۳۶ ′۱۶ °۴۶ تا ″۳۲ ′۳۸ °۴۶ طول شرقی و ″۲۷ ′۲۳ °۳۳ تا ″۵۴ ′۳۸ °۳۳ عرض شمالی قرار دارد. حدود حوضه را از شمال کوه قلارنگ، از شرق کبیر کوه، از جنوب کوه ورگر شریف و پوزه‌چملان و از غرب کوه شاه نخجیر و روستای ماربره محدود کرده است. حوزه آبخیز گل‌گل یکی از زیرحوضه‌های مهران می‌باشد که در بین حوضه‌های ایلام، شیروان چرداول، دره شهر و چنگوله واقع شده است. در واقع مهمترین رود در این حوضه رودخانه کنجانچم است که از اتصال دو رودخانه چاویز و گل‌گل تشکیل شده است. موقعیت منطقه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.کمترین ارتفاع حوضه مورد مطالعه در این محل ۱۲۰۰ متر و بیشترین ارتفاع نیز در کوه قلارنگ واقع در شمال حوضه ۲۴۰۰ متر می‌باشد.

روش پژوهش: برای شروع کار با مدل SWAT2012 ابتدا نقشه رقومی ارتفاعی[1] (DEM) حوزه آبخیز سنجابی به محیط نرم‌افزار مدل در ArcGIS فراخوانده شد. شاخص‌های فیزیوگرافی مختلف حوزه آبخیز از مدل رقومی ارتفاعی زمین قابل استخراج هستند. با معرفی نقشه DEM حوضه، ابتدا شبکه آبراهه‌های حوضه به‌وسیله مدل SWAT تعیین و ترسیم شد و برای هر آبراهه، نقطه خروجی آن مشخص شد. سپس محدوده و مرز حوزه آبخیز با توجه به توپوگرافی و شبکه آبراهـه‌ها ترسیم و در پایان حوضه به زیرحوضه-های مختلف تقسیم‌بندی شد. سپس، مـدل SWAT با استفـاده از نقشـه‌های خاک، کاربـری اراضـی حوضـه که به مدل معرفی شده است و همچنین، نقشه شیب حوضه (تشکیل شده به‌وسیله مدل با استفاده از نقشه DEM) زیرحوضه‌ها را به واحدهای پاسخ هیدرلوژیکی[2] (HRU) تقسیم‌بندی نمود. واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی به قسمت‌هایی از زیرحوضه که دارای

[1] Digital Elevation Model
[2] Hydrological Response Unit

ویژگی‌های همگنی از نظر خاک، پوشش گیاهی و مدیریت هستند، اطلاق می‌شود. مقدار آب خاک، رواناب سطحی، بار رسوب، رشد گیاه و عملیات مدیریتی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی جداگانه شبیه‌سازی می‌شود که باعث افزایش دقت تخمین مدل می‌شود.



شکل۱- موقعیت حوضه گل‌گل در کشور و استان ایلام

آمار و اطلاعات پایه و داده‌های ورودی به مدل:

مدل ارزیابی آب وخاک SWAT برای اجرا و انجام عملیات شبیه‌سازی به متغیرهای ورودی متعددی نیاز دارد. اساسا این مدل پارامترخواه می‌باشد. اما بسته به نوع هدف کاربران با تعدادی از این متغیرها می‌توان مدل را اجرا نمود. اصلی‌ترین این داده‌ها که برای شبیه‌سازی بیلان به‌کارگرفته می‌شوند، شامل متغیرهای مکانی و داده‌های هیدروکلیماتولوژی و عددی می‌باشند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، متغیرهای مکانی شامل لایه‌های اطلاعاتی مدل رقومی ارتفاع DEM[1]، که از مدل رقومی ارتفاع راداری یا SRTM با پیکسل ۸۵ در ۸۵ متر، نقشه کاربری اراضی که با استفاده از تصاویر سنجنده ETM^{+}[2] ماهواره لندست مربوط به تاریخ پنجم ژوئن (نیمه خردادماه) سال ۱۳۸۴ میلادی تولید شده است و همچنین، نقشه جهانی خاک که توسط فائو با دقت ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تهیه شده همراه با اطلاعات توصیفی واحدهای آن استفاده شده است.

همچنین، از داده‌های اقلیمی روزانه شامل مقادیر روزانه بارش، درجه حرارت حداقل و حداکثر مربوط به ایستگاه‌های داخل و خارج حوضه و متوسط رواناب روزانه خروجی حوضه استفاده شده است. برای بارندگی و آمار روزانه درجه حرارت از آمار روزانه هفت ایستگاه باران‌سنجی، تبخیرسنجی محدوده حوضه استفاده شده است و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. سایر پارامترهای اقلیمی توسط مدل با استفاده از مولد پارامترهای اقلیمی[3] شبیه‌سازی می‌شود (Neitsch و همکاران، ۲۰۰۵). 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

[1] Digital Elevation Model
[2] Enhanced Thematic Mapper plus
[3] Weather Generator

به‌کار گرفته شود. در جدول ۲ پارامترهای لازم آورده شده است، این پارامترها باید برای هر ماه در ایستگاه مورد نظر محاسبه شوند و در نهایت در فایلی با عنوان User wgn در پایگاه داده مدل وارد می‌شود، اطلاعات بیشتر و نحوه محاسبه پارامترهای مذکور در مرجع Neitsch و همکاران (۲۰۰۵) آورده شده است. در این مطالعه از ایستگاه‌های سینوپتیک کرمانشاه و روانسر استفاده شده است. لازم به ذکر است که مدل برای شبیه‌سازی یا بازسازی از آمار نزدیک‌ترین ایستگاه به هر زیرحوضه استفاده می‌کند.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منتخب باران‌سنجی، تبخیرسنجی

