



Investigating SWAT Model Efficiency to Determine Water Balance Components (Case Study: Semirrom Mehrgerd Watershed)

Z. Nouri¹, A. Talebi^{2*}, and M.A. Asadi³

Abstract

In this research, water balance components in Mehrgerd watershed was simulated using the SWAT hydrological model to investigate the model efficiency and its ability to use as a water balance simulator in the Mehrgerd watershed. For this purpose, the necessary data such as precipitation, minimum and maximum temperatures, relative humidity, sunshine hours, daily wind speed, and monthly discharge as well as required maps including digital elevation model (DEM), land use, and soil were provided. A sensitivity analysis was done using the OAT method to determine the sensitive parameters. The calibration and validation of the model were conducted by Sufi-2 algorithm respectively for the periods of 2004 to 2012 and 2013 to 2016. Monthly runoff simulation accuracy was calculated using the determination coefficient (R^2) and Nash Sutcliffe (NSE) index which were 0.73 and 0.69 for calibration and 0.71, 0.58 for validation, respectively. The results showed that 64% of precipitation enters the atmosphere through evapotranspiration and approximately 31% of it goes to the waterway as the surface runoff and lateral flow. Finally, from 6 % of water entered into the soil layers, about 1% joins the underground water. The results of this research showed the acceptable performance of the SWAT model to simulate the water balance in Mehrgerd watershed and the model can be used for water resources planning in this study area.

Keywords: Hydrological Simulation, Hydrological Response Unit, Surface Runoff, Water Balance.

Received: December 30, 2018

Accepted: June 13, 2019

بررسی کارایی مدل SWAT در تعیین مؤلفه‌های بیلان آب حوضه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز مهرگرد سمیرم)

زهرا نوری^۱، علی طالبی^{۲*} و محمدامین اسدی^۳

چکیده

در این پژوهش، مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه آبخیز مهرگرد با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT شبیه‌سازی شد. هدف اصلی این پژوهش، آزمون کارایی مدل و قابلیت استفاده از آن به‌عنوان شبیه‌ساز بیلان آب در حوضه آبخیز مهرگرد می‌باشد. به همین منظور اطلاعات لازم شامل بارش، حداقل و حداکثر دما، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، سرعت باد روزانه و دبی ماهانه و همچنین نقشه‌های مورد نیاز شامل مدل رقمی ارتفاعی (DEM)، کاربری اراضی و خاکشناسی تهیه شد. آنالیز حساسیت با استفاده از روش هر بار یک پارامتر (OAT) به‌منظور مشخص کردن پارامترهای حساس مدل انجام پذیرفت. در ادامه به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل از الگوریتم Sufi-2 استفاده شد. فرآیند واسنجی برای بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ و فرآیند اعتبارسنجی برای بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ انجام شد. دقت شبیه‌سازی رواناب ماهانه با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2) و نش-ساتکلیف (NSE) برای فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۷۳، ۰/۶۹ و ۰/۷۱، ۰/۵۸ مشاهده شد. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط حدود ۶۴ درصد بارش از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر می‌شود. حدود ۳۱ درصد آن به‌صورت رواناب سطحی و جریان جانبی و بازگشتی مستقیماً به آبراهه‌ها وارد می‌شود. در نهایت از شش درصد آب وارد شده به لایه‌های خاک، نزدیک یک درصد آن به سفره‌های عمیق آب زیرزمینی می‌پیوندد. نتایج حاصل از پژوهش، نشان‌دهنده کارایی قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبخیز مهرگرد است. بنابراین این مدل می‌تواند برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر منابع آب این منطقه راهگشای مناسبی باشد.

کلمات کلیدی: بیلان آب، رواناب سطحی، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، واحد پاسخ هیدرولوژیکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۲۳

1- M.Sc. Graduate in Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran.

2- Professor, Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran. Email: talebisf@yazd.ac.ir

3- Assistant Professor, Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.

۲- استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.

۳- استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

در راستای تأمین و بهره‌برداری از منابع آب در زمینه‌های مختلف مصرف، برنامه‌ریزی اصولی با هدف استفاده پایدار از این منابع لازم است و بدین منظور پتانسیل‌های آبی مناطق مورد نظر بایستی به خوبی ارزیابی شود. دستیابی به این مهم نیز جز با تهیه بیان دقیق آب و ارزیابی پتانسیل آن امکان‌پذیر نخواهد بود (Javanmard et al., 2017). امروزه با توجه به اهمیت شناخت و آگاهی از وضعیت بیان آبی و تحلیل رفتار هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز خصوصاً حوزه‌های آبخیز بدون آمار، برای برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های آبی، لزوم استفاده از فناوری‌های نوین در پیش‌بینی مؤلفه‌های بیان آبی بیش از پیش مشهود می‌باشد (Artimani et al., 2017). مهار آب‌های سطحی خصوصاً در کشور ما که مسأله کمبود آب در پهنه وسیعی از آن وجود دارد، از اهمیت و حساسیت زیادی برخوردار است. عدم وجود تشکیلات منسجم به‌منظور ثبت تغییرات سیستم هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز کشور، قرار گرفتن بیشتر رودها در مناطق خشک و نیمه خشک، وضعیت بحرانی برداشت از آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی، همه و همه دلایل بیشتر و ظریف‌تری می‌باشد که به مقوله شبیه‌سازی و پیش‌بینی، جلوه و نمودی کامل‌تر می‌بخشد (Hosseini, 2014). در سال‌های اخیر مدل‌هایی با ماهیت نیمه‌توزیعی ارائه شده‌اند که در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفق عمل کرده‌اند. یکی از این مدل‌های نیمه‌توزیعی که در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته، مدل هیدرولوژیکی SWAT است (Dowlatabadi and Zomorodian, 2014). با توجه به گستردگی استفاده از مدل SWAT در شبیه‌سازی اجزاء بیان آب حوزه‌های آبخیز، مطالعات زیادی در داخل و خارج کشور انجام شده است که در این رابطه می‌توان به چندین مورد اشاره کرد.

