علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هجدهم، ویژه نامه شماره۲، پاییز۱۳۹۵

شبیه‌سازی بارش – رواناب حوضه قره‌سو با استفاده از مدلSWAT

محمد رضا گودرزی[1]*

goodarzi6mr@gmail.com

باقر ذهبیون [2]

علیرضا مساح بوانی [3]

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۱۵ **تاریخ پذیرش:۸۸/۰۵/۰۲**

چکیده

زمینه و هدف: شبیه‌سازی بارش–رواناب در بسیاری از مطالعات هیدرولوژی، از جمله بررسی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه، پیش‌بینی سیلاب و برنامه‌ریزی منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل SWAT[4] برای شبیه‌سازی انتقال جریان، رسوب و متغیرهای کیفی (فسفر و نیتروژن و ...) در حوضه‌های آبریز استفاده می‌گردد. مدل SWAT یک مدل سری زمانی توزیعی با مبنای فیزیکی می‌باشد. این مدل قابلیت اتصال به GIS[5] را دارد، لذا حجم وسیعی از داده‌ها به‌صورت لایه‌های اطلاعاتی مانند کاربری اراضی، خاک و DEM[6] با استفاده از توانمندی‌های GIS توسط مدل بکار می‌رود. هدف اصلی از این تحقیق تست کارایی مدل SWAT به‌عنوان شبیه‌ساز جریان در سطح مقیاس حوضه آبریز می‌باشد.

روش بررسی: در این مطالعه اقدام به آماده‌سازی این مدل برای حوضه آبریز قره‌سو شده‌است. با استفاده از بهینه‌ساز SWAT-CUP اقدام به بهینه‌سازی پارامترها گردید.

یافته‌ها: در واسنجی مدل دوره ۱۹۹۶-۱۹۹۲ ضریب تعیین (R^2) شبیه‌سازی جریان ماهانه برابر ۰/۸۲ و ضریب Nash–Sutcliffe (E_{ns}) نیز برابر ۰/۸ و در دوره اعتبارسنجی ۲۰۰۰-۱۹۹۸ همین ضرایب به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۳ بدست آمد.

بحث و نتیجه‌گیری: این نتایج حاکی از موفقیت مدل با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه قره‌سو می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل توزیعی هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی بارش-رواناب، واسنجی، SWAT.

*۱- (مسوول مکاتبات): استادیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آیت ا.. بروجردی (ره)، لرستان، ایران

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

۳- استادیار دانشکده مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

4- Soil Water Assessment Tool
5- Geographic Information System
6- Digital Evaluation Method

J.Env. Sci. Tech., Vol 18, Special No.2, Autumn 2016

Simulation of Rainfall-Runoff for Gharesou Watershed Using SWAT Model

Mohammadreza Goodarzi [1]*
goodarzi6mr@gmail.com
Bagher Zahabiyoun [2]
Alireza Massah Bavani [3]

Abstract

Background and Objective: Rainfall-runoff Simulation is very important in many hydrological studies, such as investigating the effects of climate change on river flow, flood prediction and planning of water resources. SWAT model was used to simulate stream flow transport, sediment and quality variables (nitrogen and phosphorus...) in the watershed areas. SWAT model is a distributed time series model with physical basis. This model has an ability to connect to GIS, in a way that vast volumes of data as information layers such as land use, soil map and the DEM using GIS capabilities are used by the model. The main purpose of this study is testing SWAT model performance as a simulator of flow at the catchment scale.
Method: This study attempts to prepare a model for Gharesou catchment. Moreover, the parameters were optimized using SWAT-CUP optimizer.
Findings: The model was calibrated for the years 1992-1996 and validated for the years 1998-2000. The coefficient of determination (R^2) for monthly flow was equal to 0.82 and Nash-Sutcliffe coefficient (E_{ns}) was equal to 0.8 in the calibration period while in the validation period these coefficients were 0.77 and 0.73, respectively.
Conclusion: These results indicate the success of the SWAT model, using optimized parameters, for the stream flow simulation in Gharesou catchment.

Keywords: Distributed Hydrologic Model, Rainfall- Runoff simulation, Calibration, SWAT.

1- Assistant. Professor, Faculty of Civil Engineering, Ayatollah Ozma Brujerdi University, Brujerd, Lorestan, Iran.* *(Corresponding Author)*
2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor, Faculty of Water Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز جهت درک بهتر نقش فرآیندهای هیدرولوژی بکار می‌روند که حرکت آب سطحی و زیرسطحی را کنترل می‌کنند، در ضمن این مدل‌ها به ایجاد ابزارهای ارزیابی جهت تصمیم‌گیری با توجه به نتایج کیفیت آب می‌پردازند. مدل‌های حوضه آبریز به دسته‌های مختلفی اعم از مدل‌های تجربی (Empirical) در برابر فیزیکی (physical model)، مدل‌های رویدادگرا (Event Base) در برابر پیوسته (Continues) و مدل‌های متمرکز (Lumped) در مقابل پارامتر توزیعی (Distributed) طبقه‌بندی می‌شوند. انتخاب یک مدل مناسب وابسته به فاکتورهایی از قبیل توانایی شبیه‌سازی متغیرهای طراحی (رواناب سطحی، آب‌های زیرزمینی، بار رسوب و غیره) دقت، داده‌های در دسترس و مقیاس‌های مکانی و زمانی می‌باشد (۱).