ردیف	ایستگاه	طول‌جغرافیایی	عرض‌جغرافیایی	ارتفاع (m)
۱	ایوان	۴۶° ۱۱′	۳۳° ۳۰′	۱۱۶۹
۲	دهلران	۴۷° ۱۰′	۳۲° ۲۵′	۲۳۲
۳	دارتوت	۴۶° ۰۱′	۳۳° ۲۶′	۸۸۴
۴	دشت عباس	۴۷° ۳۰′	۳۲° ۱۵′	۱۷۵
۵	گل‌گل	۴۶° ۱۷′	۳۳° ۱۷′	۱۱۱۳
۶	گل‌زرد	۴۷° ۲۳′	۳۳° ۰۹′	۷۱۰
۷	هلیلان	۴۷° ۰۲′	۳۳° ۲۶′	۹۳۲

جدول ۲- اطلاعات مورد نیاز مدل برای ایستگاه مرجع هواشناسی

ردیف	نام پارامتر	مشخصه پارامتر
۱	میانگین حداکثر دمای روزانه در هر ماه	TMPMX
۲	میانگین حداقل دمای روزانه در هر ماه	TMPMN
۳	انحراف معیار حداکثر دمای روزانه در هر ماه	TMPSTDMX
۴	انحراف معیار حداقل دمای روزانه در هر ماه	TMPSTDMN
۵	میانگین مجموع بارش در هر ماه	PCPMM
۶	انحراف معیار بارش روزانه در هر ماه	PCPSTD
۷	ضریب چولگی بارش روزانه در هر ماه	PCPSKW
۸	احتمال روز بارانی پس از یک روز خشک، در ماه	PR_W1
۹	احتمال روز بارانی پس از یک روز بارانی، در ماه	PR_W2
۱۰	میانگین روزهای بارانی در ماه	PCPD
۱۱	حداکثر بارش نیم ساعته در کل دوره آمار برداری	RAINHHMX
۱۲	میانگین تابش روزانه خورشید در هر ماه	SOLARAV
۱۳	میانگین دمای نقطه شبنم روزانه در ماه	DEWPT
۱۴	میانگین سرعت باد روزانه در ماه	WNDAV

نحوه شبیه‌سازی: پس از جمع‌آوری اطلاعات و تهیه فایل‌های ورودی، کار اولیه برای اجرای مدل شروع شد، پارامترسازی[1] مدل با استفاده از واسط مدل ArcSWAT در ArcGIS به‌دست آمده است و مدیریت داده‌ها را سهولت می‌بخشد. خلاصه مراحل اجرای مدل به‌ترتیب شکل‌بندی حوضه یا ایجاد زیرحوضه‌ها، تعریف HRUs، اصلاح پارامترهای اولیه و در انتها اجرای مدل در دوره شبیه‌سازی می‌باشد. برای شبیه-سازی حوضه به‌وسیله مدل SWAT با توجه به محدودیت‌های موجود از قبیل نقص در داده‌ها و عدم تطابق زمانی داده‌های روزانه درجه حرارت، بارندگی و هیدرومتری، یک دوره ۱۳ساله انتخاب شد. اجرای مدل بر اساس گام زمانی روزانه از یکم ژانویه ۱۹۹۷ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۹ صورت گرفته است. واسنجی بر اساس دوره هشت ساله از ۱۹۹۷ الی ۲۰۰۴ و

[1] Parameterization

اعتبارسنجی در طول پنج سال بعدی از سال ۲۰۰۵ الی ۲۰۰۹ انجام گرفته است.

تحلیل حساسیت[1]، واسنجی[2] و اعتبارسنجی[3] مدل: مدل‌های پیچیده هیدرولوژیک مانند SWAT نیازمند پارامترهای زیادی برای ارائه توزیع مکانی خصوصیات حوضه می‌باشند. زیرا نه امکان آن وجود دارد و نه معنی‌دار خواهد بود که تمامی پارامترها واسنجی شوند، تحلیل حساسیت به ما کمک می‌کند که پارامترهایی که به شدت بر خروجی مدل تأثیر گذارند، شناخته شوند. تحلیل حساسیت با بررسی شدت تغییرات در خروجی مدل با توجه به ورودی مدل، تشخیص می‌دهد که در کجا تغییرات بزرگ‌تری رخ می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت مدل می‌باشد. پارامترهایی که حساسیت بیشتری دارند، باید برای واسنجی استفاده شوند، و تا جایی که معیارهای عملکرد اجازه دهند، تصحیح شوند. سودمندی و مورد اعتماد بودن یک مدل حوضه بستگی به این دارد که چگونه واسنجی و سپس اعتبارسنجی شود. واسنجی شامل انتخاب و تصحیح پارامترهای تأثیرگذار مدل است تا زمانی که خروجی‌های شبیه‌سازی بر مشاهدات واقعی منطبق شود.

