نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹٤

صفحات۱۱۲-۹۹

واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژی IHACRES و SWAT در شبیه‌سازی روان‌آب

هادی نظری پویا، دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران[1]

پرویز کردوانی، استاد جغرافیا، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران

عبدالرضا فرجی راد، استاد جغرافیا، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران

دریافت مقاله: ۹۳/۱۲/۲۵ پذیرش نهایی: ۹۴/۰۴/۱۵

چکیده

مقدار روان‌آب در هر منطقه‌ای با توجه به شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، خاک و پوشش گیاهی در سطح حوضه تغییر می‌کند. شبیه‌سازی فرآیندهای فوق نیازمند ارائه‌ی اطلاعات لازم از چگونگی تغییرات مکانی این عوامل است. در این زمینه، با توجه به تنوع مدل‌های هیدرولوژیکی، دستیابی به مناسب‌ترین شبیه‌سازی چنین مدل‌هایی و انتخاب مدلی مناسب مستلزم ارزیابی میزان عملکرد آن‌ها متناسب با شرایط هیدرولوژیکی هر منطقه است. بنابراین، انتخاب مدل، به تشخیص قابلیت و محدودیت مدل‌های هیدرولوژی حوضه نیاز دارد. در این پژوهش، میزان عملکرد دو مدل بارش ـ روان‌آب (SWAT, IHACRES) در شبیه‌سازی روان‌آب دو حوضه یلفان و سولان ارزیابی و مقایسه شده است. بر این اساس، با تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها ارزیابی شدند. بازه‌ی زمانی ۱۹۹۹-۱۹۸۳ دوره‌ی واسنجی و دوره‌ی ۲۰۱۰-۱۹۸۳ دوره‌ی صحت‌سنجی انتخاب و بررسی گردید. سرانجام، به منظور تعیین توانایی مدل در شبیه‌سازی روان‌آب حوضه‌ها به کمک معیارهای ضریب نش ـ ساتکلیف‌ضریب NS (مورد) ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هر دو مدل از توانمندی قابل پذیرشِ شبیه‌سازی R^2 (تعیین) دوره‌ی صحت‌سنجی هر دو زیر حوضه در مقیاس روزانه و درSWATروان‌آب در هر دو حوضه‌ی برخوردارند و مدل شبیه‌سازی روان‌آب در هر دو حوضه نسبت بالای ۰/۷ بهترین عملکرد را ازماهیانه با ضریب نش ۰/۶ و ضریب تعیین به داده‌های مشاهداتی دارد.

واژگان کلیدی: هیدرولوژی، مدلIHACRES ، مدل SWAT ، روان‌آب، واسنجی.

۱. نویسنده مسئول: Email: hnpoya@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

مقدمه

یکی از ابزارهای اساسی در مدیریت منابع آب بررسی و تعیین مقدار روان‌آب در حوزه‌های آبخیز است. شبیه‌سازی جریان رودخانه به منظور آگاهی از آورد رودخانه و پیش‌بینی مناسب جریان آن در کارهای عمرانی، ساماندهی، طراحی و برنامه‌ریزی منابع آب سطحی (مهار سیل و پیشگیری از مخاطرات محیطی و کاهش فرسایش و رسوب در حوضه‌های آبخیز) دارای اهمیت ویژه‌ای است. بدون تحلیل دقیق داده‌های بارش ـ روان‌آب مشاهده‌ای، مدیریت جامع حوزه‌ی آبخیز برای پیش‌بینی وقوع سیلاب و کاهش خطرهای ناشی از آن سبب هدررفت سرمایه و عدم ایجاد توسعه‌ی پایدار خواهد شد. از سویی دیگر، فقدان ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری یا کمیت و کیفیت اندک آمار آن‌ها، لزوم استفاده از روش‌های شبیه‌سازی بارش ـ روان‌آب در قالب مدل‌های هیدرولوژیکی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. داودی در سال ۱۹۸۳ ضمن بررسی مدل‌های بارش روان‌آب بر این نظر است که خروجی حوزه‌ی آبخیز تابعی از رفتارهیدرولوژیک آن در برابر ورودی است که این اصل به همراه تعدد و تنوع شاخص‌های مؤثر در فرآیند بارش ـ روان‌آب عامل رواج انواع مدل‌های مذکور شده است. بنابراین، برای به کار بردن موفقیت‌آمیز مدل‌های هیدرولوژیکی، می‌بایست شاخص‌های مدل به دقت تعیین شود. به دلیل فقدان اطلاعات فیزیکی مشخص و همچنین اندازه‌گیری‌های میدانی که بسیار هزینه‌بر هستند، اندازه‌گیری مستقیم همه‌ی مقادیر شاخص‌های مدل امکان‌پذیر نیست. از این رو، تخمین شاخص‌ها معمولاً با برازش خروجی مدل و داده‌های مشاهده‌ای در یک فرایندِ سعی و خطا انجام می‌شود. از طرف دیگر، کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های هیدرولوژیکی بستگی به دقت واسنجی مدل دارد. بنابراین، قبل از به کار بردن نتایج مدل برای تصمیم‌گیری‌های مختلف باید واسنجی برای افزایش قابلیت اطمینان مدل به دقت انجام شود. شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه‌های آبخیز و به ویژه در حوضه‌هایی که به نوعی با مناطق شهری در ارتباط هستند، برای کمک به مدیریت و برنامه‌ریزی کارآمدتر امری ضروری است.

برای شبیه‌سازی رابطه‌ی بارش ـ روان‌آب مدل‌های هیدرولوژی متفاوتی طراحی شده است. مدل‌های هیدرولوژیکی به سه دسته‌ی تجربی، مفهومی و مدل‌های با مبنای فیزیکیِ توزیعی تقسیم‌بندی می‌شوند. لیوسلی در سال ۲۰۰۲ با بررسی مدل‌های هیدرولوژی مشخص می‌کند که دسته‌ی اولِ این مدل‌ها آشکارا قوانین فیزیکی است که فرآیندها را در نظر نمی‌گیرد و فقط با تابعِ تبدیلی ورودی را به خروجی ارتباط می‌دهد. دسته‌ی دوم مدل‌های مفهومی هستند که بر اساس مطالعات محدود فرآینـدهای موجود در سامانه‌ی هیدرولوژی حوضه‌ی آبریز است. شکل‌گیری این مدل‌ها بر اساس همه‌ی فرآیندهای فیزیکی نیست، ولی بر مبنای درک رفتار سامانه‌ی طراحِ مدل است. دسته‌ی سوم مدل‌های با مبنای فیزیکی‌توزیعی هستند که در این مدل‌ها تلاش می‌شود همه‌ی فرآیندهای موجود سامانه‌ی هیدرولوژی مورد نظر از طریق اعمال معانی فیزیکی ارائه گردد. بدین ترتیب، با درک فرآیندهای فیزیکیِ رویداد بارش، پیش‌بینی رفتار سامانه تحت هر شرایط ممکن می‌گردد. برای مدیریت حوضه‌ی آبریز و جلوگیری از بروز ناسازگاری در اقدامات طراحی‌شده در سطح حوضه (به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه) به مدلی نیاز است که بتواند حجم وسیع داده‌ها از جمله خصوصیات اقلیمی، خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی را در شبیه‌سازی به کار برد. مدل‌های توزیعی اغلب به دلیل قابلیت اتصال به GIS قادرند همه‌ی تغییرات هیدرولوژیکی متناسب با تغییرات مکانی و حرکت‌های هیدرولوژیکی حوضه را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کنند. در سال‌های اخیر، مدل‌هایی با ماهیت نیمه‌توزیعی تهیه شدند که اغلب در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفق عمل کردند. یکی از این مدل‌های نیمه‌توزیعی،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

که در نقاط گوناگون جهان مورد استفاده قرار گرفته، مدل هیدرولوژیکی SWAT است. SWAT مخفف Soil and Water Assessment Tool است که جف آرنولد اولین بار در سال ۱۹۹۰ در سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه گذاری کرد. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی دو مدل هیدرولوژیکی SWAT و IHACRES در دنیا و به ویژ در ایران انجام شده است. ذهبیون و همکاران (۱۳۸۹) برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه در حوضه‌ی آبخیز قره سو از مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده کردند.