مقیاس مکانی یکی از مسایل مهم در مدل‌سازی است. اعتبار شبیه‌سازی‌های مدل‌های هیدرولوژی بستگی به خوب مدل نمودن توزیع مکانی مشخصات حوضه به‌وسیله ورودی‌های مدل می‌باشد. مدل‌های یکپارچه حوضه را به‌عنوان یک واحد برای محاسبات در نظر گرفته و پارامترهای حوضه به‌صورت متوسطی از کل حوضه لحاظ می‌گردد. مدل‌های یکپارچه فقط پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبریز را در خروجی حوضه بدون لحاظ‌کردن منافع داشتن داده‌های توزیعی، شبیه‌سازی می‌کنند. نشان‌دادن تغییرات مکانی ذاتی مشخصات حوضه دلیل مناسبی برای مناسب‌بودن مدل‌های توزیعی نسبت به مدل‌های یکپارچه می‌باشد. مدل‌های توزیعی حوضه را به زیر واحدهایی (زیرحوضه، واحد پاسخ هیدرولوژیکی، شبکه) برای هدف شبیه‌سازی تفکیک نموده و برای هر واحد مشخصات و پارامترهای خود را لحاظ می‌کند. اخیرا توصیف و استخراج شبکه آبراهه‌ها با کمک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و با استفاده از مدل رقومی زمین (DEMs) می باشد (۲).

تغییرات مکانی و زمانی فاکتورهای موثر در فرایند مدل‌سازی حوضه آبریز از یک سو و حجم وسیع اطلاعات و گستردگی مکانی و زمانی داده‌ها از سوی دیگر ضرورت بکارگیری نوآوری‌های جدید همچون سنجش از راه دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) را امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به‌منظور پردازش و تحلیل اطلاعاتی که موقعیت مکانی اطلاعات برای آن‌ها مهم است خلق گردیده‌اند. ویژگی مهم دیگر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برقراری ارتباط مکانی بین لایه‌های مختلف اطلاعات می‌باشد. مدل‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز، یک پدیده مکانی گسترده است، لذا تکنیک‌های اطلاعات جغرافیایی نقش مهمی در شبیه‌سازی آن ایفا می‌نماید (۳).

مدل‌های هیدرولوژیکی با مبنای فیزیکی متفاوتی برای شبیه‌سازی رابطه بارش–رواناب تحت مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت طراحی شده‌است. تعدادی از مدل‌ها اقدام به لحاظ نمودن ناهمگنی ناشی از توزیع توپوگرافی، کاربری اراضی، مشخصات خاک، بارش و تبخیر و تعرق در سطح حوضه آبریز نموده‌اند. مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) یکی از مدل‌های حوضه آبریز می‌باشد که نقش اصلی در تجزیه و تحلیل اثر تغییرات مدیریتی زمین بر آب در حوضه‌های پیچیده را بازی می‌کند. این مدل به‌صورت وسیعی در مناطق مختلف دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرور جامعی از کاربردهای این مدل توسط Gassman و همکاران در سال ۲۰۰۷ صورت گرفته‌است (۴). توانایی مدل‌های حوضه آبریز برای شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژی با آنالیز حساسیت پارامترها، واسنجی مدل و صحت‌سنجی مدل ارزیابی می‌گردد.

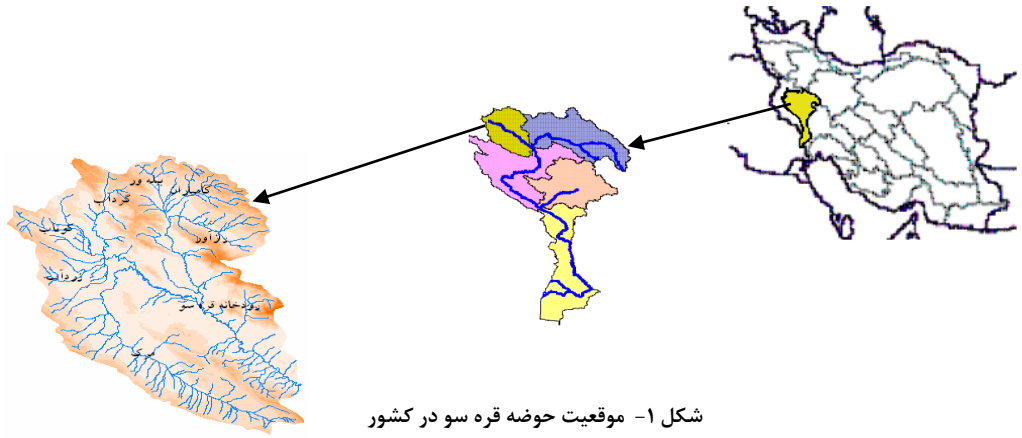
Abbaspour و همکاران در تحقیقی در سال ۲۰۰۶ در حوضه آبریز رودخانه Thur (۱۷۰۰ کیلومتر مربع) در شمال‌غربی کشور سوییس اقدام به بررسی و تست کارایی مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان و آلاینده‌های انتقالی (فسفر و ...) در این حوضه آبریز نمودند. برای واسنجی مدل از برنامه بهینه‌ساز پارامترها SUFI-2 استفاده نمودند. مقایسه آمارهای متغیرهای مشاهداتی و محاسباتی نشان از توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی جریان و کیفیت داد (۵). در این تحقیق اقدام به تست کارایی مدل SWAT به‌عنوان شبیه‌ساز جریان برای حوضه آبریز قره‌سو شده‌است.