اعتبارسنجی شبیه واسنجی است که در آن داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای مقایسه می‌شوند، هر چند که تصحیح هیچ پارامتری انجام نمی‌شود و مقایسه داده‌ها در سری‌های زمانی متفاوتی می‌باشد یا شرایط محیطی است که متفاوت از دوره واسنجی است. نهایتاً، اعتبارسنجی اعتمادپذیر بودن مدل واسنجی شده را برای استفاده در داده‌های مستقل تعیین می‌کند. در ArcSWAT امکانات مستقلی برای تحلیل حساسیت و عملیات واسنجی در نظر گرفته شده است. اما به‌منظور صرفه جویی در وقت و بهبود کیفیت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در نتایج مدل از روش SUFI2، (Abbaspour، ۲۰۰۹) در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شده است. برنامه SUFI2 واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب کرده و سعی می‌کند، پارامترهای عدم قطعیت را به نحوی تعیین کند که اکثر داده‌های مشاهده‌ای در ناحیه عدم قطعیتِ تعیین شده قرار گیرند. در عین حال سعی می‌کند، کوچک‌ترین طیف عدم قطعیت ممکن را ایجاد نماید. در این نرم‌افزار، یک دامنه بزرگ اولیه عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا، داده‌های مشاهده‌ای در سطح ppu ۹۵ قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی، کاهش می‌یابد تا دو شرط زیر برقرار شود. ۱- اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ppu ۹۵[4] واقع شوند ($P_factor \to 1$) و ۲- 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 ($d_factor \to 0$).

معیارهای ارزیابی مدل: فرایند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه مدل و فرایند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین نیز از اهمیت اساسی برخوردار است (Schaefli و Gupta، ۲۰۰۷). شاخص‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ارزیابی کمی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های آماری ضریب تبیین R^2 و نش- ساتکلیف (NS) استفاده شد.

الف) ضریب همبستگی (R^2):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Oi - \bar{O}\right)\left(Pi - \bar{P}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Oi - \bar{O}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Pi - \bar{P}\right)^2}} \qquad (۱)$$

که در آن، 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 صفر تا یک تغییر می‌کند.

ب) ضریب نش-ساتکلیف (NS):

رابطه NS به قرار زیر است (McCuen و همکاران، ۲۰۰۶).

[1] Sensitivity Analysis
[2] Calibration
[3] Validation

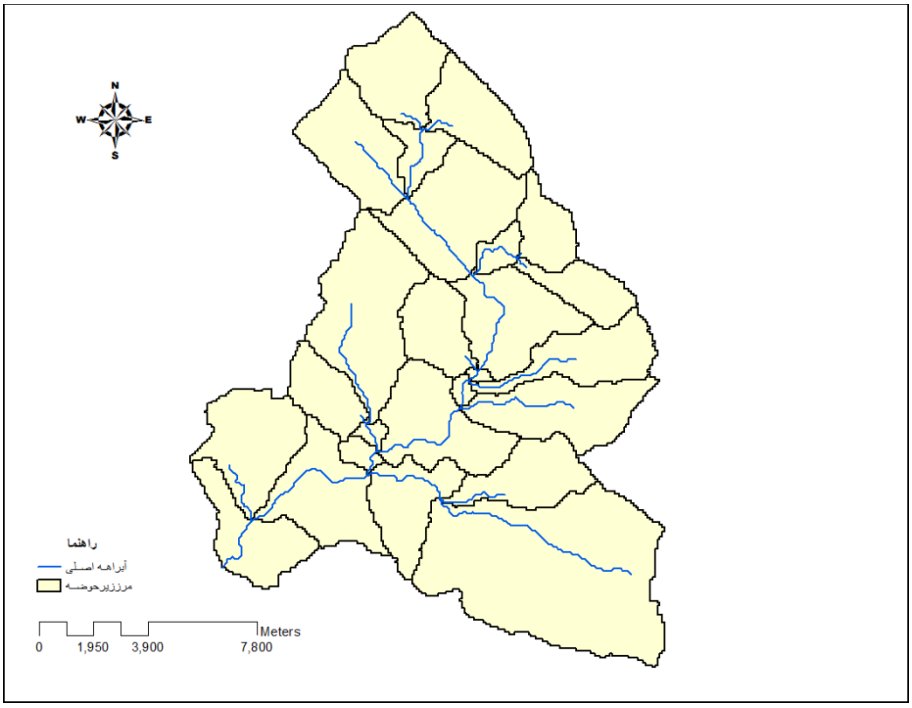
[4] 95 Percent Prediction Uncertainty

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

که در آن، O مقدار دبی اندازه‌گیری شده و P مقدار دبی شبیه‌سازی شده می‌باشد. مقدار NS از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک (خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد. تاکنون هیچ معیار خاصی به‌طور دقیق در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نشده است. اما به‌طور کلی اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد، مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰). همچنین، Moriasi و همکاران، (۲۰۰۷) پیشنهاد می‌کنند که مقادیر NS باید از ۰/۵ بزرگ‌تر باشد تا بتوانیم در مقیاس ماهانه، نتایج مدل برای مطالعات هیدرولوژیک و همچنین شبیه‌سازی فرایندهای مرتبط با انتقال آلاینده‌ها قابل قبول قلمداد شوند که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

پس از ورود داده‌های مورد نیاز، مدل SWAT برای دوره شبیه‌سازی ۱۳ساله (۲۰۰۹-۱۹۹۷) اجرا شد. با اجرای مدل در حوضه گل‌گل با توجه به مساحت آن که ۲۲۳/۹۰۸ کیلومتر مربع می‌باشد، این منطقه به ۲۵ زیرحوضه تقسیم شد. همچنین، با تعیین حداقل پنج درصد سطح برای طبقه‌های کاربری اراضی، طبقات شیب و خاک، واحدهای واکنش هیدرولوژیک با در نظر گرفتن درصد سطح غالب برای هر زیرحوضه تعریف شد. که در نهایت کل حوضه گل‌گل به ۲۵ واحد واکنش هیدرولوژیک تقسیم شد (شکل ۲). همچنین، نتایج خروجی مدل برای حوزه آبخیز گل‌گل قبل از واسنجی در شکل ۳ آورده شده است.



