دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های آبخیز مناطق خشک در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لار)

مهناز کیانی مجد[۱]، محمد نهتانی[۲]، محمدرضا دهمرده قلعه نو[۳] و زهرا شیخ[۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه زابل
۲- استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه زابل، (نویسنده مسوول: m.nohtani@uoz.ac.ir)
۳- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه زابل
۴- دانش آموخته دکترای تخصصی بیابان زدایی، دانشگاه سمنان
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱
صفحه: ۱۳۵ تا ۱۴۵

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: بشر در طول حیات خود شاهد حوادث مختلف هیدرولوژیکی مانند کمبود آب، خشکسالی، سیل، وقوع بهمن و ... بوده است که دامنه خطر این حوادث تابع رفتار متغیرهای هیدرولوژیکی و خصوصیات حوضه‌های آبخیز می‌باشد. فقدان آمار و اطلاعات یا کافی نبودن آمار درست و مناسب سبب شده است تا بررسی و شناخت رفتار متغیرهای هیدرولوژیکی و خصوصیات حوضه‌های آبخیز با دقت قابل قبولی صورت نگیرد. بر همین اساس، مدل‌های هیدرولوژیکی ابزار مناسبی برای ارزیابی وضعیت کنونی منابع آبی و پیش‌بینی شرایط آتی با آگاهی و درک از اندرکنش‌ها و تعاملات حاکم در سطح حوضه‌های آبخیز می‌باشند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، با استفاده از مدل SWAT اقدام به انجام شبیه‌سازی بارش- رواناب حوضه آبخیز لار شد که برای این منظور از داده‌های روزانه بارش، دما و دبی طی دوره آماری مشترک (۲۰۱۷-۱۹۸۸) استفاده شد. شبیه‌سازی اولیه مدل هیدرولوژیکی در افزونه SWAT انجام و از نرم افزار SWAT-CUP و روش SUFI-2 به‌عنوان یک الگوریتم بهینه برای تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده گردید.

یافته‌ها: بر پایه مدل SWAT منطقه مورد مطالعه به ۳۷ زیرحوضه و ۳۰۸ واحد پاسخ هیدرلوژیکی تقسیم گردید. علاوه بر این، با تحلیل حساسیت ۲۴ پارامتر موثر بر شبیه‌سازی رواناب ماهانه خروجی حوضه آبخیز لار مشخص شد که تعداد ۷ پارامتر براساس مقادیر دو شاخص t-state وp-value، به‌عنوان پارامترهایی با بیشترین اثرگذاری انتخاب و از این ۷ پارامتر، سه پارامتر شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط، فاکتور بازگشت جریان پایه به آبراهه اصلی و متوسط آب قابل استفاده به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی رواناب شناسایی گردیدند. سپس مدت ۱۸ سال از دوره آماری (۱۹۸۸-۲۰۰۵) جهت واسنجی و ۱۲ سال (۲۰۰۶-۲۰۱۷) برای اعتبارسنجی انتخاب شد. همچنین کارآیی و راندمان مدل با استفاده از ضرایب NS، R^2، p-factor و r-factor مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر این ضرایب طی دوره واسنجی به‌ترتیب ۰/۸۰، ۰/۸۲، ۰/۸۰ و ۰/۳۳ و طی دوره اعتبارسنجی ۰/۹۰، ۰/۹۰، ۰/۳۹ و ۰/۴۳ برآورد گردید. علاوه براین، انطباق زمانی نقاط اوج و فرود هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده دبی نیز دقت بالای مدل در شبیه‌سازی را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: نتایج کسب شده نشان می‌دهد که با وجود جریان فصلی و بدون جریان پایه و همچنین فراوانی روزهای با جریان صفر، مدل SWAT از قابلیت بالایی جهت شبیه‌سازی دبی ماهانه حوضه‌های آبخیز مناطق خشک برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: روش SUFI-2، مدیریت حوضه آبخیز، مناطق خشک، SWAT-CUP

مقدمه

بارش‌های جوی منبع تامین آب شیرین و رواناب‌های حاصل از آن‌ها اصلی‌ترین شکل دریافت آب، در بیشتر مناطق دنیا می‌باشد. بشر به دلیل نیاز حیاتی به آب از گذشته تا به حال در پی یافتن رابطه‌ای بین مقدار بارش انجام گرفته و میزان رواناب حاصل از آن است تا بتواند بر روی این منبع با ارزش خدادادی برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب داشته باشد (۲). بنابراین آگاهی از مقدار و شدت رواناب در سطح زمین و آبراهه‌ها به‌منظور مدیریت اصولی منابع آبی به‌ویژه در مناطق درگیر با بحران‌های جدی آب، امری ضروری است (۲۵).

بر همین اساس به منظور تعیین بیلان آبی در یک حوضه آبخیز و برای پیش‌بینی میزان جریان خروجی حوضه آبخیز در دوره‌های مختلف زمانی، نرم افزارها و مدل‌های ریاضی زیادی توسعه یافته‌اند (۷). روشی که به‌طور معمول پذیرفته شده، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است که مبتنی بر خصوصیات فیزیکی حوضه هستند (۳۳).

مدل‌های (شبیه‌سازی) هیدرولوژیکی با در نظر گرفتن روابط و اندرکنش‌های پیچیده میان اقلیم، اجزای هیدرولوژیکی و کاربری (اراضی) ابزارهایی کارآمد برای این هدف محسوب می‌گردند (۱۴) که امکان ارزیابی و تبیین اثرات اقلیم بر رواناب را نیز فراهم می‌سازند (۱۹). مدل‌های هیدرولوژیکی توانایی شبیه‌سازی حجم وسیع داده‌ها از جمله بارش، مرزهای حوضه آبخیز، توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی و ... را دارا می‌باشند (۳۶). یکی از کارآمدترین این مدل‌ها، مدل هیدرولوژیکی SWAT می‌باشد که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی امریکا[۱] طراحی شده است. مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT) یک مدل هیدرولوژیکی نیمه‌فیزیکی و نیمه توزیعی[۲] است که توانایی ارزیابی داده‌ها در بازه‌های زمانی ساعتی، روزانه، ماهانه و سالانه را دارد (۲۶).

بررسی و مرور ادبیات نشان می‌دهد که تاکنون گزارش‌های متعددی از کاربرد گسترده این مدل در سطح جهان در جنبه های مختلف هیدرولوژی و مدیریت حوضه آبریز و همچنین آنالیز عدم قطعیت و بهینه‌سازی پارامترهای مدل ارائه شده است (۳۶،۳۴،۳۰،۲۸،۲۷،۲۳،۲۲،۱۹،۱۸،۱۷،۱۲،۶،۳).

در نهایت به‌منظور اطمینان از هماهنگی و انطباق مدل با شرایط منطقه، نیاز است مدل برای منطقه مورد نظر واسنجی شود. برای واسنجی مدل SWAT از یک بسته نرم افزاری SWAT-CUP[۳] استفاده می‌شود. این برنامه دارای چند روش جهت انجام واسنجی دارد که یکی از روش‌های بهینه آن الگوریتم SUFI-2 می‌باشد.این الگوریتم توانایی انجام آنالیز حساسیت، واسنجی و آنالیز عدم قطعیت‌ها را دارد و تمام عدم قطعیت‌ها را مانند عدم قطعیت در پارامترهای مدل، در

1- American Agricultural Research Service 2- Semi-Distributed Models 3- Calibration Uncertianty Program

داده‌های ورودی مدل از قبیل بارش و...، عدم قطعیت مفهومی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای پارامترها لحاظ می‌کند (۲۴).