روش بررسی

مشخصات منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کرخه به مساحت ۵۰۷۶۴ کیلومتر مربع در غرب کشور، در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس بین '۰۶ °۴۶ و '۱۰ °۴۹ طول شرقی و '۵۸ °۳۰ و '۵۶ °۳۴ عرض شمالی قرار گرفته‌است. حدود ۲۷۶۴۵ کیلومتر مربع آن کوهستانی و حدود ۲۳۱۱۹ کیلومتر مربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل می‌دهند. مناطق کوهستانی این حوضه غالبا در بخش‌های شرقی و میانی متمرکزند و دشت‌ها که عموما در بخش‌های شمالی و جنوبی قرار دارند حدود ۴۵ درصد از وسعت کل حوضه را می‌پوشانند.

زیرحوضه قره‌سو در شمال غربی حوضه کرخه و در غرب ایران واقع شده‌است (شکل شماره۱). مساحت آن برابر ۵۳۵۴ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به ترتیب ۳۳۴۶ و ۱۱۸۰ متر می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه آن بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. سه رودخانه اصلی در این حوضه جریان دارند که عبارتند از رودخانه مرک، رودخانه قره‌سو و رودخانه رازآور (۶).



شکل ۱- موقعیت حوضه قره سو در کشور

Figure 1- Location of Gharesou watershed

معرفی مدل SWAT

مدل‌های زیادی برای ارزیابی هیدرولوژی حوضه وجود دارند که توسط مدیران منابع آب، تصمیم گیرنده‌ها و محققین بکار می‌روند. این مدل‌ها کمک بزرگی در تخمین تأثیر بر رواناب از یک برنامه توسعه خاص ایجاد می‌کنند. مدل‌های پیوسته جریان می‌توانند درک بهتری از پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبریز در اثر تغییر اقلیم و تغییر پوشش گیاهی ناشی از آن ایجاد کنند.

مدل‌های حوضه آبی را می‌توان براساس نحوه مواجهه با مولفه‌های مکانی مربوط به هیدرولوژی حوضه به دو دسته کلی تقسیم بندی نمود. مدل‌های توده ای (Lumped) که کل حوضه را بدون احتساب تغییرات مکانی در فرآیندها، ورودی، شرایط مرزی، یا ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه، به‌عنوان یک واحد یکپارچه در نظر می‌گیرند. در مقابل، مدل‌های توزیعی (Distributed) که با حل معادلات حاکم برای هر پیکسل در شبکه حوضه، تغییرات مکانی را نیز لحاظ می‌کنند (۷).

مدل SWAT جهت شبیه‌سازی اثرات فعالیت‌های مدیریتی اراضی بر آب، ایجاد رسوب و عوامل شیمیایی کشاورزی در مقیاس حوضه آبریز با تنوع خاک، پوشش اراضی و شرایط مدیریتی در بازه زمانی طولانی توسعه یافته‌است. این مدل یک مدل فیزیکی-توزیعی است و به جای آن‌که از معادلات رگرسیونی جهت توصیف رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده نماید، اطلاعات ویژه‌ای راجع به هوا، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و پوشش اراضی در حوضه آبریز دریافت می‌کند.

این مدل از نظر محاسباتی کارآمدی مناسبی دارد. شبیه‌سازی حوضه‌های بسیار بزرگ یا با تنوع استراتژی مدیریتی را می‌توان بدون صرف هزینه یا زمان اضافی انجام داد. این مدل کاربران را قادر به شبیه‌سازی طولانی مدت می‌نماید. SWAT از نظر زمانی یک مدل پیوسته است. این مدل به‌صورت یک الحاقی (Extension) تحت نرم‌فزارهای GIS می‌باشد و از قابلیت‌های آن بهره می‌گیرد. دراین مدل فیزیک حرکت آب و رسوب، رشد گیاه، چرخه عناصر و جهت شبیه‌سازی، به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود.

ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) به‌طور گسترده برای مطالعات مقیاس حوضه آبریز در ارتباط با کیفیت و کمیت آب مورد استفاده قرار گرفته‌است.

SWAT یک مدل شبیه‌سازی پارامتر توزیعی مبتنی بر فرآیند است که روی یک گام زمانی روزانه عمل می‌کند. SWAT حوضه آبریز را به زیرحوضه‌های آبریز تقسیم می‌کند که با هر کدام به‌عنوان یک واحد مجرد رفتار می‌کند. مدل همچنین با پیکربندی مدل‌سازی USEPA[1] برای منابع غیر نقطه‌ای و نقطه‌ای (BASINS) یکپارچه شده‌است. این چهارچوب برای کاربران یک ابزار توصیف حوضه آبریز ایجاد می‌کند که به کاربران این امکان را می‌دهد که به‌طور اتوماتیک حوضه آبریز را براساس مدل رقومی زمین (DEM) توصیف کند. مدل SWAT نیاز دارد که برای حوضه مورد مطالعه جهت تضمین این‌که پارامترهای مدل نماینده‌ای برای ناحیه مطالعه هستند، واسنجی و اعتبارسنجی گردد.