عباسپور و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل رسوب و بارهای مواد مغذی (در همه‌ی عوامل مؤثر در کمیت آب)، SWAT کشور سوئیس را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها تعیین کردند مساحتی حدود ۲۲۲۰ کیلومتر مربع واقع در شمال شرق در حوضه‌ی تور رسوب دارد. این مدل توانایی فراوانی در شبیه‌سازی کمیت آب دارد.

غفاری و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی در پاسخ‌های هیدرولوژی حوضه‌ی آبخیز زنجان‌رود با استفاده از مـدلSWAT پرداختند و در آن آثار تغییر کاربری اراضی در جریان رودخانه و بار آبی حوضه را مشخص کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییـر در کـاربری اراضی از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۶ منجر به افزایش مقدار روان‌آب سطحی در حـدود ۳۳ درصـد و کـاهش سـطح سـفره‌ی آب‌هـای زیرزمینـی در حـدود ۲۲ درصـد شـده اسـت. آذری و همکاران (۱۳۹۲) با ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود از مدل SWAT بـرای شـبیه‌سـازی رژیـم هیـدرولوژیکی حوضـه و از الگـوریتم SUFI- ۲ در نـرم‌افزار SWAT-CUP به منظور بهینه‌سازی شاخص‌های مدل استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که مدل کارایی لازم را برای شـبیه‌سـازی رژیـم هیـدرولوژیکی حوضـه دارد. گودرزی (۱۳۹۱) با مقایسه‌ی عملکرد سه مدل هیدرولوژی IHACRES، SWAT و SIMHYD در شبیه‌سازی روان‌آب نتیجه می‌گیرد که مدل SWAT بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی روان‌آب حوضه از داده‌های مشاهداتی در دوره‌ی صحت‌سنجی داشته است. آشفته و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر در آذربایجان شرقی، از مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان استفاده کردند و نتایج مدل را برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، به ترتیب با مقادیر ضریب همبستگی ۰/۷۹ و ۰/۷۰ تعیین و قابل قبول ارزیابی کردند. زارعی و همکاران (۱۳۹۰) در ارزیابی مدل هیدرولوژیکی IHACRES، به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه در حوضـه‌ی آبخیـزکسیلیان مشخص می‌کند که بر اساس مقادیر دو پـارامتر ضـریب تـشخیص و میـانگین خطـای نـسبی پـارامتر، این مدل جریان رودخانه را در کل حوضه‌ی آبخیز کسیلیان با دقت بیشتری از زیرحوضه‌های آن شبیه‌سازی کرده است. حسین خیرفام و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل IHACRES دبی روزانه برخی از حوضه‌های آبخیز استان گلستان را بررسی کردند و کارایی آن را در هفت زیرحوضه در رودخانه‌ی گرگان‌رود استان گلستان را تعیین می‌کند و نتیجه می‌گیرد که مدل IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب کارایی نسبتاً مقبولی دارد. حسینی و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه‌ی آبخیز طالقان مؤلفه‌های جریان را با مدل SWAT مورد ارزیابی قرار می‌دهد و نتیجه می‌گیرد که مدل در شبیه‌سازی روان‌آب در دوره‌ی زمانی سالیانه و ماهیانه نتایج مطلوبی نشان می‌دهد، ولی در دوره‌ی روزانه دقت کمتری دارد. لی و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیق خود (حوضه‌ای در غرب آفریقا) با استفاده از مـدل SWAT نشان دادند که تغییر کاربری حوضه‌ها از جنگل، مرتع و بوته‌زار به اراضی کشاورزی و یـا منـاطق شـهری سبب تغییر واکنش هیدرولوژی حوضه می‌گردد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییـرکاربری اراضی سبب افزایش در حجم سطحی، کاهش تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی و آب پایه‌ی رودخانه‌هـا و تغییـر در مقدار روان‌آب و شدت فرسایش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

و رسوب می‌شود. کلین و همکاران (۲۰۱۳) در زیرحوضه‌ی کرالای هندوستان، توانمندی مدل SWAT را در شبیه‌سازی روان‌آب بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل در شرایط آب وهوایی و تغییر کاربری اراضی توانایی بالایی در شبیه‌سازی و برآورد روان‌آب دارد. ویز و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از چهار مدل بارش ـ رواناب SMARG ، SACRAMENTO، SIMHYD و IHACRES تأثیرات تغییرات اقلیمی بر روی واکنش‌های هیدرولوژیکی ۶۱ حوضه‌ی را در استرالیا بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نتایج مدل IHACRES دقت بیشتری در شبیه‌سازی بارش روان‌آب دارد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که دو مدل هیدرولوژیکی SWAT و IHACRES از قابلیت فراوانی برای شبیه‌سازی و برآورد روان‌آب حوضه‌های آبخیز برخوردار هستند. از این رو، در این پژوهش کارایی مدل هیدرولوژیکی توزیعی SWAT و مدل یکپارچه‌ی IHACRES تعیین و با استفاده از معیارهایِ عملکرد مقایسه و ارزیابی می‌شوند. بر این مبنا، ابتدا به طور مختصر هر دو مدل مذکور معرفی و سپس نتایج پژوهش در حوضه‌هایِ بررسی تعیین و ارزیابی می‌شوند.

