

تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه بالخوچای)

مجید رئوف*^۱، جوانشیر عزیزی مبصر^۲، آیت سلحشور^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۲۷

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب دانشگاه محقق اردبیلی

۲- استادیار، گروه مهندسی آب دانشگاه محقق اردبیلی

۳- کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، شرکت آب منطقه‌ای اردبیل

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: majidraoof2000@yahoo.co.uk

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی معادله بیلان آب و تخمین برخی از پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه آبخیز رودخانه بالخوچای در استان اردبیل با استفاده از مدل SWAT می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز شامل، نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی، اطلاعات خاک‌شناسی، بارش روزانه، دما، رطوبت نسبی و دبی جریان بود که از شرکت آب منطقه‌ای و اداره منابع طبیعی استان اردبیل اخذ گردید. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، حساس‌ترین پارامترها شامل شماره منحنی، ضریب تبخیر از سطح خاک، آب قابل دسترس خاک، بارش، دمای ذوب برف و زمان تأخیر در تغذیه آبخوان می‌باشد. برای واسنجی مدل از داده‌های آماری ثبت‌شده برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ و برای اعتبارسنجی از آمار سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸ استفاده شد. دقت شبیه‌سازی انجام‌شده با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) ارزیابی شد. پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه از قبیل شماره منحنی، زمان تأخیر در تغذیه آبخوان و هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد گردید. مقادیر این پارامترها به ترتیب ۷۰ تا ۸۰، ۳۰ روز و ۱۲ تا ۲۴ میلی‌متر در ساعت برآورد گردید. مقادیر R^2 ، RMSE و RE در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۹۸ و ۰/۰۷ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۸۹ و ۰/۰۸ به دست آمدند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل SWAT جریان رودخانه را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. همچنین مقدار خطا در مرحله اعتبارسنجی نشان داد که پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی با دقت خوبی برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، بیلان، حوضه بالخوچای، رواناب، واسنجی

Estimating Hydrological and Hydrogeological Parameters of Watershed Using SWAT Model (Case study: Balukhlu-chay Basin)

M Raof^{1*}, J Azizi Mobaser², A Salahshoor³

Received: 13 July 2015

Accepted: 18 October 2016

1- Assoc. Prof, Water Engineering Department, University of Mohagheghe Ardabili, Iran

2- Assist. Prof, Water Engineering Department, University of Mohagheghe Ardabili, Iran

3- M.Sc. of Irrigation and Drainage, Ardabil Regional Water Company, Iran

* Corresponding Author, Email: majidraof2000@yahoo.co.uk

Abstract

The aim of this study was estimation of some hydrological and hydrogeological parameters for Balukhlu-chay basin, Ardabil province, using SWAT model. Required data for this study including soil properties, soil, land use and topography maps, daily rainfall, temperature, air humidity and surface water discharge were collected from Natural Resources Office and Regional Water Company of Ardabil province. Curve number, coefficient of evaporation from soil surface, soil water availability, precipitation, snowmelt temperature, and delay time for aquifer recharge were identified as the most important and sensitive parameters. The hydroclimatologic data of the years 2000 to 2004 were used in calibration stage and the data of the years 2005 to 2007 were used in validation stage of the model evaluation. The R^2 , RMSE and RE indices were used to evaluate the goodness of simulation. Hydrological and geohydrological parameters including curve number, delay time for aquifer recharge and saturated hydraulic conductivity were estimated. The values of these parameters, respectively 70 to 80, 30 days, and 12 to 24 mm per hour were estimated for Balukhlu-chay basin. During calibration process, the values of 0.81, 0.98 and 0.07 were obtained for R^2 , RMSE and RE, respectively. Similarly, these values were calculated as 0.63, 0.89 and 0.08 for R^2 , RMSE and RE, respectively, during the validation. The results showed that river flow was well simulated by the SWAT model, compared with the measured data. The amount of error in the validation stage showed that hydrological and hydrogeological parameters were estimated with good accuracy.

Keywords: Balance, Balukhlu-chay Basin, Calibration, Run Off, Validation

مقدمه

تغییرات مکانی، مشکلات مقیاس برای اندازه‌گیری‌های صحرایی و اجزای مدل و ترسیم غیرکامل فرایندهای واقعی در مدل روبرو هستند. این عوامل نیاز به واسنجی و اعتبار سنجی مدل را فراهم می‌کنند (رفسگارد ۱۹۹۷). مدل SWAT یک مدل جامع در زمینه مطالعات آب و خاک می‌باشد که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان برای اراضی وسیع مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به کارایی این مدل در سال‌های گذشته، استفاده وسیعی از آن در مناطق مختلف ایران و جهان شده است. از جمله این

مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی با پایه فیزیکی، که پارامترهای ورودی آنها دارای مفهوم فیزیکی هستند و تغییرات مکانی را نشان می‌دهند، به‌طور رو به‌رشدی برای حل مسائل مربوط به منابع آب، شامل تأثیرات محیطی تغییر کاربری اراضی، اثر تغییر اقلیم بر منابع آب، آمایش آب و مدیریت حوضه‌ها از نظر آبخیزداری، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌هر حال مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی با مشکلات کمبود داده‌های کافی برای شناساندن کامل

