

واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژی IHACRES و SWAT در شبیه‌سازی روان آب

هادی نظری پویا، دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران^۱

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 روان آب 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 - روان آب (SWAT, IHACRES) در شبیه‌سازی روان آب دو حوضه یلفان و سولان ارزیابی و مقایسه شده است. بر این اساس، با تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها ارزیابی شدند. بازه‌ی زمانی ۱۹۸۳-۱۹۹۹ دوره‌ی واسنجی و دوره‌ی ۲۰۱۰-۱۹۸۳ دوره‌ی صحت‌سنجی انتخاب و بررسی گردید. سرانجام، به منظور تعیین توانایی مدل در شبیه‌سازی روان آب حوضه‌ها به کمک معیارهای ضریب نش - ساتکلیف ضریب NS (مورد) ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هر دو مدل از توانمندی قابل پذیرش شبیه‌سازی R^2 (تعیین) دوره‌ی صحت‌سنجی هر دو زیر حوضه در مقیاس روزانه و در SWAT روان آب در هر دو حوضه‌ی برخوردارند و مدل شبیه‌سازی روان آب در هر دو حوضه نسبت بالای ۰/۷ بهترین عملکرد را آزمایشانه با ضریب نش ۰/۶ و ضریب تعیین به داده‌های مشاهداتی دارد.

واژگان کلیدی: هیدرولوژی، مدل IHACRES، مدل SWAT، روان آب، واسنجی.

مقدمه

یکی از ابزارهای اساسی در مدیریت منابع آب بررسی و تعیین مقدار روان آب 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 - روان آب 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 - روان آب در قالب مدل‌های هیدرولوژیکی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. داودی در سال ۱۹۸۳ ضمن بررسی مدل‌های بارش روان آب بر این نظر است که خروجی حوزه‌ی آبخیز تابعی از رفتار هیدرولوژیک آن در برابر ورودی است که این اصل به همراه تعدد و تنوع شاخص‌های مؤثر در فرآیند بارش - روان آب 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 فرایند 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 - روان آب مدل‌های هیدرولوژی متفاوتی طراحی شده است. مدل‌های هیدرولوژیکی به سه دسته‌ی تجربی، مفهومی و مدل‌های با مبنای فیزیکی توزیعی تقسیم‌بندی می‌شوند. لیوسلی در سال ۲۰۰۲ با بررسی مدل‌های هیدرولوژی مشخص می‌کند که دسته‌ی اول این مدل‌ها آشکارا قوانین فیزیکی است که فرآیندها را در نظر نمی‌گیرد و فقط با تابع تبدیلی ورودی را به خروجی ارتباط می‌دهد. دسته‌ی دوم مدل‌های مفهومی هستند که بر اساس مطالعات محدود فرآیندهای موجود در سامانه‌ی هیدرولوژی حوضه‌ی آبریز است. شکل‌گیری این مدل‌ها بر اساس همه‌ی فرآیندهای فیزیکی نیست، ولی بر مبنای درک رفتار سامانه‌ی طراح مدل است. دسته‌ی سوم مدل‌های با مبنای فیزیکی توزیعی 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 فیزیکی 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،

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 ویژه 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.