انتشار عدم قطعیت در پارامترها منجر به ایجاد عدم قطعیت در متغیرهای خروجی مدل باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU[1]) نشان داده می‌شود که این باند در سطوح ۲/۵ درصد و ۹۷/۵ درصد توزیع تجمعی یک متغیر خروجی که با نمونه‌برداری به روش لاتین هایپرکیوب[2] شبیه‌سازی شده است؛ محاسبه می‌گردد. اغلب از ضرایب نش ساتکلیف و تبیین به‌عنوان تابع هدف در تعیین نیکویی برازش در الگوریتم SUFI-2 استفاده می‌گردد (۴). در اکثر مطالعاتی که از مدل SWAT استفاده کردند الگوریتم SUFI-2 به کار گرفته شده است (۳۵،۳۰،۲۹،۲۴،۱۹،۱۸،۱۳،۸،۳).

بررسی مطالعات و گزارش‌های ارائه شده در دنیا نشان می‌دهد اکثریت این مدل‌ها دارای محوریت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز و شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آبی در اقلیم‌های مرطوب بوده است. نتیجه این امر سبب توسعه انواع مدل‌های مختلف بر اساس خصوصیات این اقلیم‌ها بوده است و مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. کمبود و عدم مدیریت صحیح منابع آب سطحی در دسترس، یکی از چالش‌های اصلی در کشورهای واقع در مناطق خشک جهان است. میزان بارش فلات ایران کمتر از یک سوم میانگین جهانی بوده و بیش از دو سوم مساحت آن را مناطق خشک و نیمه‌خشک پوشانیده است (۳۱). در چنین شرایطی مدیریت بهینه و بکارگیری حداکثری از ظرفیت‌ها جهت مدیریت منابع موجود بیش از پیش اهمیت می‌یابد. حوضه آبخیز لار با قرارگیری در منطقه فراخشک با میانگین بارش ۷۲ میلی‌متر (بسیار کمتر از میانگین بارندگی ایران که معادل ۲۵۰ میلی‌متر است)، یکی از مناطق درگیر با بحران شدید کم آبی است.

بنابراین، مدلسازی رواناب و برآورد میزان ماهانه در مناطق درگیر با بحران‌های شدید آبی، می‌تواند گام مؤثر در مدیریت و برنامه‌ریزی اصولی توسط سیاست‌گزاران و افزایش تاب‌آوری ساکنین درگیر در این مناطق باشد (۳۲). به همین منظور هدف اصلی این پژوهش،ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد مقادیر رواناب در حوضه‌های خشک است که برای این منظور به شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز لار در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. با توجه به اهمیت انتخاب پارامترهای مؤثر، تحلیل حساسیت در دو سطح صورت پذیرفته و در نهایت مؤثرترین پارامترها با توجه شرایط اقلیمی- فیزیوگرافی خاص حوضه انتخاب می‌گردند. همچنین با هدف بهبود نتایج نهایی، عملیات بهینه‌سازی واسنجی و عدم قطعیت‌ها از الگوریتم SUFI-2 استفاده می‌شود. در نهایت با استفاده از شاخص‌های آماری، به ارزیابی عملکرد مدل و صحت برآوردها اقدام می‌گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز لار با وسعتی معادل ۱۷۶۸/۳۶ کیلومترمربع در جنوب شرق ایران و در محدوده جغرافیایی "۰۰ '۱۰ °۲۹ تا "۰۰ '۴۰ °۲۹ عرض شمالی و "۰۰ '۴۰ °۶۰ و "۰۰ '۰۰ °۶۱ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). ریزش‌های جوی منطقه مورد مطالعه بیشتر به صورت باران (بیشتر رگبار) دیده می‌شود که بخش بیشتر آن به اوایل بهار و زمستان مربوط می‌شود و همچنین بر پایه آمار ایستگاه‌های بارانسنجی واقع در محدوده مورد مطالعه، به طور متوسط ۱۸ درصد بارش‌ها در فصل پاییز، ۶۰ درصد در فصل زمستان، ۲۰ درصد در فصل بهار و ۲ درصد در فصل تابستان ثبت شده‌اند (۱۶). در جدول (۱) مشخصات اقلیمی حوضه آبخیز لار ارائه شده است. رودخانه اصلی آن به نام لار که فصلی می‌باشد و به‌هنگام بارندگی دارای آب شده و سیلاب‌های آبراهه‌های منتهی به آن شهر زاهدان را تهدید می‌کند. رودخانه لار از دامنه کوه‌های لار و پدگی واقع در جنوب شرقی زاهدان سرچشمه می‌گیرد. شاخه‌های اولیه با فراوانی بیشتر که از جنوب شرقی تا شمال شرقی شهر به رودخانه پیوسته و این رودخانه از جنوب به شمال جریان می‌یابد و در ادامه از مرز کشور ایران خارج شده و وارد کشور پاکستان می‌شود (۱۵).

جدول ۱- مشخصات اقلیمی حوضه آبخیز لار

Table. Climatic characteristics of Lar watershed

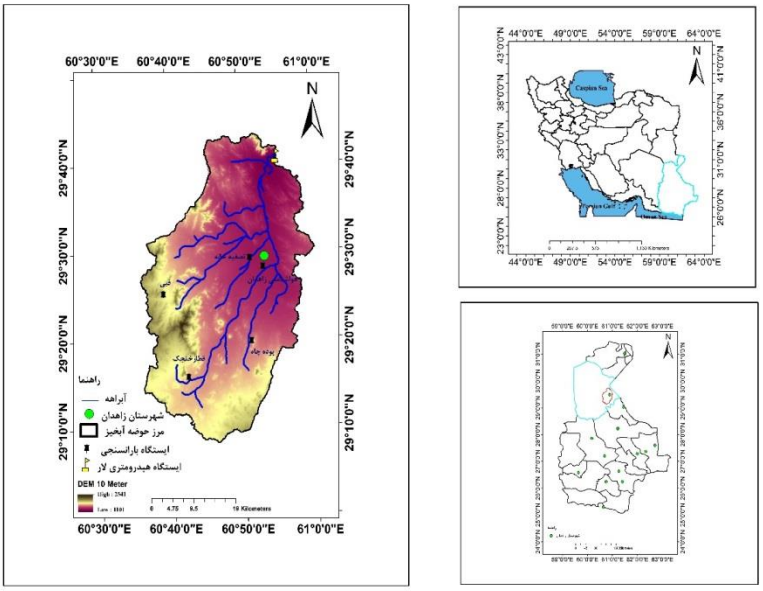
مشخصات اقلیمی Climatic Characteristics	مقدار The Amount of
متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) Average Annual Rainfall (mm)	72
حداقل سالانه دما (سانتی‌گراد) Minimum Annual Temperature (C)	-12.6
حداکثر سالانه دما (سانتی‌گراد) Maximum Annual Temperature (C)	42
میانگین رطوبت نسبی (درصد) Average Relative Humidity (%)	31
تعداد روزهای یخبندان Number of Frost Days	43
نوع اقلیم براساس روش‌های آمبرژه و دومارتن The Type of Climate Based on Amberg and Dumartin Methods	معتدل و خشک Mild and Dry

داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۷) استفاده شد. ۱۸ سال ابتدایی (۱۹۸۸-۲۰۰۵) برای واسنجی و ۱۲ سال انتهایی (۲۰۰۶-۲۰۱۷) به‌عنوان اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. این داده‌ها شامل داده‌های رواناب خروجی از حوضه آبخیز لار مربوط به ایستگاه هیدرومتری لار و سایر اطلاعات هواشناسی روزانه ایستگاه‌های بارانسنجی و سینوپتیک قرار گرفته در محدوده مورد مطالعه که از اداره کل

1- 95 Percent Prediction Uncertainty
2-Latin Hypercube Sampling

هواشناسی و شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان تهیه گردیده است. در جدول (۳) مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز لار روی نقشه ایران، توزیع شبکه رودخانه‌ای و ایستگاه‌های بارانسنجی و هیدرومتری
Figure 1. Location of Lar watershed on the map of Iran, distribution of river network and rain gauge and hydrometer stations

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش
Table 2. The characteristics of the stations used in this research

نام ایستگاه Station Name	نوع ایستگاه Station Type	ارتفاع (متر) Height (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
فبی Fabi	بارانسنجی Rain Gauge	2096	60° 37' 49"	29° 35' 20"
پوده‌چاه Poudeh Chah	بارانسنجی Rain Gauge	1937	60° 40' 34"	29° 19' 41"
قطارخنجک Ghatar Kanjak	بارانسنجی Rain Gauge	1695	60° 43' 42"	29° 14' 07"
تصفیه‌خانه Tassfihe Khaneh	بارانسنجی Rain Gauge	1396	60° 51' 11"	29° 29' 02"
هواشناسی Meteorology	سینوپتیک Synoptic	1385	60° 53' 00"	29° 28' 00"
لار Lar	هیدرومتری Hydrometry	1145	60° 55' 15"	2° 40' 41"

مدل SWAT

SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی و نیمه‌فیزیکی است. این مدل با ساختن زیرحوضه براساس شبکه رودخانه و توپوگرافی، ناهمگنی موجود در حوضه آبخیز را کاهش می‌دهد. سپس هر یک از این زیرحوضه‌ها را به واحدهای کوچک‌تری به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU[1]) تقسیم می‌کند که این واحدها از نظر خاک، کاربری اراضی و شیب تا حد ممکن یکسان هستند. این مدل نیمه‌توزیعی براساس بیلان آبی استوار است که توسط ورودی‌های آب و هوایی مانند بارش روزانه و حداکثر و حداقل دمای هوا کنترل می‌شود. معادله بیلان آب در رابطه (۱) ارائه شده است (۵).

$$SW_t = SW_0 + \sum(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (۱)$$

که در آن SW_t: محتوای آب نهایی در خاک در هر روز (میلی‌متر)، t: زمان (روز)، SW_0: مقدار آب اولیه موجود در خاک به صورت روزانه (میلی‌متر)، R_{day}: مقدار بارش در هر روز (میلی‌متر)، Qsurf: مقدار رواناب سطحی در هر روز (میلی‌متر)، E_a: مقدار تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر)، W_{seep}: مقدار آب نفوذ کرده به منطقه زیرقشری در هر روز (میلی‌متر) و Q_{gw}: مقدار نفوذ به سفره زیرزمینی در هر روز (میلی‌متر) می‌باشد.

ورودی‌های اولیه مدل هیدرولوژیکی SWAT

اطلاعات مکانی مورد نیاز شامل نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع (شکل ۱)، کاربری اراضی (شکل ۲ و جدول ۴) و خاک (شکل ۲ و جدول ۵) هستند. علاوه بر این نیاز به داده‌های هواشناسی به‌صورت روزانه می‌باشد. نحوه دریافت هر یک از اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق در جدول (۳) ارائه شده

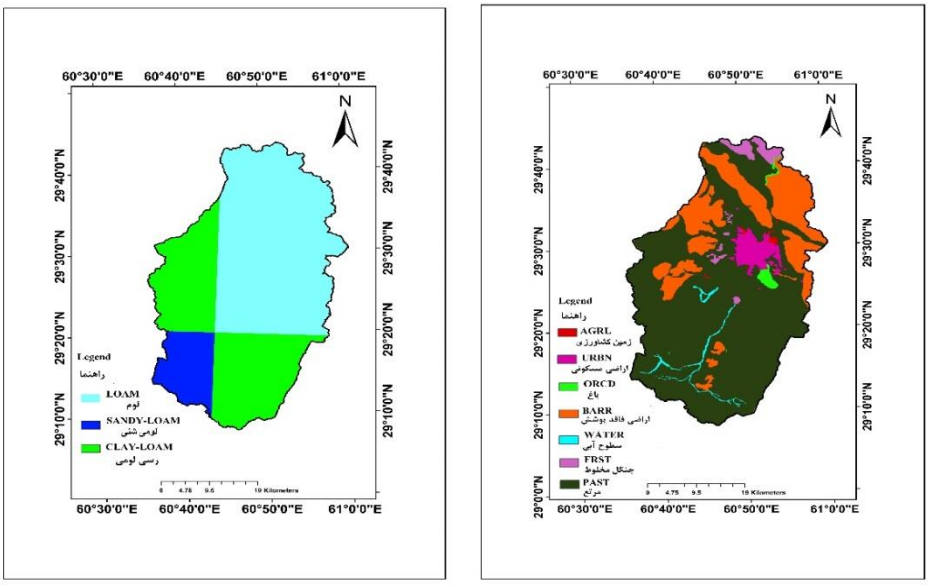
1- Hydrologic Response Unit

است. همچنین لازم به ذکر است که در این تحقیق، برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجده OLI با دقت مکانی ۳۰ متر سال ۲۰۲۱ از سامانه گوگل ارث انجین[1] استفاده شده است. برای طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در این سامانه از روش طبقه‌بندی ماشین بردار[2] اقدام به طبقه‌بندی نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۱ شد. در حوضه آبخیز لار شش طبقه کاربری متمایز شامل زمین‌های کشاورزی (دیم و آبی)، اراضی مسکونی، باغ، اراضی بایر و فاقد پوشش، سطوح آبی، جنگل‌های دست کاشت) و مرتع مشخص گردید. اطلاعات پس از ذخیره در گوگل درایو، وارد محیط Arc GIS ۱۰/۳ شدند و صحت طبقه‌بندی با استفاده از نقاط کنترلی بدست آمده از تصاویر گوگل ارث مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۳- مشخصات داده‌های استفاده شده در این تحقیق

Table 3. Specifications of the data used in this research

منبع داده‌ها Data Source	وضوح (متر) Clarity (m)		نوع داده Data Type
سازمان نقشه‌برداری ایران National Cartographic Center of Iran	10×10	نقشه مدل رقومی ارتفاع DEM	داده‌های مکانی Spatial Data
نقشه بافت جهانی www.ncc.gov.ir Global Texture Map www.nrcs.usda.gov	1000×1000	نقشه بافت خاک Soil Texture Map	
earthengine.google.com	30×30	نقشه کاربری اراضی Landuse Map	



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی و بافت خاک حوضه آبحیز لار

Figure 2. Land use map and soil texture of Lar watershed

جدول ۴- مشخصات کاربری اراضی حوضه آبخیز لار

Table 4. Characteristics of land use in the Lar watershed

درصد (%)	شرح Description	کاربری اراضی Landuse
0.37	زمین‌های کشاورزی (دیم و آبی) Agricultural Lands (Rainy and Irrigated)	AGRL
3.6	اراضی مسکونی Residential Lands	URBN
0.87	باغ Garden	ORCD
21.09	اراضی بایر و فاقد پوشش Barren and Uncovered Lands	BARR
1.02	سطوح آبی Blue Surfaces	WATER
2.23	جنگل‌های مخلوط (دست کاشت) Mixed Forests (Hand Planting)	FRST
70.79	مرتع Pasture	PAST

*: ستون اول سمت راست از علامت‌های اختصاری مدل SWAT جهت تعیین کاربری اراضی حوزه می‌باشد.