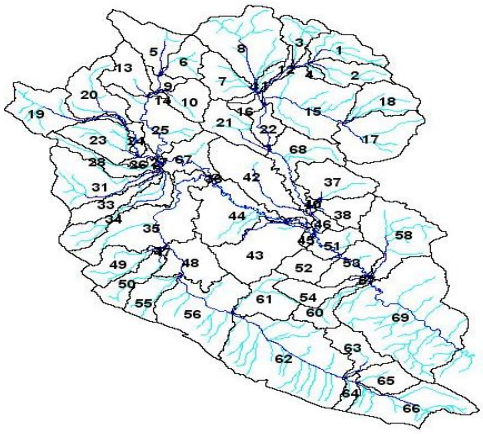
مدل SWAT در شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی از معادله توازن هیدرولوژیک زیر استفاده می‌کند:

$$\Delta SW = \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (۱)$$

در این رابطه Δ SW = آب ذخیره‌شده در خاک، Rday = بارش روزانه، Qsurf = رواناب سطحی، Ea = تبخیر و تعرق واقعی، Wseep = آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیر اشباع وارد می‌شود و Qgw = جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه می‌باشد.

در مدل SWAT زیرحوضه‌ها به بخش‌های پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) تقسیم می‌شوند که بخش‌هایی از زیرحوضه‌ها با پوشش‌ها، مدیریت و خصوصیات خاک می‌باشد. SWAT از روش عدد منحنی اصلاح‌شده (USDA Soil Conservation Service, 2001) یا روش نفوذ Green and Ampt جهت محاسبه حجم رواناب سطحی برای هر HRU استفاده می‌کند تقسیمات زیرحوضه‌ها برای حوضه قره‌سو در شکل شماره ۲ نشان داده شده‌است (۸و۹).

1- US Environmental Protection Agency



شکل ۲- تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها در حوضه قره‌سو با استفاده از مدل SWAT

Figure 2- Classification of sub-basins in Gharesou watershed using SWAT model

این مدل به‌علت پیچیدگی، توزیعی بودن و لحاظ کردن اکثر عوامل موثر در فرآیند بارش–رواناب دارای پارامترهای متعددیست که تعدادی از مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی عبارتند از:

۱) پارامترهای مهم در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف

SFTMP: دمای متوسط هوا برای تبدیل باران به برف (۵+ تا ۵) ،

SMTMP: دمای توده برف هنگامی که ذوب برف آغاز می‌گردد (۵+ تا ۵-) ،

TLAPS: کاهش دما در هر کیلومتر افزایش ارتفاع (۰ تا ۵۰) ،

ELEVB: ارتفاع مرکز باندهای ارتفاعی (۰ تا ۸۰۰۰) ،

ELEVB_FR: درصدی از مساحت زیرحوضه که در هر باند ارتفاعی وجود دارد (۰ تا ۱)

SMFMX: حداکثر ذوب برف در اثر یک درجه سانتی‌گراد تغییر دما (۰ تا ۱۰)

SMFMN: حداقل ذوب برف در اثر یک درجه سانتی‌گراد تغییر دما (۰ تا ۱۰).

۲) پارامترهای مهم در مشخصات رودخانه‌ها

CH-N (1) و CH-N (2): ضریب مانینگ مواد بستر رودخانه‌ها،

CH-K (1) و CH-K (2): هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه‌ها

۳) پارامترهای مؤثر در تعیین رواناب سطحی

SURLAG: فاکتور تأخیر رواناب سطحی (۱ تا ۲۴) ،

CN2 یا شماره منحنی در روش SCS (۳۵ تا ۹۸).

۴) پارامترهای بکار رفته جهت تعریف و شناسایی وضعیت واحدهای هیدرولوژیکی

OV-N: ضریب مانینگ رواناب سطحی (۰/۰۱ تا ۳۰) ،

LAT-TIME: زمان تأخیر جریان‌های زیرسطحی (۰ تا ۱۸۰).

۵) پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

GW-DELAY: زمان رسیدن آب از آخرین لایه خاک به سفره آب زیرزمینی (۰ تا ۵۰۰) ،

GW-REVAP: ضریب قابلیت نفوذ به سفره آب زیرزمینی عمیق یا انتقال آب از سفره آب زیرزمینی کم عمق توسط موئینگی (۰/۰۲ تا ۰/۲) ،

REVAPMN: حداقل ذخیره لازم در سفره آب زیرزمینی کم عمق که برای رخ دادن REVAP لازم است (۰ تا ۵۰۰) ،

GWQMN: حداقل ذخیره لازم در سفره آب زیرزمینی کم که برای رخ دادن جریان پایه لازم است (۰ تا ۵۰۰۰)،

AL PHA-BF: ضریب آلفای آب زیرزمینی (۰ تا ۱).