Chentha et al. (2011) با هدف پیش‌بینی مقادیر روزانه رواناب، رسوب و کربن آلی حوزه آبخیز کشاورزی در جنوب غرب فرانسه از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل SWAT مقادیر روزانه رواناب را بهتر از مقادیر روزانه رسوب شناسایی کرده است. Santra and Das (2013) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه در حوزه آبخیز رودخانه چیلیکا در کشور هند استفاده کردند. ضرایب نش و مربعات خطا در دوره واسنجی به ترتیب ۷۲ درصد و ۵۴۵ درصد و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۸۸ درصد و ۶۶۱ درصد به‌دست آمد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در حدود ۶۰ درصد بارش در این حوزه آبخیز به رواناب تبدیل می‌شود. Hosseini (2014) در پژوهشی بیان آبی حوزه آبخیز قره‌سو، واقع در استان کرمانشاه را با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کرد. دقت

شبیه‌سازی ماهانه با استفاده از شاخص نش- ساتکیف در دوره واسنجی ۵۶ درصد و با شاخص R^2 معادل ۶۰ درصد و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۶۰ درصد و ۶۵ درصد به دست آمد. نتایج حاکی از کارایی مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی بیان آبی و بررسی اثرات اقدامات مختلف مدیریتی و یا تغییرات اقلیمی بر دبی جریان آبخیز قره سو می‌باشد. (Hajihoseini et al. 2015) در پژوهشی با هدف ارزیابی تغییرات متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی در بالادست حوضه هیرمند طی سده گذشته از داده‌های اقلیمی CRU و مدل SWAT استفاده کردند. معیارهای آماری R^2 و NS برای دوره واسنجی ۰/۷۲ و ۰/۶۹ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۷۹ و ۰/۸ به‌دست آمد. بر این اساس نتایج توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان حوضه بالادست هیرمند با استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی CRU را نشان داد. (Zare Garizi and Talebi 2016) در تحقیقی بیان آبی حوضه قره سو استان گلستان را با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل، به طور متوسط حدود ۶۷ درصد بارش از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر می‌شود، ۱۷ درصد آن به‌صورت رواناب سطحی و جریان جانبی به آبراه‌ها وارد می‌شود و ۱۶ درصد نفوذ یافته و وارد سفره زیرزمینی می‌شود. نتایج نشان داد که مدل SWAT بیان آبی حوضه قره‌سو را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. (Havrylenko et al. 2016) آب موجود در خاک را توسط مدل SWAT مورد ارزیابی قرار دادند، دریافتند که این مدل با توجه به مقدار محک‌های آماری R^2 و نش-ساتکیف که به ترتیب اعداد ۷۷ درصد و ۷۵ درصد گزارش شده بود، یک ابزار مناسب برای تخمین مقدار آب موجود در خاک در مناطق با اطلاعات ضعیف است. (Ebrahimi et al. 2018) در پژوهشی با هدف آزمون کارایی مدل SWAT، رواناب حوزه آبخیز نکا را با استفاده از الگوریتم SUFI-2 شبیه‌سازی کردند. نتایج کلی واسنجی نشان می‌دهد که مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز نکا باشد. (Rivas-Tabares 2019) در پژوهشی از مدل SWAT برای بررسی بیان آب حوزه آبخیز Cega-Eresma-Adaja استفاده کردند. ضریب نش- ساتکیف برای دوره واسنجی ۸۶ درصد و برای دوره اعتبارسنجی ۶۷ درصد به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده حاکی از عملکرد بالای مدل در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های بزرگ مقیاس بخصوص مناطقی با شرایط نیمه خشک سرد می‌باشد. (Mehrparvar et al. 2019) در پژوهشی با هدف شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب حوضه آبریز چالکروود از مدل SWAT استفاده کردند. به‌منظور به‌روزرسانی و اصلاح تولید منابع خطا، تکنیک داده‌گواری فیلتر کالمن مجموعه‌ای (EnKF) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که ضریب NS برای مدل اصلاحی

معادل ۰/۸۶ است. همچنین این مقدار برای دوره صحت‌سنجی ۰/۸۲/ ارتقاء یافته است. بر این اساس مدل SWAT عملکرد بهتری نسبت به مدل توسعه‌یافته بدون تکنیک EnKF از خود نشان داده است.

اگرچه کارایی مطلوب مدل SWAT در ارتباط با بررسی شرایط هیدرولوژیکی بعضی از حوضه‌های داخل و خارج از کشور به اثبات رسیده است اما این موضوع به طور صد در صد قابل تعمیم به تمام حوضه‌ها با شرایط اقلیمی و خصوصیات فیزیکی مختلف نبوده و ممکن است شرایط منطقه به گونه‌ای باشد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل SWAT چندان رضایت بخش نباشد. بنابراین اجرای این مدل در حوضه‌های مختلف نتایج کاملاً متفاوت از یکدیگر را خواهد داشت. نظر به اینکه در چند سال اخیر بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور بخصوص نواحی مرکزی ایران با مسأله کمبود آب به واسطه مدیریت نادرست مواجه بودند، بر اساس نیازسنجی انجام پذیرفته حوزه آبخیز مهرگرد به دلیل مشکلات عدیده‌ای که در این زمینه داشت با هدف بررسی کارایی مدل SWAT برای تعیین مؤلفه‌های بیلان آب انتخاب شد تا از این طریق شرایط هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بهتر مورد ارزیابی قرار گیرد. به بیان دیگر هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی کارایی مدل SWAT در تعیین مؤلفه‌های بیلان آب این منطقه بوده است و بیشتر جنبه کاربردی دارد. لازم به ذکر است که تاکنون در این حوزه آبخیز هیچ‌گونه مطالعه‌ای از حیث بررسی بیلان آب با استفاده از این مدل انجام نشده است. این پژوهش می‌تواند زمینه‌ای برای مطالعات گسترده‌تر مرتبط با مباحث بیلان آب در منطقه مورد نظر را فراهم کند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی مهرگرد به طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه و ۸ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۰ دقیقه و ۵۷ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۹ ثانیه شمالی به عنوان بخشی از حوضه آبریز کارون بزرگ با وسعت ۱۲۷۵/۵۹ کیلومتر مربع، در شمالی‌ترین بخش شهرستان سمیرم استان اصفهان واقع شده است. این منطقه از شمال به شهرضا، از شرق به آباد و اقلید فارس، از جنوب غربی و غرب با مرز طبیعی رشته کوه‌های دنا و با استان کهگیلویه و بویر احمد، از غرب به بروجن و لردگان (چهارمحال و بختیاری) محدود می‌شود. کمترین ارتفاع محدوده ۲۰۷۵ متر مربوط به بخش‌های خروجی حوزه آبخیز و بیشترین ارتفاع محدوده ۳۶۸۸ متر از سطح دریا مربوط به قسمت‌های شمالی حوضه می‌باشد. اقلیم منطقه براساس اقلیم‌نمای آمبرژه نیمه خشک سرد و بر اساس روش دومارتن نیمه خشک می‌باشد. بارندگی متوسط دشت در این