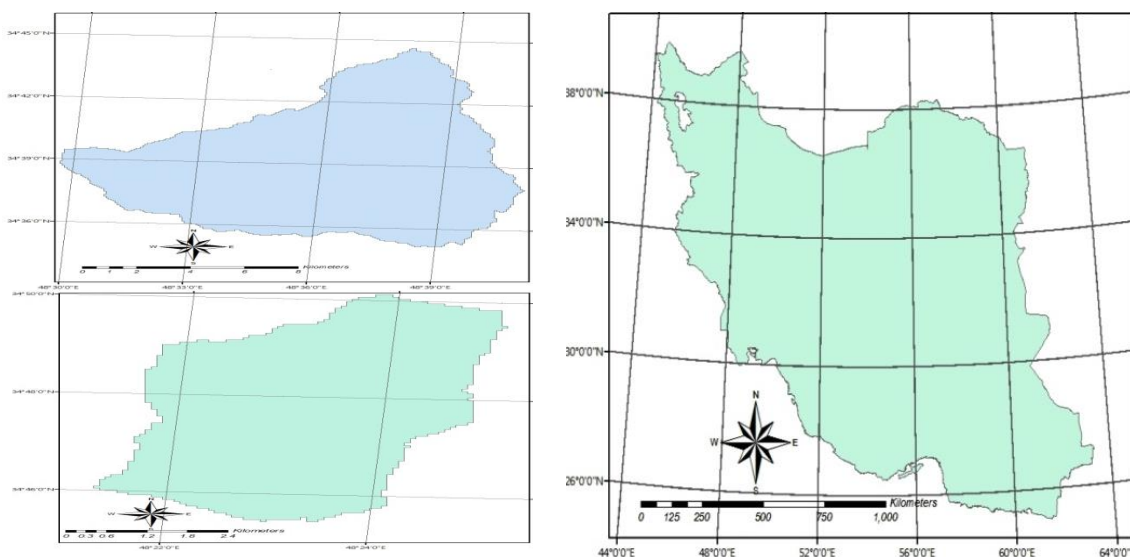
غفاری و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی در پاسخ‌های هیدرولوژی حوضه‌ی آبخیز زنجان‌رود با استفاده از مدل SWAT پرداختند و در آن آثار تغییر کاربری اراضی در جریان رودخانه و بار آبی حوضه را مشخص کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییر در کاربری اراضی از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۶ منجر به افزایش مقدار روان‌آب سطحی در حدود ۳۳ درصد و کاهش سطح سفره‌ی آب‌های زیرزمینی در حدود ۲۲ درصد شده است. آذری و همکاران (۱۳۹۲) با ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رژیم هیدرولوژیکی حوضه و از الگوریتم ۲-SUFI در نرم‌افزار SWAT-CUP به منظور بهینه‌سازی شاخص‌های مدل استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که مدل کارایی لازم را برای شبیه‌سازی رژیم هیدرولوژیکی حوضه دارد. گودرزی (۱۳۹۱) با مقایسه‌ی عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT، IHACRES 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 حوضه‌ی آبخیز کسلیان مشخص می‌کند که بر اساس مقادیر دو پارامتر ضریب تشخیص و میانگین خطای نسبی پارامتر، این مدل جریان رودخانه را در کل حوضه‌ی آبخیز کسلیان 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 مدل SWAT نشان دادند که تغییر کاربری حوضه‌ها از جنگل، مرتع و بوته‌زار به اراضی کشاورزی و یا مناطق شهری سبب تغییر واکنش هیدرولوژی حوضه می‌گردد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییر کاربری اراضی سبب افزایش حجم سطحی، کاهش تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی و آب پایه‌ی رودخانه‌ها و تغییر در مقدار روان‌آب و شدت فرسایش

و رسوب می‌شود. کلین و همکاران (۲۰۱۳) در زیرحوضه‌ی کراالی هندوستان، توانمندی مدل SWAT را در شبیه‌سازی روان‌آب بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل در شرایط آب و هوایی و تغییر کاربری اراضی توانایی بالایی در شبیه‌سازی و برآورد روان‌آب دارد. ویز و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از چهار مدل بارش - 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 معیارهای عملکرد مقایسه و ارزیابی می‌شوند. بر این مبنا، ابتدا به طور مختصر هر دو مدل مذکور معرفی و سپس نتایج پژوهش در حوضه‌های 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 $48^{\circ} 41'$ و $48^{\circ} 30'$ طول شرقی و $34^{\circ} 36'$ و $34^{\circ} 46'$ عرض شمالی و زیرحوضه‌ی سولان نیز با مساحت $32/54$ 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 ۱۹۸۳-۱۹۹۹ برابر $46/04$ میلیون مترمکعب در سال و میانگین آبدهی سالیانه‌ی آن $1/43$ متر مکعب در ثانیه است. کمترین میانگین آبدهی ماهیانه $0/09$ مترمکعب در ثانیه در شهریور و بیشترین میانگین آبدهی ماهیانه‌ی آن $3/68$ مترمکعب در ثانیه در اردیبهشت است. حجم کل آورد زیرحوضه‌ی سولان نیز طی دوره‌ی آماری ۱۹۸۳-۱۹۹۹ برابر $12/78$ میلیون مترمکعب در سال و میانگین آبدهی سالیانه‌ی آن $0/411$ مترمکعب در ثانیه است. کمترین میانگین آبدهی ماهیانه $0/23$ مترمکعب در ثانیه در شهریور و بیشترین میانگین آبدهی ماهیانه‌ی آن $1/03$ 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 471 میلی‌متر است که بین 375 در مناطق کم‌ارتفاع تا 635 میلی‌متر در قسمت‌های مرتفع در نوسان است. حداکثر و حداقل ارتفاع زیرحوضه‌ی یلفان به ترتیب 1970 و 3467 متر و زیر حوضه‌ی سولان نیز به ترتیب 1958 متر و 3317 متر است. بیشترین شیب حوضه‌ی یلفان در قسمت‌های جنوب غربی $36/8$ درصد و کمترین شیب حوضه 4 درصد است. متوسط دمای سالیانه‌ی هر دو زیرحوضه $8/8$ درجه‌ی سانتی‌گراد و متوسط حداقل و حداکثر دما به ترتیب $3/1$ و $14/5$ درجه‌ی سانتی‌گراد است. دامنه‌ی میانگین سالیانه‌ی دما $28/3$ درجه‌ی سانتی‌گراد و نیز حداکثر و حداقل مطلق دما 24 و $-33/5$ درجه‌ی سانتی‌گراد است.



