

بررسی کارایی مدل SWAT در برآورد دبی‌های روزانه‌ی حوضه‌های فاقد آمار با رویکرد منطقه‌بندی در مناطق خشک

دانیال صیاد^۱، رضا قضاوی^{۲*}، ابراهیم امیدوار^۳

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- استادیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳- استادیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰

چکیده

رواناب یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژی است. در هر حوضه‌ی آبریز برآورد رواناب برای برنامه‌ریزی دقیق مدیریت منابع آب ضروری است. هدف از انجام این مطالعه بررسی کارایی مدل هیدرولوژیکی و نیمه‌توزیعی SWAT جهت برآورد دبی روزانه‌ی حوضه‌های فاقد آمار در مناطق خشک از طریق انتقال پارامترهای واسنجی شده از حوضه‌ی دارای آمار به حوضه‌ی فاقد آمار با رویکرد منطقه‌بندی مبتنی بر خصوصیات فیزیکی است. جهت انجام این مطالعه، ابتدا مدل SWAT در حوضه‌ی آبریز دارای آمار (خنچه) واسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس پارامترهای واسنجی شده برای شبیه‌سازی و تحلیل جریان در بسته نرم‌افزاری Hydro office-FDC به حوضه‌ی فاقد آمار سوک چم انتقال داده شد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، از بین پارامترهای حساس در شبیه‌سازی جریان، پارامترهای HRU-SLP, SLSOIL, SOL-AWC, CANMX, CH-S1 به عنوان حساس‌ترین پارامترها در منطقه‌ی مورد مطالعه شناخته شدند. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل PBIAS, R², NSE به ترتیب برای دوره واسنجی ۰/۶، ۰/۴۵ و ۱۰/۷ و برای دوره‌ی صحت‌سنجی برابر ۰/۴۷، ۰/۶۳ و ۱۱/۸۸- به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی دقت قابل قبول شبیه‌سازی دبی روزانه در حوضه‌ی خشک در مقیاس روزانه است. همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری شاخص‌های منحنی تداوم سیلابی (Q₅)، مرطوب (Q₂₀-Q₁₀)، متوسط (Q₆₀-Q₅₀-Q₄₀-Q₃₀)، کم‌آبی (Q₉₅-Q₉₀-Q₈₀-Q₇₀) نشان داد که در ۵ درصد از ایام سال (۱۸ روز) دبی سیلابی معادل ۰/۲۸ مترمکعب برثانیه یا بیشتر از آن است. محدوده‌ی شاخص‌های مرطوب، متوسط و کم آبی به ترتیب (۰/۱۶-۰/۱۲)، (۰/۱۱-۰/۰۸) و (۰/۲۴-۰/۰۵۸) مترمکعب برثانیه به دست آمد. استخراج این نتایج می‌تواند به درک و شناخت بهتر از رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های فاقد آمار کمک کند.

کلمات کلیدی: مدل ارزیابی آب و خاک، حوضه‌های فاقد آمار، شبیه‌سازی روزانه، رویکرد منطقه‌بندی، منحنی تداوم جریان، حوضه‌هایی آبریز، خنچه و سوک چم، استان اصفهان

رواناب یکی از مهم‌ترین اجزاء چرخه هیدرولوژی است و در هر حوضه‌ی آبریز، برآورد رواناب برای برنامه‌ریزی دقیق مدیریت منابع آب ضروری است (جیمینو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۹۲). درک فرایند بارش-رواناب برای مدیریت منابع آبی و استفاده‌ی بهینه از منابع آب موجود در هر حوضه ضروری است (تاشوم^۲ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۰۳). مدل‌سازی بارش و رواناب قسمت کلیدی تحقیقات جهانی در زمینه هیدرولوژی آب‌های سطحی است. با وجود تلاش‌های گسترده برای جمع‌آوری داده‌های هیدرولوژیکی، هنوز مناطقی از جهان خصوصاً مناطق خشک و نیمه‌خشک فاقد آمار هیدرولوژیکی، خصوصاً آمار ایستگاه‌های هیدرومتری است (تگن^۳ و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۵۴). مدل‌های هیدرولوژیکی زیادی برای شبیه‌سازی جریان در حوضه‌های آبریز وجود دارد، اما مدل‌های با گام زمانی پیوسته به دلیل توانایی دقیق شبیه‌سازی جریان روی زمین در ارتباط با خاک و پوشش گیاهی دارای دقت بالایی هستند (آرنولد^۴ و همکاران، ۱۹۹۳: ۴۷؛ ارکان^۵ و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۸۸؛ نادری و همکاران، ۲۰۱۸: ۶۱). تا به امروز در مورد ارزیابی عملکرد مدل SWAT برای برآورد دبی حوضه‌های فاقد آمار مطالعات کمی صورت گرفته است (سرینیواسان^۶ و همکاران، ۲۰۱۰).

مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT)^۷، یک مدل هیدرولوژیکی مفهومی و نیمه‌توزیعی و از جامع‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها در سراسر جهان در مقیاس حوضه‌ی آبریز است (آرنولد و همکاران، ۱۹۹۳: ۱۷؛ عباسپور و همکاران، ۲۰۱۵: ۷۳۳؛ قضاوی و همکاران، ۲۰۱۸: ۵۴؛ کریمی و بیاتی خطیبی، ۲۰۱۹: ۱۱۵). از آنجایی که در حوضه‌های فاقد آمار داده‌های مشاهداتی وجود ندارد، فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های هیدرولوژیکی در این حوضه‌ها ناممکن است. از سوی دیگر پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار برای اهداف مدیریت و برنامه‌ریزی حوضه (تخمین رواناب، خدمات اکوسیستمی، کنترل سیل) امری ضروری است (بک^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). با این حال پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از مدل هیدرولوژیکی واسنجی شده در حوضه‌های دارای آمار مشاهداتی با رویکرد منطقه‌بندی به طور گسترده‌ای مورد بحث و استفاده قرار گرفته است (یانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۹). رویکرد منطقه‌بندی به عنوان یکی از کم‌هزینه‌ترین و رایج‌ترین راه‌حل‌ها برای حل مشکل پیش‌بینی جریان در حوضه‌های فاقد آمار معرفی شده است (سیسلاقی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰). بر اساس تعریف رویکرد منطقه‌بندی، پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار از طریق انتقال اطلاعات از حوضه دارای آمار به حوضه فاقد آمار انجام می‌شود (روجاس^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۶).

1- Jimeno
2- Teshome
3- Tegegne
4- Arnold
5- Ercan
6- Srinivasan

7- Soil & Water Assessment Tools
8- Beck
9- Yang
10- Cislighi
11- Rojas

به طور کلی واسنجی در حوضه دارای آمار و انتقال پارامترهای بهینه شده از حوضه دارای آمار به حوضه‌ی فاقد آمار (گیرنده) به سه روش: ۱- روش‌های مبتنی بر مجاورت مکانی، ۲- روش‌های مبتنی بر شباهت فیزیکی و ۳- روش‌های مبتنی بر روابط رگرسیونی انجام می‌شود (یانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). مزیت استفاده از روش‌های مبتنی بر شباهت فیزیکی، کارایی آن برای مناطق با وسعت زیاد است (ساوین و پاترا^۲، ۲۰۱۷).

نتایج مطالعات پاراجکا^۳ و همکاران (۲۰۰۵) در اتریش؛ بائو^۴ و همکاران (۲۰۱۲) در چین؛ یانگ^۵ و همکاران (۲۰۱۹) در نروژ؛ رفیعی امام^۶ و همکاران (۲۰۱۶) در ویتنام نشان داده است که روش شباهت فیزیکی در بین سایر روش‌ها بهترین روش است. مطالعات انجام شده جهت شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از مدل SWAT در نقاط مختلف جهان و با رویکرد منطقه‌بندی، نشان‌دهنده‌ی قابل قبول بودن نتایج این مدل است. آنگ و اورنگ^۷ (۲۰۱۸) در مطالعه‌ی خود به شبیه‌سازی رواناب در حوضه فاقد آمار کامبوج با مدل SWAT پرداختند و نتایج قابل قبولی گزارش کردند. منگیستو^۸ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه خود با هدف واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در حوضه‌های فاقد آمار منطقه‌ی نیمه‌خشک جنوب آفریقا با استفاده از رویکرد منطقه‌ایی با روش شباهت فیزیکی نتایج رضایت‌بخش گرفته‌اند. لای^۹ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ی خود در حوضه فاقد آمار رودخانه‌ی کاپانگا با مدل SWAT برای اهداف مدیریت منابع آب نتایج را خوب گزارش کردند.