تحقیق آنها نشان داد که حساسترین پارامترها برای جریان‌های سیلابی یا دبی‌های پیک شامل CN، چگالی توده خاک و آب قابل دسترس خاک بودند. حساس‌ترین پارامتر به جریان پایه نیز پارامترهای CN، فاکتور جبران تبخیر خاک، و آب قابل دسترس خاک تعیین شدند. ویلای سان و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل SWAT و اسنچی و عدم قطعیت مدل سازی جریان هیدرولوژیکی را در حوضه رودخانه ژودن لائوس تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که از مدل SWAT و اسنچی شده برای تأثیر کاربری و تغییر اقلیم بر کیفیت آب و رسوب حوضه و مدیریت ریسک سیل نیز می‌توان استفاده نمود. از جمله تحقیقاتی که در داخل کشور انجام شده است، می‌توان به تحقیقی که اکبری و همکاران (۱۳۸۹) جریان روزانه رودخانه بالخلوچای استان گلستان را با مدل SWAT شبیه‌سازی کرده و در این کار ابتدا یک مرحله تحلیل حساسیت پارامتر انجام داده و پارامترهای مهم‌تر را شناسایی کردند، اشاره نمود. فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم SUFI2 برخی اجزای بیلان آب را در کل ایران شبیه‌سازی کرده و ارتباط آنها را با تولید گندم، با در نظر گرفتن عملکرد سدها و اقدامات آبیاری اراضی کشاورزی بررسی کردند. نتایج تحقیق این محققان نشان داد که عملیات آبیاری اثر معنی‌داری بر بیلان آب در استان‌های دارای کشاورزی آبی دارد. کاویان و همکاران (۱۳۹۴) رواناب و باررسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران را با بهره‌گیری از الگوی SWAT شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان‌دهنده زیاد بودن دقت شبیه‌سازی دبی جریان در هر چهار ایستگاه مورد بررسی بود. محققان زیادی شبیه‌سازی جریان پایه و سیلابی، تحلیل حساسیت و اسنچی مدل SWAT انجام داده‌اند که از جمله آن می‌توان به تحقیقاتی که توسط عمانی و همکاران (۱۳۸۵)، سیدقاسمی (۱۳۸۵) و امیری و همکاران (۱۳۸۵) اشاره

مطالعات می‌توان به مطالعه‌ای که در مالزی توسط آلانسی (۲۰۰۹)، برای اعتبار سنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه برنام^۱ انجام شد اشاره نمود. این مطالعه نشان داد مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی موفق جریان در مناطق مرطوب استوایی می‌باشد و می‌تواند برای مطالعه اثرات تغییر کاربری آبی مورد استفاده قرار گیرد. ژیانگ ژین و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از اسنچی مدل SWAT بیلان آبی را در یک حوضه آبریز کوهستانی در شمال غرب چین شبیه‌سازی کردند، که نتایج تحقیق آنها نشان داد، خروجی‌های مدل، یک مرجع مناسب و قابل اطمینان برای ارزیابی و مدیریت منابع آب چنین حوضه‌هایی است. هاوری لنکو و همکاران (۲۰۱۶) 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-ساتکلیف که به ترتیب اعداد ۰/۷۷ و ۰/۷۵ گزارش شده بود، یک ابزار مناسب برای تخمین مقدار آب موجود خاک در مناطق با اطلاعات ضعیف است. بکیاریس و همکاران (۲۰۰۵)، در مطالعه‌ای برای برآورد پارامترهای کمی و کیفی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز در جنوب کشور سوئد از مدل SWAT استفاده کردند و پس از انجام تحلیل حساسیت، پارامترهای مهم شناسایی و بر اساس خروجی‌های مدل SWAT بیلان آب آبخیز استخراج گردید که اسنچی و اعتبارسنجی هیدرولوژیکی مدل در پایه زمانی روزانه نتیجه خوبی نشان نداد. مائوریو و همکاران (۲۰۱۵) مدل SWAT را برای یک حوضه آبریز کوچک جنگلی مورد ارزیابی قرار دادند، که نتایج نشان داد اجرای این مدل در شرایط مناسبی بوده و منابع عدم قطعیت در هنگام مدل کردن حوضه مورد مطالعه را شناسایی کرده است. فیریسن و همکاران (۲۰۰۷)، در منطقه جورجیا کشور آمریکا و اسنچی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT را در یک زیرحوضه کوچک انجام دادند که نتایج

^۱. Bernam

معادله بیلان آب

در مدل SWAT کوچکترین واحد کاری واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU^۲) می‌باشد که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و خاک حاصل می‌شود. معادله بیلان آب هر HRU که در مدل استفاده می‌شود به صورت ذیل می‌باشد:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad [1]$$

که در آن SW_t محتوای آب نهایی در خاک، t زمان (روز)، SW_0 مقدار آب اولیه موجود در خاک، R_{day} مقدار بارش در هر روز، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در هر روز، E_a مقدار تبخیر و تعرق روزانه، W_{seep} مقدار آب نفوذ کرده به منطقه قشری در پروفیل خاک و Q_{gw} مقدار نفوذ به سفره زیرزمینی می‌باشد (نیچ و همکاران ۲۰۰۵).

داده‌های ورودی مدل

نقشه‌های پایه مورد نیاز شامل نقشه مدل ارتفاع رقومی (DEM^۳)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک می‌باشند که هر سه در قالب رستری به مدل ارائه شدند. در تحقیق حاضر مهمترین داده‌های ورودی مدل در شش گروه طبقه‌بندی گردیدند که این شش گروه را می‌توان تحت عناوین داده‌های عمومی، خاک، سفره آب زیرزمینی HRU، زیرحوضه‌ها و روندیابی نام گذاری کرد. قبل از اجرای مدل داده‌های ورودی شامل داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، نقشه توپوگرافی، نقشه خاک‌شناسی، نقشه کاربری اراضی، نقشه شبکه آبراهه‌ای و مرز زیرحوضه‌ها آماده‌شدند. نقشه‌های مذکور در محیط ArcGIS تهیه شده و هرکدام به‌عنوان یک لایه که دربرگیرنده اطلاعات مورد نیاز از ورودی‌های شش گانه است در نظر گرفته می‌شوند. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در

نمود. با بررسی تحقیقات صورت گرفته مشخص شد که مدل SWAT یک ابزار توانمند در زمینه‌های گوناگون مطالعات آب و خاک بوده و گستردگی مناطقی که در آنها از این مدل استفاده شده، جهانی بودن آن را تایید می‌کند. به‌طور کلی اهداف تحقیق حاضر عبارتند از:

- ۱- ارزیابی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه بالخلوچای به‌عنوان یکی از زیرشاخه‌های رودخانه قره سو در استان اردبیل.
- ۲- تخمین برخی از پارامترهای مهم هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه بالخلوچای شامل شماره منحنی متوسط، زمان تأخیر در تغذیه آبخوان، هدایت هیدرولیکی اشباع متوسط حوضه و ارزیابی دقت و صحت آنها.
- ۳- تحلیل حساسیت پارامترهای معادله بیلان حوضه