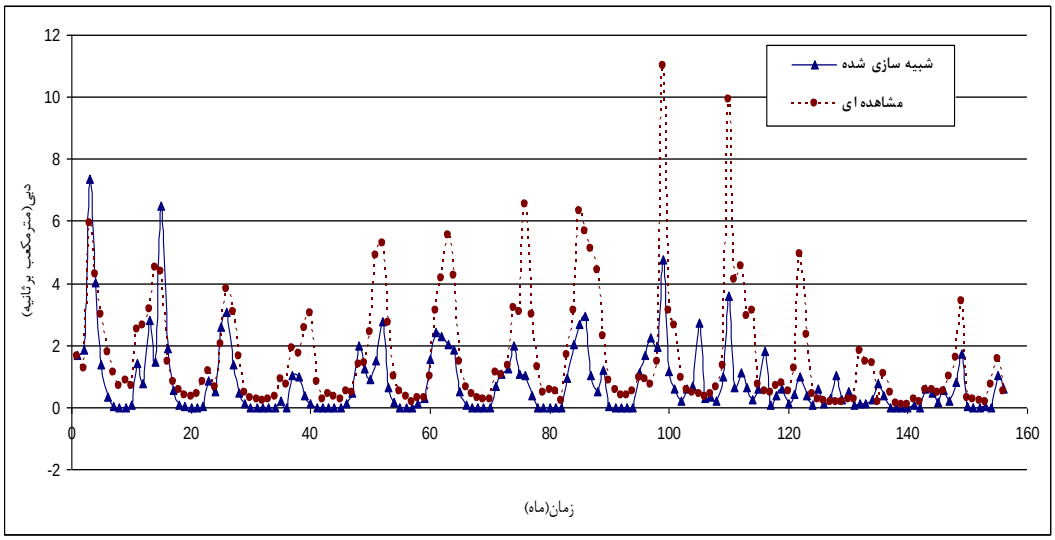
شکل ۲- نقشه زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی

تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل حوضه: از آن‌جایی که امکان این وجود ندارد که تمام پارامتر در فرایند واسنجی استفاده شوند، بنابراین، ابتدا یک انتخاب اولیه از پارامترهای مؤثر بر جریان صورت می‌گیرد که بر اساس شناخت حوضه و تحقیقات انجام شده قبلی می‌باشد. در این مطالعه، با توجه به مطالعات اخیری که به مطالعه رواناب و جریان رودخانه پرداخته بودند (Heuvelmans و همکاران، ۲۰۰۴)،

ابتدا حدود ۲۴ پارامتر انتخاب شد که در جدول ۳ آورده شده است و سپس روش آنالیز حساسیت مطلق (تغییر یکی از پارامترها در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده‌اند) در نرم‌افزار SWAT-CUP2 (Abbaspour، ۲۰۰۹) اجرا شد. ابتدا برای هر پارامتر یک دامنه معقول و نسبتاً بزرگ، به‌صورت نسبی (یعنی: یک بعلاوه/منهای دامنه، ضرب در مقدار اولیه) و یا به‌صورت دامنه مطلق انتخاب می‌شود، سپس در نرم‌افزار مذکور این دامنه به پنج قسمت مساوی تقسیم شده و برای هر مقدار مدل SWAT اجرا می‌شود و نتایج با داده‌های مشاهده شده بر اساس تغییر ایجاد شده در تابع هدف، مقایسه می‌شوند. در نهایت ۱۰ پارامتر نسبتاً حساس مطابق جدول ۴، برای حوضه گل‌گل به‌دست آمد که در ادامه از آن‌ها در فرایند واسنجی استفاده شده است.

پس از اجرای مدل به تعداد تکرارهای مشخص شده، نرم‌افزار SWAT-CUP خلاصه‌ای از نتایج از جمله مقادیر d_factor و P_factor به همراه حدود جدید مشخص شده برای هر پارامتر ارائه می‌دهد. اگر چنانچه مقادیر ارائه شده مناسب باشند، کاربر حدود ارائه شده را به‌عنوان حدود نهایی انتخاب می‌کند. ولی چنانچه مقادیر ضرایب مذکور خارج از حد توصیه شده باشند، یا به‌عبارتی بیشتر مقادیر مشاهده شده خارج از باند عدم اطمینان باشند و یا متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین اختلاف زیادی با انحراف از معیار متغیر مشاهده شده داشته باشند، کاربر می‌تواند از مقادیر جدید پیشنهادی مشخص شده به‌وسیله SWAT-CUP استفاده و برای دوره بعدی نمونه‌گیری، از این حدود استفاده کند. لازم به ذکر است که حدود جدید پیشنهادی ممکن است، خارج از حدود مجاز برای هر پارامتر باشد. بنابراین لازم است که مقادیر ارائه شده توسط کاربر بررسی شود تا حدود تغییر پارامترها همواره معنی‌دار باشند. برای واسنجی جریان در ایستگاه‌های مذکور از روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP، مدل در سه تکرار و هر تکرار ۵۰۰ بار اجرا شد. در جدول ۴ حدود اولیه و نهایی پارامترهایی که برای واسنجی انتخاب شده بودند، آورده شده است. شکل‌های ۴ و ۵ نتایج واسنجی و اعتبار سنجی مدل در ایستگاه و داده‌های مشاهداتی و باندهای عدم قطعیت ۹۵ درصد در دوره‌های مذکور را نشان می‌دهند.