با توجه به استفاده از مدل SWAT در برآورد دبی حوضه‌های فاقد آمار در نقاط مختلف جهان، بر اساس بررسی‌های انجام شده، تاکنون در ایران مطالعه‌ای برای برآورد دبی روزانه‌ی حوضه‌های فاقد آمار در مناطق خشک با رویکرد منطقه‌بندی مبتنی بر خصوصیات فیزیکی با استفاده از مدل SWAT صورت نگرفته است. هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی کارایی مدل هیدرولوژیکی و نیمه‌توزیعی SWAT جهت برآورد دبی روزانه‌ی حوضه‌های فاقد آمار در مناطق خشک از طریق انتقال پارامترهای واسنجی شده از حوضه‌ی دارای آمار و با تکیه بر روش منطقه‌بندی مبتنی بر خصوصیات فیزیکی است.

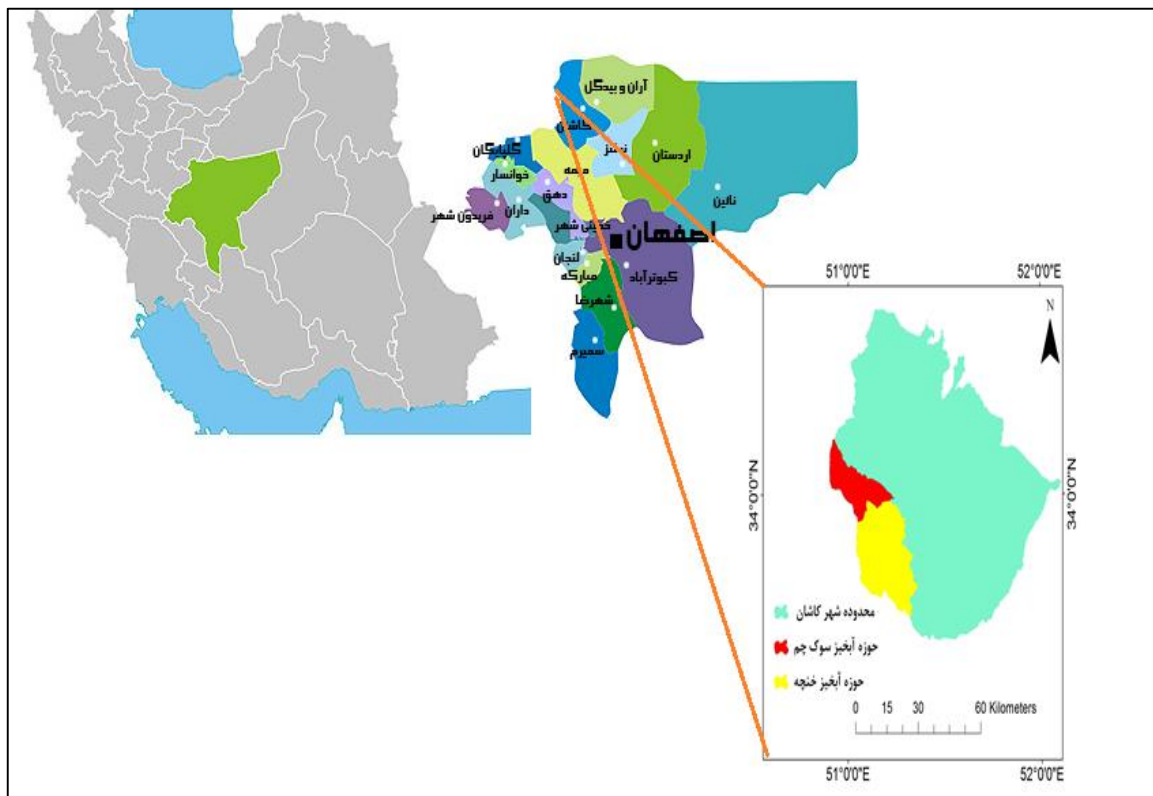
1- Yang
2- Swain
3- Prajakta
4- Bao
5- Yang

6- Rafiei Emam
7- Ang & Oeurng
8- Mengistu
9- Leye

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی سوک چم یکی از حوضه‌های مشرف به شهر کاشان با مساحت تقریبی ۹۶۵/۲۷ کیلومترمربع است که در قسمت شمال غربی استان اصفهان و قسمت مرکزی ایران واقع شده است. این حوضه بین طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۴ دقیقه و ۱ ثانیه تا ۵۱ درجه ۲۱ دقیقه و ۳۹ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۰ دقیقه و ۲۹ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۹ دقیقه و ۱ ثانیه شمالی واقع شده است. حوضه‌ی مورد مطالعه از یک زیرحوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم) با مساحت ۳۲۱/۷۶ کیلومترمربع و یک حوضه دارای آمار (خنچه) با مساحت ۶۴۳/۵۶ کیلومترمربع تشکیل شده است (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت حوضه‌های آبریز مورد مطالعه شامل زیرحوضه‌ی دارای آمار (خنچه) و زیرحوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم)

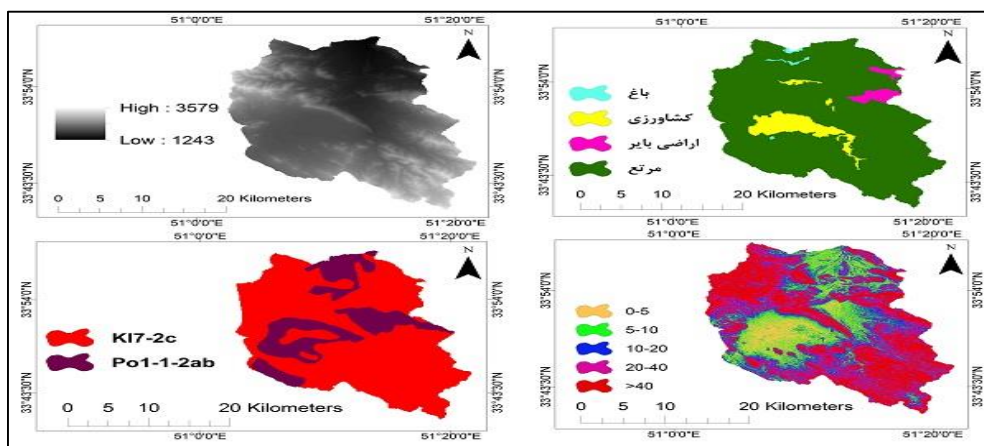
Fig (1): Location of the studied watersheds include Khonche subbasin and Sok Cham subbasin

۲-۲- روش مطالعه

SWAT یک مدل فیزیکی و نیمه‌توزیعی پیوسته است که برای ارزیابی کمیت و کیفیت آب در مقیاس حوضه‌های آبریز برنامه‌ریزی شده است. یکی از مزیت‌های مدل SWAT امکان استفاده از آن برای مدل‌سازی دبی در مقیاس‌های زمانی مختلف در حوضه‌های فاقد آمار است (نوری^۱ و کالین، ۲۰۱۶: ۱). این مدل قادر است با استفاده از پایگاه مولد اقلیمی داده‌های مفقود شده اقلیمی را شبیه‌سازی کند. مدل SWAT برای شبیه‌سازی بارش-رواناب نیازمند داده‌های مکانی (نقشه‌ی طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، خاک)، داده‌های ایستگاه اقلیمی (بارندگی، حداکثر و حداقل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشعات خورشیدی) و اطلاعات ایستگاه هیدرومتری (دبی) است (تاشوم^۲ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۰۳). در این مطالعه، داده‌های روزانه بارندگی و دمای هوا (حداکثر و حداقل) حوضه خنچه برای دوره‌ی زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۲ از ایستگاه‌های برزوک، فین و نیاسر جدول ۱ استخراج و به مدل SWAT معرفی شد. همچنین نقشه‌های طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی و خاک در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی^۳ تهیه و به مدل معرفی گردید. نقشه طبقات شیب با استفاده از نقشه‌ی طبقات ارتفاعی^۴ در محیط مدل SWAT طبقه‌بندی و به مدل معرفی شد (شکل ۲) و جدول ۲. سپس با تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب، نقشه‌ی واحد پاسخ هیدرولوژیکی^۵ برای مدل تعریف شد. در نهایت داده‌های دبی اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه‌ی خنچه به سه دوره (۲۰۰۶-۲۰۰۷) برای گرم کردن مدل، (۲۰۰۸-۲۰۱۰) برای واسنجی و (۲۰۱۱-۲۰۱۲) برای صحت‌سنجی دسته‌بندی و به مدل معرفی شد. شکل ۳ نقشه‌ی شبکه‌ی آبراهه‌ها و محل ایستگاه هیدرومتری و هواشناسی حوضه دارای آمار (خنچه) را نشان می‌دهد. بعد از به دست آمدن مقادیر پارامترهای بهینه در فرایند واسنجی در حوضه‌ی دارای آمار (خنچه)، مدل SWAT با توجه به خصوصیات فیزیکی نزدیک دو حوضه برای حوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم) ساخته و اجرا شد. در شکل ۴ نمودار مراحل مختلف انجام کار آمده است.