مواد و روش‌ها

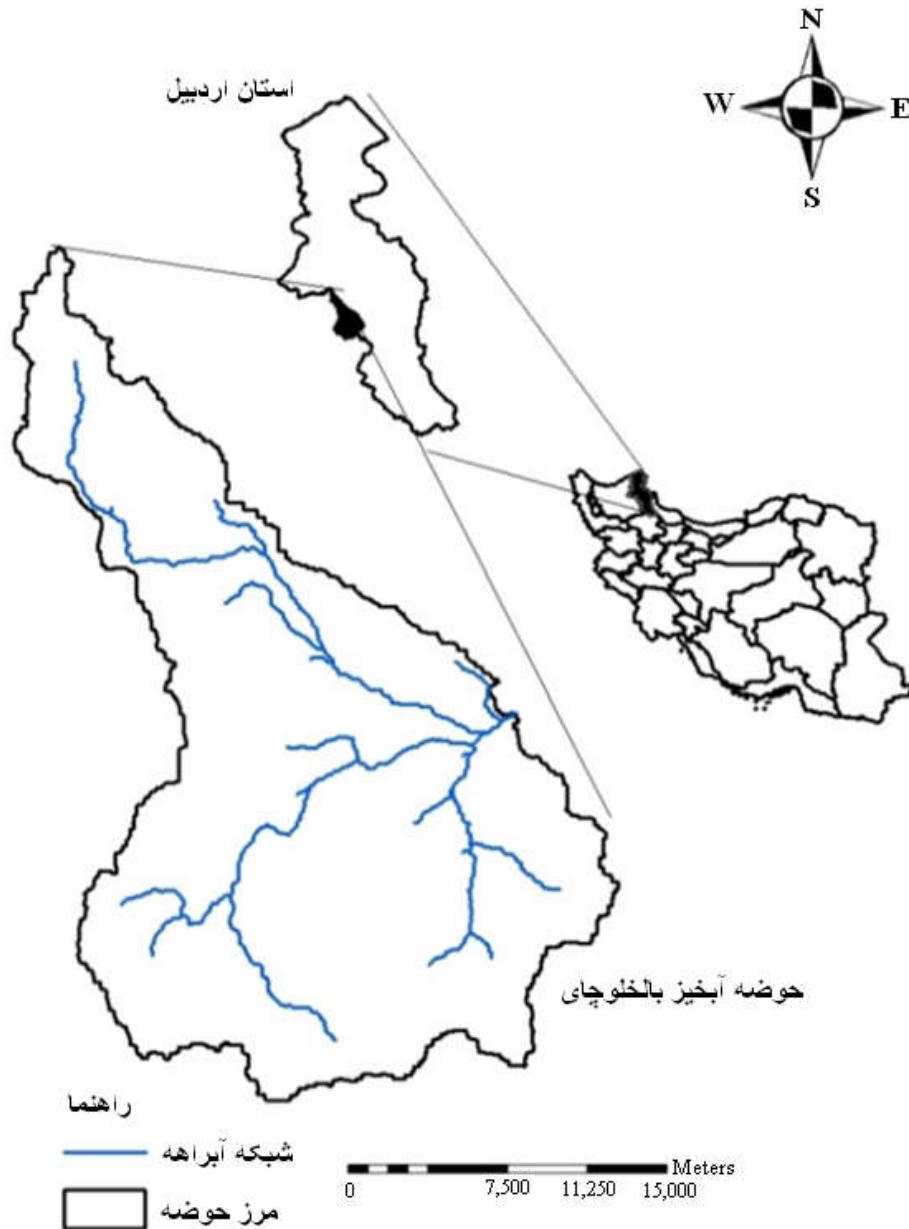
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز بالخلوچای یکی از سرشاخه‌های رودخانه قره سو در استان اردبیل بوده و در تقسیم‌بندی سیاسی جزء استان اردبیل می‌باشد. موقعیت آن بین ۴۷°۴۷' تا ۴۸°۰۵' طول شرقی و ۳۷°۵۲' تا ۳۸°۱۷' عرض شمالی است. موقعیت حوضه آبخیز بالخلوچای در استان اردبیل و در ایران به همراه شبکه آبراهه‌های اصلی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. حوضه آبخیز بالخلوچای با وسعت ۵۶۷ کیلومتر مربع و محیط ۱۷۴ کیلومتر در منطقه‌ای کوهستانی واقع شده و تغییرات ارتفاع آن بین ۱۵۵۷ تا ۴۳۸۳ متر می‌باشد. همچنین ضریب گراویلیوس حوضه ۲/۰۵، شیب متوسط حوضه برابر ۱۵ درصد و شیب رودخانه اصلی حوضه برابر ۶/۱ درصد و طول کل آبراهه‌ها به ۴۱۹ کیلومتر و طول شاخه اصلی به ۴۴ کیلومتر می‌رسد (بی‌نام ۱۳۹۰).

^۲- Digital elevation model

^۳- Hydrology reaction units

جدول ۱ و نقشه‌های خاک‌شناسی، DEM، کاربری اراضی و زیر حوضه‌ها در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز بالخلوچای.

بر روی اصلاح حجم رواناب تولید شده بود. انجام مرحله اعتبارسنجی با استفاده از مقادیر پارامترهای اصلاح شده در مرحله واسنجی و بر اساس آمار دبی اندازه‌گیری شده سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ در ایستگاه هیدرومتری

واسنجی، اعتبارسنجی و ارزیابی مدل

در تحقیق حاضر واسنجی بر اساس آمار سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ انجام شد. با توجه به ضعیف بودن نتایج شبیه‌سازی حجم رواناب در مرحله واسنجی، ابتدا تمرکز

محاسبات قرار نگرفته و به اصطلاح به عنوان دوره آماده سازی^۶ انتخاب شد، چرا که در ابتدای شبیه سازی مدتی طول می کشد تا تمام اجزای چرخه آب به طور صحیح در مدل مشارکت داشته باشند (عباسپور و همکاران ۲۰۰۷).