محدوده ۳۳۹ میلی‌متر است. همچنین متوسط بارندگی در ارتفاعات ۳۶۸ میلی‌متر در سال برآورد شده است. موقعیت منطقه مهرگرد سمیرم بر اساس استان، شهرستان و زیرحوضه‌های کارون بزرگ در (شکل ۱) آمده است.

۲-۲- تئوری مدل SWAT

مدل SWAT مخفف "ابزار ارزیابی آب و خاک" است که اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط دکتر جف آرنولد طراحی و پایه‌گذاری شد (Dowlatabadi and Zomorodian, 2014). مدل SWAT نمونه‌ای از مدل‌های نیمه توزیعی و مفهومی است که با حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی فرایندهای سیستم آبخیز می‌پردازد. این مدل به لحاظ مقیاس فضایی نیمه توزیعی و از نظر زمانی مدلی پیوسته است. در مدل SWAT ابتدا از روی مدل رقومی ارتفاعی^۲ (DEM)، حوضه آبریز اصلی به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود، سپس بر مبنای نقشه‌های خاک و کاربری اراضی زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچکتری تقسیم می‌شوند، که به هر کدام از این واحدها یک واحد پاسخ هیدرولوژیکی^۳ (HRU) می‌گویند. این واحدها باید تا حد امکان از نظر هیدرولوژیکی مشابه باشند. در واقع باید در هر واحد هیدرولوژیکی ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش و کاربری اراضی تغییرات چشمگیری نداشته باشند. خروجی‌های مدل در هر زیر حوضه محاسبه شده برای هر واحد هیدرولوژیکی، به روش وزنی به دست می‌آیند. شبیه‌سازی سیستم آبخیز در مدل SWAT را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم نمود: فاز زمینی و فاز آبی. فاز زمینی مربوط به فرایندهای سطح زمین و ورود آب، رسوب و عناصر شیمیایی به آبراهه اصلی هر زیرحوضه است. فاز آبی فرایندهای آبراهه‌ها و کانال‌های جریان از جمله حرکت آب، رسوب و مواد شیمیایی را شبیه‌سازی می‌کند (Neitsch, 2005). شبیه‌سازی بخش زمینی چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT، بر پایه بیلان آبی (رابطه ۱) صورت می‌گیرد:

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

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

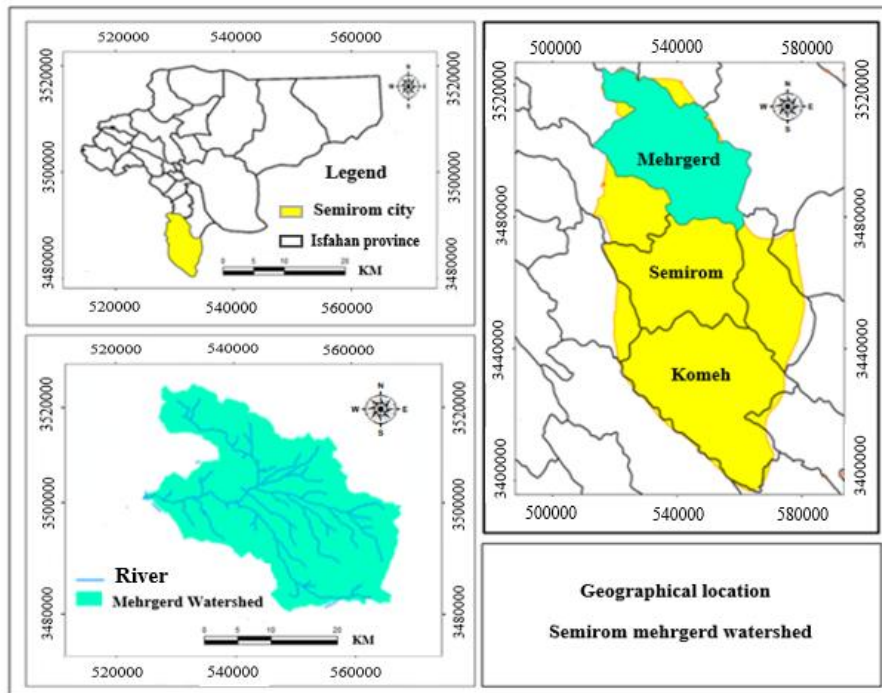


Fig. 1- The location of the study area

شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

شهرضا و بروجن به فایل wgen. user موجود در پایگاه داده مدل معرفی شد. هدف از انجام این مرحله استفاده از مولد داده اقلیمی WGEN جهت بازسازی داده‌های مفقود می‌باشد. به منظور برآورد تبخیر و تعرق از روش هارگریوز سامانی استفاده شد. همچنین دبی ماهانه خروجی از دو خط لوله انتقال آب در منطقه و سد مخزنی قره‌آقاج پس از انجام محاسبات اولیه به همراه خصوصیات فیزیکی سد به مدل معرفی شد. در نهایت مدل SWAT برای اجرا آماده شد. در (جدول ۱) مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در مدل SWAT ارائه شده است.