1- Noori
2- Teshome
3- Geographic Information System

4- Digital Elevation Model
5- Hydrologic Response Unit



شکل (۲): نقشه‌های مکانی حوضه‌ی آبریز (خنچه)
 Fig (2): Location maps of Khonche watershed

جدول (۱): ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری منطقه‌ی مطالعه (حوضه‌ی آبریز خنچه)

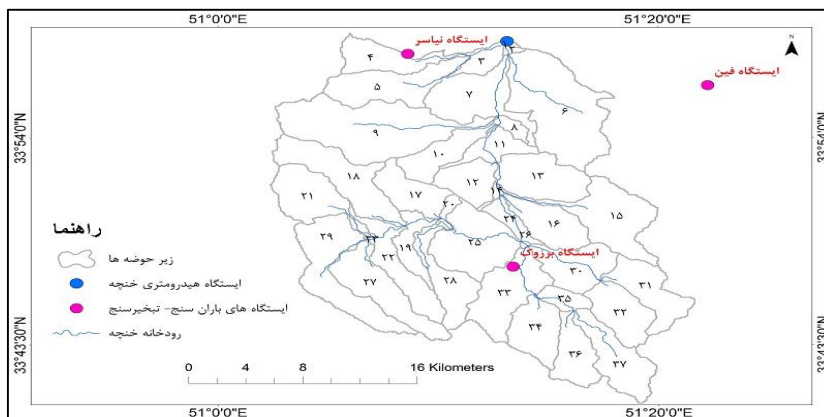
Tab (1): The Meteorology and streamflow observation stations of the study area (Khonche watershed)

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول	عرض	ارتفاع	سازمان دریافت‌کننده
۱	برزوک	تبخیر- باران سنج	۵۱/۲۱	۳۳/۷۶	۲۰۸۰	اداره کل هواشناسی اصفهان
۲	فین	تبخیر- باران سنج	۵۱/۳۷	۳۳/۹۴	۱۰۵۰	اداره کل هواشناسی اصفهان
۳	نیاسر	باران‌سنجی	۵۱/۱۴	۳۳/۹۷	۱۶۰۰	اداره کل هواشناسی اصفهان
۴	خنچه	هیدرومتری	۵۱/۲۱	۳۳/۹۸	۱۴۸۵	اداره کل هواشناسی اصفهان

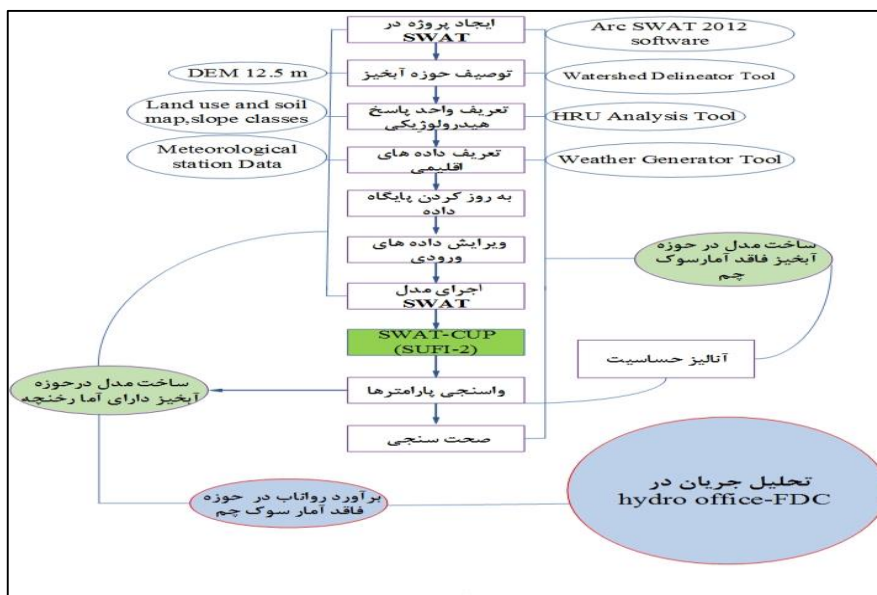
جدول (۲): داده‌های مورد استفاده برای آماده‌سازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

Tab (2): Data used for preparing, calibrating and validating of the SWAT model

ردیف	داده	دقت مکانی	منبع
۱	مدل رقومی ارتفاعی	۱۲/۵ × ۱۲/۵ متر	https://search.asf.alaska.edu
۲	نقشه‌ی کاربری اراضی	۱۰۰۰ متر	www.gvm.jrc.it/glc2000
۳	نقشه‌ی خاک	۱۰۰۰ × ۱۰۰۰ متر	کلاس خاک فائو
۴	داده‌های هواشناسی	ایستگاه هواشناسی	اداره کل هواشناسی اصفهان
۵	داده‌های هیدرومتری	مشاهده‌ای روزانه رواناب	اداره کل هواشناسی اصفهان



شکل (۳): نقشه‌ی شبکه‌ی آبراهه، ایستگاه هیدرومتری و هواشناسی حوضه‌ی آبریز خنچه
Fig (3): Stream network, hydrometry and meteorology map of Khonche watershed



شکل (۴): روند نمای فرآیند مدل‌سازی با استفاده از مدل SWAT
Fig. (4): General flowchart of the modelling process using SWAT

۱-۲-۲- تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل

۱-۱-۲-۲- تحلیل حساسیت

هدف از تحلیل حساسیت، شناسایی پارامترهایی است که در فرایندهای مدل‌سازی هیدرولوژیکی بیشترین تأثیر را دارند. در این پژوهش برای تحلیل حساسیت حوضه‌ی دارای آمار (خنچه) ۱۴ پارامتر جدول (۳) که بر

داده‌های اندازه‌گیری شده) است که در باند عدم قطعیت 95PPU قرار دارد. مقدار این پارامتر بین صفر تا یک است و بهترین نتیجه وقتی است که P-factor نزدیک به یک باشد. r-factor میانگین ضخامت باند عدم قطعیت است که بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است و مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی تطابق کامل مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده است (عباسپور، ۲۰۱۳).

۲-۲-۲- انتقال پارامترهای واسنجی شده به حوضه‌ی فاقد آمار با رویکرد منطقه‌بندی

در این پژوهش از رویکرد منطقه‌بندی مبتنی بر تشابه فیزیکی برای انتقال پارامترهای واسنجی شده از حوضه‌ی دارای آمار به حوضه‌ی فاقد آمار استفاده شد (ناتان^۱ و همکاران، ۱۹۹۰؛ ساموئل^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). به این منظور ابتدا مدل برای حوضه دارای آمار با استفاده از داده‌های مکانی (خاک، کاربری اراضی، شیب) و داده‌های اقلیمی (بارش و حداکثر و حداقل دما) واسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس پارامترهای واسنجی شده در حوضه‌ی دارای آمار (خنچه) به حوضه فاقد آمار (سوک چم) بر اساس رویکرد منطقه‌بندی بر اساس خصوصیات فیزیکی انتقال داده شد تا بتوان رواناب را در حوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم) شبیه‌سازی کرد. جدول ۴ برخی از خصوصیات فیزیکی مشترک حوضه دارای آمار و فاقد آمار را نمایش می‌دهد. تفاوت در اندازه دو حوضه، ممکن است برخی از خصوصیات هیدرولوژیکی را تحت تأثیر خود قرار دهد که این تأثیر روی عدم قطعیت مدل در درجه اول و روی ویژگی‌های کیفی جریان اثر دارد (والاس^۳ و همکاران، ۲۰۱۸: ۸۹۴). از آنجایی که در این پژوهش تمرکز روی شبیه‌سازی کمی جریان است، بنابراین تفاوت در اندازه‌ی دو حوضه اثر ناچیزی دارد.