نتایج

تهیه نقشه های مورد نیاز

همان گونه که پیش تر اشاره شد برای شبیه سازی های هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT نیاز است ابتدا نقشه های پایه تهیه گردد، بنابراین در قدم اول نقشه های طبقات ارتفاعی، طبقات شیب و واحدهای HRU تهیه شدند که در شکل ۳ آورده شده اند. از نقشه طبقات ارتفاعی می توان دریافت که قسمت اعظم مساحت حوضه مورد مطالعه در ارتفاع ۱۶۰۰ تا ۲۲۰۰ متر واقع شده اند و بنابراین می توان گفت که بخش اعظم حوضه آبریز در ارتفاعات زیاد (با توجه به مورفولوژی و نقشه توپوگرافی حوضه) و با شیب تقریباً کم قرار گرفته است.

یامچی صورت گرفت. نتیجه مرحله اعتبارسنجی مدل میزان اعتبار مدل واسنجی شده را نشان می دهد. همچنین نتایج شبیه سازی ها در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل با شاخص های ضریب همبستگی (R^2)، $RMSE^{\xi}$ و RE^{θ} مورد ارزیابی قرار گرفت. رابطه های شاخص های فوق به شرح ذیل است (فیریس و همکاران ۲۰۰۷):

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

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right)^{0.5} \quad [3]$$

$$RE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad [4]$$

در این روابط، P_i مقدار دبی شبیه سازی شده، O_i مقدار دبی مشاهده شده، \bar{P} متوسط دبی شبیه سازی شده و \bar{O} متوسط دبی مشاهداتی می باشد. برای ارزیابی نتایج شبیه سازی در دوره واسنجی، داده های یک سال اول در

جدول ۱- مشخصات ایستگاه های هواشناسی مورد استفاده.

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)
۱	نیر	تبخیرسنجی	۰۷' ۰۱' ۴۸"	۲۲' ۰۲' ۳۸"	۱۶۲۳
۲	لای	تبخیرسنجی	۲۵' ۰۴' ۴۷"	۵۵' ۰۶' ۳۸"	۲۰۲۸
۳	آتشگاه	تبخیرسنجی	۳۰' ۰۳' ۴۸"	۵۸' ۱۲' ۳۸"	۱۷۷۸

نتایج مرحله واسنجی مدل

هیدروگراف شبیه سازی شده برای دوره واسنجی مدل، در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج شاخص های ارزیابی مدل نیز در جدول ۲ قابل مشاهده است. ضریب همبستگی دبی های ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری یامچی (خروجی حوضه مورد مطالعه) با مقادیر شبیه سازی شده نشان می دهد که شبیه سازی با دقت خوبی صورت گرفته است.

از هیدروگراف جریان سطحی نیز می توان دریافت که در هر بازه زمانی که مقادیر بارش قابل توجه بوده اند میزان رواناب سطحی خروجی از حوضه نیز افزایش یافته است. در این مورد تطابق هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده نیز قابل مشاهده می باشد. هیدروگراف شبیه سازی شده نشان داد که مدل مقادیر دبی پایه رودخانه را کمتر و مقادیر دبی اوج را بیشتر از دبی اوج مشاهداتی نشان داد. علت این امر می تواند تا حدودی به وجود چشمه های