نتایج ارزیابی مدل حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی به‌دست آمده در این حوضه در جدول ۵ به وضوح نشان داده شده است. شاخص ارزیابی NS در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی ۰/۶۵ و ۰/۴۹ می‌باشد که نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن کارایی مدل در فرایند شبیه‌سازی می‌باشد. همچنین، مقدار به‌دست آمده شاخص R^2 در دو مرحله به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۵۱ می‌باشد، این شاخص نیز تأییدکننده این نتایج می‌باشد.



شکل ۳- نتایج خروجی مدل برای دبی ماهانه در ایستگاه آب‌سنجی سرجوی گل‌گل قبل از واسنجی از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۹

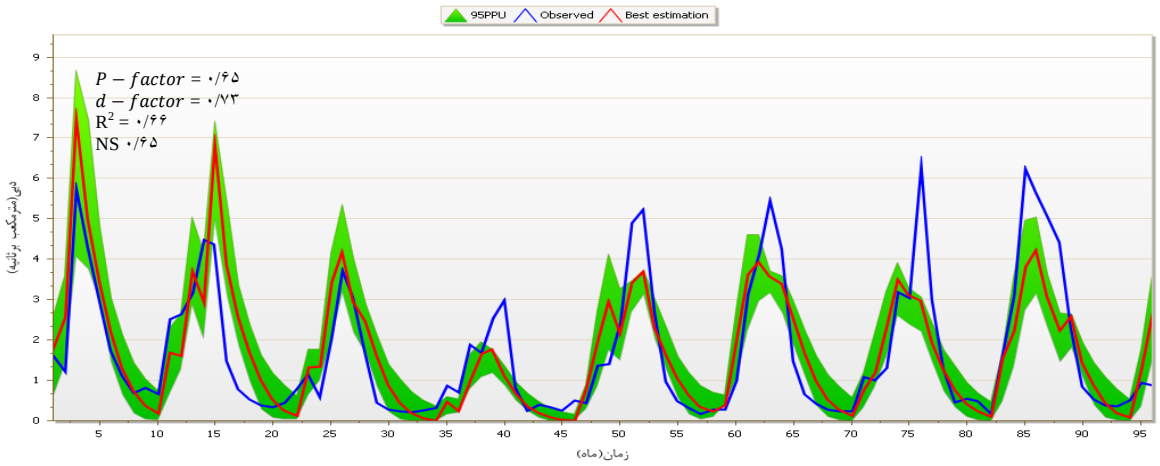
جدول ۳- پارامترهای مؤثر بر جریان در مدل SWAT

ردیف	نام پارامتر	شرح پارامتر	محدوده تغییرات*	مقدار اولیه در مدل
۱	CN2	شماره منحنی رواناب در شرایط رطوبتی متوسط	۳۵-۹۸	بر اساس جداول NRCS
۲	GW_DELAY	ضریب تأخیر آب زیرزمینی (روز)	۰-۵۰۰	۳۱
۳	ALPHA_BF	ضریب عکس‌العمل جریان آب‌زیرزمینی	۰-۱	۰/۱
۴	GW_REVAP	ضریب تعیین نفوذ به آبخوان عمیق از آبخوان سطحی یا صعود مویینگی از آبخوان سطحی	۰/۰۲-۰/۲	۱
۵	RCHRG_DP	درصد تغذیه آبخوان عمیق	۰-۱	۰
۶	GWQMN	حداقل مقدار ذخیره شده آب در آبخوان که برای رخ دادن جریان پایه لازم است	۰-۵۰۰۰	۰
۷	REVAPMN	حداقل میزان ذخیره آب در آبخوان سطحی برای روی دادن revap (mm)	۰-۵۰۰	۰
۸	SHALLST	عمق اولیه آب در آبخوان آزاد (m)	۰-۱۰۰۰	۱۰
۹	SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۰-۱	بر اساس بافت خاک
۱۰	SOL_K	هدایت هیدرولیکی خاک ($mmhr^{-1}$)	۰-۲۰۰۰	بر اساس بافت خاک
۱۱	SOL_BD	چگالی ظاهری خاک ($grcm^{-3}$)	۰/۹-۲/۵	بر اساس بافت خاک
۱۲	SOL_ALB	ضریب آلبیدو خاک	۰-۰/۲۵	بر اساس بافت خاک
۱۳	ESCO	ضریب تصحیح تبخیر از خاک	۰-۱	۰/۹۵
۱۴	SLSUBBSN	متوسط طول شیب در هر HRU (m)	۱۰-۱۵۰	به‌وسیله مدل از DEM
۱۵	OV_N	ضریب مانینگ جریان رو زمینی	۰/۰۱-۳۰	۰/۱۵
۱۶	EPCO	ضریب تصحیح جذب گیاهی	۰/۰۱-۱	۱
۱۷	CH_N1	ضریب مانینگ جریان آبراهه‌ای در هر حوضه	۰/۰۱-۰/۳	۰/۰۱۴
۱۸	SURLAG	ضریب تأخیر رواناب سطحی (روز)	۱-۲۴	۴
۱۹	SFTMP	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (درجه سانتی‌گراد)	-۵-۵	۱
۲۰	SMTMP	دمای ذوب توده برف (درجه سانتی‌گراد)	-۵-۵	۰/۵
۲۱	CH_N2	ضریب مانینگ آبراهه اصلی هر حوضه	۰/۰۱-۰/۳	۰/۰۱۴
۲۲	CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر در کانال اصلی ($mmhr^{-1}$)	۰-۱۵۰	۰
۲۳	MSK_CO1	ضریب واسنجی زمان ذخیره برای جریان نرمال در روش ماسکینگام	۰-۱۰	۰
۲۴	MSK_CO2	ضریب واسنجی زمان ذخیره برای جریان کم در روش ماسکینگام	۰-۱۰	۰/۳

