

مقاله پژوهشی

مقایسه عملکرد بیلان آب سطحی با استفاده از دو مدل مخزنی در حوضه آبخیز کارون-۴

سمیرا بیاتی^۱، خدایار عبدالهی^{۲*}، افشین هنربخش^۳ و محمدعلی نصر اصفهانی^۴

چکیده

بیلان آب در سطح حوضه در ظاهر یک تابع ساده به نظر می‌رسد، اما برآورد آن فرایندی پیچیده است. به همین منظور اجزای مؤثر به زیربخش‌هایی تقسیم و مدل‌های بیلان آب در شبیه‌سازی سیستم منابع آب حوضه استفاده می‌شوند که به ورودی‌های مشخصی نیاز دارند. از آنجا که یکی از مشکلات موجود در مناطق کوهستانی کمبود داده است، هدف پژوهش حاضر شبیه‌سازی بیلان آب سطحی حوضه آبخیز کارون ۴ با استفاده از مدلی با حداقل داده ورودی است. در این مطالعه، از مدل Exp-Hydro که دارای ساختاری ساده و نیازمند ورودی‌های کمی است و کاربرد آن در ایران جدید تلقی می‌شود، استفاده شد. ورودی‌های این مدل مقادیر روزانه بارش، دما، دبی و تبخیر- تعرق پتانسیل و خروجی آن جریان روزانه خروجی حوضه است. سپس نتایج این مدل با یک مدل بیلان آب روزانه بر مبنای مخزن که در این مطالعه با اصلاح ساختار مدل اصلی حاصل شده‌است، مقایسه شد. دوره آماری این پژوهش سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ است که دوسوم داده‌ها برای دوره واسنجی و یک‌سوم آن برای دوره اعتبارسنجی استفاده شد. جداسازی مقدار جریان پایه از دبی روزانه مشاهداتی با استفاده از نرم‌افزار WHAT و روش فیلتر دیجیتال بازگشتی انجام شد. نتایج ارزیابی کارایی مدل‌ها نشان داد که مدل توسعه داده شده با مقدار ضریب کارایی نش-ساتکلیف ۰/۷۶ در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی نسبت به مدل Exp-Hydro با مقدار ۰/۶۹ در دوره واسنجی و مقدار ۰/۶ در دوره اعتبارسنجی عملکرد بهتری داشته است. همچنین مدل بیلان آب توسعه داده شده جریان‌های کم را با دقت بیشتری برآورد کرده و درباره جریان‌های سیلابی هر دو مدل کم‌برآوردی داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب روزانه، تابع نمایی عملکرد مخزن، مدل‌سازی بارش- رواناب، PSO.

ارجاع: بیاتی س.، عبدالهی خ.، هنربخش ا. و نصر اصفهانی م. ع. ۱۴۰۲. مقایسه عملکرد بیلان آب سطحی با استفاده از دو مدل مخزنی در حوضه آبخیز کارون-۴. مجله پژوهش آب ایران. ۵۰: ۳۰-۲۱. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14211.2488>

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه شهرکرد.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: kabdolla@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