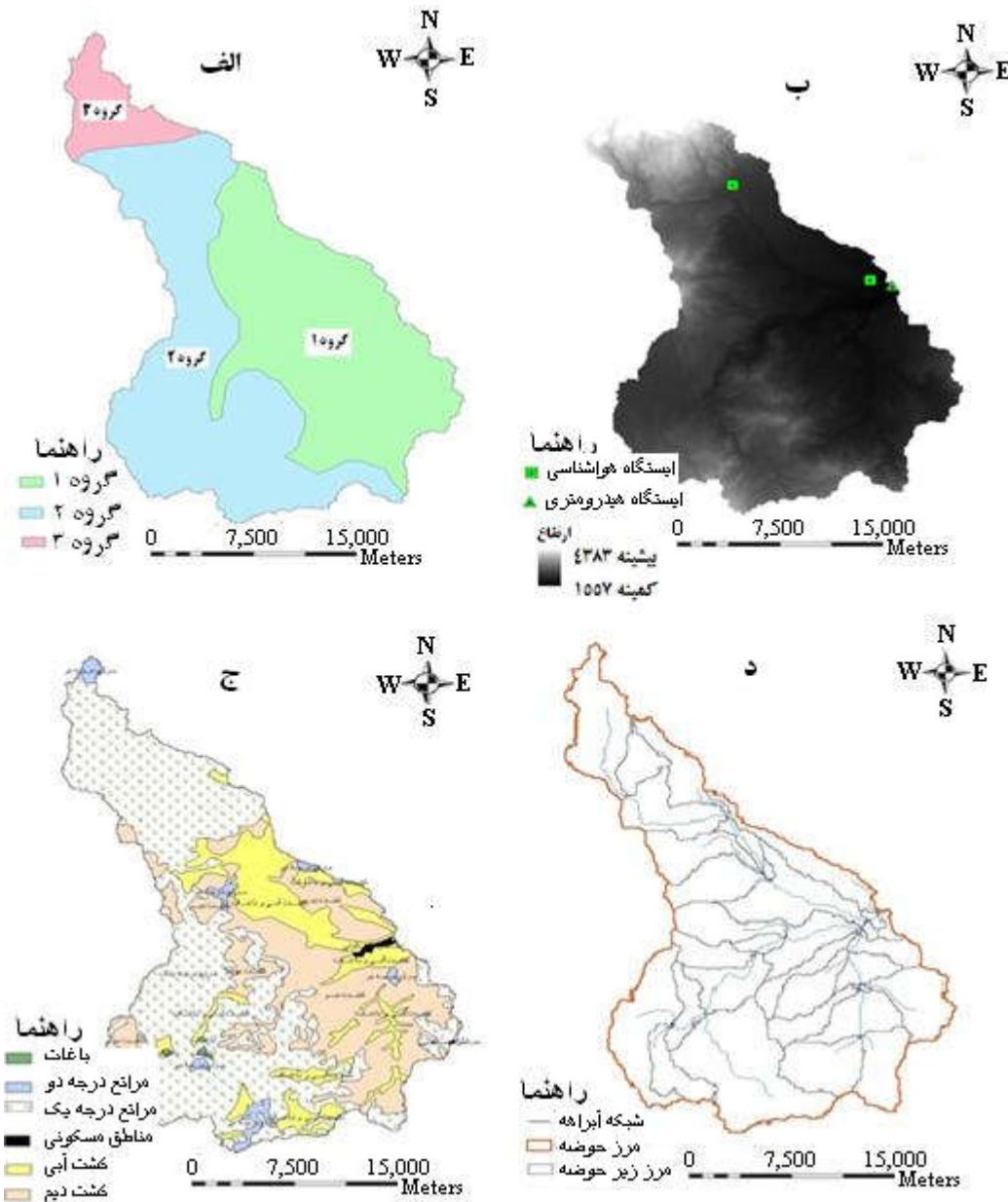
۶-Warm up

ξ - Root mean squared error

θ - Relative error

بعدی به مرور توسط چشمه‌ها از حوضه خارج می‌گردد که باعث بالا بودن دبی پایه خواهد بود.

فراوان در حوضه آبخیز بالخلوچای مرتبط باشد زیر بخش عمده‌ای از باران نزولی بر روی حوضه در خاک نفوذ نموده و از شدت بیشینه دبی کاسته و در زمان‌های



شکل ۲- نقشه‌های اطلاعات خاک‌شناسی (الف) DEM (ب) کاربری اراضی (ج) زیرحوضه‌ها و شبکه آبراه‌های (د) برای حوضه آبخیز مورد مطالعه.

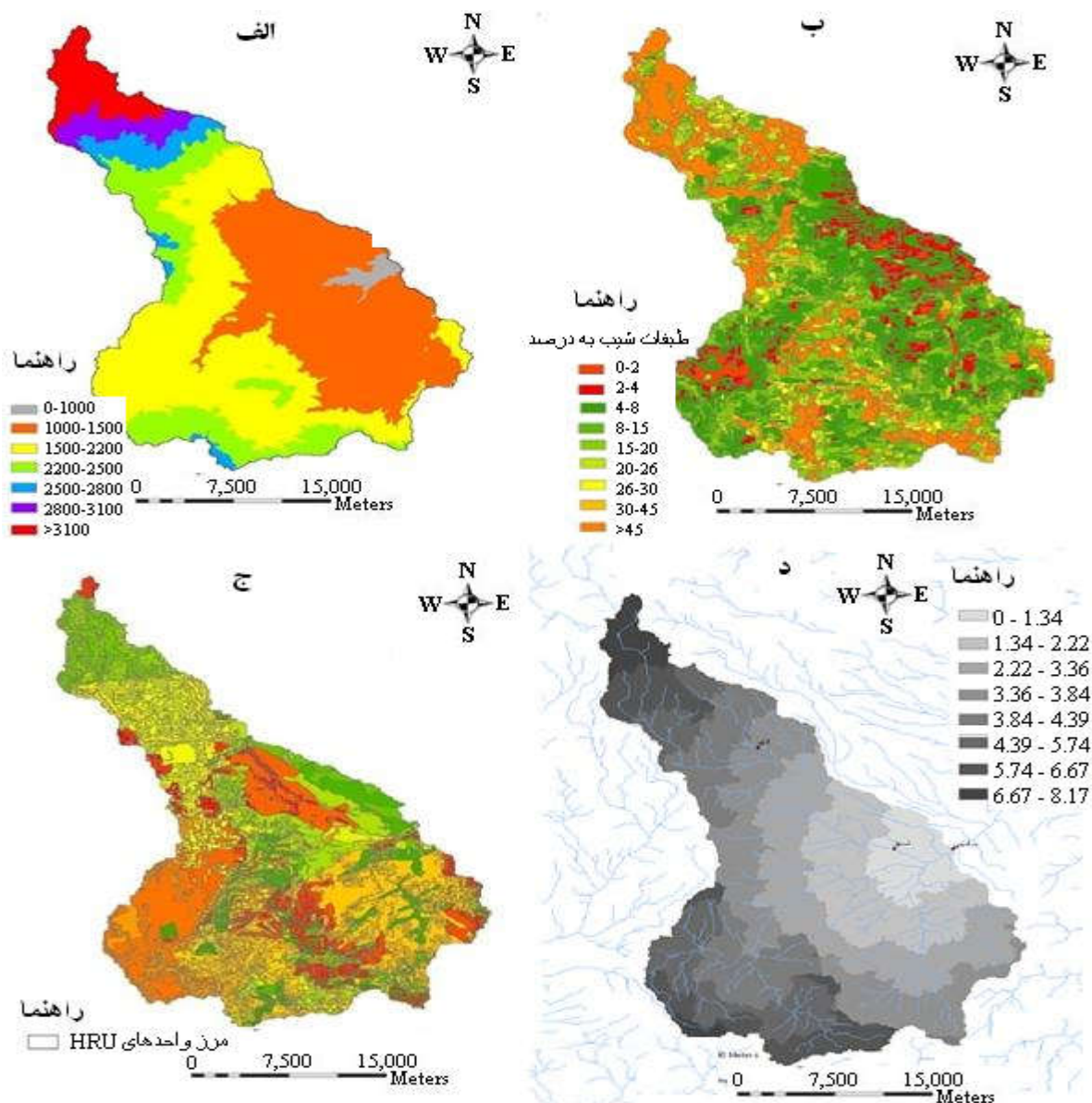
جدول ۲- نتایج شاخص‌های ارزیابی، برای شبیه‌سازی در دوره واسنجی.