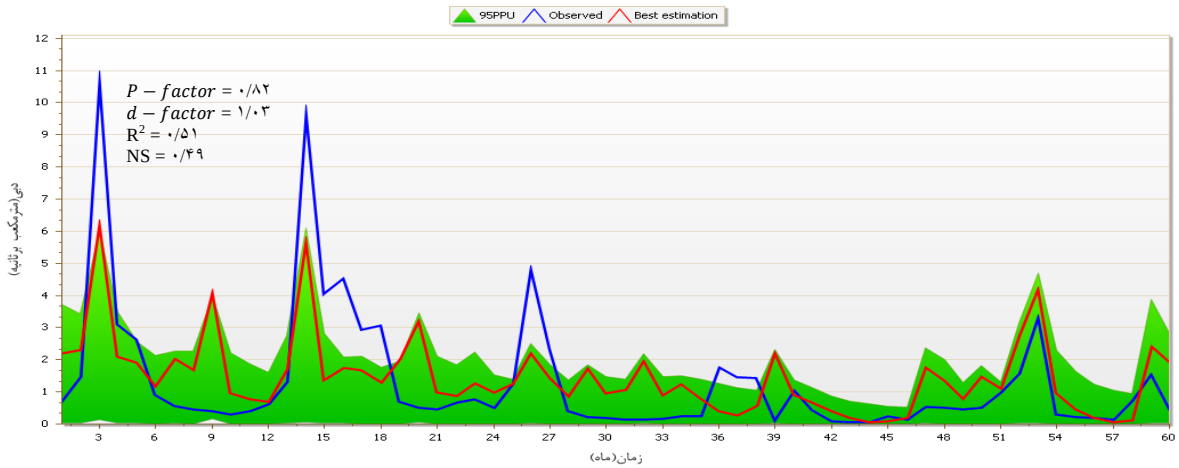
* دامنه تغییرات توسط مدل تعیین شده است.

جدول ۴- پارامترهای حساس مدل و حدود اولیه و نهایی آن‌ها در فرایند واسنجی در حوضه گل‌گل

ردیف	پارامتر	حدود اولیه	حدود نهایی
۱	CH_K2.rte	-۰/۰۱-۱۵۰	۶۴/۵۵۳-۱۹۳/۷۴۳
۲	SOL_K(1).sol	-۲۱۷–۲۰۰۰	۴۰۴/۶۱۵-۱۶۴۸/۸۵۸
۳	ALPHA_BNK.rte	-۰/۳۸–۱	-۰/۵۵۸-۰/۴۸۰
۴	CH_N2.rte	-۰/۰۱–۰/۳	۰/۰۱۳-۰/۲۰۴
۵	ALPHA_BF.gw	۰–۱/۵	-۰/۶۴۸-۰/۷۸۳
۶	SOL_ALB().sol	۰–۰/۲۵	-۰/۰۹۰-۰/۱۳۶
۷	GWQMN.gw	۰–۵۰۰۰	۰-۱۰۰
۸	RCHRG_DP.gw	۰/۱–۱	۰/۴۶۲-۱/۱۸۳
۹	REVAPMN.gw	-۱۰۶–۳۰۰	۳۱/۳۹۰-۳۰۶/۳۳۳
۱۰	GW_REVAP.gw	۰/۰۲–۰/۴	۰/۰۰۸-۰/۲۶۹



شکل ۴- نتایج واسنجی جریان در ایستگاه سرجوی گل‌گل



شکل ۵- نتایج اعتبارسنجی جریان در ایستگاه سرجوی گل‌گل

جدول ۵- شاخص‌های ارزیابی به‌دست آمده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی حوضه گل‌گل

نام شاخص	NS	R^2	P_factor	d − factor
دوره واسنجی	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۷۳
دوره اعتبارسنجی	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۸۲	۱/۰۳

بررسی مؤلفه‌های بیلان آب در سطح حوضه گل‌گل: پارامترهایی مرتبط با بیلان آب سطحی که مدل SWAT برای کل حوضه، زیرحوضه‌ها و هر واحد هیدرولوژیک در دوره شبیه‌سازی محاسبه می‌کند، در جدول ۶ آورده شده است. در این تحقیق خروجی‌های مدل برای کل حوضه گل‌گل بررسی شده است و در جدول ۷، مقادیر پارامترهای بیلان آب سطحی در سال‌های شبیه‌سازی (۲۰۰۹-۱۹۹۷) آورده شده است.