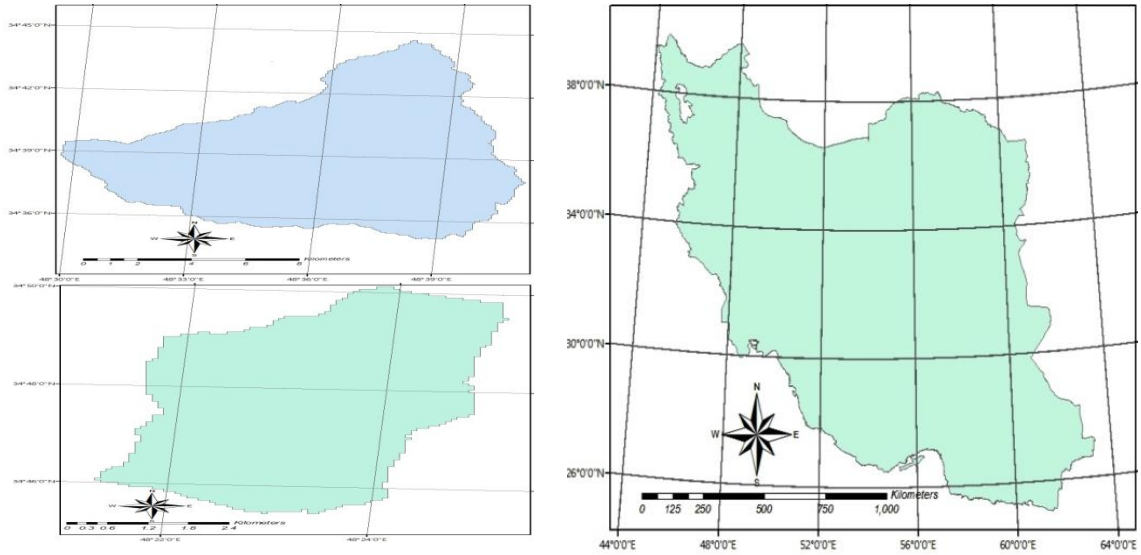
داده‌ها و روش کار

الف) قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

حوضه‌ی یلفان با مساحت ۱۶۰ کیلومتر مربع در مرکز استان همدان بین '۴۱ °۴۸ و '۳۰ °۴۸ طول شرقی و '۳۶ °۳۴ و '۴۶ °۳۴ عرض شمالی و زیرحوضه‌ی سولان نیز با مساحت ۳۲/۵۴ کیلومتر مربع در دامنه‌های شمالی الوند قرار دارند. رودخانه‌ی هر دو زیرحوضه‌ی بررسی از دامنه‌های شمالی پربرف کوه الوند سرچشمه می‌گیرند. حجم کل آورد زیرحوضه‌ی یلفان طی دوره‌ی آماری ۱۹۹۹-۱۹۸۳ برابر ۴۶/۰۴ میلیون مترمکعب در سال و میانگین آبدهی سالیانه‌ی آن ۱/۴۳ متر مکعب در ثانیه است. کمترین میانگین آبدهی ماهیانه ۰/۰۹ مترمکعب در ثانیه در شهریور و بیشترین میانگین آبدهی ماهیانه‌ی آن ۳/۶۸ مترمکعب در ثانیه در اردیبهشت است. حجم کل آورد زیرحوضه‌ی سولان نیز طی دوره‌ی آماری ۱۹۹۹-۱۹۸۳ برابر ۱۲/۷۸ میلیون مترمکعب در سال و میانگین آبدهی سالیانه‌ی آن ۰/۴۱۱ مترمکعب در ثانیه است. کمترین میانگین آبدهی ماهیانه ۰/۰۲۳ مترمکعب در ثانیه در شهریور و بیشترین میانگین آبدهی ماهیانه‌ی آن ۱/۰۳ مترمکعب در ثانیه در اردیبهشت است. قسمت عمده‌ی زیرحوضه‌های مورد بررسی کوهستانی بوده و دارای آب و هوای نیمه‌خشک تا مرطوب است. متوسط بارندگی سالیانه ۴۷۱ میلی‌متر است که بین ۳۷۵ در مناطق کم‌ارتفاع تا ۶۳۵ میلی‌متر در قسمت‌های مرتفع در نوسان است. حداکثر و حداقل ارتفاع زیرحوضه‌ی یلفان به ترتیب ۱۹۷۰ و ۳۴۶۷ متر و زیر حوضه‌ی سولان نیز به ترتیب ۱۹۵۸ متر و ۳۳۱۷ متر است. بیشترین شیب حوضه‌ی یلفان در قسمت‌های جنوب غربی ۳۶/۸ درصد و کمترین شیب حوضه ۴ درصد است. متوسط دمای سالیانه‌یِ هر دو زیرحوضه ۸/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد و متوسط حداقل و حداکثر دما به ترتیب ۳/۱ و ۱۴/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است. دامنه‌ی میانگین سالیانه‌ی دما ۲۸/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد و نیز حداکثر و حداقل مطلق دما ۲۴ و ۳۳/۵- درجه‌ی سانتی‌گراد است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]



شکل ۱. موقعیت حوضه‌های محدوده‌ی مطالعه.

ب)داده ها

در این تحقیق، داده‌های پایه شامل داده‌های مشاهداتی دما، بارش و روان‌آب در دوره‌ی آماری ۲۰۱۰-۱۹۸۳ میلادی است. داده‌های بارندگی ایستگاه هواشناسی یلفان و درجه‌ی حرارت روزانه‌ی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک فرودگاه همدان و اطلاعات روان‌آب ایستگاه هیدرومتری یلفان برای حوضه‌ی یلفان و ایستگاه هیدرومتری سولان برای حوضه‌ی سولان مبنای بررسی قرار گرفتند. در این بررسی، دوره‌ی ۱۹۹۹-۱۹۸۳ برای واسنجی مدل و دوره‌ی ۲۰۰۹-۱۹۹۹ به منظور اعتبارسنجی مدل‌های موردِ بررسی انتخاب و تعیین شدند. برخی از اطلاعات پایه‌ی مورد نیاز مدل‌ها از قبیل خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی و کاربری اراضی با استفاده از نقشه‌های دریافتی از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان تهیه و برای انجام تحقیق استفاده شدند. بر این اساس، در ادامه‌ی کار ابتدا به بررسی اجمالی دو مدل و روش کار در هر کدام پرداخته می‌شود و سپس معیارها و شاخص‌های ارزیابی مدل در قسمت معیارهای عملکرد مدل بررسی و تعیین می‌گردد.

ج) روش کار

- **مدل** SWAT

در ۱۹۹۰، جف آرنولد مدل SWAT را برای اولین‌بار در تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه‌گذاری کرد. این مدل مدلی فیزیکی و نیمه توزیعی است که برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی تهیه شده است. چنین مدلی از اطلاعات ویژه‌ای شامل اقلیم، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی در حوضه برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند. در این مدل زیرحوضه‌ها به زیرحوضه‌ای کوچک‌تری به نام پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم می‌شوند که این واحدها اراضی یکپارچه‌ی دارای ترکیبات یکسانی از پوشش‌خاک و مدیریت هستند (نیچ و همکاران، ۲۰۰۵). اصلی‌ترین معادله در تخمین روان‌آب معادله‌ی بیلان آب است. روان‌آب سطحی به روش شماره‌ی منحنی برای هر واحد واکنش هیدرولوژیکی شبیه‌سازی و سرانجام کل روان‌آب برای حوضه روندیابی می‌شود. در این مدل، رابطه‌ی اصلی در محاسبه‌ی همه‌ی شاخص‌های مربوط به آب حوضه برای هر واحد هیدرولوژیکی از رابطه‌ی زیر صورت می‌گیرد:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

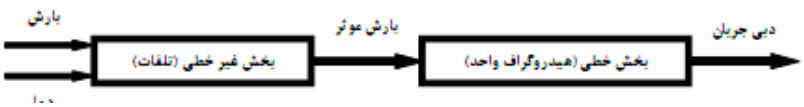
$$SW_t=SW_o+\sum_{i=1}^{t}(R_{day}-Q_{sur}-Ea-W_{seep}-Q_{gw})$$