ردیف	نام شاخص	دقت شبیه‌سازی ماهانه
۱	$R^2 (-)$	۰/۸۱
۲	RMSE($m^3 s^{-1}$)	۰/۹۸
۳	RE (%)	۷

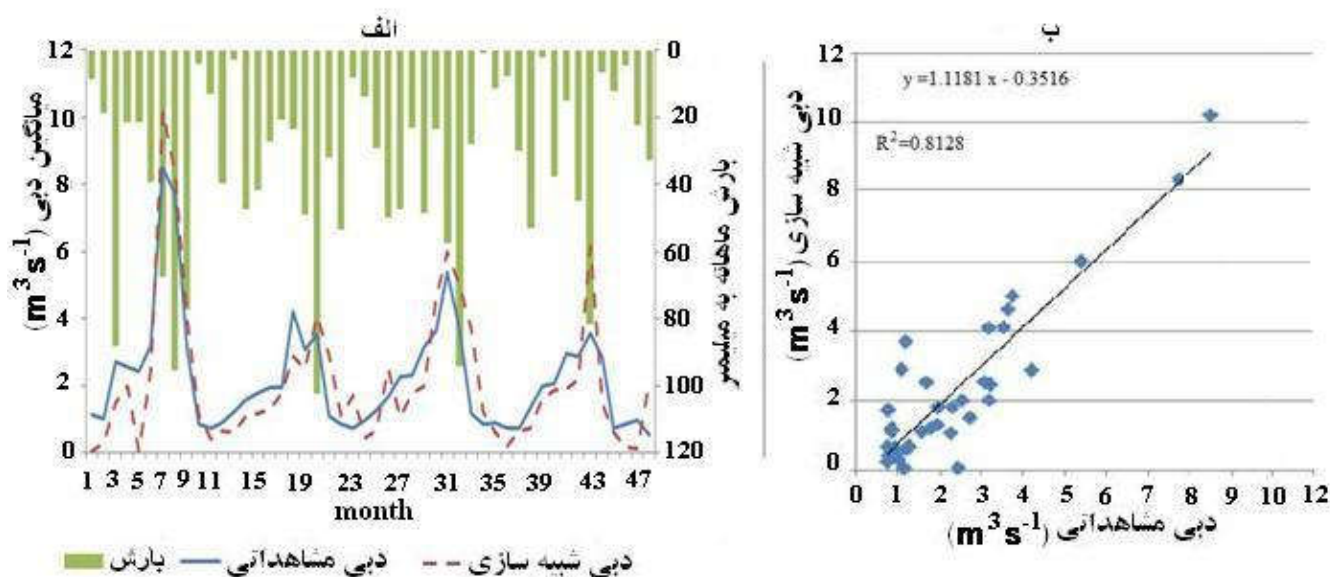
نتایج مرحله اعتبارسنجی

در شکل ۵ هیدروگراف‌های مرحله اعتبارسنجی به همراه مقایسه دبی‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آورده شده است. نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل نیز در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. شاخص‌های ارزیابی مدل نشان می‌دهد که شبیه‌سازی در دوره اعتبارسنجی دارای دقت کمتری نسبت به دوره واسنجی می‌باشد. در این مرحله نیز دبی شبیه‌سازی شده پایه رودخانه کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده آن و دبی‌های اوج نیز بیشتر از

مقادیر اندازه‌گیری شده استخراج شده است. به نظر می‌رسد تغییر کاربری اراضی در طول سال‌های آماری دوره اعتبارسنجی، مدیریت حوضه آبخیز و فعالیت‌های آبخیزداری در حوضه از مهم‌ترین دلایل کاهش دقت مدل در این دوره می‌باشد. احداث سد یامچی بلافاصله در پایین‌دست و بهره‌برداری آن در سال ۸۵-۱۳۸۴ نیز می‌تواند یکی از عوامل تغییر در نتایج گرفته شده در مرحله اعتبارسنجی باشد.



شکل ۳- نقشه‌های طبقات ارتفاعی (الف) طبقات شیب (ب) واحدهای HRU (ج) زمان تمرکز حوضه (د) برای حوضه آبخیز مورد مطالعه.



شکل ۴- تغییرات دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (الف) و رگرسیون برازش نتایج برای دوره واسنجی (ب).

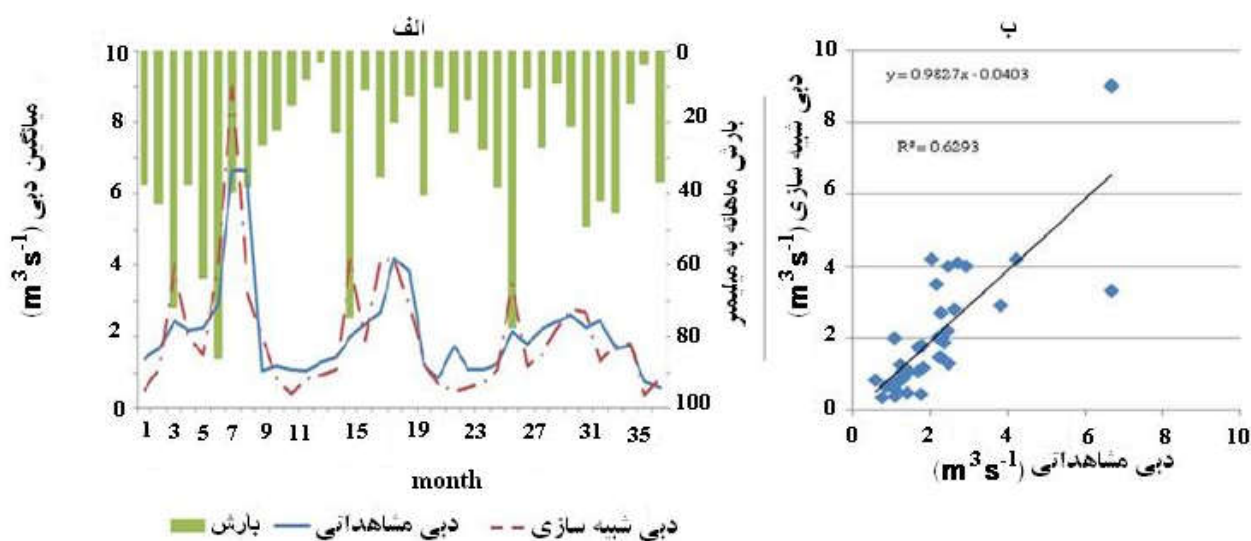
بیشینه و کمینه نرخ ذوب برف به ترتیب با استفاده از متوسط دمای روزانه در روز اول تیر ماه (۲۱ ژوئن)، و متوسط دمای روزانه در روز هفتم دی ماه (۲۱ دسامبر) در حوضه محاسبه می‌شود که با توجه به اطلاعات موجود برای حوضه بالخوچای این پارامترها به ترتیب ۸ و ۰/۸ به دست آمد. در صورتی که کاویان و همکاران (۱۳۹۴) برای حوضه آبخیز هراز مازندران برای این پارامتر اعداد ۱۰ و ۳/۹۲ را به دست آوردند که با توجه به مقایسه دو حوضه از نظر اقلیمی این تفاوت‌ها قابل قبول به نظر می‌رسد. مهم‌ترین این پارامترها، زمان تأخیر در تغذیه آبخوان (gw-delay)، هدایت هیدرولیکی اشباع (sol-k) و شماره منحنی (CN) می‌باشد (کاویان و همکاران ۱۳۹۴).