شکل ۱. موقعیت حوضه‌های محدوده‌ی مطالعه.

ب) داده‌ها

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 مورد 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 اولین بار 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 پوشش خاک 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:

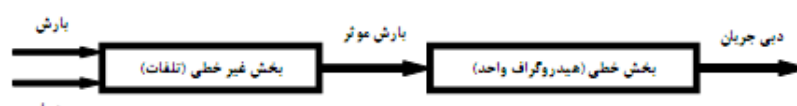
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{sur} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

در این رابطه، SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی‌متر)، SW_0 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)، E_a 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. (نیتج 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 مدل SWAT 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 - روان‌آب است که جیکمن و هورمبرگر در ۱۹۹۳ تهیه کردند. مدل IHACRES بارش - روان‌آب مدلی پارامتری مؤثر و کارآمد 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 می‌شود.

به همین منظور در ابتدا بارندگی r_k و دما t_k 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 صحت‌سنجی از معیارهای عملکرد شامل ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش (NASH) استفاده می‌گردد.

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.

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

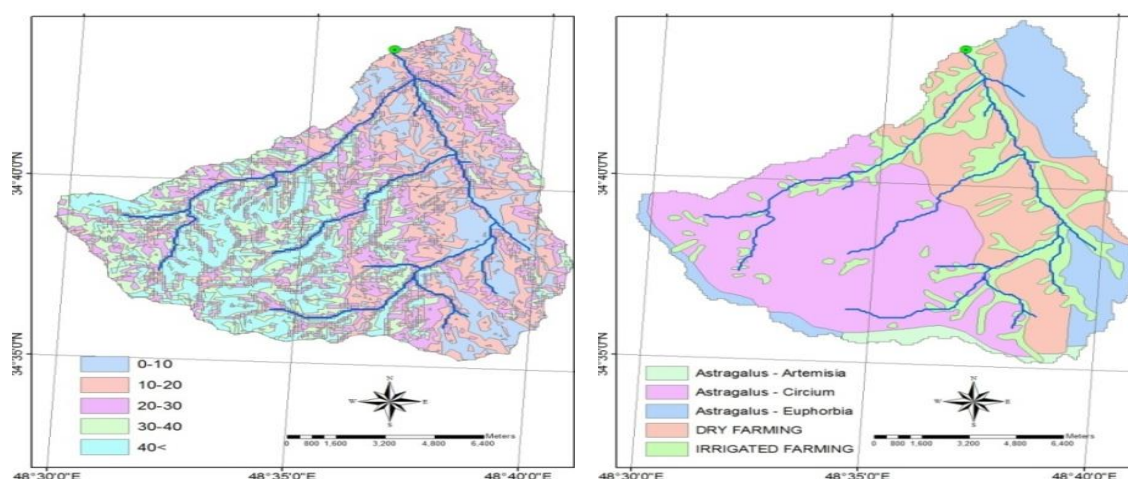
$$E = 1 - \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2 \right]}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \right]} \quad \text{رابطه ۲}$$

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

همان‌طور 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 روزانه 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 شماره ۱ مشخص گردیده است.