۲-۴- واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

با توجه به اینکه دو سال برای آموزش مدل در نظر گرفته شد بنابراین برای واسنجی مدل از بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ و برای اعتبارسنجی از بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ مربوط به ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز استفاده شد. در ابتدای اجرای مدل به منظور مشخص کردن پارامترهای مؤثر بر رواناب منطقه، آنالیز حساسیت با استفاده از روش هر بار یک پارامتر^۴ (OAT) برای مدل انجام شد و پارامترهای حساس برای واسنجی مدل تعیین گردید. در این پژوهش تعداد داده‌های مشاهداتی در خروجی به صورت ماهانه برای رواناب در مرحله واسنجی ۱۰۸ و در مرحله اعتبارسنجی ۴۸ نمونه مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- مدل‌سازی شرایط هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT

پس از معرفی نقشه DEM با دقت ۲۰ متر، مدل منطقه را به ۱۸ زیرحوضه تقسیم کرد. در ادامه شبکه آبراهه ترسیم و موقعیت دو ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز و پل بردکان در پایین‌دست سد و همچنین موقعیت سد مخزنی قره‌آقاج به مدل معرفی و مرز حوزه آبخیز تشکیل شد (شکل ۲). پس از تهیه نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شیب منطقه، از روی هم قرار گرفتن آن‌ها ۵۴ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) برای کل منطقه به‌دست آمد. بعد از آن که از صحت داده‌های ورودی به مدل اطمینان حاصل شد نوبت معرفی اطلاعات اقلیمی به مدل است. در همین راستا با مراجعه به سازمان هواشناسی کل کشور اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده برای مدل SWAT مطابق با جدول (۱) با بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ بر مبنای سال تأسیس و موجودیت داده‌ها تهیه شد. با توجه به مطالعات پیشین این بازه زمانی برای اجرای مدل در حد قابل قبولی قرار دارد (Shawul et al., 2013; Fukunaga et al., 2015; Gholami et al., 2017; SalehPoor Laghani et al., 2019; Amini et al., 2018). بر این اساس بارش روزانه، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی ایستگاه‌های موجود در منطقه برای بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ در قالب فرمت *.TXT وارد مدل شد. همچنین اطلاعات دو ایستگاه سینوپتیک

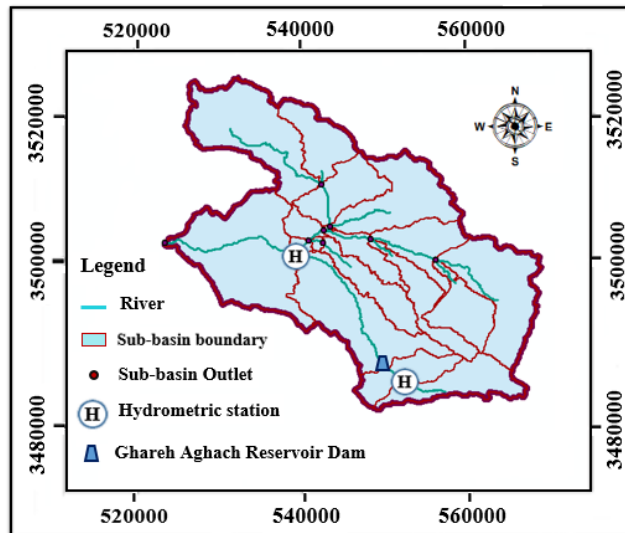


Fig. 2- Sub-basins map using Arc-SWAT model

شکل ۲- نقشه زیر حوضه‌ها با استفاده از مدل Arc-SWAT

Table 1- Specifications of the stations used in the SWAT model

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در مدل SWAT

Row	Station Name	Station Type	Longitude	Latitude	Elevation (m)
1	Semirom	Synoptic	51°-34'	31°-25'	2470
2	Shahreza	Synoptic	51°-50'	31°-59'	1845
3	Borujen	Synoptic	51°-18'	31°-57'	2197
4	Lordegan	Synoptic	50°-49'	31°-31'	1580
5	Esfarjan	Rain Gauge	51°-55'	31°-40'	2270
6	Tnge sahari	Rain Gauge	51°-40'	31°-03'	2130
7	Mehrgerd	Evaporation Gauge	51°-31'	31°-34'	2330
8	Hana	Evaporation Gauge	51°-44'	31°-12'	2310
9	Shahid Hamzavi	Climatology	51°-49'	31°-09'	2274
10	Tange Zardaloo	Hydrometry	51°-28'	31°-39'	2270

داده‌ها و عدم قطعیت مدل‌های مفهومی، هیچگاه این مقادیر برای دو پارامتر ذکر شده به دست نمی‌آید. بدین منظور مدل مجدداً اجرا شد تا بازه مناسب برای هر پارامتر به دست آمد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، از ضریب تبیین^۵ (R^2) و ضریب نش- ساتکلیف^۶ (NS) استفاده شد. دامنه‌های این ضرایب در (جدول ۲) ارائه شده است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

پس از اجرای مدل SWAT خروجی‌های مدل شامل: رواناب، جریان زیرسطحی، آب زیرزمینی و غیره به صورت فایل متنی به دست آمد. براساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل، ۱۰ پارامتر به عنوان

برای واسنجی مدل ابتدا ۱۹ پارامتر که بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی دبی حوزه آبخیز مهرگرد داشتند انتخاب و بعد از انجام تحلیل حساسیت، ۱۰ پارامتر به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها به مدل معرفی شدند. برای این کار از الگوریتم SUFI-2 استفاده شد. الگوریتم SUFI-2 یک روش بهینه‌سازی معکوس است که در آن تمام منابع عدم قطعیت در دامنه معرفی شده برای هر پارامتر لحاظ می‌گردد. به نحوی که محدوده اولیه پارامترها بعد از هر بار تکرار به وسیله محدوده جدید پارامترها به دست آمده توسط مدل، جایگزین شده و یک دامنه عدم قطعیت محدودتری از پارامترها به دست می‌آید. این روند تا زمانی که دو شاخص کمی‌سازی عدم قطعیت به حد مطلوب خود برسند یعنی P-Factor به یک و R-Factor به صفر میل کند ادامه پیدا می‌کند (Uniyal et al., 2015). ولی اکثراً به دلیل خطاهای گوناگون در

روش Replace، مقدار اولیه پارامتر مورد نظر با ارزش داده شده جایگزین می‌شود اما در روش Multiple، مقدار اولیه در (۱+ ارزش داده شده) ضرب می‌شود. نمودار همبستگی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به دوره واسنجی و اعتبارسنجی در (شکل ۳) ارائه شده است.