مقدمه

حوضه آبخیز، یک سیستم طبیعی بسیار پیچیده است و ما نمی‌توانیم به درک همه جزئیات آن امیدوار باشیم (وولهایزر، ۱۹۷۳). همچنین حوضه‌های آبخیز به دلیل عملکرد عوامل هیدرولوژیکی مختلف مؤثر بر آن‌ها، اغلب عکس‌العملی پیچیده و متفاوت نشان می‌دهند (محمدی‌وند و همکاران، ۱۳۹۸). بیلان آب تابعی است که می‌تواند در توصیف جریان آب در داخل و خارج از یک سیستم استفاده شود (جوما و همکاران، ۲۰۲۲). برای یک سیستم بسته، معادله بیلان آب از اصل بقای جرم استفاده می‌کند که به موجب آن، بارش واردشده به سیستم به تبخیر-تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی منتقل می‌شود (شارما و همکاران، ۲۰۱۹). ازجمله مشکلات محاسبه بیلان آب در ایران غیرممکن یا دشوار بودن اندازه‌گیری مستقیم برخی از مؤلفه‌های بیلان آب در حوضه، کمبود داده‌های موثق برای برآورد بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی، زمان‌بر بودن محاسبات به‌صورت دستی و ضرورت اتصال بیلان حوضه‌های مجاور به یکدیگر است (رضوی کهنمویی و همکاران، ۱۳۹۵). وجود چنین مشکلاتی سبب شده است که محققان به دنبال روش‌ها و مدل‌هایی برای تخمین بیلان آب با دقت بالاتر و درعین حال داده‌های ضروری کمتر به‌منظور استفاده در حوضه‌هایی با کمبود یا نبود آمار باشند؛ البته باید توجه داشت که کاربرد مدل‌ها، به‌عنوان ابزاری عملی برای درک بخش مفید و قابل‌فهم واقعیت و نه کل واقعیت است (فاضلی ثانی و همکاران، ۱۳۹۵). امروزه مدل‌های هیدرولوژیکی دارای کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های برنامه‌ریزی و توسعه سازه‌های آبی، پیش‌بینی سیل، ارزیابی در دسترس بودن آب، پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمینو تخمین دبی در حوضه‌های آبخیز فاقد ایستگاه اندازه‌گیری هستند (سود و اسمختین، ۲۰۱۵). باوجود مطالب ارائه‌شده از کاربرد این مدل‌ها، در عمل کاربرد آن‌ها با نوع و میزان دسترسی داده‌های ورودی در حوضه‌های مختلف محدود می‌شود (رضوی کهنمویی و همکاران، ۱۳۹۸؛ آدان و همکاران، ۲۰۲۱) و هدف از اجرای مدل نیز در این میان اثرگذار است. در چنین شرایطی استفاده از مدل‌های با ساختار ساده و داده‌های کم می‌تواند جذابیت کاربردی داشته باشد. در این مطالعه، بیلان آب سطحی حوضه آبخیز کارون ۴ با استفاده از