*: The First Column on the Right is One of the Abbreviations of the SWAT model to Determine the Landuse of the Area

1- Google Earth Engine

2- Support Vector Machine

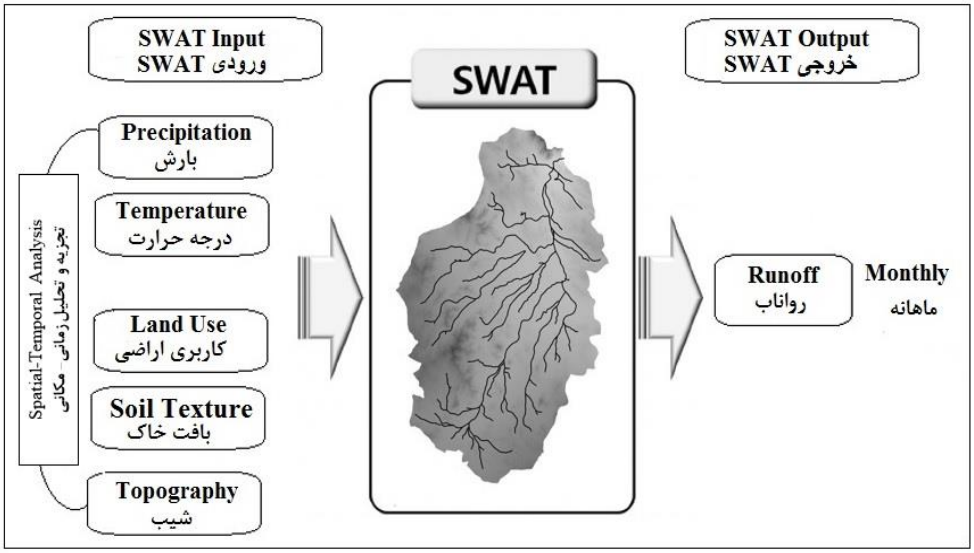
جدول ۵ – مشخصات نقشه بافت خاک حوضه آبخیز لار

Table 5. Characteristics of soil texture map of Lar watershed

نوع بافت خاک Type of Soil Texture	گروه هیدرولوژیکی Hydrological Group	درصد (%)
لوم LOAM	D	53.93
لومی شنی SANDY-LOAM	C	9.68
رسی لومی CLAY-LOAM	D	36.37

اجرای مدل SWAT

در این پژوهش، نسخه SWAT۲۰۱۲ که به‌صورت افزونه قابل نصب در Arc GIS ۱۰/۳ می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. پس از آماده‌سازی نقشه‌ها و داده‌های ورودی، گام اول ساخت حوضه آبخیز می‌باشد. با توجه به تغییرات ارتفاعی، تعیین مساحت زیرحوضه‌ها و تعداد بهینه آن‌ها بر عهده مدل SWAT گذاشته شد. در ادامه براساس نقشه‌های کاربری اراضی، بافت خاک، طبقات شیب و همچنین استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی برای حوضه آبخیز تشکیل شدند. سپس به منظور روندیابی جریان از روش ذخیره متغیر، محاسبه تبخیر و تعرق از روش هارگریوز- سامانی و برای محاسبه رواناب از روش SCS استفاده شد. در نهایت اطلاعات اقلیمی شامل بارش و دما طی دوره زمانی مشترک ۱۹۸۸–۲۰۰۵ وارد مدل SWAT شد. سه سال ابتدایی دوره (۱۹۸۸–۱۹۹۰) جهت آماده‌سازی اولیه مدل در نظر گرفته شد. شکل (۳) فرایند مدل‌سازی در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳– فرایند مدلسازی SWAT در این تحقیق

Figure 3. SWAT modeling process in this research

تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

به‌منظور بهبود دقت نتایج حاصله، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT با روش SUFI-2 تحت نرم افزار SWAT-CUP ۲۰۱۹ انجام شد. همچنین برای کمّی کردن میزان دقت واسنجی و عدم قطعیت دو شاخص r-factor (درصد داده‌های مشاهده‌ای قرار گرفته در بازه ۹۵ درصد عدم قطعیت و مقدار بهینه آن صفر) و شاخص p-factor (متوسط ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵ PPU تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای و مقدار بهینه آن یک) مورد استفاده قرار گرفت (۴).

ارزیابی کارایی مدل

در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی رواناب مدل SWAT در دوره‌های اعتبارسنجی و واسنجی با استفاده از دو شاخص آماری مورد ارزیابی قرارگرفت.

ضریب تبیین (R^2)

مقدار این ضریب بین صفر تا یک متغیر است. در واقع این ضریب یکی از معیارهای سنجش نیکویی برازش مدل است. این ضریب نشان‌دهنده واریانس کل مقادیر مشاهده‌ای یا قسمتی از تغییرات کل می‌باشد که به وسیله مقادیر شبیه‌سازی شده توجیه می‌شود. زمانی که مقدار این ضریب برابر با یک باشد، نشان‌دهنده یکسان بودن مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد (۳۰) که در رابطه (۲) ارائه شده است.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i^{sim} - \bar{Q}_i^{sim}\right)\left(Q_i^{abs} - \bar{Q}_i^{abs}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i^{sim} - \bar{Q}_i^{sim}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}(Q_i^{abs} - \bar{Q}_i^{abs})^2} \quad (۲)$$

که در آن $\bar{Q}_i^{abs}$: متوسط مقادیر مشاهده شده رواناب (مترمکعب بر ثانیه)، $\bar{Q}_i^{sim}$: متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده

رواناب (مترمکعب بر ثانیه)، Q_i^{abs}: مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب (مترمکعب بر ثانیه)، Q_i^{sim} : مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب (مترمکعب بر ثانیه) و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

ضریب نش- ساتکلیف (NS)

این ضریب نشان‌دهنده میزان نسبت اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد. مقدار این ضریب بین یک تا منفی بی نهایت در متغیر است که مقدار بهینه آن یک می‌باشد. اما به طور کلی اگر مقدار NS کمتر از ۰/۳۶ مدل غیرقابل قبول، اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد رضایت‌بخش و در نهایت بیشتر از ۰/۷۵ مدل عالی و کامل فرض می‌شود. (۱۸). ضریب نش– ساتکلیف در رابطه (۳) ارائه شده است.