به طور کلی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب بیانگر این است که مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوزه آبخیز مهرگرد سمیرم از کارایی خوبی برخوردار است (شکل ۴ و ۵). بر اساس نتایج بدست آمده از شاخص P-Factor و R-Factor، درصد قابل قبولی از داده‌های مشاهداتی در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفتند و پهنای باند عدم قطعیت نیز قابل قبول است.

حساس‌ترین پارامترها شناسایی شدند. که نتایج آن در (جدول ۳) ارائه شده است.

Table 2- The ranges of R² and NS coefficients (Donigian, 2000; Moriasi et al., 2007)
جدول ۲- دامنه ضرایب R² و NS (Donigian, 2000;)
(Moriasi et al., 2007)

	POOR	Middle	Good	Very Good
R ²	<0.60	0.60-0.70	0.70-0.80	>0.80
NS	<0.50	0.50-0.65	0.65-0.75	>0.75

در ستون دوم (جدول ۳) با عنوان پارامترها، r نشان‌دهنده روش Multiple و v نشان‌دهنده روش Replace در واسنجی می‌باشد. در

Table 3- Results of sensitivity analysis on parameters for the calibration period (2004-2012)
جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت پارامترها برای دوره واسنجی (۲۰۱۲-۲۰۰۴)

Row Number	Parameter Name	Definition	t-stat	p-value
1	V__CN2.mgt	SCS runoff curve number for moisture condition II	1.80	0.07
2	V__REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap."	-2.13	0.03
3	V__HRU_SLP.hru	Average slope steepness	2.76	0.01
4	r__SOL_AWC(1).sol	Soil available water storage capacity(1)	-3.49	0.00
5	r__SOL_AWC(2).sol	Soil available water storage capacity(2)	-9.74	0.00
6	V__GWQMN.gw	Threshold depth of water in shallow aquifer for return flow	-4.10	0.00
7	V__ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	6.73	0.00
8	r__SOL_BD(1).sol	Soil bulk density(1)	8.92	0.00
9	r__SOL_BD(2).sol	Soil bulk density(2)	13.77	0.00
10	V__PLAPS.sub	Precipitation lapse rate	70.59	0.00

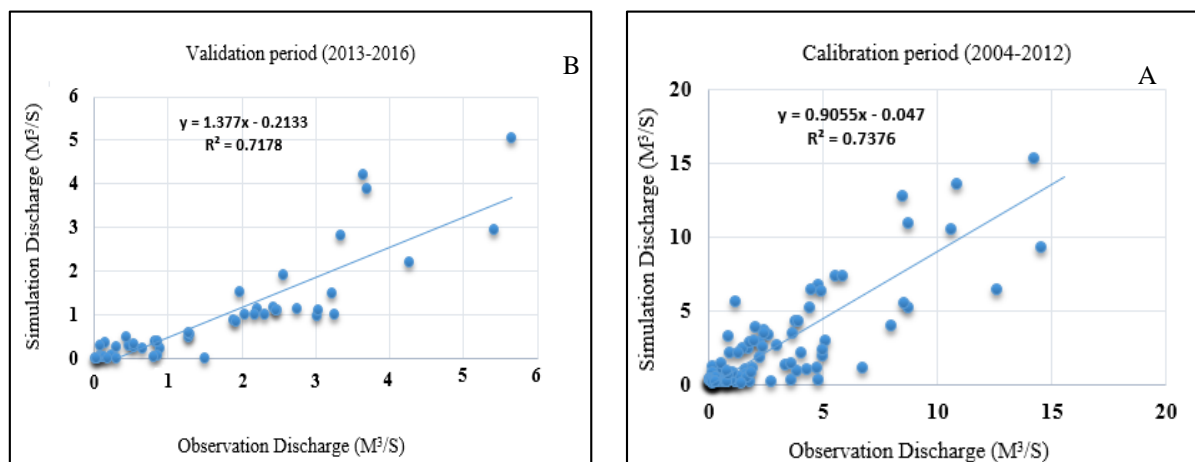


Fig. 3- Correlation of observed and simulated values of calibration (A) and validation (B) periods
شکل ۳- نمودار همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دوره واسنجی (A) و اعتبارسنجی (B)

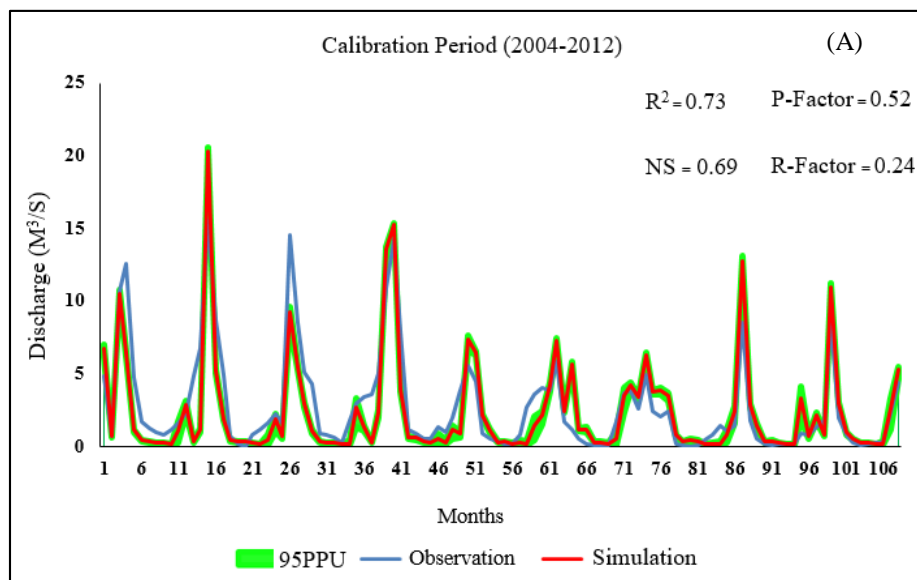


Fig. 4- Comparison of observed and simulated discharges in Tange-Zardaloo station for calibration period (A)