ورودی‌های مدل

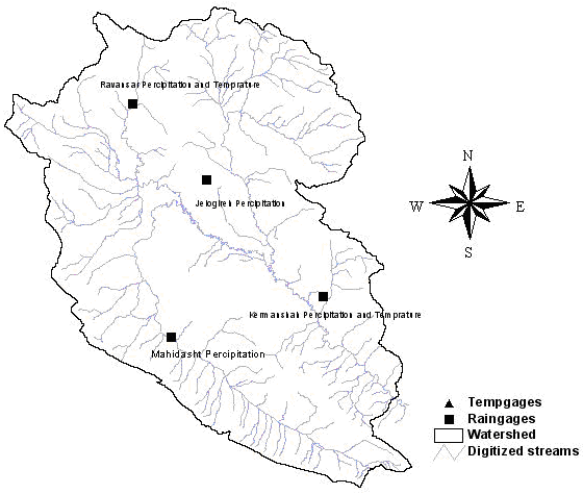
برای آماده‌سازی مدل بارش-رواناب لازم است از داده‌های با اعتبار مناسب استفاده شود. وجود خطا در داده‌های ورودی مدل می‌تواند از عوامل مهم خطا در پارامترهای تخمینی مدل و جریان شبیه‌سازی‌شده باشد.

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز مدل عبارتند از بارش، دمای حداقل و حداکثر روزانه (دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ میلادی) که به‌صورت فایل اطلاعاتی (dbf.) به مدل معرفی شده‌است. سایر اطلاعات هواشناسی مورد نیاز عبارتند از تابش، سرعت باد، رطوبت نسبی که در این تحقیق توسط مدل شبیه‌سازی شده‌اند. داده‌های بارندگی از آمار دو ایستگاه باران‌سنجی ماهیدشت و جلوگیره و دو ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه و روانسر و دمای روزانه از آمار دو ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه و روانسر به‌دست آمده‌است. همچنین ایستگاه هیدرومتری قره‌باغستان واقع در خروجی حوضه قره‌سو به‌عنوان ایستگاه مبنا برای مشاهده تغییرات رواناب حوضه انتخاب گردید (جدول ۱ و شکل ۳).

جدول۱- مشخصات ایستگاه‌های استفاده‌شده حوضه قره‌سو

Table 1- Information of used stations of Gharesou watershed

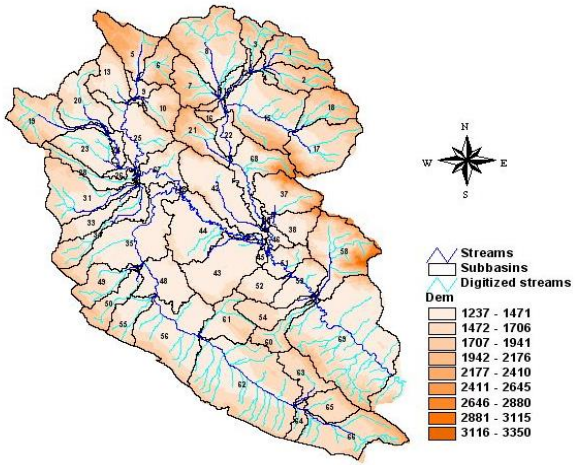
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع (m)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
کرمانشاه	سینوپتیک	۱۳۱۸/۶	۹ ۴۷	۲۱ ۳۴
روانسر	سینوپتیک	۱۳۷۹/۷	۳۹ ۴۶	۴۳ ۳۴
جلوگیره	بارانسنجی	۱۱۸۰	۵۱ ۴۶	۳۵ ۳۴
ماهیدشت	بارانسنجی	۱۴۱۵	۴۹ ۴۶	۱۶ ۳۴
قره‌باغستان	هیدرومتری	۱۲۳۰	۱۵ ۴۷	۱۴ ۳۴