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i^{abs} - Q_i^{sim}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\bar{Q}_i^{abs} - \bar{Q}_i^{sim}\right)}\right] \qquad (۳)$$

که در آن $\bar{Q}_i^{abs}$: متوسط مقادیر مشاهده شده رواناب (متر مکعب بر ثانیه)، $\bar{Q}_i^{sim}$: متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب (متر مکعب بر ثانیه)، Q_i^{abs}: مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب (متر مکعب بر ثانیه، Q_i^{sim} : مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب (متر مکعب بر ثانیه) و n: تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

پس از راه‌اندازی و اجرای مدل SWAT، نتایج برای هر یک از HRUها، زیرحوضه‌ها و رودخانه‌ها به صورت جداگانه در یک فایل ذخیره گردید. اطلاعات کسب شده از حوضه آبخیز لار پس از شبیه‌سازی توسط مدل SWAT در جدول (۶) نشان داده است.

جدول ۶ – مشخصات فیزیوگرافیک شبیه‌سازی شده حوضه آبخیز لار با استفاده از مدل SWAT

Table 6. Simulated physiographic characteristics of Lar watershed using SWAT model

مقدار The Amount of	مشخصات فیزیوگرافیک حوضه Physiographic Characteristics of the Basin
1608.61	مساحت حوضه(کیلومتر مربع) Basin area (Km^2)
2541	ارتفاع حداکثر (متر) Maximum Height (m)
1105	ارتفاع حداقل (متر) Minimum Height (m)
1608	میانگین ارتفاع (متر) Average Height (m)
37	تعداد زیرحوضه‌ها The Number of Sub Basins
308	تعداد واحد پاسخ هیدرولوژیکی Number of Hydrological Response Units
4.18	مقدار رواناب (متر مکعب بر ثانیه) Amount of Runoff (m^3/s)
35	شیب متوسط آبراهه (درصد) Average Slope of the Waterway (%)
8	شیب حوضه (درصد) Basin Slope (%)

سپس به‌منظور انطباق حداکثری مدل طراحی شده با شرایط حاکم در منطقه، بر روی پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی تحلیل حساسیت صورت گرفت تا پارامترهایی با بیشترین تأثیرگذاری یا حساسیت شناسایی شوند. برای انجام این کار ۲۴ پارامتر براساس خصوصیات حوضه آبخیز لار و همچنین یافته‌های مطالعاتی (گودرزی و همکاران (۲۰۱۷)، امینی و همکاران (۲۰۱۸) و حسینی و همکاران (۲۰۱۸)) که از شرایط فیزیکی مشابهی با منطقه مطالعاتی برخوردار بودند؛ شناسایی گردیدند که پس از تحلیل حساسیت کلی پارامترها، تعداد ۷ پارامتر با توجه به مقدار t-stat (مقدار آن یک یا بیشتر از یک) و p-value (مقدار آن صفر یا نزدیک به صفر) به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها انتخاب شدند که این پارامترها در جدول (۷) بر اساس درجه حساسیت ارائه شده است و ادامه واسنجی مدل بر پایه همین پارامترها صورت گرفت و در ادامه اقدام به اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه حوضه آبخیز لار شد.

جدول ۷ – پارامترهای منتخب قبل از واسنجی مدل SWAT

Table 7. Selected parameters before SWAT model calibration

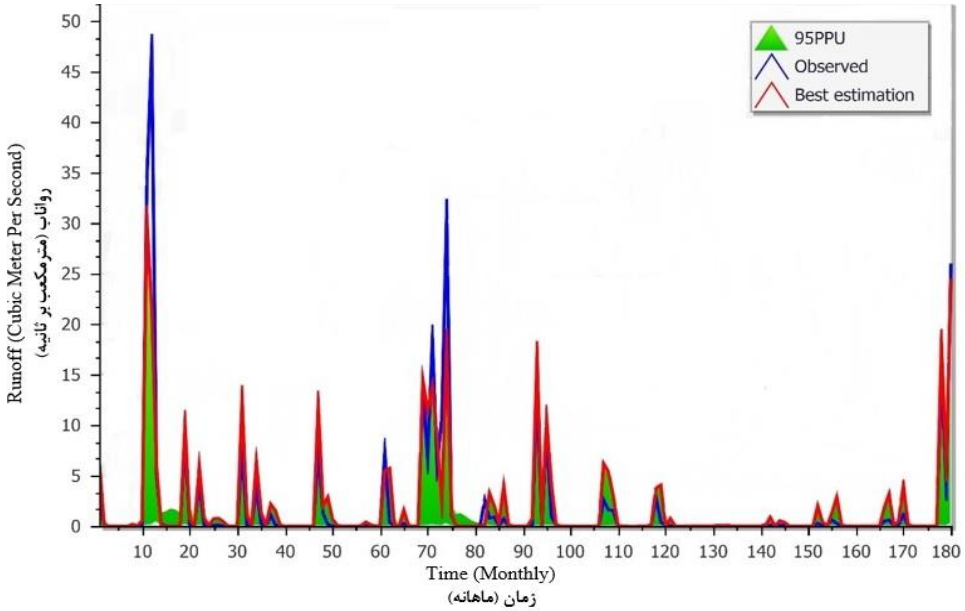
رتبه Rank	پارامتر Parameter	شرح Description	t-stat	p-value
1	r__CN2.mgt	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط Curve Number for Medium Humidity Conditions	45.1	0
2	v-ALpha_BF.gw	فاکتور بازگشت جریان پایه به آبراهه اصلی (روز) Base Flow Return Factor to the Main Waterway (Days)	9.68	0
3	r-SOL_AWC.sol	متوسط آب قابل استفاده (میلی‌متر بر میلی‌متر) Average Usable Water (mm/mm)	-3.23	0
4	v-gw_DELAY.gw	زمان تاخیر برای بازگشت آب زیرزمینی (روز) Delay Time for Groundwater Return (Days)	-2.47	0.01
5	v-CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی رودخانه اصلی (میلی‌متر بر ساعت) Hydraulic Conductivity of the Main River (mm/h)	-2.1	0.03
6	v-gw_GWHT.gw	ارتفاع اولیه آب زیرزمینی (متر) Initial Height of Underground Water (m	0.89	0.37
7	v-RCHRG_DP.gw	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق یا غیرمحصور Feeding Percentage of Deep Aquifer from Shallow or Unconfined Aquifer	0.68	0.49

در این تحقیق مرحله واسنجی با روش تحلیل حساسیت کلی و ۵۰۰ نمونه از هر بازه انتخاب و انجام شد. بعد از ترکیب ۵۰۰ نمونه از هر ۷ پارامتر، شاخص‌های واسنجی و مدل اجرا شده SWAT محاسبه شدند. این مرحله در ۵ گام و در هر گام ۵۰۰ بار تکرار شد تا در نهایت نتایج مطلوبی کسب شد. همچنین ضریب نش- ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف برای ارزیابی مدل انتخاب شد. نتایج واسنجی در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸- معیارهای عملکرد دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT حوضه آبخیز لار
Table 8. Performance criteria of the calibration and validation period of SWAT model of Lar watershed

r-factor	p-factor	NS	R^2	تعداد ماه Number of Months	دوره آماری Statistical Period	ایستگاه هیدرومتری Hydrometric Station
0.33	0.80	0.80	0.82	180	2005-1988	لار
0.43	0.39	0.90	0.90	140	2017-2006	Lar