جدول (۴): تشابه در خصوصیات فیزیکی بین دو حوضه‌ی آبریزداری آمار و فاقد آمار بر اساس رویکرد منطقه‌بندی

Tab (4): Similarities in physical properties between gauged and ungauged watersheds based on regionalization approach

ردیف	خصوصیات توصیفی	حوضه‌ی دارای آمار	حوضه‌ی فاقد آمار
۱	مساحت حوضه‌ی آبریز	۶۴۳/۵۶ کیلومتر مربع	۳۲۱/۷۶ کیلومتر مربع
۲	بافت خاک	LOAM, CLAY_LOAM	LOAM, CLAY_LOAM
۳	کلاس شیب	۸۰ درصد حوضه شیب بیشتر از ۱۰ درصد	۸۰ درصد حوضه شیب بیشتر از ۱۰ درصد
۴	محدوده‌ی ارتفاعی	۱۲۹۱-۳۵۴۸	۱۲۶۰-۳۲۹۲
۵	کاربری اراضی	باغ، کشاورزی، مرتع	مرتع، باغ
۶	بارندگی سالانه	۲۰۸/۵ میلی‌متر	۱۸۸/۷ میلی‌متر
۷	ضریب رواناب	۰/۱۶	۰/۱۶
۸	نسبت تبخیر و تعرق به بارندگی	۰/۸۳	۰/۸۶
۹	تبخیر و تعرق	۱۷۳/۶	۱۶۲/۶

1- Nathan
2- Samuel

3- Wallac

۳-۲-۲- ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل از سه شاخص نش- ساتکلیف^۱ (NSE)، ضریب تعیین^۲ (R²) و درصد انحراف^۳ (PBIAS) استفاده شد. رابطه‌ی ۱ ضریب NSE را نشان می‌دهد. این ضریب مبین اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده جریان است که بین مثبت یک تا منفی بی‌نهایت متغیر است و هرچه مقادیر نزدیک به یک باشد، نشان‌دهنده‌ی دقت بیشتر مدل است. ضریب تعیین R² رابطه‌ی ۲ همبستگی بین مقادیر مشاهده‌داتی و شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد و مقادیر آن بین یک تا صفر است. هر چه این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی بهتری بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود دارد. PBIAS (رابطه‌ی ۳) بیانگر گرایش مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده شده است. مقادیر مثبت، منفی و صفر به ترتیب بیانگر تخمین کمتر از واقعیت و تخمین بیش‌تر از واقعیت و بهینه است.

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_i-S_i)^2}{\sum_{i=1}^n(Q_i-\bar{Q})^2} \quad (1)$$

$$R^2=\left[\frac{\sum_{i=1}^n(Q_i-S_i)(S_i-\bar{S})}{\left(\sum_{i=1}^n(Q_i-\bar{Q})^2\right)^{0.5}\left(\sum_{i=1}^n(S_i-\bar{S})^2\right)^{0.5}}\right]^2 \quad (2)$$

$$BIAS=\frac{\sum_{i=1}^n(Q_i-S_i)\times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

Q_i مقادیر مشاهده‌ای، S_i مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{Q} میانگین مقادیر مشاهده‌ای، \bar{S} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است (موریاسی^۴ و همکاران، ۲۰۰۷؛ ییلماز و اونوز^۵، ۲۰۲۰).

۳-۲-۴- تحلیل رواناب شبیه‌سازی شده رودخانه‌ی سوک چم

منحنی تدام جریان برای نمایش ارتباط بین دبی (روزانه) و درصد زمانی که دبی معادل یا بیشتر از آن مقدار است، ترسیم می‌گردد (بزابع^۶، ۲۰۲۱: ۱). منحنی تداوم جریان می‌تواند برای برنامه‌ریزی مدیریتی منابع آب خصوصاً کنترل سیلاب و تأمین منابع آب شرب، کشاورزی و محدوده‌ی دبی‌های رودخانه (سیلابی تا کم آبی) مورد استفاده قرار گیرد (لی^۷ و همکاران، ۲۰۱۳). در این پژوهش برای تعیین محدوده‌ی دبی‌های رودخانه‌ی سوک چم (سیلابی تا کم آبی)، منحنی تداوم جریان بر پایه جریان‌های برآورد شده روزانه حوضه‌ی آبریز سوک چم با استفاده از رویکرد منطقه بندی برای سال‌های آماری (۲۰۱۵-۲۰۰۸) در بسته نرم افزاری hydro office-

1- Nash and Sutcliffe
2- Coefficient of Determination
3- Moriasi
4- Moriasi

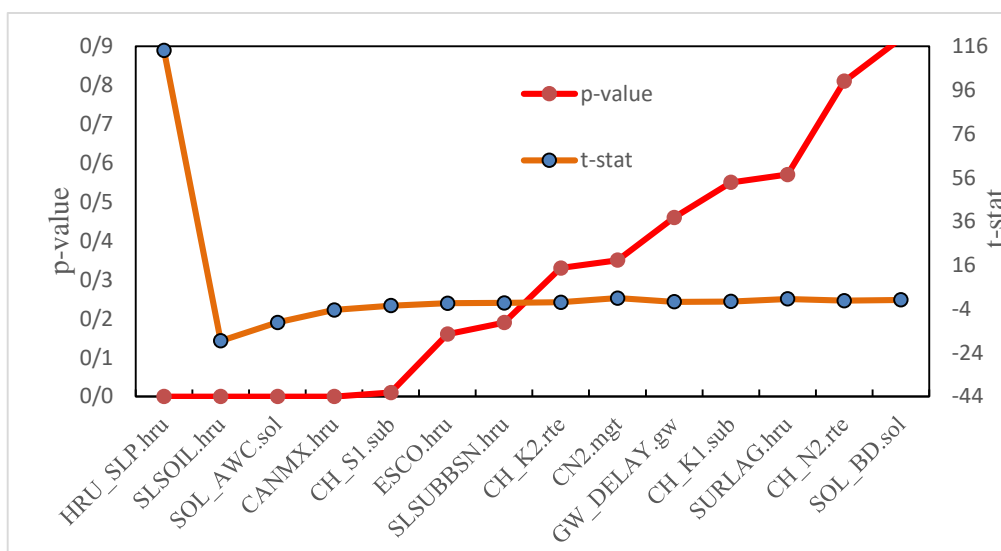
5- Yilmaz & Onoz
6- Bezabih
7- Lee et al.

FDC و با استفاده از شاخص‌های $Q_5, Q_{10}, Q_{20}, Q_{30}, Q_{40}, Q_{50}, Q_{60}, Q_{70}, Q_{80}, Q_{90}, Q_{95}$ ترسیم گردید. همچنین شیب و شکل منحنی تداوم جریان در هر لحظه، مقدار دبی در آن لحظه و نوع رژیم جریان حاکم بر رودخانه را نشان می‌دهد (یاداوا^۱، ۲۰۰۷).

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- تحلیل حساسیت پارامترها

شکل ۵ نتایج تحلیل حساسیت ۵ پارامتر (SLSOIL, HRU-SLP, SOL-AWC, CANMX, CH-S₁) که در این مطالعه دارای بیش‌ترین حساسیت با بیشترین مقدار T-stat و کم‌ترین مقدار P-value بوده‌اند را نمایش می‌دهد. به طور کل P-value کم‌تر از ۰/۰۵ به عنوان حساس‌ترین پارامترها در یک مطالعه شناخته می‌شوند (جاکادا و چن^۲، ۲۰۲۰؛ واروساویتارانا^۳، ۲۰۲۰).