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های استفاده‌شده

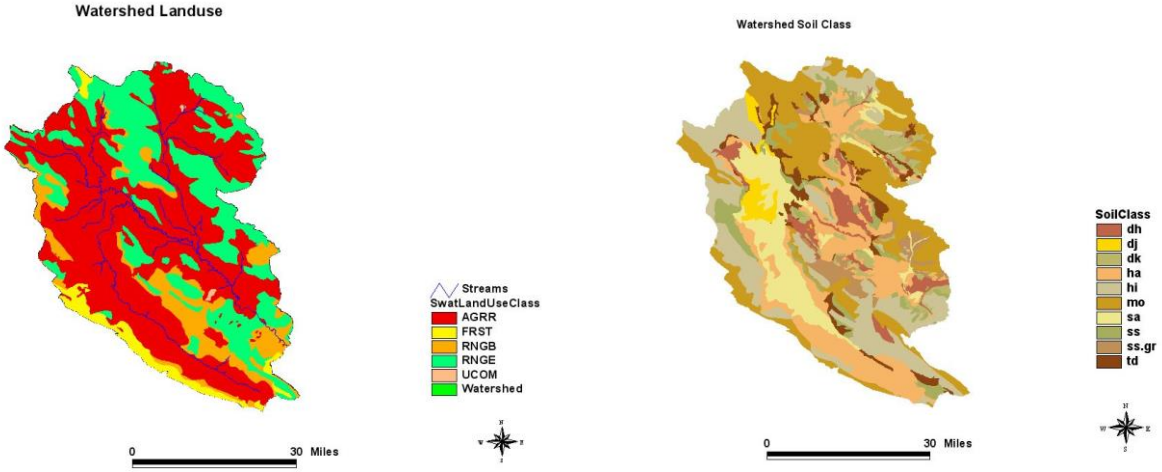
Figure 3- Location of used stations

داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی توسط مدل SWAT عبارت‌اند از توپوگرافی، آب و هوا، پوشش گیاهی، خاک و داده‌های مدیریتی. اطلاعات توپوگرافی به‌صورت مدل ارتفاع رقومی (DEM)، این لایه باید به‌صورت رستر و سیستم مختصات جغرافیایی مشخص به مدل وارد شود (شکل شماره۴). مدل با درنظر گرفتن این رقوم ارتفاعی قادر به تعیین محل آبراهه‌ها، رودخانه-ها و حوضه آبریز هرکدام از آن‌ها با دقت دلخواه می‌باشد. بدین ترتیب که با وارد کردن مقدار «حداقل مساحت دلخواه»، منطقه مورد نظر به زیرحوضه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌گردد، به‌طوری‌که مساحت هیچ یک از زیرحوضه‌ها از مقدار حداقل تعیین‌شده توسط کاربر، کمتر نشود. نقشه کاربری اراضی و خاک به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (اندازه پیکسل‌ها ۵۰×۵۰ متر) از مؤسسه حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی تهیه گردیده‌است (۶). نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای استخراج گردیده‌است. این اطلاعات بعد از پردازش در محیط GIS به‌صورت فایل‌های رستری (Grid) در مدل SWAT مورد استفاده در مدل قرار گرفتند (شکل۵).



شکل ۴- مدل رقوم ارتفاعی حوضه

Figure 4- Digital Evaluation Model of watershed



شکل۵- نقشه کاربری اراضی (سمت چپ) و نوع خاک حوضه آبریز (سمت راست)

Figure 5- Land use map (left) and soil class map (right)

آماده‌سازی مدل و نتایج

واسنجی مدل‌های شبیه‌سازی حوضه آبریز دارای مسایل زیادی است زیرا که عدم قطعیت‌ها در شکل‌هایی از جمله، ساده‌سازی فرآیندها، فرآیندهایی که در نظر گرفته نشده‌اند، فرآیندهایی در حوضه آبریز که برای مدل‌سازی مشخص نبوده‌اند موجود هستند. مثال‌هایی از موارد اشاره‌شده عبارتند از: اثر یک مخزن بر هیدرولوژی مواد انتقالی رودخانه، اثر تداخلی مابین آب‌های سطحی و زیرزمینی، اثر ساخت سازه‌هایی مثل سد و پل که می‌تواند در الگوی جریان و میزان رسوب تاثیرات شدیدی داشته‌باشد، جریان تخلیه فاضلاب به رودخانه که معلوم نباشد و موارد دیگری از جمله برنامه‌های مدیریت آبیاری کشاورزی (۵). با توجه به عدم قطعیت‌های مختلف و توزیعی بودن مدل واسنجی این مدل برای حوضه آبریز مساله مهمی می‌باشد.

برای واسنجی مدل قسمتی از داده‌های اقلیمی و هیدرومتری مشاهداتی مورد استفاده قرار می‌گیرد . به این ترتیب پس از ورود داده‌ها به مدل و شبیه‌سازی جریان رودخانه، اقدام به مقایسه با جریان مشاهداتی جریان رودخانه می‌گردد. در این مرحله مقادیر پارامترها، به روشی هدفمند، آنقدر تغییر داده می‌شود که جریان شبیه‌سازی‌شده تا حد مطلوب به جریان مشاهداتی نزدیک گردد. اجرای مدل هنگامی موفقیت‌آمیز تلقی می‌شود که مقدار تابع هدف به‌عنوان معیار اندازه‌گیری کارایی مدل، بهینه شود. پس از کالیبراسیون، اعتبار مدل با پارامترهای به‌دست‌آمده در مرحله کالیبراسیون، با استفاده از داده‌های مشاهداتی که در قسمت واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته‌است، سنجیده می‌شود .در صورت شبیه‌سازی قابل‌قبول، مدل برای کاربرد آماده‌است (۱۰و۱۱).

واسنجی اتوماتیک مدل (calibration Automated model) نیاز به تغییر سیستماتیک پارامترهای غیرقطعی (uncertain) و بعد از شبیه‌سازی مدل نیاز به داده‌های مشاهداتی خروجی مرتبط با داده‌های محاسباتی دارد.

مهم‌ترین تابع فراهم نمودن تداخل ارتباط مابین ورودی خروجی برنامه واسنجی و مدل می‌باشد. SWAT-CUP یک برنامه بهینه‌ساز ارتباط‌دهنده می‌باشد که برای مدل SWAT توسعه داده شده‌است. که با استفاده از آن واسنجی و تحلیل عدم قطعیت‌های مدل SWAT به راحتی انجام‌پذیر است (۱۲).

پارامترهای متعددی جهت واسنجی مدل انتخاب گردیده‌است (جدول شماره ۲). این پارامترها با توجه به واسنجی جریان رودخانه با استفاده از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری قره‌باغستان تنظیم گردیده و با توجه به تحقیقات قبلی در زمینه کالیبراسیون مدل SWAT انتخاب شده‌اند (۱۳و۱۴). جدول (۲) مقدار به‌دست‌آمده برای پارامترهای بهینه‌شده در مرحله واسنجی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این جدول پارامتر CN2 به‌صورت ضریبی از مقادیر اولیه در زیرحوضه بهینه شده‌است. واسنجی مدل از سال ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۶ میلادی با تابع هدف‌های مقدار ضریب تعیین (R^2) شبیه‌سازی جریان ماهانه، ضریب Nash–Sutcliffe (E_{ns}) میانگین جریان ماهانه و واریانس جریان‌های ماهانه صورت گرفت. ارزیابی مدل از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ میلادی انجام گرفت که نتایج در جدول شماره ۳ ارائه گردیده‌است. شکل‌های شماره (۶)و (۷) نشان‌دهنده نتایج واسنجی و ارزیابی مدل می‌باشند.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})(S_i-\overline{S})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2\sum_{i=1}^{n}(S_i-\overline{S})^2} \quad (۲)$$

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

در این روابط $\overline{O}$ و $\overline{S}$ به ترتیب متوسط دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده‌است.