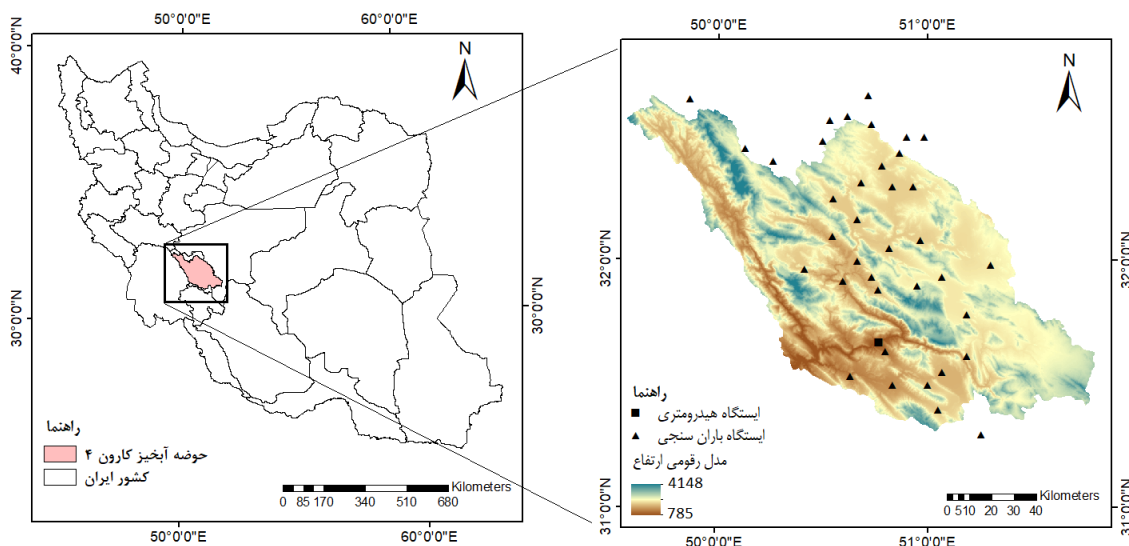
مدلی از این دست برآورد شده است؛ بنابراین ابتدا از مدل با توابع نمایی Exp-Hydro برای شبیه‌سازی استفاده شد و با توجه به شباهت ساختاری چنین توابعی با مخزن، نتایج آن با مدل بیلان آب روزانه توسعه داده شده در این مطالعه مقایسه شد. کد مدل Exp-Hydro به زبان برنامه‌نویسی پایتون نوشته شده و متن‌باز بودن یکی از مزایای این مدل است که شفافیت کد و قابلیت توسعه آن را سبب می‌شود. ساختار و معادلات ساده این مدل و نیاز به داده‌های ورودی کمتر نیز از مزیت‌های دیگر آن محسوب می‌شود و برای مناطقی که با کمبود داده مواجه هستند، مناسب است. این مدل در ابتدا توسط پاتیل و استیگلنیتز (۲۰۱۴) به‌عنوان یک مدل هیدرولوژیکی یکپارچه مکانی در مقیاس زمانی روزانه ارائه شد؛ اما بعدها نسخه توزیعی از آن نیز توسعه داده شد. برای اجرای این مدل نیاز به نصب نسخه‌های خاص پایتون و بسته‌های NumPy، SciPy و Matplotlib است. ازجمله سوابق مطالعاتی مربوط به استفاده از این مدل می‌توان به مطالعه پاتیل و استیگلنیتز (۲۰۱۴) اشاره کرد که با ضریب کارایی نش-ساتنکلیف (NSE)، به‌طور رضایت‌بخشی دبی را در ۳۲۳ حوضه در ایالات متحده ($NSE > 0.6$) شبیه‌سازی کرد. در این مطالعه مشخص شد که NSE به سه پارامتر حساس بود که دو مورد آن کنترل‌کننده رفتار بخش پایین‌رونده هیدروگراف حوضه و دیگری کنترل‌کننده نرخ ذوب برف بودند. پاتیل و همکاران (۲۰۱۴) نیز هر دو نسخه یکپارچه و توزیعی مدل Exp-Hydro را در ۴۱ حوضه در مقیاس متوسط (۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلومتر مربع) در منطقه شمال غربی اقیانوس آرام ایالات متحده اجرا کردند. نتایج نشان داد که عملکرد مدل توزیعی در ۳۸ حوضه از ۴۱ حوضه بهتر و در ۱۳ حوضه به‌طور قابل‌توجهی بهتر از مدل یکپارچه بود. به دلیل تشابهات آب‌وهوایی، برخی از مدل‌های توسعه‌داده‌شده در آمریکا نظیر شماره منحنی برای کشور ایران نیز مناسب گزارش شده است. به دلیل جدید بودن مدل Exp-Hydro مطالعات بسیار اندکی در این باره صورت گرفته است و مطابق با اطلاعات نویسندگان تاکنون در هیچ‌یک از حوضه‌های آبخیز کشور ایران، استفاده از آن گزارش نشده است. هدف از پژوهش حاضر، واسنجی نسخه یکپارچه مکانی مدل Exp-Hydro و مقایسه آن با مدل بیلان آب روزانه توسعه داده شده در این مطالعه است. هر دو مدل مورد

محل سد ۸ درجه سلسیوس و دمای حداکثر در محل سد برابر ۳۲/۴ درجه سلسیوس است (شیرالی و همکاران، ۱۳۹۹).