شکل (۵): نمودار تحلیل حساسیت و رتبه‌بندی پارامترها
Fig (5): Sensitivity analysis and ranking parameters

۳-۲- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در این پژوهش مدل SWAT با استفاده از جریان روزانه در ایستگاه دارای آمار خنجه واسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس پارامترهای بهینه با رویکرد منطقه‌بندی مبتنی بر خصوصیات فیزیکی به حوضه‌ی آبریز فاقد آمار

1- Yadav
2- Jakada & Chen

3- Warusavitharana

سوک چم انتقال داده شدند و سپس رواناب حوضه‌ی فاقد آمار تخمین زده شد. بر اساس نتایج حاصل از واسنجی مدل، مقدار p-factor و R-factor برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۲۶ و ۱/۲۳ و برای دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۴۲ و ۲/۵۷ به دست آمد. با توجه به مقادیر به دست آمده p-factor برای دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب ۲۶ درصد و ۴۲ درصد از مقادیر مشاهده‌ای در باند عدم قطعیت^۱ 95ppu قرار دارند.

مقادیر حاصله از R-factor (ضخامت باند عدم قطعیت) برای دوره‌ی صحت‌سنجی نشان از عدم قطعیت نسبتاً زیاد در این دوره است. بالا بودن عدم قطعیت در این پژوهش با توجه به شرایط خاص منطقه امری طبیعی است. از دلایل بالا بودن عدم قطعیت در این مطالعه می‌توان به واقع شدن منطقه در اقلیم خشک، واسنجی و صحت‌سنجی مدل در مقیاس روزانه، توانایی پایین مدل در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و دبی‌های کم اشاره کرد. (فو^۲ و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین در این پژوهش ضریب تعیین و نش _ ساتکلیف برای دوره‌ی واسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۶ و برای دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۴۷ به دست آمد که با توجه گزارش‌های جدول ۵ عملکرد مدل به ترتیب در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی خوب و رضایت‌بخش به دست آمده است (کالین^۳ و همکاران، ۲۰۱۰). در جدول ۶ نتایج تحلیل حساسیت و پارامترهای واسنجی شده مدل به همراه محدوده‌ی تغییرات هر پارامتر برای حوضه‌ی آبریز خنچه نشان داده شده است.

جدول (۵) ارزیابی عملکرد مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب روزانه

Tab (5): Performance evaluation of SWAT model for daily runoff simulation

ردیف	عملکرد مدل	NSE	(PBIAS)
۱	خیلی خوب	$NSE \geq 7/0$	$PBIAS \leq 25$
۲	خوب	$5/0 \leq NSE < 7/0$	$25 < PBIAS \leq 50$
۳	رضایت‌بخش	$3/0 \leq NSE < 5/0$	$50 < PBIAS \leq 70$
۴	ناکارآمد	$NSE < 3/0$	$PBIAS > 70$

در این جدول، کدهای (V-I) به ترتیب مقدار اولیه پارامتر در (+۱ ارزش داده شده) ضرب می‌گردد و مقدار اولیه پارامتر با مقدار داده شده جایگزین می‌شود (گونگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۲: ۸۲۲). در شکل ۶؛ ۷ و ۸ به ترتیب هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی و همبستگی بین مقدار رواناب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. از آنجائی که برای R^2 مقادیر بیش‌تر از ۰/۵ قابل قبول است

1- Uncertainty
2- Fu

3- Kalin
4- Gong

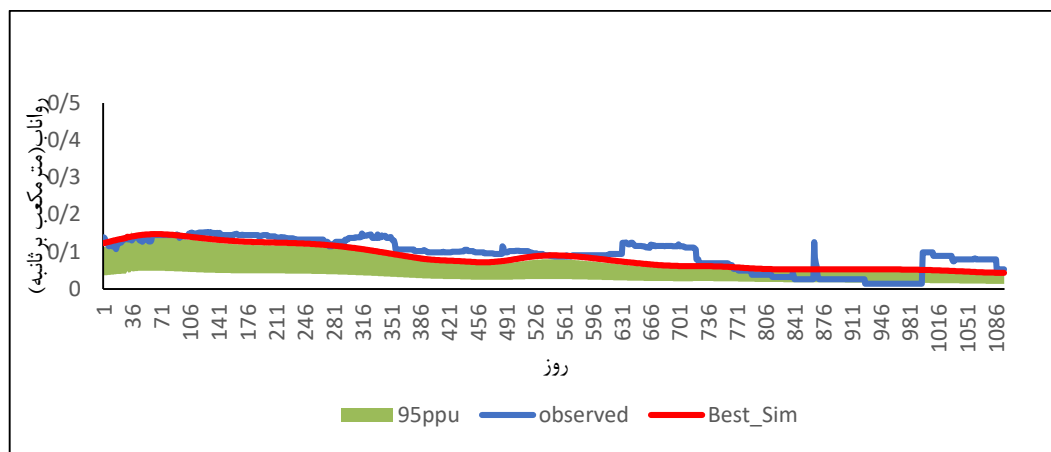
(کرکی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰)، نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه نیز قابل قبول است.

در این پژوهش مقدار PBIAS برای دوره‌ی واسنجی (تخمین کم‌تر از واقعیت) و صحت‌سنجی (تخمین بیش‌تر از واقعیت) به ترتیب برابر ۱۰/۷ و ۱۱/۸ به دست آمده است. در جدول ۷ ارزیابی عملکرد مدل SWAT برای شبیه‌سازی روزانه رواناب در حوضه‌ی آبریز خنچه نشان داده شده است. با توجه به معیار R^2 و با بررسی شکل هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی، تطابق زمانی (اوج و کاهش) قابل قبول است. ولی با توجه به ضریب br^2 (ضریب همبستگی وزنی) که برای دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۴ و ۰/۲۱ به دست آمده است، مقادیر نظیر به نظیر دبی خوب پیش‌بینی نشده است. به طور کل مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی‌های اوج دچار ضعف است و معمولاً رواناب را کم‌تر از حالت مشاهده‌ای شبیه‌سازی می‌کند (تالسون و شومکر^۲، ۲۰۰۴). در جدول ۸ مقایسه نتایج حاصل عملکرد مدل SWAT جهت شبیه‌سازی روزانه‌ی رواناب بین پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های مرتبط آمده است.

جدول (۶) نتایج تحلیل حساسیت و محدوده‌ی واسنجی و بهینه‌ی پارامترها

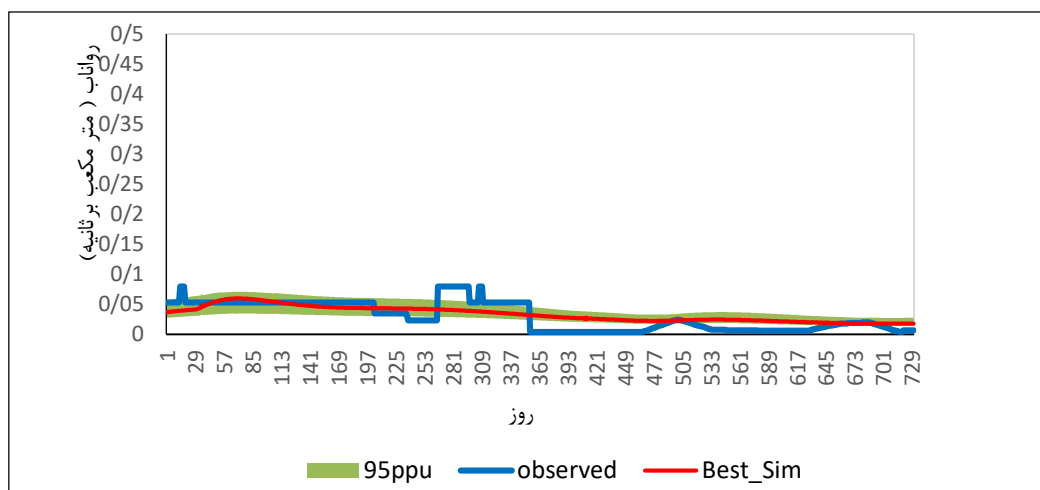
Tab (6): Results of the sensitivity analysis and calibration range and optimal parameters