در این رابطه، SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی‌متر)، SW_o مقدار اولیه‌ی آب موجود در خاک (میلی‌متر) t زمان برحسب روز، R_{day} مقدار بارش در روز i (میلی‌متر)، Q_{sur} مقدار روان‌آب سطحی در روز i (میلی‌متر)، Ea مقدار تبخیر و تعرق در روز i (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آب نفوذی به لایه‌ی فوقانی خاک در روز i (میلی‌متر)، Q_{gw} مقدار آب زیرزمینی برداشت‌شده در روز i (میلی‌متر) است. (نیتچ و همکاران، ۲۰۰۳). مدل SWAT برای شبیه‌سازی از داده‌های توپوگرافی، اطلاعات هیدروکلیماتولوژی مشتمل بر داده‌های آب‌سنجی در خروجی حوضه و داده‌های بارندگی روزانه و اطلاعات روزانه درجه‌ی حرارت، باد، رطوبت نسبی ایستگاه سینوپتیک، پوشش گیاهی و لایه‌ی DEM خاک به همراه خصوصیات آن در واحدهای مختلف استفاده می‌کند. اطلاعات توپوگرافی مدل ارتفاع رقومی به صورت رستر مدل معرفی می‌شود. نقشه‌ی کاربری اراضی و نقشه‌ی خاک نیز بعد از پردازش در محیط GIS به صورت فایل‌های رستری در مدلSWAT استفاده شدند. نرم‌افزار SWAT-CUP نیز برنامه‌ی بهینه‌ساز ارتباط‌دهنده‌ای با مدل SWAT است که با استفاده از آن واسنجی و تحلیل عدم قطعیت‌های مدل SWAT صورت می‌گیرد.

- **مدل IHACRES**

مدل IHACRES هیدرولوژی مدلی یکپارچه مفهومی متریک برای شبیه‌سازی بارش ـ روان‌آب است که جیکمن و هورمبرگر در ۱۹۹۳ تهیه کردند. مدلِ IHACRES بارش ـ روان‌آب مدلی پارامتری مؤثر وکارآمد است که در اکثر مناطق آب و هوایی گوناگون از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارد. اساس این روش از دو مدول غیر خطی کاهش و مدول خطی هیدروگراف تشکیل می شود.

به همین منظور در ابتدا بارندگی r_k و دما r_kف در هر گام زمانی k با مدول غیر خطی به بارندگی مؤثر u_k تبدیل می‌شود و سپس با مدول خطی هیدروگراف واحد به روان‌آب سطحی x_k در همان گام زمانی تبدیل می‌گردد (شکل ۲).



شکل ۲. چگونگی شبیه‌سازی بارش روان‌آب مدل IHACRES همراه با مدول‌های خطی و غیرخطی (جیکمن و هورمبرگر در ۱۹۹۳).

در کل، این مدل از شاخص‌های هواشناسی بارندگی و درجه‌ی حرارت روزانه و اطلاعات روزانه‌ی ایستگاه‌های هیدرومتری به صورت ورودی مدل استفاده می‌کند و پس از ارزیابی اولیه از شبیه‌سازی روان‌آب در دوره‌ی واسنجی و تأیید میزان کارایی آن در این مرحله، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی روان‌آب صورت می‌گیرد. گفتنی است که هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی از معیارهای عملکرد برای میزان توانمندی مدل در شبیه‌سازی روان‌آب است.

- **معیارهای عملکرد**

برای تعیین میزان عملکرد هر دو مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی روان‌آب و تعیین میزان کارایی آن‌ها در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی از معیارهای عملکرد شامل ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش (NASH) استفاده می‌گردد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

هرچه مقادیر ضریب تأثیر (NAS) و ضریب تعیین (R^2) به یک نزدیک‌تر باشند دبی‌های شبیه‌سازی شده از دقت مطلوب‌تری برخوردار خواهند بود. روابط ۱ و ۲.

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q\ obs - \bar{Q}\ obs)\ (Q\ sim - \bar{Q}\ sim)}{Q\ obs \times Q\ sim}\right]$$ رابطه ۱

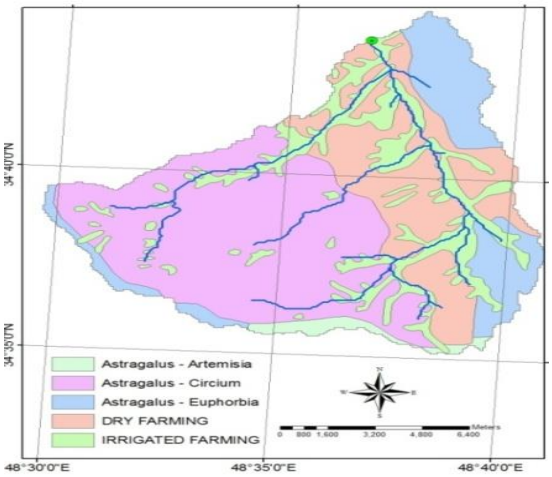
$$E = 1 - \left[\frac{\frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n}(Qobs - Qsim)^2}{\frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n}(Qobs - \bar{Q}obs)^2}\right]$$ رابطه ۲

در این روابط Q داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و n برابر تعداد داده‌هاست. اندیس sim بیانگر داده‌های شبیه‌سازی شده و اندیس obs بیانگر داده‌های مشاهده‌ای است. مقدار R^2 بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. در ۱۹۹۹، موتویلو و همکاران در بررسی تعیین کارایی مدل تعیین کردند که اگر مقادیر ضریب تأثیر (NASH) بیش از ۰/۷۵ باشد شبیه‌سازی خوب و مقادیر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ شبیه‌سازی مقبول و کمتر از ۰/۳۶ شبیه‌سازی پذیرش‌ناپذیر است.

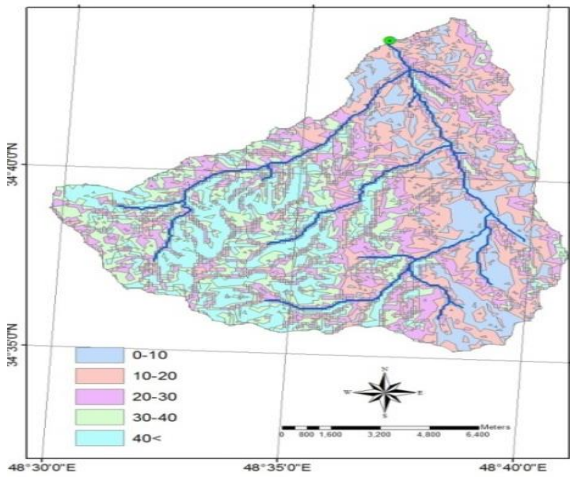
شرح و تفسیر نتایج

ارزیابی مدل SWAT در شبیه‌سازی روان‌آب

همان طور که قبلاً اشاره شد، مدل SWAT در شبیه‌سازی و برآورد روان‌آب از اطلاعات بسیار گسترده‌ای استفاده می‌کند. بر این اساس، پس از جمع‌آوری داده‌های توپوگرافی، اطلاعات هیدروکلیماتولوژی مشتمل بر داده‌های آب‌سنجی در خروجی حوضه و داده‌های بارندگی روزانه و اطلاعات روزانه‌ی درجه‌ی حرارت، باد، رطوبت نسبی ایستگاه سینوپتیک و اطلاعات پوشش گیاهی و خاک به ارزیابی و شبیه‌سازی روان‌آب در دو حوضه اقدام شد. پارامترهای متعددی برای واسنجی مدل در دو زیرحوضه‌ی سولان و یلفان با استفاده از مدل SWAT-CUP استفاده شد که میزان حساسیت هر کدام از شاخص‌ها در مراحل ابتدایی واسنجی تعیین گردید. نتایج مربوط به شاخص‌های حساس در جدول شماره‌ی ۱مشخص گردیده است.