مدل Exp-Hydro

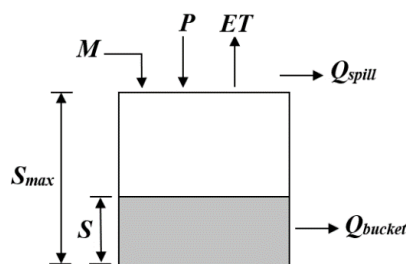
در این مدل بارش روزانه به دو شکل باران (P_r) و برف (P_s) برحسب میلی‌متر طبقه‌بندی می‌شود که نیاز به دمای روزانه (T_a) و حداقل آن (T_{min}) برحسب درجه سلسیوس است (پاتیل و همکاران، ۲۰۱۴). ورودی‌ها و خروجی‌های این مدل در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{if } T_a < T_{min}, \quad P_s &= P, \quad P_r = 0 \\ \text{else,} \quad P_s &= 0, \quad P_r = P \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های باران‌سنجی

مازاد بر نفوذ برای ورود به مخازن حوضه در دسترس بوده و درعین حال ذخیره‌سازی S به ظرفیت کامل S_{max} رسیده باشد. دبی روزانه خروجی حوضه Q_{sim} از مجموع Q_{bucket} و Q_{spill} حاصل می‌شود (پاتیل و استیگلitz، ۲۰۱۴).



شکل ۲- نمایش شماتیک مدل Exp-Hydro (پاتیل و استیگلitz، ۲۰۱۴)

استفاده در این مطالعه براساس نظریه تشابه رفتاری حوضه‌های آبخیز مطابق با عملکرد مخزن عمل می‌کنند.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز رودخانه کارون در محدوده سد کارون ۴ در جنوب غربی ایران بین عرض شمالی ۳۱/۳۳ تا ۳۲/۶۷ درجه و طول شرقی ۴۹/۵۵ تا ۵۱/۷۵ درجه در رشته‌کوه‌های زاگرس واقع شده است. مساحت این منطقه حدود ۱۴۵۵۳ کیلومترمربع و محدوده ارتفاعی آن از ۷۸۵ متر در خروجی تا ۴۱۴۸ متر در ارتفاعات این حوضه آبخیز متغیر است (شکل ۱). متوسط بارش سالانه حوضه آبخیز مذکور حدود ۶۸۰ میلی‌متر، متوسط تبخیر سالانه از سطح دریاچه ۱۸۱۱/۲ میلی‌متر، دمای حداقل اقلیم

مدل Exp-Hydro دو معادله دیفرانسیل معمولی جفت‌شده زیر را برای بیلان برف و بیلان آب به‌طور هم‌زمان در هر مرحله زمانی حل می‌کند (پاتیل و استیگلitz، ۲۰۱۵).

$$\frac{ds_{snow}}{dt} = P_s - M \quad (2)$$

$$\frac{ds}{dt} = P_r + M - ET - Q_{bucket} - Q_{spill} \quad (3)$$

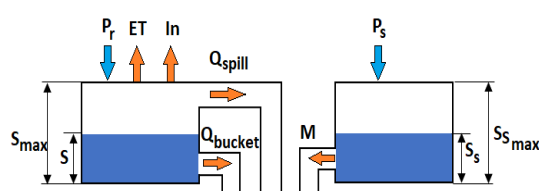
که در آن، S_{snow} ذخیره‌سازی در مخزن برف، M ذوب برف، S آب ذخیره‌شده در مخزن حوضه، ET تبخیر-تعرق، Q_{bucket} رواناب تولیدشده در مخزن حوضه و Q_{spill} رواناب سرریز یا مازاد بر ظرفیت مخزن برحسب میلی‌متر هستند. زمانی رخ می‌دهد که بارش یا ذوب برف

ظرفیت می‌رسد و f پارامتر کنترل‌کننده کاهش رواناب تحت‌تأثیر ذخیره مخزن (mm^{-1}) است.

مدل دو مخزنی بیلان آب روزانه توسعه داده شده در

این مطالعه

با توجه به کوهستانی بودن منطقه عملکرد مدل بیلان آب روزانه توسعه داده شده در این مطالعه بر پایه دو مخزن طرح‌ریزی شده است که در این حالت بارش برف به‌طور جداگانه در مخزن تجمع برف جمع می‌شود، درحالی‌که بارندگی مستقیماً وارد مخزن حوضه می‌شود. ورودی‌ها و خروجی‌ها در هر دو مخزن در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- نمایش شماتیک مدل بیلان آب روزانه