شکل ۴. نقشه‌ی شیب حوضه‌ی یلفان

شکل ۳. نقشه‌ی پوشش گیاهی حوضه‌ی یلفان

جدول ۱ 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_K ^۲ .rte	۲۰.۸۴	۱۱.۴۶	۱۴.۴۴	۶
ظرفیت آب قابل دسترس خاک / میلی‌متر در میلی‌متر	R__SOL_AWC(..).sol	-۰.۹۲	-۱.۹۵	-۱.۰۰	۷
شماره‌ی منحنی	R__CN ^۲ .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_N ^۲ .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

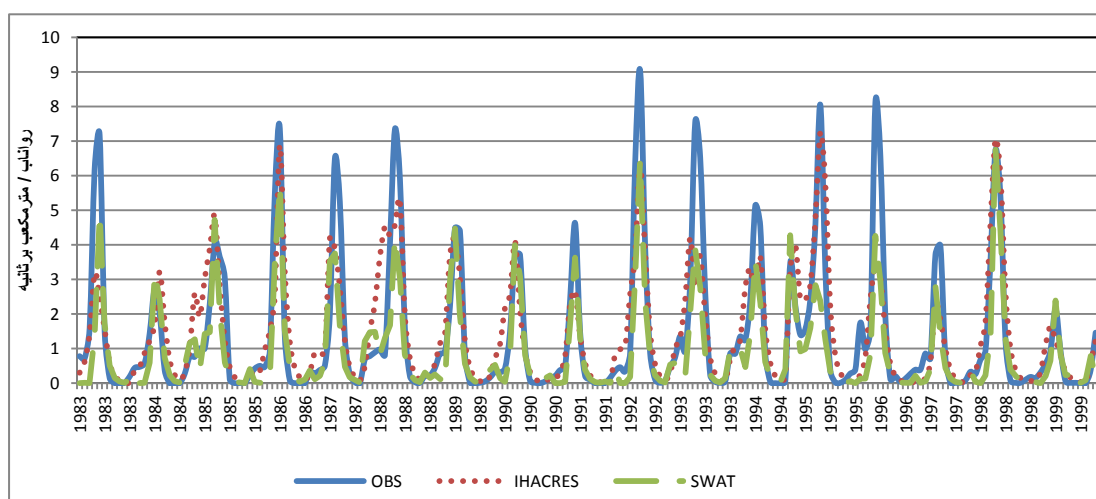
۱ و ۲ نشان‌دهنده‌ی تغییرات نسبی (ضرب در مقادیر شاخص به صورت درصد) و مطلق (جابجایی مقادیر شاخص) هستند.

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 ۰/۶۸ و دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۷۴ و در حوضه‌ی سولان در دوره‌ی واسنجی ۰/۶۹ و دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۷۶ است.

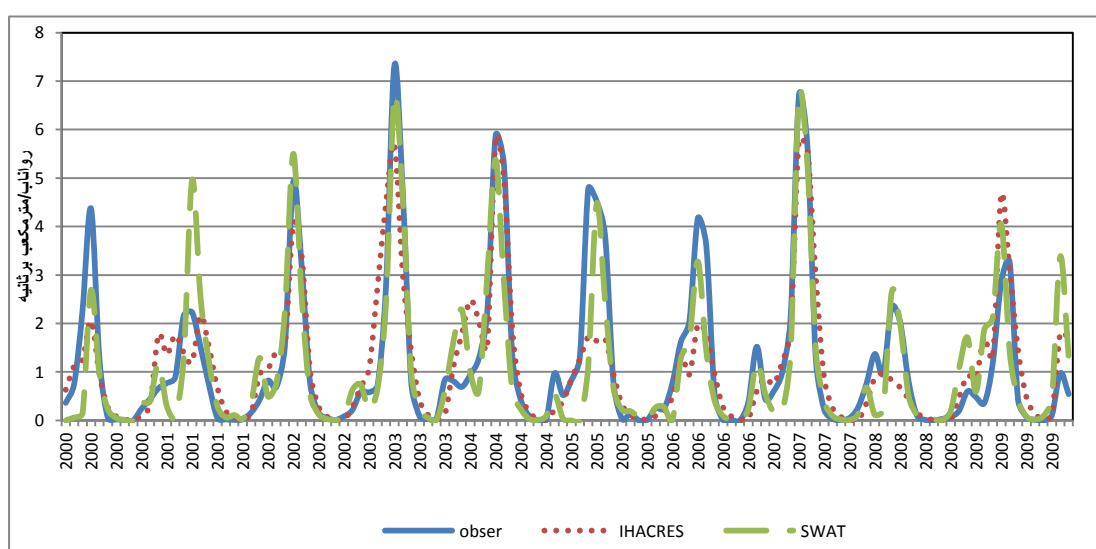
همچنین، طبق این جدول مشاهده می‌شود که مقدار دبی شبه‌سازی در دوره‌ی صحت‌سنجی دقت بالایی دارد. در حوضه‌ی یلفان مقدار دبی مشاهده‌ای در مقیاس روزانه ۱/۱۷ مترمکعب بر ثانیه بوده و مقدار دبی شبه‌سازی ۱/۱۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. در حوضه‌ی سولان این مقدار به ترتیب ۰/۴۰ و ۰/۳۷ مترمکعب بر ثانیه است. علاوه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