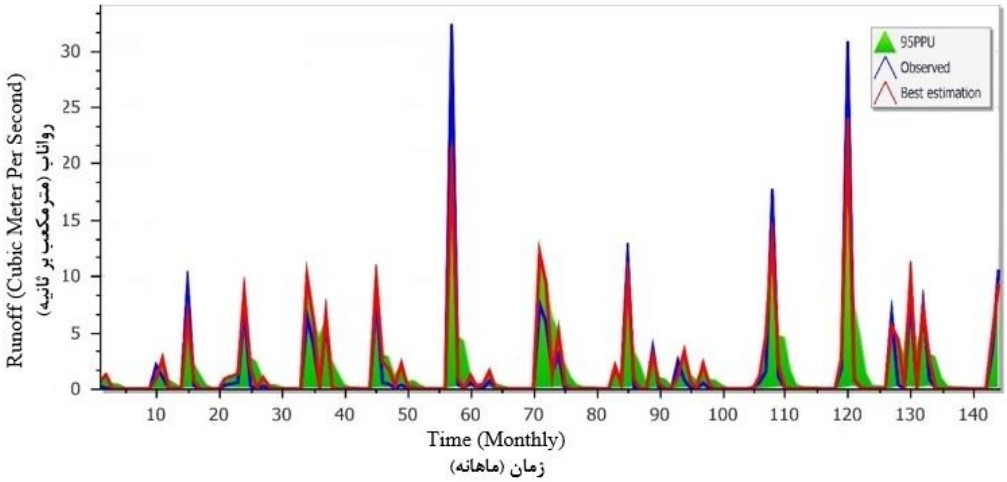
با توجه به جدول (۸) مقدار تابع هدف در این تحقیق، ۰/۸۰ و مقدار این شاخص R^2 ۰/۸۲ بدست آمد. بدین صورت که ۸۲ درصد از داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با یکدیگر همبستگی دارند و در باند عدم قطعیت قرار گرفته برای منطقه مطلوب می‌باشد. همچنین براساس شاخص p-factor مشخص شد که ۰/۸۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری در باند عدم قطعیت (۹۵ PPU) قرار گرفته‌اند که در واقع نشان‌دهنده‌ی واسنجی عالی برای مدل می‌باشد. همچنین مقدار شاخص r-factor که برابر ۰/۳۳ می‌باشد نشان می‌دهد پهنای باند ۹۵ PPU کم می‌باشد و واسنجی به درستی انجام شده است. همانگونه که از شکل (۴) مشخص است نتایج دوره واسنجی رضایت‌بخش بوده است. به‌طوری که هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری رواناب در مقیاس ماهانه از نظر تطابق زمانی نقاط اوج و فرود هیدروگراف خیلی خوب بوده و فقط در برخی از ماه‌های سال (اسفند، فروردین و اردیبهشت) مدل نتواسته است مقدار جریان‌های حداکثر را به درستی شبیه‌سازی کند یا که کم شبیه‌سازی کرده است. یکی از علت‌های این اختلاف را می‌توان به خطای اندازه‌گیری و یا مناسب نبودن تجهیزات اندازه‌گیری جریان اشاره کرد.



شکل ۴ – نمودار دبی جریان شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در دوره واسنجی برای ایستگاه هیدرومتری لار
Figure 4. Simulated and measured flow rate diagram during calibration period for Lar hydrometric station

پس از این که مدل جهت شبیه‌سازی بهتر دبی با شرایط منطقه تطبیق حداکثری پیدا کرد. باید اعتبار مدل را برای یک دوره زمانی غیر از دوره واسنجی ارزیابی کرد که در این مطالعه مدت ۱۲ سال (۲۰۰۶-۲۰۱۷) جهت اعتبارسنجی مدل SWAT در نظر گرفته شد. تفاوت این مرحله نسبت به مرحله واسنجی عدم نیاز به بهینه‌سازی پارامترها بوده و می‌توان از پارامترهای بهینه‌شده مرحله واسنجی استفاده کرد. در جدول (۸) و شکل (۵) نتایج و نمودار دبی جریان شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری مرحله اعتبارسنجی ارائه شده است. با توجه به جدول (۸) نتایج شاخص‌های دوره اعتبارسنجی بسیار مناسب بدست آمده است به طوری که مقدار NS، R^2، p-factor و r-factor به ترتیب در دوره اعتبارسنجی برابر ۰/۹۰، ۰/۹۰، ۰/۳۹ و ۰/۴۳ می‌باشد. با افزایش مقدار تابع هدف و ضریب تبیین در دوره اعتبارسنجی مشخص شد که مدل در این دوره هم نتایج مطلوبی داشته است. اما کاهش مقدار شاخص p-factor و افزایش r-factor با توجه به تابع هدف نشان می‌دهد که تطابق داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری کمتر شده است. یکی از دلایل تفاوت نتایج دوره واسنجی و

اعتبارسنجی شاید بدلیل بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده باشد. مثلا تعداد روزهای بدون جریان در مرحله واسنجی بیشتر از مرحله اعتبارسنجی بوده و این امر بطور مستقیم بر دقت برآوردها می‌تواند اثر داشته باشد. لازم به ذکر است در مطالعات، کاهش عدم قطعیت و ایده‌آل شدن مقادیر شاخص‌های عدم قطعیت بسیار حائز اهمیت است. به‌طور کل براساس شاخص‌های ارزیابی مدل و با توجه به شکل (۵) تطابق زمانی نقاط اوج و فرود هیدروگراف‌های دبی جریان شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی بهتر شده است.



شکل ۵ – نمودار دبی جریان شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در دوره اعتبارسنجی برای ایستگاه لار
Figure 5. Simulated and measured flow rate diagram in the validation period for Lar station

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق از مدل نیمه‌توزیعی SWAT و الگوریتم SUFI-2 موجود در بسته نرم افزار SWAT-CUP برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز لار استفاده شد که مدت ۱۸ سال (۱۹۸۸–۲۰۰۵) برای واسنجی و ۱۲ سال (۲۰۱۷–۲۰۰۶) برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که تعداد ۷ پارامتر بر شبیه‌سازی رواناب منطقه مورد مطالعه تأثیرگذار می‌باشد که از بین آن‌ها پارامترهای r__CN2.mgt، v__ALpha_BF.gw و r__SOL_AWC.sol نسبت به دیگر پارامترها از حساسیت بالایی برخوردار بودند و بیانگر این موضوع است که محدوده مطالعاتی به شدّت تحت تأثیر تغییرات سه پارامتر است. حساسیت بالای این سه پارامتر در اجرای مدل ارزیابی آب وخاک در بسیاری از مطالعات مشاهده شده است (۳۷،۲۱،۱۱). نتایج دقت شبیه‌سازی با استفاده از شاخص ارزیابی نش ساتکلیف، ضریب تبیین، p-factor و r-factor در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۸۰، ۰/۸۲، ۰/۸۰ و ۰/۳۳ و اعتبارسنجی ۰/۹۰، ۰/۹۰، ۰/۳۹ و ۰/۴۳ بدست آمد که نشان می‌دهد که مدل SWAT شبیه‌سازی دبی ماهانه حوضه آبخیز لار را با دقت بالایی انجام داده است. علاوه بر این، حداکثر تطابق زمانی نقاط اوج و فرود هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری دبی نیز توانایی زیاد مدل SWAT را تأیید می‌کند. همچنین، بررسی نتایج کسب شده نشان داد که مدل SWAT فقط در برخی از ماه‌های سال (اسفند، فروردین و اردیبهشت) مقادیر دبی حداکثر را کمتر از مقادیر واقعی (underestimate) شبیه‌سازی کرده است. باید در نظر داشت، حوضه مورد مطالعه دارای جریان فصلی و فاقد دبی پایه بوده بطوری که در برخی از ماه‌های سال فاقد جریان و بطور کامل خشک می‌گردد. بنابراین عوامل در ارتباط با شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی حوضه و همچنین عدم پیوستگی جریان از یک سو و وجود خطاهای آماربرداری ناشی از خطای انسانی یا تجهیزات اندازه‌گیری (مناسب نبودن تجهیزات اندازه‌گیری جریان در ایستگاه هیدرومتری حوضه آبخیز لار) از سوی دیگر در بروز خطاهای مشاهده شده نقش داشته‌اند.