در این مدل نیز مشابه مدل Exp-Hydro بارش به دو صورت باران و برف تقسیم و بیلان برف و بیلان آب به‌طور هم‌زمان در هر مرحله زمانی محاسبه می‌شوند. بیلان آب در مخزن باران به‌صورت زیر است.

$$\frac{ds}{dt} = P_r - ET - In - Q_{\text{bucket}} - Q_{\text{spill}} \quad (9)$$

که در آن، In برگاب (میلی‌متر) است. یکی از خروجی‌های مخزن باران، مؤلفه تبخیر-تعرق واقعی است که با استفاده از مدل توزیع احتمال یا PDM (The probability distribution model) به‌صورت زیر محاسبه شد.

$$ET = \left\{ 1 - \left[\frac{S_{\text{max}} - S}{S_{\text{max}}} \right] \right\} \times PET \quad (10)$$

در رابطه فوق، ET و PET به‌ترتیب تبخیر-تعرق واقعی و تبخیر-تعرق پتانسیل (میلی‌متر)، S و S_{max} به‌ترتیب ذخیره آب و حداکثر آن در خاک (میلی‌متر) هستند (اوچوا سانچز و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار برگاب نیز به‌عنوان یکی دیگر از مؤلفه‌های بیلان آب با استفاده از معادله تجربی زیر محاسبه شد.

$$In = aP + b(1 - e^{(-P/b)}) \quad (11)$$

که برگاب In و P عمق بارش (میلی‌متر) و a (بین ۰/۱ تا ۰/۲) و b (بین ۲/۲۵ تا ۳۸ درصد بارش) ضرایب واسنجی هستند که به عوامل تلفات نفوذ بستگی دارند. محاسبه Q_{spill} و Q_{bucket} در این مخزن نیز مشابه با مدل Exp-

ذوب برف با استفاده از مفهوم درجه روز حرارتی به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\text{if } S_{\text{snow}} > 0, T_a > T_{\text{max}}, \\ M = \min \{S_{\text{snow}}, D_f(T_a - T_{\text{max}})\} \quad (4) \\ \text{else, } M = 0$$

که در آن، D_f ضریب درجه روز حرارتی (میلی‌متر بر روز بر درجه سلسیوس) و T_{max} آستانه دمایی است که در درجه حرارت بالاتر از آن، برف انباشته شده، شروع به ذوب شدن می‌کند (پاتیل و استیگلitz، ۲۰۱۴). مقدار تبخیر-تعرق واقعی (ET) نیز به‌عنوان کسری از تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) (هر دو برحسب میلی‌متر) محاسبه می‌شود که این ضریب به مقدار آب ذخیره شده واقعی نسبت به ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن بستگی دارد:

$$\text{if } S < 0, ET = 0 \\ \text{elif } S > S_{\text{max}}, ET = PET \quad (5) \\ \text{else, } ET = PET \left(\frac{S}{S_{\text{max}}} \right)$$

S_{max} حداکثر ظرفیت آب ذخیره شده در مخزن و PET تبخیر-تعرق پتانسیل (هر دو برحسب میلی‌متر) هستند. در صورت موجود نبودن داده‌های تبخیر از تشت، PET با استفاده از فرمول هامون (۱۹۶۳) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$PET = 29.8 D \frac{e_{\text{sat}}(T_a)}{T_a + 273.2} \quad (6)$$

که T_a دمای روزانه (درجه سلسیوس) و D طول روز (برحسب ساعت) است که به تاریخ جولیان سال و عرض جغرافیایی محل حوضه بستگی دارد و با استفاده از فرمول پیشنهاد شده توسط دینگمن (۲۰۰۲) محاسبه می‌شود. e_{sat} فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) است که محاسبه آن به‌صورت زیر است (پاتیل و استیگلitz، ۲۰۱۴).

$$e_{\text{sat}}(T_a) = 0.611 \exp\left(\frac{17.3 T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (7)$$