شکل ۳. نقشه‌ی پوشش گیاهی حوضه‌ی یلفان



شکل ۴. نقشه‌ی شیب حوضه‌ی یلفان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

جدول۱ شاخص‌های نهایی انتخابی در واسنجی، میزان حساسیت آن‌ها به همراه مقدار بهینه در مدل SWAT

شاخص	علامت اختصاری	حداکثر	حداقل	مقادیر بهینه شاخص	رتبه حساسیت
متوسط طول شیب / متر	V__SLSUBBSN.hru	۲۳.۲۹	۰.۰۰	۳.۶۵	۱
زمان تأخیر تغذیه‌ی آب زیرزمینی / روز	V__GW_DELAY.gw	۲۵.۶۰	۱۸.۹۷	۲۴.۹۰	۲
ضریب عکس العمل جریان آب زیرزمینی	V__ALPHA_BF.gw	۰.۸۰	۰.۶۷	۰.۷۷	۳
ضریب تأخیر دمای توده برف	V__TIMP.bsn	۰.۲۲	۰.۱۵	۰.۱۵	۴
دمای وقوع برف / درجه‌ی سانتی‌گراد	V__SFTMP.bsn	۲.۳۲	۱.۵۹	۲.۲۹	۵
هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	V__CH_K۲.rte	۲۰.۸۴	۱۱.۴۶	۱۴.۴۴	۶
ظرفیت آب قابل دسترس خاک/ میلی‌متر در میلی متر	R__SOL_AWC(..).sol	-۰.۹۲	-۱.۹۵	-۱.۰۰	۷
شماره‌ی منحنی	R__CN۲.mgt	-۰.۵۰	-۰.۶۳	-۰.۵۴	۸
دمای ذوب توده برف /درجه‌ی سانتی‌گراد	V__SMTMP.bsn	۱۱.۲۶	۱۰.۱۲	۱۰.۱۴	۹
ضریب تصحیح جذب آب از خاک توسط گیاه	R__EPCO.bsn	۰.۰۸	۰.۰۷	۰.۰۷	۱۰
ضریب مانینگ	R__CH_N۲.rte	۰.۰۹	۰.۰۵	۰.۰۵	۱۱
عامل ذوب برف در ۲۱ دسامبر / درجه‌ی سانتی‌گراد	V__SMFMN.bsn	۳.۹۴	۱.۰۳	۱.۹۶	۱۲
هدایت هیدرولیکی خاک / میلی‌متر بر ساعت	R__SOL_K(..).sol	۱.۳۹	۱.۳۶	۱.۳۸	۱۳
ضریب تأخیر روان‌آب سطحی	V__SURLAG.bsn	۰.۵۳	-۰.۱۷	۰.۳۷	۱۴

r و v نشان‌دهنده‌ی تغییرات نسبی (ضرب در مقادیر شاخص به صورت درصد) و مطلق (جایگزین مقادیر شاخص) هستند.

پس از تعیین شاخص‌های حساس در دو زیرحوضه اقدامات مربوط به واسنجی و صحت‌سنجی مدل در دو زیرحوضه صورت گرفت که نتایج ارزیابی و واسنجی مدل SWAT برای هر دو حوضه در جدول شماره‌ی ۲ و شکل‌های شماره‌ی ۵ و ۶ آورده شده‌اند. طبق نتایج به دست آمده در هر دو حوضه مورد بررسی (جدول ۲) ضریب نش در مقیاس ماهیانه در حوضه‌ی یلفان در دوره‌ی واسنجی ۶۸/ ۰ و دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۷۴ و در حوضه‌ی سولان در دوره‌ی واسنجی ۰/۶۹و دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۷۶ است.

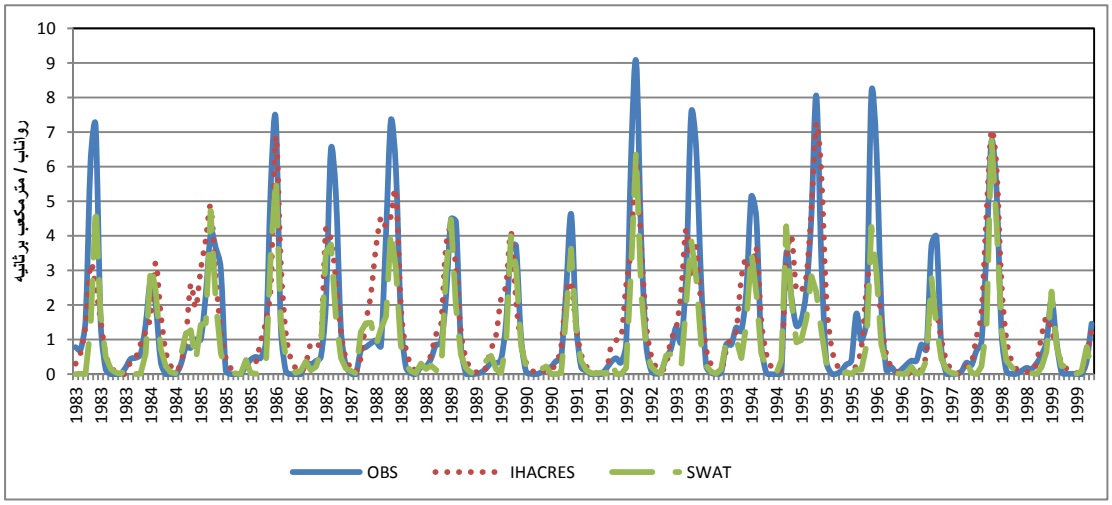
همچنین، طبق این جدول مشاهده می‌شودکه مقدار دبی شبه‌سازی در دوره‌ی صحت‌سنجی دقت بالایی دارد. در حوضه‌ی یلفان مقدار دبی مشاهده‌ای در مقیاس روزانه ۱/۱۷ مترمکعب بر ثانیه بوده و مقدار دبی شبیه‌سازی ۱/۱۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. در حوضه‌ی سولان این مقدار به ترتیب ۰/۴۰ و ۰/۳۷ مترمکعب بر ثانیه است. علاوه بر این، با مروری بر مقادیر ضریبِ تعیین مشاهده می‌گردد که در هر دو حوضه مقدار بسیار بالاست که این نشان‌دهنده‌ی دقت فراوان شبیه‌سازی‌ها در مقیاس ماهیانه و روزانه است. بر اساس جدول شماره‌ی ۲ نتایج کلی نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی‌های ماهیانه و روزانه برای هر دو حوضه مورد بررسی نتایج مقبولی دارد و می‌تواند در بررسی‌های مربوط به شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی هر دو حوضه استفاده شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