بطور کلی بر پایه نتایج مطالعه حاضر، با توجه به کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی مقادیر بارش رواناب در سطح حوضه لار در منطقه خشک، می‌توان به ارزیابی عملکرد این مدل در سایر نقاط خشک نیز اقدام نموده و به شبیه‌سازی مقادیر بارش–رواناب پرداخت.

منابع

1. Amini, M.A., G. Turkan, S. Islamian, M.J. Zareian and A.A. Basaltpour. 2017. Evaluation of SWAT hydrological model in simulating water balance in watersheds of Semi-Arid Areas (case study: Zayandeh Roud watersheds). Journal of Water and Soil, 3(32): 849-863. DOI: 10.22067/jsw.v32i5.68815 (In Persian).
2. Astagneau, P.C., G. Thirel, O. Delaigue, J.H. Guillaum., J. Parajka, C.C. Brauer and K.J. Beven. 2021. A unified analysis of models and practicalities from a user perspective (hydrology modelling R

packages). Journal of Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 25 (7): 3937–3973. DOI:10.5194/hess-25-3937-2021.
3. Aslam, H and L. Andrew. 2017. SWAT modeling of hydrology, sediment and nutrients from the Grand River, Ontario. Water Quality Research Journal, 52(4): 243-257. DOI:10.2166/wqrj.2017.014.
4. Abbaspour, K.C. and J. Yang. 2006. A calibration and uncertainly analysis program for SWAT. Swiss Federal Institute of Aquatic Scientific and Technology, 333: 413-430.
5. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. Journal of the American Water Resouces Association, 34: 73–89. DOI:10.1111/j.1752-1688.
6. Baloi, F., S. Soltani Kopani and M. Tavakoli. 2020. Investigating the effectiveness of SWAT model in simulating runoff and soil moisture in the Dourij Basin of Ilam province. Journal of Watershed Management Research, 12(23): 180-190. DOI:10.52547/jwmr.12.23.180 (In Persian).
7. Dutta, P. and A.K. Sarma. 2021. Hydrological modeling as a tool for water resources management of the data-scarce Brahmaputra Basin. Journal of Water and Climate Change, 12(1): 152-165. DOI:10.2166/wcc.2020.186.
8. Fatehi, Z. and S.V. Shahoei. 2020. Application of SWAT model for simulating monthly runoff, lake Urmia watershed in Kurdistan province, Iran. Journal of Environment and Water Engineering, 6(3): 295–305. DOI: 10.22034/jewe.2020.218842.1346 (In Persian).
9. Gholami, S.A. and M. Nasiri. 2014. Simulation of the monthly discharge of the Atrak river using the SWAT model (case study: Marawah-tepe catchment area of Golestan province). Journal of Watershed Engineering and Management, 7(2): 126-135. DOI:10.22092/ijwmse.2015.101256 (In Persian).
10. Guderzi, A., M.T. Dasturani, A.R. Masahboani and A. Talebi. 2011. Investigating the effects of climate change on the state of runoff in arid regions (case study: Herat-Yazd river Basin). The 4th Iran Water Resources Management Conference, Tehran, Iran, 7pp (In Persian).
11. Golshan, M., A. Kavian, H. Rouhani and A. Ismaili. 2015. Multi-station calibration of Haraz watershed runoff with SWAT model. Journa of Iranian Water and Soil Research, 46(2): 293-303. DOI:10.22059/ijswr.2015.55934 (In Persian).
12. Ghezelsofloo, A.A., M. Hajibigloo, M. Eftekhari, S. Mahmoodizadeh, M. Akbari and S.A. Eslaminezhad. 2022. Simulation of runoff from Atrak river Basin Iran using SWAT model. Journal Soil and Environment, 41(1): 33-45. 2022. DOI:10.25252/SE/2022/222697.
13. Hosseini, S.H., H. Memarian and H. Memarian. 2018. Use of SWAT model and SWAT-CUP software in simulating and analyzing hydrological uncertainty of watersheds in arid and semi-arid regions (case study: Zashk watershed in Targaba-Shandiz city). Scientific Journal of Rain Catchment Surface Systems, 7(2): 35-44 (In Persian).
14. Khoi, D.N. and T. Suetsugi. 2014. Impact of climate and land-use changes on hydrological processes and sediment yield (a case study: be river catchment, Vietnam). Journal of Hydrological Sciences, 59(5): 1095-1108. DOI:10.1080/02626667.2013.819433.
15. Kiyani Majd, M., M. Nahtani and M.R. Dehmarde Ghaleno. 2021. Investigating SPI and SDI indicators of Zahedan plain using R software. 10Th International Conference on Rain Catchment Surface Systems, Kordestan, Iran, 8pp (In Persian).
16. Kiyani Majd, M. 2022. Hydrological simulation of Lar watershed in Sistan and Baluchistan province using SWAT model. M.ScThesis, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran. 112 pp (In Persian).
17. Khosravi, S.A. and M.H. Mir Yagoub Zadeh. 2019. Simulation of river flow based on SWAT physical model in Barandozchai watershed of Urmia Lake. Journal of Watershed Management Research, 11(22): 31-42. DOI:10.52547/jwmr.11.22.31 (In Persian).
18. Lucas, M., R. Marcelo, L. Marx, F.A. Diego and C. Nilton. 2016. Hydrological modeling of tributaries of cantareira system southeast Brazil with the SWAT model. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, 1037-1049. DOI:10.1590/1809-4430.
19. Li, T. and Y. Gao. 2015. Runoff and sediment yield variations in response to precipitation changes (a case study: Xichuan watershed in the loess plateau, China). Journal of Water, 7(10): 5638-5656. DOI:10.3390/w7105638.
20. Liu, J., D. Yuan, L. Zhang, X. Zou and X. Song. 2016. Comparison of three statistical downscaling methods and ensemble downscaling method based on Bayesian model averaging, China. Advances in Meteorology Journal, 1 (1): 1-12. DOI:10.1155/2016/7463963.
21. Liu, Y., Y. Xu, Y. Zhao and Y. Long. 2022. Using SWAT model to assess the impacts of land use and climate changes on flood in the Upperweihe River, China. Journal of Water, 14(13): 2098. DOI:10.3390/w14132098.
22. Mahzari, S., F. Kiani, F. Khormali and M. Azimi. 2016. Using SWAT model to determine runoff, sediment yield and nitrate loss in Gorganrood watershed. Journal of Ecopersia Iran, 2: 1359-1377 (In Persian).