همچنین، در شکل۶، ارتباط بین پارامترهای جدول ۷ نشان داده شده است. معمولاً تغییرات نفوذ عمقی و جریان رودخانه حوضه متناسب با بارندگی می‌باشد و این نشان‌دهنده اهمیت بارندگی در مناطق نیمه‌خشک می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشخص است، از مجموع ۵۰۲/۷۷ میلی‌متر متوسط بارندگی سالانه ۱۲۴/۳۳ میلی‌متر آن به مجموع رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و جریان جانبی[1] اختصاص دارد و بیشترین مقدار آن متعلق به تبخیر و تعرق ۳۶۵/۸۹ میلی‌متر متوسط سالانه در سطح حوضه می‌باشد که رقم قابل توجهی را در برگرفته

[1] Water Yield

است. همچنین، میزان جریان آب زیرزمینی شرکت کننده در جریان آبراهه اصلی ۳۷/۳۶ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به این مقدار برآورد شده به‌وسیله مدل تنها ۷/۴۳ درصد از بارندگی کل به‌صورت جریان آب زیرزمینی جریان دارد.

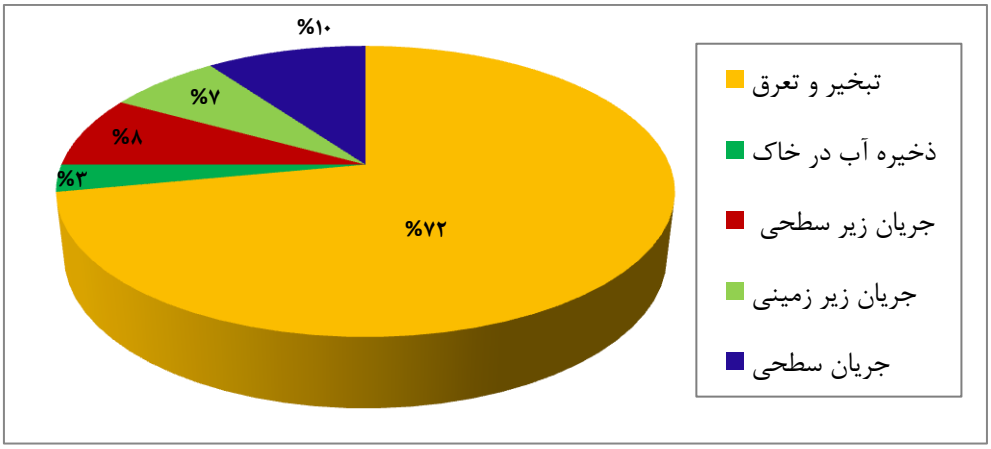
جدول ۶- پارامترهای شبیه‌سازی شده بیلان آب سطحی در مدل SWAT برای حوضه (میلی‌متر)

نام پارامتر	توضیح
PRECIP	بارش
SURQ	رواناب سطحی شرکت‌کننده در جریان آبراهه اصلی زیرحوضه
GWQ	جریان آب زیرزمینی شرکت‌کننده در جریان آبراهه اصلی زیرحوضه
LATQ	جریان جانبی شرکت‌کننده در جریان آبراهه اصلی
WYLD*	مجموع رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و جریان جانبی
PERC	میزان نفوذ عمقی
SW	رطوبت آب در خاک در انتهای دوره زمانی
SNOW	بارش برف
PET	تبخیر و تعرق پتانسیل
ET	تبخیر و تعرق واقعی

* Water Yield

جدول ۷- متوسط سالانه مؤلفه‌های بیلان آب سطحی حوضه گل‌گل (میلی‌متر)

سال	جریان زیر زمینی	جریان زیر سطحی	جریان سطحی	ذخیره آب در خاک	تبخیر و تعرق	بارش
۱۹۹۷	۱۲۲/۰۳۹	۵۹/۵۲۹	۱۱۲/۴۱۹	۴۹/۵۵۱	۳۵۹/۴۶۵	۷۰۲
۱۹۹۸	۴۴/۲۲	۵۵/۶۴۲	۷۴/۸۳۸	۱۴۴/۰۳۷	۳۹۶/۲۸۶	۶۷۶
۱۹۹۹	۷۹/۲۸۷	۳۳/۸۷۷	۴۸/۱۲۹	۲۱/۱۸۱	۳۰۸/۲۵۲	۳۵۶
۲۰۰۰	۰/۱۳	۲۸/۷۵۶	۲۸/۸۱۲	۴۳/۶۲۲	۳۲۶/۳۸	۴۰۷
۲۰۰۱	۰/۰۸۱	۳۲/۸۶۳	۱۱/۹۱۳	۱۱۵/۲۰۶	۳۳۴/۷۶۶	۴۵۵
۲۰۰۲	۲۲/۷۵	۳۵/۴۹۹	۳۸/۱۵۱	۶۴/۱۴۷	۳۹۷/۳۹۵	۴۴۷
۲۰۰۳	۴۲/۹۰۱	۴۵/۸۱۴	۵۵/۲۹۴	۹۹/۲۸۹	۳۷۲/۴۳۷	۵۶۳
۲۰۰۴	۱۷/۸۸	۴۶/۱۳۱	۴۹/۷۷	۱۶۷/۸۲۵	۴۱۶/۶۴۶	۶۰۷
۲۰۰۵	۱۳۰/۸۷۶	۷۰/۹۳۴	۱۴۶/۲۲۹	۳/۶۸۴	۶۳۶/۳۰۸	۸۳۸
۲۰۰۶	۱۸/۷۴۴	۳۹/۸۷۶	۳۷/۷۸	۱۲۴/۸۸۶	۳۰۱/۵۷۴	۵۲۳
۲۰۰۷	۶/۰۳۹	۳۸/۴۷۲	۱۷/۸۲۹	۱۲۵/۶۱۶	۴۶۸/۸۰۳	۵۳۴
۲۰۰۸	۰/۶۹۹	۳/۴۶۲	۰/۰۴۲	۳۶/۱۳۹	۱۷۳/۱۵۶	۸۸
۲۰۰۹	۰/۰۳۲	۲۱/۲۶۵	۰/۰۴	۸۸/۳۰۲	۲۶۵/۱۰۳	۳۴۰
میانگین	۳۷/۴	۳۹/۴	۴۷/۸	۸۳/۳۵	۳۶۶	۵۰۲/۸