ردیف	نام پارامتر	رتبه	t-stat	p-value	روش تغییر	محدوده‌ی واسنجی شده		بهینه
						حداقل	حداکثر	
۱	HRU_SLP.hru	۱	۱۱۴/۰۳	۰/۰۰۰	Replace	۰/۱	۰/۳	۰/۲۹
۲	SLSOIL.hru	۲	-۱۸/۵۷	۰/۰۰۰	Replace	۵۳	۶۵	۵۳/۵
۳	SOL_AWC.sol	۳	-۱۰/۱۸	۰/۰۰۰	Relative	۰/۳	۰/۴	۰/۳
۴	CANMX.hru	۴	-۴/۵	۰/۰۰۰	Replace	۳۶	۸۲	۵۲/۵
۵	CH_S1.sub	۵	-۲/۵	۰/۰۱	Replace	۲/۱	۴/۴	۳/۶۳
۶	ESCO.hru	۶	-۱/۳۸	۰/۱۶	Replace	۰/۰۳	۰/۲	۰/۰۸
۷	SLSUBBSN.hru	۷	-۱/۲	۰/۱۹	Replace	۷۸	۸۰	۷۹/۴
۸	CH_K2.rte	۸	-۰/۹۶	۰/۳۳	Replace	۳۱	۵۹	۳۹/۷
۹	CN2.mgt	۹	۰/۹	۰/۳۵	Relative	-۰/۲۱	-۰/۲	-۰/۲
۱۰	GW_DELAY.gw	۱۰	-۰/۷۲	۰/۴۶	Replace	۲۸۶	۳۶۵	۳۰۴/۹
۱۱	CH_K1.sub	۱۱	-۰/۵۹	۰/۵۵	Replace	۱۸۳	۲۳۹	۲۱۳
۱۲	SURLAG.hru	۱۲	۰/۵۵	۰/۵۷	Replace	۵	۶	۵/۸
۱۳	CH_N2.rte	۱۳	-۰/۲۳	۰/۸۱	Replace	۰/۱۴	۰/۱۴۱	۰/۱۴
۱۴	SOL_BD.sol	۱۴	۰/۰۹	۰/۹۲	Replace	۲/۱	۲/۲	۲/۱



شکل (۶): مقایسه‌ی جریان روزانه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در طول دوره‌ی واسنجی (۲۰۰۸-۲۰۱۰)

Fig (6): Comparison of the measured and predicted daily stream flow during the calibration Period (2008-2010)



شکل (۷): مقایسه‌ی جریان روزانه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در طول دوره‌ی صحت‌سنجی (۲۰۱۱-۲۰۱۲)

Fig (7): Comparison of the measured and predicted daily stream flow during the validation Period (2011-2012)

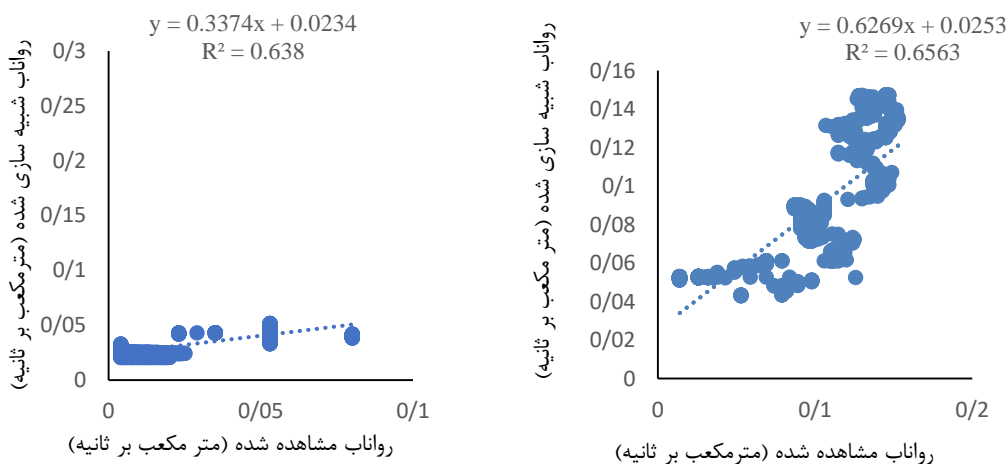
جدول (۷): معیارهای ارزیابی مدل برای مقیاس زمان روزانه

Tab (7): Evaluation model criteria for daily time scale

P-Factor	R-Factor	PBIAS	NSE	R2	دوره‌ی آماری	مرحله
۰/۲۶	۱/۲۳	۱۰/۷	۰/۶	۰/۶۵	۲۰۱۰-۲۰۰۸	واسنجی
۰/۴۲	۲/۵۷	-۱۱/۸	۰/۴۷	۰/۶۳	۲۰۱۲-۲۰۱۱	صحت‌سنجی

جدول (۸) مقایسه نتایج حاصل از عملکرد مدل SWAT جهت شبیه‌سازی رواناب روزانه بین پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها
Tab (8): Comparison between the results of the SWAT model to simulate daily runoff in present study and other research

ردیف	محقق، سال	سال	حوضه‌ی آبریز	مساحت (km ²)	واسنجی		صحت‌سنجی	
					NSE	R ²	NSE	R ²
۱	(زانگ ^۱ و همکاران)	۲۰۰۷	لوهو (چین)	۵۲۳۹	۰/۸۲	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۵۴
۲	(روحانی و همکاران)	۲۰۰۷	گروته (بلژیک)	۳۸۳	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۸۱	۰/۶۶
۳	(گلاوان ^۲ و همکاران)	۲۰۱۱	آکس (انگلستان)	۴۰۰	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۵۳	۰/۴۷
۴	(دسو و ملسی ^۳)	۲۰۱۳	مارا (تانزانیا)	۱۳۷۵۰	۰/۶۹	۰/۶۸	۰/۴۴	۰/۴۳
۵	(اکبری و همکاران)	۲۰۱۳	چهل چای (ایران)	۲۵۶/۸۳	۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۴۲	۰/۳۲
۶	(کاوین و همکاران)	۲۰۱۴	کچیک (ایران)	۳۶	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۷۱
۷	(سها ^۴ و همکاران)	۲۰۱۴	یاس (استرالیا)	۱۵۹۷	۰/۵۵	۰/۵۶	۰/۸۱	۰/۷۱
۸	(الیور ^۵ و همکاران)	۲۰۱۴	هینز (ایالات متحده)	۴۴	۰/۵	۰/۴۹	۰/۴۶	۰/۳۷
۹	(سررو ^۶ و همکاران)	۲۰۱۴	آلگیا (اسپانیا)	۵۳	۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۵۲	۰/۴۹
۱۰	(فهرر ^۷ و همکاران)	۲۰۱۴	کیلستاو (آلمان)	۵۰	۰/۸۴	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۷۶
۱۱	این پژوهش	۲۰۲۱	حوضه‌ی آبریز خنچه (کاشان، ایران)	۶۴۳/۵۶	۰/۶۵	۰/۱۶	۰/۶۳	۰/۴۷



شکل (۸): همبستگی داده‌های رواناب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مدل در مرحله‌ی الف) واسنجی و ب) صحت‌سنجی در حوضه‌ی آبریز خنچه

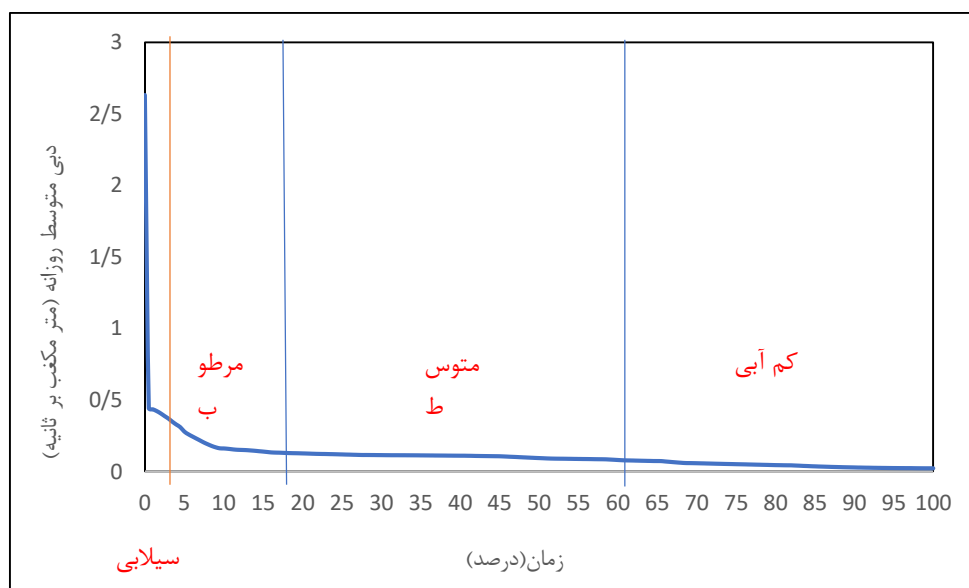
Fig (8): Correlation between observation and prediction runoff data in (A) validation and (B) calibration Stage in Khonche watershed