شکل ۴- مقایسه آبدهی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه تنگ زرد آلو برای دوره واسنجی (A)

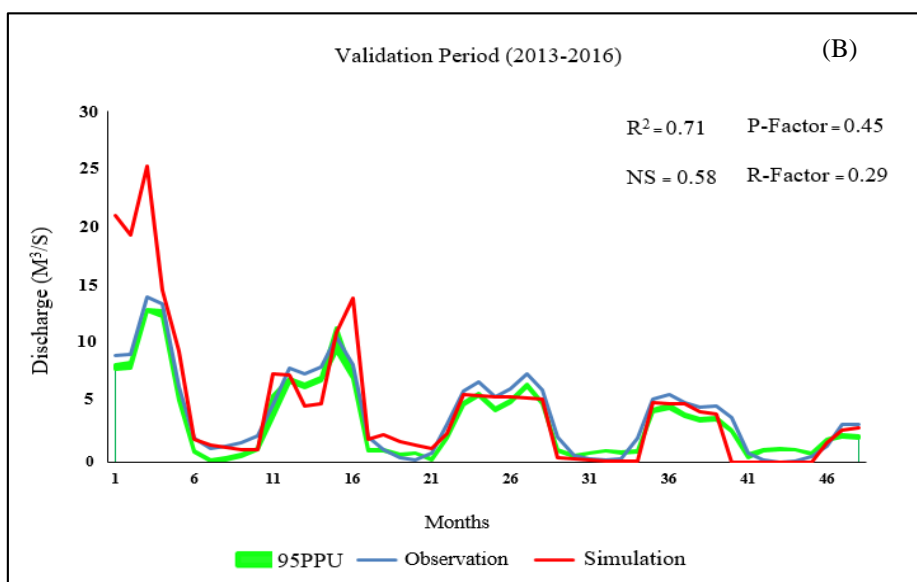


Fig. 5- Comparison of observed and simulated discharge in Tange-Zardaloo station for validation period (B)

شکل ۵- مقایسه آبدهی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه تنگ زرد آلو برای دوره اعتبارسنجی (B)

فروردین ۲۰۱۵ و مارس؛ اردیبهشت ۲۰۱۶) برای دوره اعتبارسنجی در نقاط پیک، تا حدودی همبستگی کمتری دارند. این موضوع در کارهای محققان دیگر چون (Chu and Tolson and Shoemaker (2004) و (Shirmohammadi (2004) و (Naserabadi et al. (2016) ملاحظه می‌شود.

همچنین نتایج ضرایب R^2 و NS برای هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان دهنده این است که مدل به صورت رضایت بخشی رواناب ماهانه منطقه را شبیه‌سازی کرده است. با مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به خوبی واضح است که در بعضی از ماه‌های سال (می؛ اردیبهشت ۲۰۰۴ و مارس؛ اسفند ۲۰۰۶) برای دوره واسنجی و (می؛ اردیبهشت ۲۰۱۳، مارس؛ اسفند ۲۰۱۴، آوریل؛

در ادامه تمامی مؤلفه‌های بیلان آبی نظیر بارش، ذوب برف، تغذیه آبخوان، رواناب سطحی، نفوذ پذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی با این مدل شبیه‌سازی شد. متوسط مقادیر اجزای بیلان آبی حوزه آبخیز مهرگرد سمیرم براساس نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ در (شکل ۶) ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین بارش شبیه‌سازی شده حوزه آبخیز مطالعاتی ۳۰۵/۶ میلی‌متر است؛ به‌طور متوسط حدود ۶۴ درصد بارش از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر می‌شود، حدود ۳۱ درصد آن به‌صورت رواناب سطحی و جریان جانبی و بازگشتی مستقیماً به آبراهه‌ها وارد می‌شود و از ۶ درصد آب وارد شده به لایه‌های خاک، قریب به ۱ درصد آن به سفره‌های عمیق آب زیرزمینی می‌پیوندد که جریان پایه رودخانه را تأمین می‌کند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مدل SWAT با دقت قابل قبولی اجزای بیلان آبی منطقه مهرگرد سمیرم اصفهان را شبیه‌سازی کرده است. با توجه به این‌که بیلان منفی آب در یک حوزه آبخیز نشان‌دهنده هدر رفت ذخایر آب موجود در خاک و منابع آب زیرزمینی، از طریق نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق می‌باشد، در این منطقه سهم تبخیر و تعرق در هدر رفت آب نسبت به سایر اجزای بیلان بیشتر است. متوسط ماهانه اجزای بیلان آبی حوزه آبخیز مهرگرد سمیرم برای دوره پایه در (جدول ۴) ارائه شده است.

ارقام این جدول تغییرات زمانی اجزای بیلان آبی حوزه آبخیز در طول سال را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده مشخص است که پارامتر بارش از ماه اکتبر (مهرماه) به تدریج افزایش می‌یابد و در ماه ژانویه (دی) به حداکثر خود می‌رسد و پس از آن به تدریج از میزان بارش‌ها کاسته خواهد شد به نحوی که در ماه آگوست (مرداد) به کمترین میزان خود می‌رسد. در ارتباط با بارش برف نیز به تدریج با کاهش دما از اواخر ماه دسامبر (آذر) به بعد شاهد بارش به صورت برف خواهیم بود به طوری که در ماه ژانویه (دی) به بالاترین میزان خود می‌رسد و پس از آن با افزایش دما به تدریج از میزان آن کاسته خواهد شد. میزان رواناب سطحی و جریان جانبی به تدریج با آغاز بارش‌های پاییزه شروع می‌شود و با گذشت زمان بر میزان آن‌ها افزوده می‌شود به طوری که در ماه‌های مارس (اسفند) و آوریل (فروردین) به دلیل افزایش دما و ذوب برف، به میزان قابل توجهی نسبت به ماه‌های گذشته افزایش می‌یابند.