نتایج پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه

در جدول ۴ خلاصه‌ای از مقادیر بهینه پارامترهای مهم هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه بالخوچای که اطلاعات مفیدی از حوضه مذکور است نشان داده شده است. دمای بارش و ذوب برف، پارامترهایی هستند که با استفاده از دمای متوسط حوضه و درصد مساحت پوشش برف در حوضه توسط مدل محاسبه می‌شود. بینامان و شومیکر (۲۰۰۵) و سانتی و همکاران (۲۰۰۱) پیشنهاد کردند که شبیه‌سازی الگو، زمانی رضایت بخش تشخیص داده می‌شود که شاخص آماری R^2 بیشتر از ۰/۶ باشد. بنابراین اعداد جدول ۳ قابل اطمینان بوده و می‌توان گفت که الگوی شبیه‌سازی قابل قبول است.

جدول ۳- نتایج شاخص‌های ارزیابی شبیه‌سازی روزانه در دوره اعتبارسنجی.

ردیف	نام شاخص	دقت شبیه‌سازی ماهانه
۱	$R^2 (-)$	۰/۶۳
۲	RMSE(m ³ s ⁻¹)	۰/۸۹
۳	RE (%)	۸



شکل ۵- تغییرات دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (الف) و رگرسیون برازش نتایج برای مرحله اعتبارسنجی (ب).

جدول ۴- مقادیر بهینه شده پارامترها در مرحله واسنجی.

ردیف	مشخصه پارامتر	واحد	نام پارامتر	مقدار پارامتر
۱	دمای بارش برف	$^{\circ}\text{C}$	sftm	۵
۲	دمای ذوب برف	$^{\circ}\text{C}$	snmtmp	۵
۳	حداکثر نرخ ذوب برف	mm d^{-1}	smfmx	۸
۴	حداقل نرخ ذوب برف	mm d^{-1}	smfmin	۰/۸
۶	فاکتور تبخیر از خاک	-	esco	۰/۹۷
۷	زمان تأخیر در جریان آب زیرزمینی	d	gw-delay	۳۰
۸	هدایت هیدرولیکی کانال	mm h^{-1}	ch-k1	۴۰
۹	زمان انتقال جریان جانبی	d	lat-time	۵
۱۰	آب قابل دسترس خاک	mm mm^{-1}	sol-awc	۰/۲۲
۱۱	هدایت هیدرولیکی اشباع	mm h^{-1}	sol-k	بین ۱۲ تا ۲۴
۱۲	چگالی توده خاک	gr cm^{-3}	sol-bd	۱/۱
۱۳	شماره منحنی	-	CN	بین ۷۰ تا ۸۰

حوضه که شرایط نفوذ عمقی را دارد با توجه به ساختار فیزیوگرافی و تشکیلات زمین‌شناسی طول می‌کشد تا به آب زیرزمینی بپیوندد. این پارامتر، به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. برای اندازه‌گیری دقیق آن در یک

عمانی و ابریشم‌چی (۱۳۸۵) و فریسن و همکاران (۲۰۰۷) نیز معتقدند که یکی از حساس‌ترین پارامترها در تخمین رواناب شماره منحنی (CN) می‌باشد. زمان تأخیر در تغذیه آبخوان، زمانی است که آب سطحی موجود در سطح

مشاهده‌ای، رواناب را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند)، بنابراین پارامترهای مربوط به اجزاء بیلان با دقت خوبی برآورد گردیده و قابل قبول هستند.

بحث

در این تحقیق دقت شبیه‌سازی در دوره واسنجی با استفاده از شاخص R^2 که یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌های جریان پیوسته است، $0/8$ بدست آمد. همچنین در این مرحله مقادیر بهینه‌ای برای اجزا و ضرایب معادله بیلان آبی در حوضه آبخیز بالخلوچای با دقت مناسب استخراج گردید. از جمله این ضرایب می‌توان به دمای بارش و ذوب برف، بیشینه و کمینه نرخ ذوب برف که به ترتیب با مقادیر 8 و $0/8$ مهم‌ترین این پارامترها، زمان تأخیر در تغذیه آبخوان (gw - $delay$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($sol-k$) و شماره منحنی (CN) اشاره نمود. زمان تأخیر در تغذیه آبخوان به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست اما در مدل SWAT مقدار 30 روز برای این پارامتر مهم استخراج گردید. همچنین برای پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع و شماره منحنی (CN) به‌طور متوسط و به ترتیب 18 میلی‌متر در ساعت و 75 محاسبه گردید. در دوره اعتبارسنجی شاخص R^2 دقت $0/63$ و $RMSE$ مقداری برابر $0/89$ را نشان دادند که نتیجه قابل قبولی است. علاوه بر موارد ذکر شده، با توجه به شرایط موجود برای انجام شبیه‌سازی، از جمله دلایلی که اثر منفی در دقت شبیه‌سازی داشتند می‌توان به مسئله برف‌گیر بودن منطقه اشاره کرد. چرا که مدل SWAT از یک رابطه ساده درجه-روز برای شبیه‌سازی بارش و ذوب برف استفاده می‌کند و شبیه‌سازی برف در SWAT با دقت خیلی بالا انجام نمی‌شود. همچنین مساحت کم حوضه آبخیز مورد مطالعه و در نتیجه دبی کم جریان آن، به‌طور طبیعی باعث می‌شود ضریب تغییرات در این داده‌ها زیاد بوده و در نتیجه دقت شبیه‌سازی کاهش یابد. مسئله برداشت آب برای مصارف کشاورزی که آمار دقیق آن نیز برای ارائه به