- 1- Zhang
- 2- Glavan
- 3- Dessu & Melesse
- 4- Saha

- 5- Oliver
- 6- Cerro
- 7- Fohrer

۳-۳- برآورد رواناب حوضه‌ی آبریز فاقد آمار (سوک چم) با رویکرد منطقه‌بندی

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در حوضه‌ی دارای آمار (خنچه)، مدل برای حوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم) در گام زمانی روزانه (دوره‌ی ۲۰۰۸-۲۰۱۵) اجرا و پارامترهای واسنجی شده حوضه‌ی دارای آمار (خنچه) با رویکرد منطقه‌بندی و مبتنی بر خصوصیات فیزیکی بین دو حوضه به حوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم) انتقال داده شد. سپس با توجه به جدول ۹ به ترتیب متوسط رواناب روزانه خروجی و حجم متوسط سالانه رواناب خروجی برای حوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم) برآورد شد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از منحنی تداوم جریان (شکل ۹)، شاخص‌های سیلابی (Q_5) و مرطوب جریان ($Q_{20}-Q_{10}$) به ترتیب برابر با ۰/۲۸، ۰/۱۶ و ۰/۱۲ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده است که نشان می‌دهد در ۵ درصد از ایام سال (۱۸ روز) دبی سیلابی برای حوضه‌ی فاقد آمار سوک چم برابر ۰/۲۸ یا بیشتر از این مقدار است. همچنین در ۱۰ و ۲۰ درصد ایام سال (۳۳ و ۷۳ روز)، در این حوضه محدوده‌ی دبی برای شاخص مرطوب برابر با ۰/۱۶ و ۰/۱۲ مترمکعب بر ثانیه یا بیشتر از این مقدار به دست آمده است. همچنین محدوده‌ی شاخص‌های متوسط جریان برای ۱۱۰ تا ۲۱۹ روز از ایام سال بین ۰/۱۱ تا ۰/۰۸ مترمکعب بر ثانیه حاصل گردید. همچنین نتایج حاصل از محدوده‌ی شاخص کم آبی جریان حوضه سوک چم برای ۲۵۶ تا ۳۴۷ روز از سال بین ۰/۰۵۸ و ۰/۰۲۴ به دست آمده است. در جدول ۱۰، نتایج حاصل از شاخص‌های منحنی تداوم جریان برای حوضه‌ی سوک چم آمده است.



شکل (۹): منحنی تداوم جریان سالانه‌ی رودخانه‌ی سوک چم
 Fig (9): Annual flow continuity curve of Suk Cham river

جدول (۹): مقادیر دبی متوسط روزانه و حجم متوسط سالانه رواناب حوضه‌ی سوک چم

Tab (9): Average daily flow and annual volume of runoff in Suk Cham watershed

دوره‌ی آماری	متوسط رواناب روزانه خروجی (مترمکعب بر ثانیه)	حجم متوسط سالانه رواناب خروجی (میلیون مترمکعب)
۲۰۱۵-۲۰۰۸	۰/۱۰۷	۳/۳۹۷

جدول (۱۰): نتایج شاخص‌های منحنی تداوم جریان سالانه برای رودخانه‌ی سوک چم

Tab (10): Results of annual flow continuity curve indices for Suk Cham rive

شاخص سیلابی		شاخص متوسط					شاخص مرطوب			شاخص کم آبی	
Q5	Q10	Q20	Q30	Q40	Q50	Q60	Q70	Q80	Q90	Q95	
۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۱۲۷	۰/۱۱۵	۰/۱۱۱	۰/۰۹۴	۰/۰۸۱	۰/۰۵۸	۰/۰۴۵	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴	

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا مدل SWAT برای حوضه دارای آمار (خنچه) واسنجی و صحت‌سنجی شد. همچنین با توجه به معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب عملکرد خوب و رضایت‌بخش برای حوضه‌ی خشک دارای آمار (خنچه) در مقیاس روزانه حاصل گردید. سپس پارامترهای واسنجی شده به حوضه‌ی فاقد آمار (سوک چم) بر اساس خصوصیات فیزیکی بین دو حوضه انتقال داده شد. سپس مدل SWAT در حوضه‌ی فاقد آمار سوک چم اجرا و متوسط جریان رواناب روزانه (۰/۱۰۷ مترمکعب بر ثانیه) و حجم متوسط کل رواناب خروجی سالانه (۳/۳۹۷ میلیون مترمکعب) در این حوضه برآورد شد. سپس منحنی تداوم جریان برای رودخانه سوک چم در بسته نرم‌افزاری hydro office-FDC ترسیم شد و شاخص‌های (سیلابی، مرطوب، متوسط، کم آبی) به دست آمد. با توجه به نتایج این پژوهش در رابطه با شاخص‌های منحنی تداوم جریان رودخانه سوک چم می‌توان نتیجه گرفت که محدوده شاخص‌های مرطوب، متوسط، کم آبی به ترتیب بین (۰/۱۲ - ۰/۱۶)، (۰/۱۱۵ - ۰/۰۸۱) و (۰/۰۵۸ - ۰/۰۲۴) مترمکعب بر ثانیه برآورد شد.

همچنین شاخص سیلابی (Q5) برای رودخانه سوک چم برابر ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه بدست آمد، یعنی در ۵ درصد از ایام سال (۱۸ روز) دبی سیلابی برابر ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه یا بیشتر از آن است. استخراج این نتایج می‌تواند درک و شناخت بهتری از رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های فاقد آمار برای اهداف برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب از جمله کنترل سیلاب‌های ناگهانی و تأمین آب شرب و کشاورزی به همراه داشته باشد. همچنین با اجرای مدل SWAT در حوضه آبریز دارای آمار خنچه واقع در بالادست رودخانه سوک چم، امکان شبیه‌سازی و برآورد رواناب حوضه فاقد آمار با رویکرد منطقه بندی مبتنی بر خصوصیات فیزیکی فراهم گردید.

۵- منابع

Abbaspour, K. C. (2013). *SWAT-CUP 2012. SWAT Calibration and Uncertainty Program-a user Manual*.

Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752 .

Akbari, M. H., Bahremand, A., Najafinejad, A., & Sheikh, V. (2013). *Daily flow Simulation of Chehelchai River-Golestan Province Using SWAT Model*. (In Persian)

Ang, R., & Oeurng, C. (2018). Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Science*, 32(1), 89-101 .

Arnold, J. G., Allen, P. M., & Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142(1-4), 47-69 .

Arnold, J., Engel, B., & Srinivasan, R. (1993). A continuous time, grid cell watershed model. *Application of Advanced Information Technologies for Management of Natural Resources*, 17-19 .

Bao, Z., Zhang, J., Liu, J., Fu, G., Wang, G., He, R., Liu, H. (2012). Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 466, 37-46 .

Bezabih, A. W. (2021). Evaluation of small hydropower plant at Ribb irrigation dam in Amhara regional state, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 10(1), 1-9.

Beck, H. E., van Dijk, A. I., De Roo, A., Miralles, D. G., McVicar, T. R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. A. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 52(5), 3599-3622 .

Blainski, É., Porras, E. A. A., Garbossa, L. H. P., & Pinheiro, A. (2017). Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. *RBRH*, 22 .

Cerro, I., Antigüedad, I., Srinivasan, R., Sauvage, S., Volk, M., & Sanchez-Perez, J. M. (2014). Simulating land management options to reduce nitrate pollution in an agricultural watershed dominated by an alluvial aquifer. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 67-74.