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

نام حوضه	مدل مورد بررسی	عملیات	دوره آماری	R^2	ضریب نش	دبی مشاهده‌ای	دبی شبیه‌سازی شده	متوسط قدر مطلق خطا
یلقان	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 حوضه یلقان در دوره واسنجی با مدل SWAT.



شکل ۶. شبیه‌سازی جریان ماهیانه حوضه یلقان در دوره صحت‌سنجی با مدل SWAT.

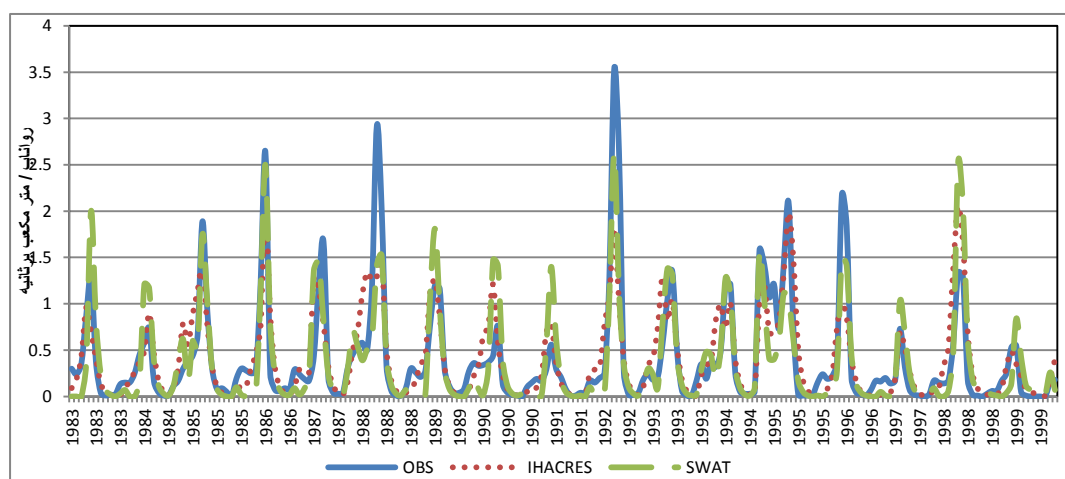
ارزیابی مدل IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب

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 ۰/۶۴ و در دوره‌ی صحت‌سنجی ۰/۶۵ است.