حوضه مشخص باید تغذیه آب زیرزمینی شبیه‌سازی گردد، سپس متناسب با تغذیه آب زیرزمینی تغییرات سطح ایستابی و تأخیر زمانی آن نیز شبیه‌سازی شود. در گام بعدی سطح ایستابی شبیه‌سازی شده با نوسانات سطح ایستابی مشاهده‌ای که در یک شبکه پیزومترى قرائت می‌شود مقایسه گردد. بنابراین برآورد زمان تأخیر در تغذیه آبخوان به‌روش معمول هزینه‌بر و زمان‌بر خواهد بود، در حالیکه در مدل SWAT به کمک سایر عوامل، این پارامتر قابل استخراج بوده و همان‌گونه که در جدول ۲ نیز ذکر شده مقدار 30 روز برای حوضه بالخلوچای به‌دست آمده است که با نتایج به‌دست آمده از تحقیق هاروی‌لنکو و همکاران (2015) متفاوت بوده که به دلیل تفاوت در مؤلفه‌هایی از قبیل شیب عمومی، کاربری اراضی و ساختار زمین ساختی بین دو حوضه مورد تحقیق می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های هیدرودینامیک خاک هدایت هیدرولیکی اشباع ($sol-k$) می‌باشد که ساده‌ترین روش برای تعیین آن استفاده از روش استوانه مضاعف می‌باشد که در سطح حوضه آبخیز استفاده از این روش مشکل خواهد بود. مقدار این پارامتر در محدوده هدایت هیدرولیکی خاک‌های لومی در حوضه بالخلوچای ($12-24$ میلی‌متر در ساعت) تخمین زده‌شد که با توجه به نوع پوشش خاک منطقه مورد مطالعه به نظر می‌رسد در محدوده قابل قبول استخراج شده است. همچنین یکی از روش‌های معمول تخمین رواناب در سطح حوضه روش SCS است، که اساس این روش تعیین دقیق مقدار CN می‌باشد که با استفاده از پوشش گیاهی، شیب متوسط حوضه، رطوبت اولیه و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک تعیین می‌شود. با توجه به اطلاعات و نقشه‌های ورودی دقیق برای مدل SWAT نتایج به‌دست آمده در حوضه بالخلوچای برای مطالعات بعدی قابل استناد است. با توجه به اینکه رواناب در سطح حوضه با تقریب بالایی نسبت به رواناب مشاهده‌ای شبیه‌سازی گردیده است (مائوریو و همکاران 2015)، ویلای سان (2015) و کاویان و همکاران (1394) نیز معتقدند که مدل SWAT در مقایسه با نتایج

مدل در دسترس نیست، از دیگر عواملی است که نقش منفی در انجام شبیه‌سازی داشته است.

منابع مورد استفاده

- اکبری ح، ۱۳۸۹. شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه چهل‌چای استان گلستان با استفاده از مدل SWAT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی منابع طبیعی- آبخیزداری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- امیری م، ۱۳۸۷. کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی SWRRB به‌منظور شبیه‌سازی رواناب. مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۶۱، شماره ۴، صفحه‌های ۷۹۷ تا ۸۰۸.
- بی‌نام، ۱۳۹۰. گزارش منابع آب‌های سطحی استان اردبیل، شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل. ۳۲۴ صفحه.
- سیدقاسمی س، ۱۳۸۵. پیش‌بینی تغییرات جریان رودخانه تحت تاثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه زاینده رود). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف. ۱۲۰ صفحه.
- عمانی ن، تجربی م و ابریشم‌چی آ، ۱۳۸۵. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT و GIS. صفحه‌های ۱ تا ۸. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، ۲۴ تا ۲۶ بهمن، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- غلامی ش، ۱۳۸۲. مدل شبیه‌سازی رسوب روزانه با استفاده از مدل توزیعی SWAT در حوضه‌های کوهستانی (حوضه آبخیز امامه). فصل‌نامه پژوهش و سازندگی، شماره ۵۹، صفحه‌های ۲۸ تا ۳۳.
- کاویان ع، گلشن م، روحانی ح، اسمعیلی عوری ا، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران با بهره‌گیری از SWAT. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه‌های ۱۹۷ تا ۲۱۱.
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J and Srinivasan R, 2007. Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine- alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333: 413-430.
- Alansi AW, Amin MSM, Abdul Halim G, Shafri HZM and Aimrun W, 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrology Earth System Science* 6: 7581-7609.
- Bekiaris IG, Panagopoulos IN, Mimikou MA, 2005. Application of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Model in the Ronnea catchment of Sweden. *Global NEST Journal* 7(3): 252-257.
- Binaman J and Shoemaker CA, 2005. Analysis of high-flow sediment event data for evaluating model performance. *Hydrological Processes* 19: 605-620.
- Faramarzi M, Abbaspour KC, Schulin R and Yang H, 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes* 23: 486-501.
- Feyereisen GW, Lowrance R, Strickland TC, Sheridan JM, Bosch DD, 2007. Long-term water chemistry database, Little River experimental watershed. *Water Resource Research* 43:W09474.
- 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.
- Meaurio M, Zabaleta A, Uriarte JA, Srinivasan R, Antigüedad I, 2015. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed, *Journal of Hydrology* 525: 326-334.
- Neitch SL, Arnold JG, Kiniry JR and Williams JR, 2005. Soil and water assessment tool documentation, (SWAT user's manual) 494 P.
- Refsgaard JC and Knudsen J, 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research* 32: 2189-2202.
- Refsgaard JC, 2007. Hydrological Modelling and River Basin Management. PhD Thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland Danish Ministry of the Environment 90 P.

- Santhi C, Arnold JG, Williams JR, Dugas WA and Hauck L, 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *The American Water Resources Association* 37(5): 1169-1188.
- Vilaysane B, Takara K, Luo P, Akkharath I, Duan W, 2015. Hydrological stream flow modeling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin. *Lao PDR, Procedia. Environmental Sciences* 28: 380–390.
- Zhixiang L, Songbing Z, Honglang X, Chunmiao Z, Zhenliang Y, Weihua W, 2015. Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth* 79: 76–85.