23. Mokhtari, F., A. Honrabakhsh, S. Soltani, Kh. Abdulahi and M. Pajuohesh. 2019. Runoff simulation in Karkheh watershed using SWAT model. Seventh Comprehensive Conference on Flood Management and Engineering, Tehran. Iran, 10 pp (In Persian).
24. Nikita, Sh., K. Prabhat and B. Shyam. 2018. A comparison of SWAT model calibration techniques for hydrological modeling in the Ganga river watershed. Research Journal Watershed Ecology, 4: 643-653. DOI:10.1016/j.eng.2018.08.012.
25. Parisouj, P., H. Goharnza and P. Moazami. 2018. Hydrological simulation of precipitation-runoff using modified satellite precipitation algorithms (Case Study: Golestan Vashmgir dam Basin). Journal of Iranian Water Resources Research, 14(3): 174-188 (In Persian).
26. Raju, B.K. and L. Nandagiri. 2018. Assessment of variable source area hydrological models in humid tropical watersheds. International Journal of River Basin Management, 16(2): 145-156. DOI:10.1080/15715124.2017.1372446.
27. Rafael, A., B. Silvio and B.F. Daniel. 2018. Calibration and validtion of the SWAT hydrological model for the Mucuri river Basin Call. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, 55-63. DOI:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p55-63/2018.
28. Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyuni, S. Farhad Mousavi, M. Heidarpour, A. Jalalian and K. Abbaspour. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous Basins in central Iran. Hydrological Sciences Journal, 53(5):977-988. DOI:10.1623/ hysj.53.5.977.
29. Rezaei Moghadam, M.H., M.A. Hajazi and A. Behbodi. 2018. Estimating the amount of runoff in the Lenbaran Chai catchment area in east azarbaijan province: comparative application of calibration methods and uncertainty analysis of the SWAT model. Geography and Environmental Hazards, 31: 75-59. DOI:10.22067/geo.v8i3.81998 (In Persian).
30. Sanjay Shekar, N.C. and D.C. Vinay. 2021. Performance of HEC-HMS and SWAT to simulate streamflow in the sub-humid tropical Hemavathi catchment. Journal of Water and Climate Change, 1-13. DOI:10.2166/wcc.2021.072.
31. Sheikh, Z., A.M. Moghaddam Nia and D. Han. 2021. Climate change impact assessment on low streamflows using cross-entropy methods. Climate Research, 85: 159-176. DOI:10.3354/cr01674.
32. Sheikh, Z., M.R. Yazdani and A. Moghaddam Nia. 2020. Spatiotemporal changes of 7-day low flow in Iran's Namak lake Basin: impacts of climatic and human factors. Theoretical and Applied Climatology, 139(1): 57-73. DOI:10.1007/s00704-019-02959-w.
33. Slater, L.J., G. Thirel, S. Harrigan, O. Delaigue, A. Hurley, A. Khouakhi and K. Smith. 2019. Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. Journal of Hydrology and Earth System Sciences, 23 (7): 2939-2963. DOI:10.5194/hess-23-2939-2019.
34. Safavi, M., A. Mustafaei and M.R. Molai Nia. 2021. Use of SWAT model in simulation of runoff in Karkheh catchment area. The First International Conference on Civil Engineering, New and Practical Findings, Shiraz, Iran, 12 pp (In Persian).
35. Zahabion, B., M.R. Guderzi and A.R. Masah Bovani. 2010. The application of SWAT model in estimating the runoff of the Basin in future periods under the influence of climate change. Journal of Climatology Research, 3(4): 44-58 (In Persian).
36. Zarezadeh Mehrizi, Sh., A. Khorani, J. Bazarafshan and A. Bazarafshan. 2016. Evaluation of SWAT model efficiency in runoff simulation of Gamasiab watershed. Journal of Natural Resources of Iran, 70(4): 881-893 (In Persian).
37. Zuo, D., Z. Xu, J. Zhao, C. Abbaspour and H. Yang. 2015. Response of runoff to climate change in the Wei River Basin, China. Hydrological Sciences Journal, 60(3): 508-522. DOI:10.1080/02626667.2014.943668.

Simulating the Runoff of Watersheds in Dry Areas on A Monthly Scale using the SWAT Model (Case Study: Lar Watershed)

Mahnaz Kiyani Majd[1], Mohammad Nohtani[2], Mohammad Reza Dehmardeh Ghaleh No[3] and Zahra Shikh[4]

1- Graduate M.Sc. of Watershed Management, Rangeland and Watershed Management Department, University of Zabol
2- Assistant Professor, Rangeland and Watershed Management Department, University of Zabol, (Corresponding author: m.nohtani@uoz.ac.ir)
3- Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, University of Zabol
4- Graduate PhD of Combat Desertification, University of Semnan
Received: 2 November 2022 Accepted: 11 January 2023

Extended Abstract

Introduction and Objective: mankind has witnessed various hydrological events such as water shortage, drought, flood, avalanche, etc., and the scope of these events depends on the behavior of hydrological variables and characteristics of watersheds. The lack of statistics and information or the lack of correct and appropriate statistics has caused the investigation and recognition of the behavior of hydrological variables and the characteristics of watersheds with acceptable accuracy. Based on this, hydrological models are a suitable tool for evaluating the current state of water resources and predicting future conditions with knowledge and understanding of the prevailing interactions at the level of watersheds.

Material and Methods: In this research, using the SWAT model, the precipitation-runoff simulation of the Lar watershed was carried out, and for this purpose, the daily data of precipitation, temperature and discharge during the common statistical period (1988-2017) were used. The initial simulation of the hydrological model was done in the SWAT plugin, and the SWAT-CUP software and the SUFI-۲ method were used as an optimal algorithm for sensitivity analysis, calibration and validation of the model.

Results: Based on the SWAT model, the study area was divided into 37 sub-basins and 308 hydrological response units. In addition, by analyzing the sensitivity of 24 parameters affecting the simulation of the monthly runoff of the Lar watershed, it was determined that 7 parameters based on the values of the t-state and p-value indicators were selected as the parameters with the greatest effect, and out of these 7 parameters, Three parameters curve number for medium humidity conditions, base flow return factor to the main waterway and average usable water were identified as the most sensitive parameters in runoff simulation. Then 18 years of the statistical period (1988-2005) were selected for recalibration and 12 years (2006-2017) for validation. Also, the effectiveness and efficiency of the model was evaluated using NS, R2, p-factor and r-factor coefficients. Model efficiency was evaluated using NS, R2, p-factor and r-factor coefficients. The values of these coefficients were estimated as 0.80, 0.82, 0.80 and 0.33 during the calibration period and 0.90, 0.90, 0.39 and 0.43 during the validation period. In addition, the temporal compatibility of the high and low points of the simulated and measured discharge hydrographs also confirmed the high accuracy of the model in the simulation.

Conclusion: The obtained results show that despite the seasonal flow and no base flow, as well as the frequency of days with zero flow, the SWAT model has a high ability to simulate the monthly discharge of watersheds in dry areas.

Keywords: Dry Areas, SUFI-2 method, SWAT-CUP, Watershed Management

[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.12.9]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.135]