تغییرات زمانی جریان پایه در طول سال نسبتاً کمتر است. بیشترین مقدار آن مربوط به اواخر زمستان و اوایل بهار همزمان با شروع ذوب برف مشاهده می‌شود و کمترین میزان آن مربوط به ماه اکتبر (مهر) است. با توجه به اینکه رواناب سطحی و جریان جانبی در ماه‌های کم‌بارش، ژوئن تا اکتبر (خرداد تا مهر) بسیار کم است، بنابراین جریان پایه منبع اصلی تأمین جریان رودخانه در این ماه‌ها محسوب می‌شود.

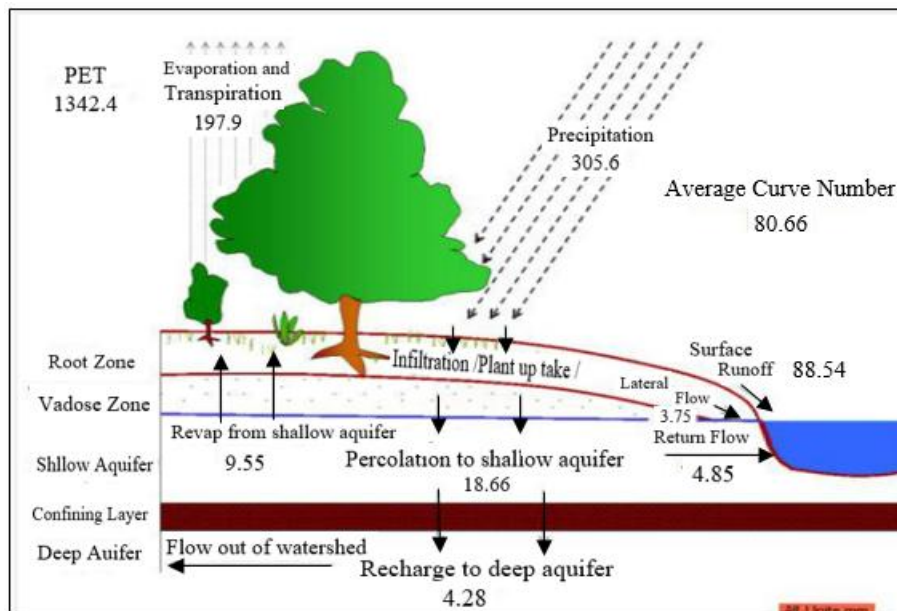


Fig. 6- The average water balance components of the watershed (2004-2016)

شکل ۶- میانگین اجزاء بیلان آبی حوزه آبخیز (۲۰۰۴-۲۰۱۶)

Table 4- Average monthly values of the water balance components for the watershed (2004-2016)

جدول ۴- میانگین ماهانه اجزاء بیلان آبی حوزه آبخیز (۲۰۱۶-۲۰۰۴)

Month	PCP (Rain)	PCP (Snow)	Surface runoff	Lateral flow	Base flow	Real (ET)	Potential (ET)
Jan	56.94	34.79	10.25	0.44	9.59	9.53	27.61
Feb	46.96	26.22	10.55	0.47	16.95	16.29	37.15
Mar	33.44	2.75	16.55	0.73	15.88	26.92	73.00
Apr	24.78	00.00	17.13	0.50	4.74	29.69	105.09
May	9.37	00.00	3.02	0.28	1.37	23.94	155.28
Jun	0.39	00.00	00.00	0.13	0.23	28.88	198.83
Jul	0.42	00.00	00.00	0.06	0.12	21.63	216.19
Aug	0.06	00.00	00.00	0.03	0.07	4.92	195.48
Sept	0.19	00.00	00.00	0.01	0.05	1.73	149.62
Oct	3.37	00.00	00.00	0.01	0.04	2.53	100.19
Nov	36.22	0.33	5.23	0.20	3.45	11.04	51.19
Dec	39.23	14.79	5.93	0.41	4.26	10.70	33.65

سفره‌های عمیق آب زیرزمینی می‌پیوندند. در مجموع نتایج تحقیق حاکی از آن است که مدل SWAT قابلیت شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه‌های آبخیز نسبتاً بزرگ با شرایط پیچیده و ناهمگن با دقت مناسب را دارد. البته به شرط این‌که داده‌های ورودی با دقت مناسب در مدل‌سازی استفاده شوند و نیز دقت و توجه کافی در واسنجی مدل صورت گیرد تا مدل هرچه بیشتر معرف شرایط واقعی حوزه آبخیز باشد. این مطالعه اطلاعات مفیدی را در مورد بیلان آبی حوزه آبخیز مهرگرد فراهم نموده و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر پروژه‌های منابع آب کمک می‌کند. از نتایج این مطالعات می‌توان برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه در قالب سناریوهای مختلف اقلیمی و کاربری اراضی و یا ترکیبی از هر دو استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Soil and Water Assessment Tool
- 2- Digital Elevation Model
- 3- Hydrologic Response Unit
- 4- One AT a Time
- 5- Coefficient of Determination
- 6- Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

۵- مراجع

- Amini MA, Torkan GH, Eslamian SS, Zareian MJ, Besalatpour AA (2018) Assessment of SWAT hydrological model in catchments' water balance simulation located in semi-arid regions (Case study: Zayandeh-Rud River Basin). Journal of Water and Soil 32(5):849-863 (In Persian)
- Artimani MM, Zeinivand H, Tahmasebipour N, Hgizadah A (2017) SWAT model assessment to