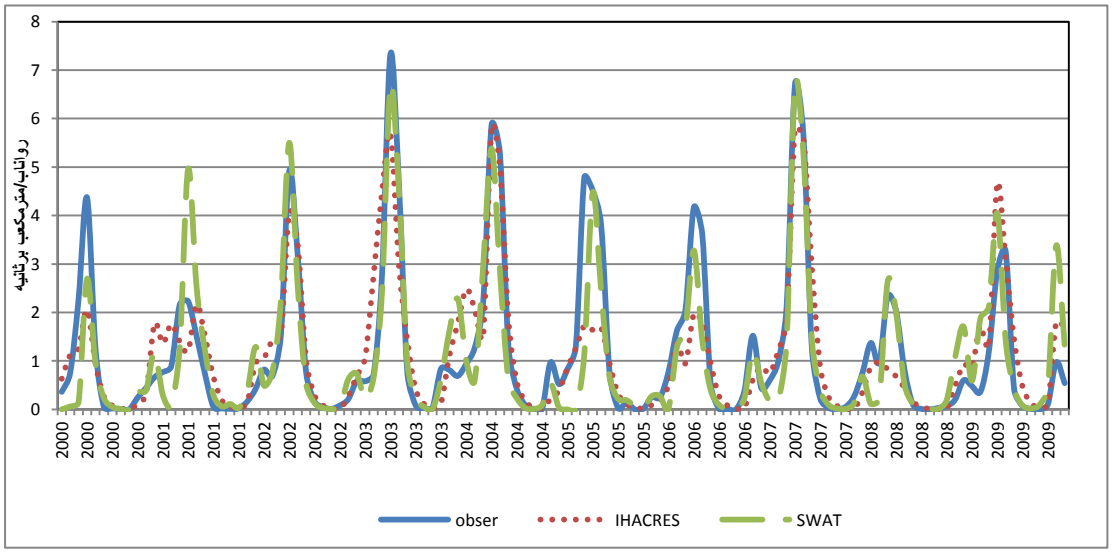
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

جدول ۲. مقادیر روزانه و ماهیانه معیارهای عملکرد در مدل هیدرولوژی SWAT در برآورد روان‌آب.

نام حوضه	مدل مورد بررسی	عملیات	دوره‌ی آماری	R^2	ضریب نش	دبی مشاهده‌ای	دبی شبیه‌سازی شده	متوسط قدر مطلق خطا
یلفان	روزانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۶۳	۰.۵۷	۱.۴	۰.۹۳	۰.۷۲
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۵۸	۰.۵۶	۱.۱۷	۱.۱	۰.۶۳
	ماهیانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۷۸	۰.۶۸	۱.۴	۰.۹۳	۰.۶۴
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۷۵	۰.۷۴	۱.۱۷	۱.۱	۰.۴۸
سولان	روزانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۶۱	۰.۵۹	۰.۴	۰.۳۷	۰.۲۳
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۶۶	۰.۵۷	۰.۳۶	۰.۴۱	۰.۲۱
	ماهیانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۷	۰.۶۹	۰.۴	۰.۳۷	۰.۱۹
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۸۱	۰.۷۶	۰.۳۶	۰.۴	۰.۱۷



شکل ۵. شبیه‌سازی جریان ماهیانه حوضه‌ی یلفان در دوره‌ی واسنجی با مدل SWAT.



شکل ۶. شبیه‌سازی جریان ماهیانه حوضه‌ی یلفان در دوره‌ی صحت‌سنجی با مدل SWAT.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

ارزیابی مدل IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب

در شبیه‌سازی، به‌رغم این‌که مدل IHACRES شاخص‌های کمتری از مدل SWAT استفاده می‌کند، شبیه‌سازی مناسبی را ارائه می‌دهد. نتایج بررسی در هر دو زیرحوضه در مقیاس ماهیانه و روزانه نشان می‌دهد که مدل IHACRES از توانایی مناسبی در شبیه‌سازی‌ها برخوردار است. این مدل از شاخص‌های هیدروکلیماتولوژی بارندگی، درجه‌ی حرارت و دبی روزانه در شبیه‌سازی روان‌آب استفاده می‌کند. بر اساس نتایج به دست آمده در دو حوضه‌ی مورد بررسی طبق جدول شماره‌ی ۳ و شکل‌های شماره‌ی ۷ و ۸ مدل دارای کارایی مناسب بوده به گونه‌ای که ضریب نش در مقیاس ماهیانه در حوضه‌ی یلفان در دوره‌ی واسنجی ۰/۶۸ و در دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۷۲ و در حوضه‌ی سولان در دوره‌ی واسنجی ۰/۶۴و در دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۶۵ است.

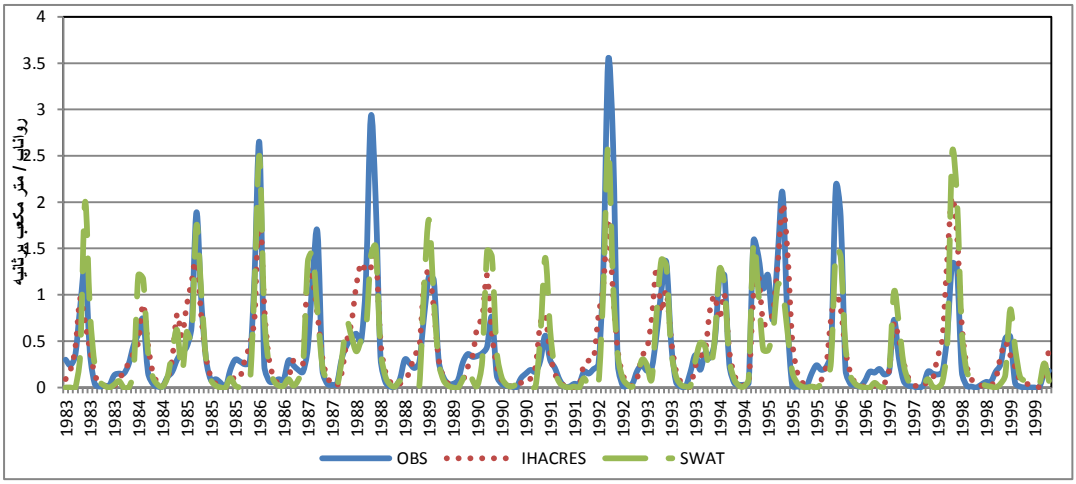
جدول ۳. مقادیر روزانه و ماهیانه معیارهای عملکرد در مدل هیدرولوژی IHACRES در برآورد روان‌آب

نام حوضه	مدل مورد بررسی	عملیات	دوره‌ی آماری	R^2	ضریب نش	دبی مشاهده‌ای	دبی شبیه‌سازی شده	متوسط قدر مطلق خطا
یلفان	روزانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۵۳	۰.۵۳	۱.۴	۱.۴۳۳	۰.۸۳
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۵۷	۰.۵۷	۱.۱۷	۱.۱۳	۰.۶۲
	ماهیانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۶۸	۰.۶۸	۱.۴	۱.۴۳	۰.۶۹
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۷۲	۰.۷۲	۱.۱۷	۱.۱۴	۰.۵۴
سولان	روزانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۵۷	۰.۵۷	۰.۴	۰.۴۱	۰.۲۳
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۵۵	۰.۵۴	۰.۳۶	۰.۳۶۲	۰.۲۲
	ماهیانه	واسنجی	۱۹۸۳-۱۹۹۹	۰.۶۴	۰.۶۴	۰.۴	۰.۴۱	۰.۲
		صحت‌سنجی	۲۰۰۰-۲۰۰۹	۰.۶۵	۰.۶۵	۰.۳۶	۰.۳۷	۰.۱۹