- Cislaghi, A., Masseroni, D., Massari, C., Camici, S., & Brocca, L. (2020). Combining a rainfall-runoff model and a regionalization approach for flood and water resource assessment in the western Po Valley, Italy. *Hydrological Sciences Journal*, 65(3), 348-370 .
- Dessu, S. B., & Melesse, A. M. (2013). Impact and uncertainties of climate change on the hydrology of the Mara River basin, Kenya/Tanzania. *Hydrological Processes*, 27(20), 2973-2986.
- Ercan, M. B., Goodall, J. L., Castronova, A. M., Humphrey, M., & Beekwilder, N. (2014). Calibration of SWAT models using the cloud. *Environmental Modelling & Software*, 62, 188-196 .
- Fohrer, N., Dietrich, A., Kolychalov, O., & Ulrich, U. (2014). Assessment of the environmental fate of the herbicides flufenacet and metazachlor with the SWAT model. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 75-85.
- Fu, C., James, A. L., & Yao, H. (2014). SWAT-CS: Revision and testing of SWAT for Canadian Shield catchments. *Journal of Hydrology*, 511, 719-735
- Ghazavi, R., Nadimi, M., Omidvar, E., & Imani, R. (2018) The Study of the Effects of the Future Climate Change on Discharge Variation of the Herochay River using SWAT and LARS-WG. *Hydrogeomorphology*, 4(15), 54-79. (In Persian) (In Persian)
- Glavan, M., White, S., & Holman, I. P. (2011). Evaluation of river water quality simulations at a daily time step—Experience with SWAT in the Axe Catchment, UK. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 39(1), 43-54.
- Gong, Y., Shen, Z., Liu, R., Hong, Q., & Wu, X. (2012). A comparison of single-and multi-gauge based calibrations for hydrological modeling of the Upper Daning River Watershed in China's Three Gorges Reservoir Region. *Hydrology Research*, 43(6), 822-832 .
- Jakada, H., & Chen, Z. (2020). An approach to runoff modelling in small karst watersheds using the SWAT model. *Arabian Journal of Geosciences*, 13).8
- Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., & Pulido-Velazquez, D. (2018). A Comparison of SWAT and ANN models for daily runoff simulation in different climatic zones of Peninsular Spain. *Water*, 10(2), 192 .
- Jung, C. G., & Kim, S. J. (2018). Assessment of the water cycle impact by the Budyko curve on watershed hydrology using SWAT and CO2 concentrations derived from Terra MODIS GPP. *Ecological Engineering*, 118, 179-190 .

- Kalin, L., Isik, S., Schoonover, J. E., & Lockaby, B. G. (2010). Predicting water quality in unmonitored watersheds using artificial neural networks. *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1429-1440 .
- Karami, F., & Bayati Khatibi, M. (2019). The Modeling of Soil Erosion and Prioritizing Sediment Production in Sattarkhan Dam Basin Using MUSLE and SWAT Models. *Hydrogeomorphology*, 5(18), 115-137. (In Persian)
- Karki, R., Srivastava, P., Bosch, D. D., Kalin, L., Lamba, J., & Strickland, T. C. (2020). Multi-Variable Sensitivity Analysis, Calibration, and Validation of a Field-Scale SWAT Model: Building Stakeholder Trust in Hydrologic and Water Quality Modeling. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 523-539 .
- Kavian, A., Bahrami, M., & Rouhani, H. (2014). Performance Evaluation of SWAT Model to estimate surface runoff in Kachik Watershed, Golestan Province. *Watershed Management Research*, 27(2-103), 22-32. (In Persian)
- Kumar, N., Singh, S. K., Srivastava, P. K., & Narsimlu, B. (2017). SWAT Model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction of the Tons River Basin, India, using Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) algorithm. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(1), 30 .
- Lee, S., Kim, J., & Hur, J. W. (2013). Assessment of ecological flow rate by flow duration and environmental management class in the Geum River, Korea. *Environmental earth sciences*, 68(4), 1107-1118 .
- Leye, I., Sambou, S., Sané, M. L., Ndiaye, I., Ndione, D. M., Kane, S., . . . Cissé, M. T. (2020). Hydrological Modeling of an Ungauged River Basin Using SWAT Model for Water Resource Management Case of Kayanga River Upstream Niandouba Dam. *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 9(1), 29-41 .
- Ma, Q., Xiong, L., Li, Y., Li, S., & Xu, C.-Y. (2018). Partitioning multi-source uncertainties in simulating nitrogen loading in stream water using a coherent, stochastic framework: Application to a rice agricultural watershed in subtropical China. *Science of the Total Environment*, 618, 1298-1313 .
- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N. C., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A. L., . . . Cacovean, H. (2020). Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review. *Environmental Research*, 109330 .
- Mengistu, A. G., van Rensburg, L. D., & Woyessa, Y. E. (2019). Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 100621 .

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900 .
- Naderi, M., Ildoromi, A., Nouri, H., Aghabeigi Amin, S., & Zeinivand, H. (2018). The Impact of Land Use and Climate Change on Watershed Runoff Using SWAT Model (Case Study: Garin Watershed). *Hydrogeomorphology*, 4(16), 61-79 .
- Nathan, R., & McMahon, T. (1990). Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology*, 121(1-4), 217-238 .
- Noori, N., & Kalin, L. (2016). Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 533, 141-151 .
- Oliver, C., Radcliffe, D., Risse, L., Habteselassie, M., Mukundan, R., Jeong, J., & Hoghooghi, N. (2014). Quantifying the Contribution of On-Site Wastewater Treatment Systems to Stream Discharge Using the SWAT Model. *Journal of environmental quality*, 43(2), 539-548.
- Parajka, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2005). *A Comparison of Regionalisation Methods for Catchment Model Parameters*.
- Rafiei Emam, A., Kappas, M., Hoang Khanh Nguyen, L., & Renchin, T. (2016). Hydrological modeling in an ungauged basin of Central Vietnam using SWAT model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-33.
- Rojas-Serna, C., Lebecherel, L., Perrin, C., Andréassian, V., & Oudin, L. (2016). How should a rainfall-runoff model be parameterized in an almost ungauged catchment? A methodology tested on 609 catchments. *Water Resources Research*, 52(6), 4765-4784.
- Rouhani, H., Willems, P., Wyseure, G., & Feyen, J. (2007). Parameter estimation in semi-distributed hydrological catchment modelling using a multi-criteria objective function. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(22), 2998-3008.
- Saha, P. P., Zeleke, K., & Hafeez, M. (2014). Streamflow modeling in a fluctuant climate using SWAT: Yass River catchment in south eastern Australia. *Environmental Earth Sciences*, 71(12), 5241-5254.
- Samuel, J., Coulibaly, P., & Metcalfe, R. A. (2011). Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 447-459.
- Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Carrillo-García, J., & Soto, J. (2017). Using SWAT and Fuzzy TOPSIS to assess the impact of climate change in the headwaters of the Segura River Basin (SE Spain). *Water*, 9(2), 149.

- Srinivasan, R., Zhang, X., & Arnold, J. (2010). SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1533-1546.
- Swain, J. B., & Patra, K. C. (2017). Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *Journal of Hydrology*, 554, 420-433.
- Tegegne, G., & Kim, Y. O. (2018). Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity. *Journal of Hydrology*, 564, 452-466.
- Teshome, F. T., Bayabil, H. K., Thakural, L., & Welidehanna, F. G. (2020). Modeling Stream Flow Using SWAT Model in the Bina River Basin, India. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(03), 203.
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2004). Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville Reservoir. Rep. Prepared for Cornell Univ.
- Wallace, C. W., Flanagan, D. C., & Engel, B. A. (2018). Evaluating the effects of watershed size on SWAT calibration. *Water*, 10(7), 898.
- Warusavitharana, E. (2020). Semi-distributed parameter optimization and uncertainty assessment for an ungauged catchment of Deduru Oya Basin in Sri Lanka. *International Journal of River Basin Management*, 18(1), 95-105.
- Yadav, M., Wagener, T., & Gupta, H. (2007). Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in water resources*, 30.1756-1774, 80.
- Yang, X., Magnusson, J & Xu, C.-Y. (2019). Transferability of regionalization methods under changing climate. *Journal of Hydrology*, 568, 67-81.
- Yang, X., Magnusson, J., Huang, S., Beldring, S., & Xu, C.-Y. (2020). Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions. *Journal of Hydrology*, 582, 124357.
- Yilmaz, M. U., & Onoz, B. (2020). A Comparative Study of Statistical Methods for Daily Streamflow Estimation at Ungauged Basins in Turkey. *Water*, 12(2), 459.
- Zhang, X., Srinivasan, R., & Hao, F. (2007). Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River basin using the SWAT model. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 901-910.