جدول۲- مقدار نهایی پارامترهای بکار رفته در مدل‌سازی

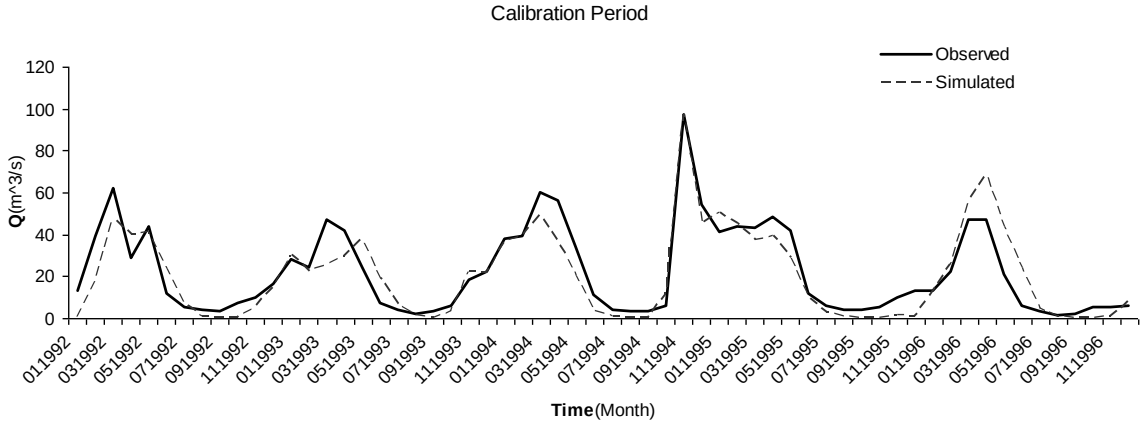
Table 2- The final value of used parameters in modeling

پارامتر	تعریف پارامتر	محدوده تغییرات	مقدار نهایی
SMTMP	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (°C)	±۵	۲,۳۷۵
SMFMN	نرخ ذوب برف در ۲۱ دسامبر(mmH2O/°C- day)	۰-۱۰	۴,۶۱۵
ESCO	فاکتور تبخیر آب ازخاک	۰/۰۱-۱	۰,۶۴۱۸
ALPHA-BF	ضریب آلفای آب زیرزمینی	۰ -۱	۰,۰۱۵۴۲
GW-REVAP	ضریب تعیین نفوذ به سفره آب زیر زمینی عمیق یا صعود موئینگی از سفره آب کم عمق	۰,۰۲-۰,۲	۰,۱۷۷۲
SOL_AWC(1)	آب موجود در لایه اولیه خاک	۰-۱	۰,۱۲۲۵
CN2	عدد CN	۲۰-۹۰	-۰,۲۲
CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر در کانال اصلی	۰-۱۵۰	۳,۲۶۲۵
REVAPMN	حداقل ذخیره آب زیرزمینی برای رخ دادن REVAP (mmH2O)	۰-۵۰۰	۱۰۵,۸۷۵

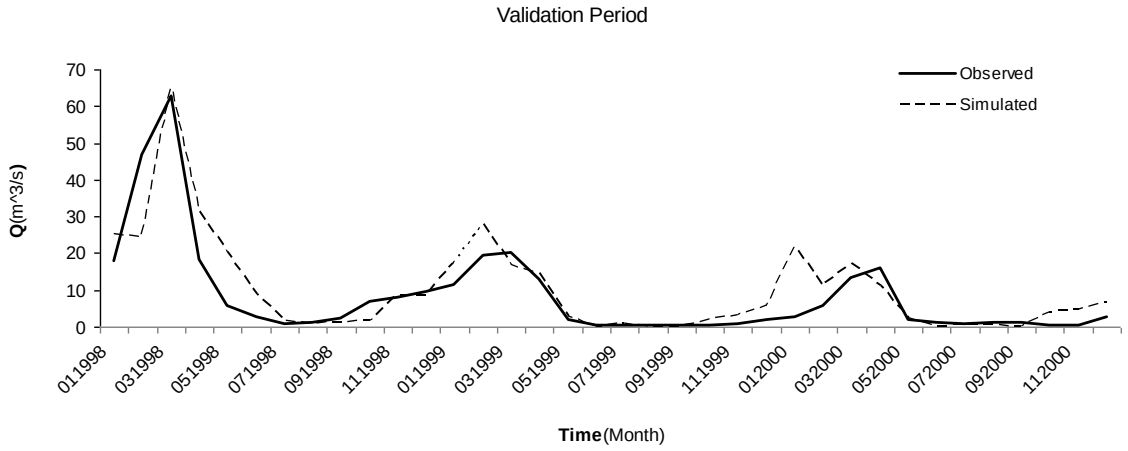
جدول۳- نتایج واسنجی و ارزیابی مدل SWAT برای شبیه سازی جریان ماهانه حوضه