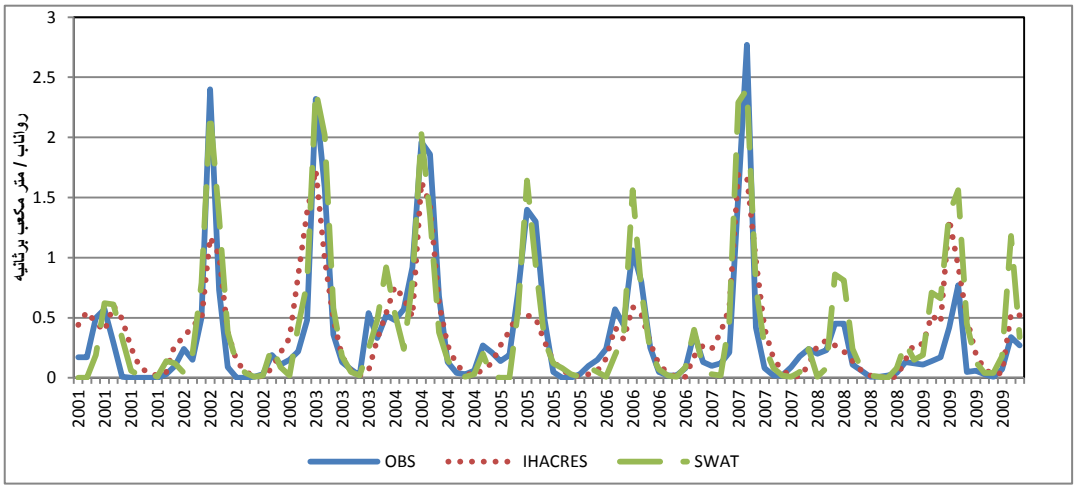
مقایسه‌ی دبی مشاهده‌ای ۱/۴۰ مترمکعب در ثانیه (دوره‌ی واسنجی) با دبی شبیه‌سازی شده‌ی ۱/۴۳ مترمکعب در ثانیه (دوره‌ی صحت‌سنجی) نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار است که این وضعیت در حوضه‌ی سولان نیز با مقایسه مقادیر دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مقیاس ماهیانه و روزانه از دقت مناسبی برخوردار است. بررسی ضریب تعیینِ هر دو زیرحوضه نیز نشان می‌دهد که در هر دو حوضه مورد بررسی مقدار آن در مقیاس روزانه و ماهیانه بالا بوده و در مقیاس ماهیانه مقادیر ضریب تعیین بیش از روزانه است بنابراین، نتایج کلی نشان می‌دهد که مدل توانایی لازم را برای برآورد روان‌آب دارد و در شبیه‌سازی روان‌آب در مقیاس روزانه و ماهیانه هر دو حوضه نتایج مقبولی نشان می‌دهد. شکل‌های شماره‌ی ۷ و ۸ عملکرد مدل‌های بارش ـ روان‌آب را در شبیه‌سازی روان‌آب نشان می دهند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]



شکل ۷. شبیه‌سازی جریان ماهیانه‌ی حوضه‌ی سولان در دوره‌ی واسنجی با مدل IHACRES.



شکل ۸. شبیه‌سازی جریان ماهیانه‌ی حوضه‌ی سولان در دوره‌ی صحت‌سنجی با مدل IHACRES.

نمودارهای شبیه‌سازی جریان ماهیانه و روزانه دو حوضه‌ی سولان و یلفان در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی با دو مدل هیدرولوژیکی SWAT و IHACRES نشان می‌دهد که هر دو مدل در شبیه‌سازی روان‌آب حوضه دقت بالایی دارند که در این میان مدل IHACRES در برآورد مقادیر حداکثر نسبت به مدل SWAT ضعیف‌تر عمل می‌کند.

مقایسه‌ی مدل‌ها در شبیه‌سازی روان‌آب

برای بررسی و تعیین وضعیت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی بارش ـ روان‌آب در حوضه‌های سد یلفان و سولان، نتایج دو مدل هیدرولوژیکی توزیعی SWAT و مدل یکپارچه IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب در مقیاس روزانه و ماهیانه در دوره‌های واسنجی ۱۹۹۹- ۱۹۸۳ و دوره‌ی صحت‌سنجی ۲۰۰۹-۲۰۰۰ استخراج و تعیین گردیدند. همان طور که در جدول شماره‌ی ۲ و ۳ مشخص است، در مقیاس روزانه در دوره‌ی واسنجی در هر دو حوضه‌ی یلفان و سولان با توجه به مدل SWAT مقدار نش به ترتیب ۰/۵۷و ۰/۵۹ و مقدار ضریب تعیین ۰/۶۳ و۰/۶۱است. با توجه به مدل IHACRES مقدار نش به ترتیب ۰/۵۳و ۰/۵۷ است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

جدول‌های مربوط به مقادیر ماهیانه‌ی معیارهای عملکرد دو مدل هیدرولوژی در برآورد روان‌آب در دو حوضه (با مقایسه‌ی مقادیر ضریب نش در هر دو مدلِ دو حوضه‌ی مورد بررسی) نشان می‌دهند که مدلSWAT مقدار نسبتاً بالاتری نسبت به مدل IHACRES در هر دو دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی دارد. در حوضه‌ی سولان مقدار این ضریب برای مدل SWAT در دوره‌ی واسنجی ۰/۶۹ و در دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۷۶ است، ولی در مدل IHACRES به ترتیب مقدار آن ۰/۶۴ و ۰/۶۵ است. همچنین، این وضعیت در حوضه‌ی یلفان نیز وجود دارد.

براساس مقایسه‌ی شکل‌های شماره‌ی ۴ تا ۷ و شاخص‌های عملکرد در جدول شماره‌ی ۵، هر دو مدل مورد بررسی در دوره‌ی مشترک شبیه‌سازی نتایج مناسبی دارند. در کل، با مقایسه‌ی هر دو مدل ملاحظه می‌گردد که مدل SWAT با بالاترین ضریب نش در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی در مقیاس ماهیانه و روزانه در دو حوضه‌ی مطالعاتی، نتیجه‌ی دقیق‌تری در شبیه‌سازی روان‌آب دارد. بنابراین، با توجه به این‌که مدل SWAT برای آماده‌سازی نیازمند صرف وقت طولانی‌تری بوده و نیازمند اطلاعات آماری و شاخص‌های طبیعی بسیار زیاد و دارای پیچیدگی فراوانی است، به علت لحاظ کردن شرایط واقعی‌تر حوضه‌ی کارایی مناسب‌تری در شبیه‌سازی بسیاری از خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دو مدل‌بارش ـ روان‌آب در مقیاس روزانه و ماهیانه واسنجی و ارزیابی شدند. در این زمینه، مدل SWAT به صورت مدل توزیعی با ورودی‌های متنوع و مدل IHACRES به عنوان مدل مفهومی با ورودی‌هایی محدودتر ازSWAT انتخاب و بررسی گردیدند. نتایج مربوط به نمودارها و بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که مدل IHACRES و SWAT در مقیاس ماهیانه و روزانه در هر دو دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی در شبیه‌سازی روان‌آب نتایج مقبول و مناسبی نشان می‌دهند. در دوره‌ی صحت‌سنجیِ هر دو زیرحوضه در مقیاس روزانه و ماهیانه، ضریب نش ۰/۶ و ضریب تعیین بالای ۰/۷ در مدل SWAT بهترین عملکرد را از شبیه‌سازی روان‌آب در هر دو حوضه از داده‌های مشاهداتی برآورد کردند. در دوره‌ی واسنجی هر دو مدل روان‌آب کمتری از مقادیر مشاهداتی پیش‌بینی کردند. در این میان، متوسط مقدار جریان پیش‌بینی‌شده با مدلSWAT به متوسط مقدار مشاهداتی در هر دو دوره نزدیک‌تر است. با توجه به این‌که در هر دو مدل الگوی تغییرات روان‌آب جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در نمودارها از الگویی یکسان و منطقی پیروی می‌کند، مدل SWAT در برآورد جریان‌های حداکثر قوی‌تر و مدل IHACRES ضعیف‌تر عمل می‌کنند. مدل بارش ـ روان‌آب IHACRES که کاربری آسان‌تری از مدل SWAT دارد، در مجموع شبیه‌سازی مناسبی در برآورد روان‌آب ارائه می‌کند. نتایج این بررسی با تحقیقات گودرزی (۱۳۹۱)، آذری و همکاران (۱۳۹۲)، ویز و همکاران (۲۰۱۰) و کلین و همکاران (۲۰۱۳) هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که مدل‌های بارش ـ روان‌آب SWAT و IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب کارآیی فراوانی دارند. مدلSWAT به علت توزیعی بودن و در نظر گرفتن همه‌ی عوامل مؤثر بر روان‌آب کاربرد مناسب‌تری از مدل IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب حوضه دارد. در کل، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل SWAT برای شبیه‌سازی روان‌آب در مقیاس روزانه و ماهیانه در زیرحوضه‌های یلفان و سولان مناسب‌تر بوده و پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های مربوط به هیدرولوژی مورد توجه قرار گیرد. موضوع قابل توجه این‌که ضروری است در اغلب مطالعات مشابه در تعیین کارآیی مدل‌های بارش روان‌آب با در نظرگرفتن تنوع مدل‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