شکل ۶- ارتباط بین مؤلفه‌های اصلی بیلان آب سطحی در حوضه گل‌گل

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی مدل SWAT با کاربری‌ها، خاک و طبقات شیب مختلف حوضه گل‌گل را با مساحت ۲۲۳/۹ کیلومترمربع به ۲۵ زیرحوضه و واحد واکنش هیدرولوژیک تقسیم نمود. نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی مدل نشان می‌دهد که مهمترین پارامترهای حساس مدل در حوضه گل‌گل عبارتند از، هدایت هیدرولیکی مأثر در کانال اصلی، هدایت هیدرولیکی خاک، ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی و ضریب مانینگ آبراهه اصلی هر حوضه می‌باشد.

ارزیابی آماری نتایج مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل نشان می‌دهد که، شاخص ارزیابی NS در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب معادل ۰/۶۵ و ۰/۴۹ می‌باشد که نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن کارایی مدل در فرایند شبیه‌سازی می‌باشد. عموماً اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد، مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود (Xu و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین، مقدار به‌دست آمده شاخص R^2 در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۵۱ می‌باشد که این موضوع نیز موید مطلوبیت نسبی مدل می‌باشد. از مجموع ۵۰۳ میلی‌متر متوسط بارندگی سالانه، بیشترین مقدار متعلق به تبخیر و تعرق ۳۶۶ میلی‌متر (۷۲ درصد) متوسط سالانه در سطح حوضه می‌باشد و مجموع جریان آب زیرزمینی و زیرسطحی معادل ۷۶/۸ میلی‌متر (۱۵/۳ درصد)، جریان سطحی معادل ۴۷/۸ میلی‌متر (۹/۵ درصد) و تلفات سالانه نیز معادل سه درصد کل بارش را نشان می‌دهد. بنابراین، میزان ۱۵/۳ درصد جریان زیرسطحی و زیرزمینی پتانسیل خوبی برای برنامه‌ریزان حوضه به‌منظور اجرای برنامه‌های مدیریتی به حساب می‌آید.

منابع مورد استفاده

1. Amani, N., M. Tajrishi and A. Abrishamchi. 2006. Simulation of stream flow by applying SWAT model and GIS. 7th International Conference on River Engineering, Shahid Chamran University, p: 8 (in Persian).
2. Abbaspour, K.C. 2009. User manual for SWAT-CUP2, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 95 pages.
3. Alansi, A.W., M.S.M. Amin, G. Abdul Halim, H.Z.M. Shafri and W. Aimrun. 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. Hydrology and Earth System Sciences, 6: 7581–7609.
4. Arnold, J.G., R. Srinisvan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, part I: model development. Journal of American Water Resources Association, 34(1): 73-89.
5. Borah, D.K. and M. Bera. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint source pollution models: review of mathematical bases. Trans. ASAE, 46(6): 1553-1556.
6. Borah, D.K. and M. Bera. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint source pollution models: review of applications. ASAE, 47(3): 789-803.
7. Heuvelmans, G., B. Muys and J. Feyen. 2004. Analysis of the spatial variation in the parameters of the SWAT model with application in Flanders, Northern Belgium. Hydrology and Earth System Sciences, 8(5): 931-939.
8. Hosseini, M. 2010. Effect of land-use changes on water balance and suspended sediment yield of Taleghan Catchment, Iran. PhD Thesis, University Putra Malaysia, 224 pages (in Persian).
9. McCuen, R.H., Z. Knight and A.G. Cutter. 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. Journal of Hydrologic Engineering, 3: 597-602.
10. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Binger, R.D. Harmel and T. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. ASABE, 50(3): 885-900.
11. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting though conceptual models. Part 1: A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
12. Neitsch. S.L, J.G Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan and J.R. Williams. 2005. Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation: Version 2005.

13. Portoghes, I., V. Uricoohio and M. Vurro. 2005. A GIS tool for hydrological water balance evaluation on a regional scale in semi-arid environments. Computers and Geoscience, 31: 15-27.
14. Schaefli, B. and H.V. Gupta. 2007. Do Nash values have value? Hydrological Processes Journal, 21: 2075–2080.
15. Schuol, J., K.C. Abbaspour, H. Yang, P. Reichert, R. Srinivasan, Ch. Schar and A.J.B. Zehnder. 2006. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic 2006 model. Journal of Hydrology, 352: 30-49.
16. Xu, Z.X., J.P. Pang., C.M. Liu and J.Y. Li. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. Hydrological Processes Journal, 23(25): 3619-3630.