Table 3- Results of calibration and validation of SWAT model for basin's monthly flow simulating

دوره واسنجی(۱۹۹۶-۱۹۹۲)							دوره ارزیابی(۲۰۰۰-۱۹۹۸)					
تابع هدف	R^2	E_{ns}	Q_o	Q_s	VAR_o	VAR_s	R^2	E_{ns}	Q_o	Q_s	VAR_o	VAR_s
مقدار	۰/۸۲	۰/۸	۲۲/۱	۲۰/۲۱	۴۳۲/۱۶	۴۴۰/۲۵	۰/۷۷	۰/۷۳	۸/۳۱	۱۰/۱۷	۱۷۴/۳۲	۱۷۲/۵۳



شکل ۶- نتایج واسنجی مدل SWAT برای شبیه سازی جریان ماهانه حوضه در دوره ۱۹۹۶-۱۹۹۲
Figure 6- Results of calibration of SWAT model for basin's monthly flow in 1992-1996 period



شکل ۷- نتایج ارزیابی مدل SWAT برای شبیه سازی جریان ماهانه حوضه در دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۸
Figure 7- Results of validation of SWAT model for basin's monthly flow in 1998-2000 period

بحث و نتیجه گیری

هدف این مطالعه استفاده از یک مدل پیوسته توزیعی بارش-رواناب به‌منظور شبیه‌سازی جریان و کمک از یک برنامه بهینه‌سازی برای بهتر واسنجی‌نمودن مدل بود. در این مطالعه با استفاده از مدل بارش-رواناب فیزیکی SWAT جریان رودخانه حوضه قره‌سو، از زیرحوضه‌های کرخه، شبیه‌سازی شد. پارامترهای این مدل از طریق واسنجی، با استفاده از داده‌های مشاهداتی حوضه به دست آمد. با توجه به پیچیدگی مدل و تعداد زیاد پارامترها و در نتیجه صعوبت مشخص نمودن مقادیر بهینه پارامترها به روش دستی در به‌دست‌آوردن مقادیر بهینه پارامترها از برنامه اتوماتیک SWAT-CUP برای واسنجی مدل استفاده گردید.

در مرحله واسنجی مدل، ضریب ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۸۲و ضریب Nash–Sutcliffe (E_{ns}) نیز برابر ۰/۸ به‌دست آمد. در مرحله ارزیابی نیز این مقادیر به‌ترتیب برابر ۰/۷۷و ۰/۷۳ به‌دست آمد. ضمن آن‌که آمارهای جریان مشاهداتی نیز با تقریب خوب در جریان شبیه‌سازی‌شده حفظ شد. این نتایج حاکی از موفقیت مدل با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه قره‌سو می‌باشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، مدل SWAT به‌عنوان مدلی معقول برای شبیه‌سازی بارش- رواناب در حوضه آبریز قره‌سو ارزیابی گردید.

مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس حوضه آبریز (Large-scale watershed models) می‌توانند به‌عنوان ابزاری موثر برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی بکار رفته و در مطالعات مدیریت منابع آب از نتایج آن‌ها استفاده گردد.

منابع

1- Singh, V.P., 1995. Watershed modeling. Singh, V.P. ed., Computer Models of Watershed Hydrology (1st Edition), 1-22. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.

2- Band, L.E., Moore, I.D., 1995. Scale: landscape attributes and geographical information systems, in: scale issues in hydrological modeling (Eds.) Kalma, J.D. and M. Sivapalan, John Wiley & Sons.

3- Moore, I.D., O'Loughlin, E.M., Burch, G.J., 1988. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. Earth Surface Processes Landforms, 13: 305-320.

4- Shimelis, G., Setegn, R., Srinivasan, A., Melesse, M., Bijan, D., 2010. SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia, Hydrol. Process. 24, 357–367.

5- Abbaspour, K.C., Yang, J., 2006. A calibration and uncertainly analysis program for SWAT. Swiss Federal Institute of Aquatic Scientific and Technology.

۶- موسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی و اقتصاد کشاورزی. مطالعات مرحله اول ساماندهی دشت‌ها، دشت ماهیدشت-سنجابی، (۱۳۸۲).

7- Wood, E.F., Sivapalan, M., Beven, K., Band, L., 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. Journal of Hydrology, 102: 29-47.

8- Arnold, J.G., Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling Hydrological Processes, 19(3):563-572.

9- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W., 2002. SWAT Manual. USDA, Agricultural Research Service and Blackland Research Centre: Texas A&M University, USA.

10- Reynard, N.S., 2003. Impact of climate change on flood flows in river catchments – interim report.

۱۱- ذهبیون، باقر و گودرزی، محمدرضا. شبیه‌سازی جریان روزانه با مدل پیوسته بارش-رواناب (ARNO). کنفرانس بین‌المللی نیروگاه‌های آبی، ۱۳۸۶.

12- 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

13- Kati, L., White, Indrajeet. C., (2005). Sensitivity Analysis, Calibration, and Validations for a Multisite and Multivariable SWAT Model, Journal of the American Water Resources Association. (JAWRA) 41(5):1077-1089.

14- Omani, N., Tajrishy, M., Abrishamchi, A., 2007. Modeling of a River Basin Using SWAT Model and SUFI- 4th International Conference of SWAT Model Delft, Netherlands.