تغییرات تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل در طول سال با میزان آب در دسترس جهت تبخیر و دما رابطه تنگاتنگی دارد. تبخیر و تعرق واقعی به تدریج از ماه نوامبر (آبان) با شروع بارش، افزایش می‌یابد به طوری که از اواخر زمستان و با گرم‌تر شدن هوا به میزان تبخیر و تعرق واقعی افزوده می‌شود و در ماه آوریل (فروردین) به حداکثر خود می‌رسد. این مسأله ناشی از وجود رطوبت کافی و دمای نسبتاً زیاد برای انجام این فرآیند است. پس از آن به واسطه کاسته شدن از میزان نزولات جوی و افزایش درجه حرارت منطقه از میزان این پارامتر کاسته خواهد شد به طوری که در ماه سپتامبر (شهریور) به شدت کاهش می‌یابد. در ارتباط با تبخیر و تعرق پتانسیل بر خلاف تبخیر و تعرق واقعی با افزایش دما و کاسته شدن از میزان بارش شاهد افزایش این پارامتر خواهیم بود. کمترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل مربوط به ماه ژانویه (دی) به دلیل کاهش شدید درجه حرارت در این ماه و بیشترین میزان آن مربوط به اوایل تابستان یعنی ماه جولای (تیر) است.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

با اجرای مدل SWAT در حوزه آبخیز مهرگرد سمیرم امکان شبیه‌سازی بیلان آبی فراهم شد. برای واسنجی و ارزیابی مدل از داده‌های ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو به عنوان ایستگاه مرجع استفاده شد. مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی و همچنین شاخص عددی ارزیابی کارایی مدل، بیانگر کارایی مناسب مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه آبخیز مهرگرد است. بر این اساس به طور متوسط حدود ۶۴ درصد بارش از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر می‌شود. حدود ۳۱ درصد آن به صورت رواناب سطحی و جریان جانبی و بازگشتی مستقیماً به آبراهه‌ها وارد می‌شود و از ۶ درصد آب وارد شده به لایه‌های خاک، قریب به ۱ درصد آن به

- Javanmard S, Hesari B (2017) Application of SWAT model in simulation of surface water balance Agh Chay catchment area and sufi-2 algorithm Investigate the uncertainty of its parameters. In: Proc. Second National Iranian Conference on Hydrology (WRRC02_267), 20-21 July, Iran (In Persian)
- Mehrparvar M, Asghari K, Golmohammadi MH (2019) Reducing error of rainfall-runoff simulation using coupled hydrological SWAT model and data assimilation technique. *Journal of Iran-Water Resources Research* 14(5):84-96 (In Persian)
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) Model evaluation guide lines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900
- Naserabadi F, Esmali Ouri A, Akbari H, Rostamian R (2016) River flow simulation using SWAT model (Case study: Ghareh Su river in Ardabil Province-Iran). *Journal of Watershed Management Research* 7(13):50-59 (In Persian)
- Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R (2005) Soil and water assessment tool documentation, (user's manual). 494 pp
- Rivas-Tabares D, Tarquis A N, Willaarts B, Miguel A (2019) An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja. *Journal of Agricultural Water Management* 212:211-225
- Salehpour Laghani J, Ashrafzadeh A, Moussavi SA (2018) Water resources allocation management in Hablehroud basin using a combination of the SWAT and WEAP models. *Journal of Iran-Water Resources Research* 14(3):278-290 (In Persian)
- Santra P, Das B S (2013) Modeling runoff from an agricultural watershed of western catchment of Chilika Lake through Arc SWAT. *Journal of Hydro-Environment Research* 7:261-269
- Shawul AA, Alamirew T, Dinka MO (2013) Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, Southeastern Ethiopia. *Journal of Hydrology and Earth System Science, Discuss* 10:13955-13978
- Tolson B A, Shoemaker C A (2004) Watershed modeling of the canyonville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the cannonsville reservoir. School of Civil and Environmental Engineering, 159 pp
- determine determination of water balance components of Gamasiab basin. *Journal of Rainwater Catchment Systems* 5(2):51-64 (In Persian)
- Chantha O, Sabine S, Jose-Miguel S (2011) Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology* 401(3-4):145-153
- Chu T W, Shirmohammadi A (2004) Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Journal of Agricultural and Biological Engineers* 47(4):1057-1073
- Donigian AS (2000) HSPF training workshop handbook and CD: Lecture 19, Calibration and verification issues, slide L19-22. US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C
- Dowlatabadi S, Zomorodian S M A (2014) Hydrological simulation of Firoozabad basin by SWAT. *Journal of Irrigation & Water Engineering* 4(14):38-48 (In Persian)
- Ebrahimi P, Salimi Kuchi J, Mohseni Saravi M (2018) Calibration and validation of SWAT model in runoff simulation, case study: Neka watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management* 10(3):266-279 (In Persian)
- Fukunaga DC, Cecilio RA, Zanetti SS, Oliveira LT, Caiado MAC (2015) Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena* 206-213
- Gholami A, Shahedi K, Habib Nezhad Roshan M, Vafakhah M, Soleimani K (2017) Evaluation of the performance of the SWAT semi-distributed model for river flow simulation (Case study of Mazandaran province Tallar basin). *Journal of Iran Soil and Water Research* 48(3):463-476 (In Persian)
- Hajihoseini H, Hajihoseini M, Najafi A, Morid S, Delavar M (2015) Assessment of changes in hydro-meteorological variables upstream of Helmand Basin during the last century using CRU data and SWAT model. *Journal of Iran-Water Resources Research* 10(3):38-52 (In Persian)
- Havrylenko SB, Bodoque JM, Srinivasan R, Zucarelli GV, Mercuri P (2016) Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *Catena* 137:298-309
- Hosseini M (2014) Water balance simulation in Ghare-Sou watershed, Kermansha using the SWAT model. *Journal of Watershed Engineering and Management* 6(1):63-73 (In Persian)

Zare Garizi A, Talebi A (2016) Watershed water balance simulation using SWAT model (Case study: Ghare Sou province of Golestan). Journal of Water Engineering 9(30):50-37 (In Persian)

Uniyal B, Jha M K, Verma A K (2015) Parameter identification and uncertainty analysis for simulating streamflow in a river basin of Eastern India. Journal of Hydrological Processes 29(17):3744-3766