گوناگون بارش ـ روان‌آب در آب و هوای متفاوت دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی نیز بررسی شود و در پروژه‌های گوناگون مطالعه و ارزیابی شوند.

منابع

ذهبیون، باقر؛ محمدرضا گودرزی و علیرضا مساح بوانی. ۱۳۸۹.کاربرد مدل SWAT در تخمین روان‌آب حوضه در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، *پژوهش‌های اقلیم شناسی*. دوره‌ی ۲، شماره ۳ ، ص ۶۰-۴۵.

آذری، محمود؛ حمیدرضا مرادی؛ بهرام ثقفیان و منیره فرامرزی. ۱۳۹۲. ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه‌ی آبخیز گرگانرود، *آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی*، جلد ۷۲، شماره **۳**، ص ۷۴۵-۷۳۵.

ذهبیون، باقر و محمدرضا گودرزی، ۱۳۸۶. شبیه‌سازی‌جریان روزانه با مدل پیوسته بارش-روان‌آب، *کنفرانس بین‌المللی نیروگاه‌های آبی*.

گودرزی محمدرضا؛ باقر ذهبیون؛ علی‌رضا مساح بوانی و علی‌رضا کمال. ۱۳۹۱. مقایسه‌ی عملکرد سه مدل هیدرولوژی SIMHYD، SWAT و IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب حوضه‌ی قره‌سو، *مدیریت آب و آبیاری*، دوره‌ی ۲، شماره **۱**، ص ۵۲-۴۰.

گودرزی، محمدرضا؛ باقر ذهبیون و علیرضا مساح بوانی. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل پیوسته‌ی توزیعی بارش ـ روان‌آب SWAT، *دومین همایش‌ملی سدسازی*، زنجان، ایران.

حسین خیرفام؛ رئوف مصطفی‌زاده و سید حمیدرضا صادقی. ۱۳۹۲. تخمین دبی روزانه با استفاده از مدل IHACRES در برخی از حوضه‌های آبخیز استان گلستان، *پژوهش‌نامه‌ی مدیریت حوضه‌ی آبخیز* سال چهارم، شماره **۷**.

حسینی مجید؛ محمد غفوری؛ محمودرضا طباطبایی؛ مسعود گودرزی و سیداسدالله حجازی. ۱۳۹۲. ارزیابی مؤلفه‌های جریان با استفاده از مدل SWAT در حوضه‌ی آبخیز طالقان، نشریه‌ی علمی پژوهشی *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۷، شماره **۴۵**، ص ۴۱-۲۷.

مساح بوانی، علیرضا. ۱۳۸۵. *ارزیابی ریسک تغییراقلیم و تأثیر آن بر منابع آب مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی زاینده‌رود اصفهان*، رساله‌ی دکتری، گروه مهندسی‌سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس.

اکبری‌مجدر، حسین؛ عبدالرضا بهره‌مند؛ علی نجفی‌نژاد و واحدبردی شیخ. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی جریان روزانه‌ی رودخانه‌ی چهل‌چای استان گلستان با مدل SWAT، جلد بیستم، شماره۳، نشریه‌ی *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*.

غفاری، گلاله؛ جمال قدوسی و حسن احمدی. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر پاسخ‌های هیدرولوژی، مجله‌ی *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز زنجان‌رود، جلد شانزدهم، شماره **۱**،

دولت آبادی، سپیده؛ سید محمد علی زمردیان. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌ی فیروزآباد با استفاده از مدل SWAT، فصل‌نامه‌ی علمی پژوهشی *مهندسی آبیاری و آب*، سال چهارم، شماره **۱۴**.

زارعی مهدی؛ محمود حبیب نژاد روشن؛ کاکا شاهدی و محمدرضا قنبرپور. ۱۳۹۰. کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی IHACRES به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه، نشریه‌ی آب و خاک، *علوم و صنایع کشاورزی*، جلد ۵۲، شماره **۱**، ص ۴۱۱-۴۰۱.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]

Abbaspour K.C. ۲۰۰۷. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. Of Aquat. Sci. and Technol., Du¨bendorf, Switzerland.

Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. ۱۹۹۸. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development۱. Journal of the American Water Resources Association. ۳۴(۱): p. ۷۳-۸۹.

Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N., and De Jong, R. ۲۰۰۷. Modeling the hydrological impact of land-change in West Africa, J. of Hydro., ۳۳۷: ۲۵۸-۲۶۸.

۱۶-.Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. ۲۰۰۲. Soil and Water Assessment Tool, User's Manual, Version ۲۰۰۰, ۲۸۹p.

Vaze, J., D.A. Post, F.H.S. Chiew, J.M. Perraud , N.R. Viney and J. Teng. ۲۰۱۰..Climate non-stationarity-validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. Hydrology, ۳۹۴: ۴۴۷-۴۵۷.

Leavesley, G.H., Markstrom, S.L., Restrepo, P.J., Viger, R.J., ۲۰۰۲. A modular approach to addressing model design , scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modeling. Hydrological Processes ۱۶ (۲), ۱۷۳–۱۸۷.

Celine George and E. J. James.۲۰۱۳. Simulation of streamflow using soil and water assessment tool (SWAT) in Meenachil river basin of Kerala, India. Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET). Sch. J. Eng. Tech., ۲۰۱۳; ۱(۲):۶۸-۷۷

Motovilov Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K., and Rodhe, A.,(۱۹۹۹), "Validation of a istributed Hydrological Model againstSpatial Observations", *Agricultural and Forest Meteorology*, ۹۸-۹۹, ۲۵۷-۲۷۷.

Fathabadi, A., A. Salajegheh and M. Mahdavi. ۲۰۰۹. River flow forecasting using neuro-fuzzy methods and time series models. Iran-Watershed Management Science& Engineering, ۲(۵): ۲۱-۳۰. (In Persian)

Dawdy, D. R. ۱۹۸۳. A review of rainfall-runoff modeling. Proceedings of the Tegucigalpa Hydromath Symposium.۱۵۲: ۹۷-۱۱۳.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-06-19]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.99]