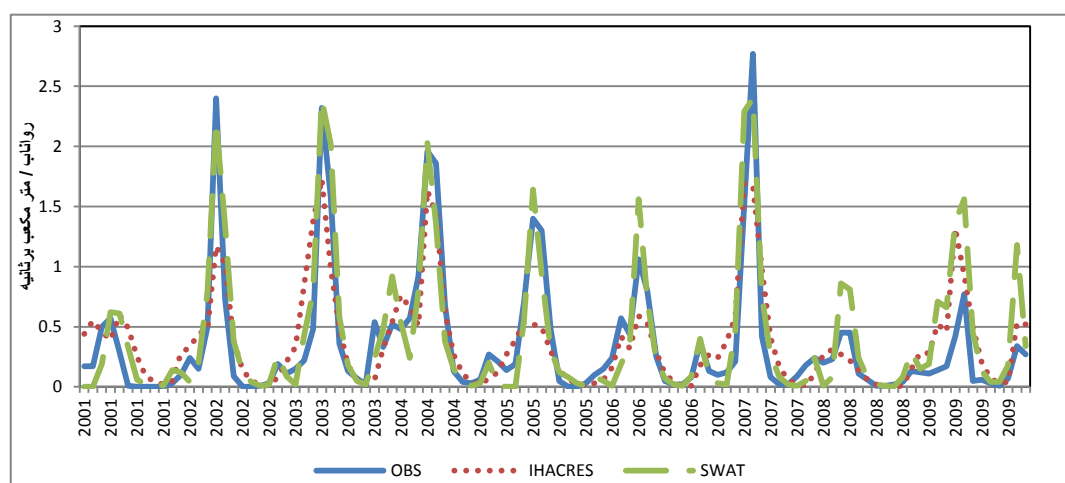
جدول ۳. مقادیر روزانه و ماهیانه معیارهای عملکرد در مدل هیدرولوژی IHACRES در برآورد روان‌آب

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 تعیین 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 - روان‌آب را در شبیه‌سازی روان‌آب نشان می‌دهند.



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 - 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 ۱۹۸۳-۱۹۹۹ و دوره‌ی صحت‌سنجی ۲۰۰۰-۲۰۰۹ استخراج و تعیین گردیدند. همان‌طور 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 ۰/۵۷ و ۰/۵۹ و مقدار ضریب تعیین ۰/۶۳ و ۰/۶۱ است. با توجه به مدل IHACRES مقدار نش به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۵۷ است.

جدول‌های مربوط به مقادیر ماهیانه‌ی معیارهای عملکرد دو مدل هیدرولوژی در برآورد روان‌آب در دو حوضه (با مقایسه‌ی مقادیر ضریب نش در هر دو مدل دو حوضه‌ی مورد بررسی) نشان می‌دهند که مدل SWAT 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 مدل بارش - 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 از SWAT 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 صحت‌سنجی 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 مدل SWAT 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 الگوی یکسان و منطقی پیروی می‌کند، مدل SWAT در برآورد جریان‌های حداکثر قوی‌تر و مدل IHACRES ضعیف‌تر عمل می‌کنند. مدل بارش - 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 - روان‌آب SWAT و IHACRES در شبیه‌سازی روان‌آب کارایی فراوانی دارند. مدل SWAT 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 کارایی مدل‌های بارش روان‌آب با در نظر گرفتن تنوع مدل‌های

گونگون بارش - روان آب در آب و هوای متفاوت دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی نیز بررسی شود و در پروژه‌های گونگون مطالعه و ارزیابی شوند.

منابع

- ذهبیون، باقر؛ محمدرضا گودرزی و علیرضا مساح بوانی. ۱۳۸۹. کاربرد مدل SWAT در تخمین روان آب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی. دوره ۲، شماره ۳، ص ۴۵-۶۰.
- 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 ۷۳۵-۷۴۵.
- ذهبیون، باقر و محمدرضا گودرزی، ۱۳۸۶. شبیه‌سازی جریان روزانه با مدل پیوسته بارش-روان آب، 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 روان آب حوضه‌ی قره‌سو، مدیریت آب و آبیاری، دوره ۲، شماره ۱، ص ۴۰-۵۲.
- گودرزی، محمدرضا؛ باقر ذهبیون و علیرضا مساح بوانی. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل پیوسته‌ی توزیعی بارش - روان آب SWAT، دومین همایش ملی 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؛ محمدرضا 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 ۲۷-۴۱.
- مساح بوانی، علیرضا. ۱۳۸۵. ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی زاینده‌رود /صفهان، رساله‌ی دکتری، گروه مهندسی سازه‌های 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، شماره ۳، نشریه‌ی پژوهش‌های حفاظت آب و خاک.
- غفاری، گلاره؛ 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 شاهی 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.

- Abbaspour K.C. ۲۰۰۷. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. Of Aquat. Sci. and Technol., Dübendorf, Switzerland.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. ۱۹۹۸. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. 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.
- 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 distributed Hydrological Model against Spatial 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.