برای شبیه‌سازی جریان، مقدار رواناب تولید شده از مخزن حوضه و سرریز از آن، با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند که به مقدار آب ذخیره شده در مخزن بستگی دارند.

$$\text{if } S < 0, Q_{\text{bucket}} = 0, Q_{\text{spill}} = 0 \\ \text{elif } S > S_{\text{max}}, Q_{\text{bucket}} = Q_{\text{max}}, \\ Q_{\text{spill}} = S - S_{\text{max}} \quad (8) \\ \text{else,}$$

$$Q_{\text{bucket}} = Q_{\text{max}} \cdot \exp(-f(S_{\text{max}} - S)), \\ Q_{\text{spill}} = 0$$

که Q_{max} حداکثر رواناب تولید شده در مخزن حوضه (میلی‌متر) یا زمانی است که ذخیره آب در آن به حداکثر

$$q_t = \frac{(1-BFI_{\max})\alpha \times q_{t-1} + (1-\alpha)BFI_{\max}Q_t}{1-\alpha BFI_{\max}} \quad (15)$$

که q_t جریان پایه فیلترشده در زمان t ، $BFI_{\max}$ حداکثر مقدار شاخص جریان پایه، α ثابت منحنی فرود، q_{t-1} جریان پایه فیلترشده در زمان $t-1$ و Q_t جریان کل در زمان t (واحد همه پارامترها بر حسب مترمکعب بر ثانیه) هستند (اکهاردت، ۲۰۰۸). در این روش باید دو پارامتر تعیین شوند؛ α که مربوط به حوضه آبخیز است و $BFI_{\max}$ که قابل اندازه گیری نیست، اما با انطباق نتایج روش های دیگر بهینه سازی شده است که در این مطالعه مقادیر α و $BFI_{\max}$ به ترتیب برابر با ۰/۹۸۵ و ۰/۳۵ انتخاب شدند.

پس از نصب بسته های مورد نیاز پایتون، داده های ورودی مدل Exp-Hydro در فایل های مجزا به صورت سری زمانی پشت سرهم از ابتدا تا انتهای دوره با پسوند متنی تهیه شدند. پس از اجرای مدل، نمودار جریان شبیه سازی شده روزانه در خروجی حوضه و ضریب کلینگ گویا (KGE) به عنوان نتیجه خروجی حاصل شد. فرایند بهینه سازی و واسنجی این مدل در حوضه آبخیز کارون ۴ با استفاده از روش PSO^۲ انجام شد که الگوریتم آن توسط کندی و ابرهات (۱۹۹۵) مطرح و توسعه یافته است. PSO با گروهی از ذرات تصادفی، مقداردهی اولیه می شود و این جمعیت ذرات با به روزرسانی مکرر سرعت و موقعیت هر ذره، به دنبال راه حل بهینه در حوضه جست و جو می شوند (پاتیل و استیگلیتز، ۲۰۱۵). در این روش به منظور به روز شدن ذرات و موقعیت و سرعت آنها براساس بهترین جواب های محلی و مطلق معادلات زیر استفاده می شوند.

$$v(t+1) = v(t) + b_1 r_1 (p_{\text{best}} - x(t)) + b_2 r_2 (g_{\text{best}} - x(t)) \quad (16)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (17)$$

که $v(t+1)$ سرعت جدید ذره، $v(t)$ سرعت قدیم ذره، b_1 و b_2 فاکتورهای یادگیری، p_{best} بهترین موقعیت ثبت شده ذره، r_1 و r_2 اعداد تصادفی مستقل بین صفر و یک با توزیع یکنواخت و g_{best} بهترین موقعیت ثبت شده در بین کل ذرات هستند (باررا و همکاران، ۲۰۱۶). برای بهینه سازی پارامترهای مدل بیلان آب روزانه توسعه داده شده در این مطالعه که واسنجی آن در نرم افزار صفحه گسترده اکسل انجام شده، از روش جست و جوی هدف (Goal Seek)

Hydro به دست می آید؛ اما با این تفاوت که در مدل Exp-Hydro مقدار $Q_{\max}$ یا حداکثر رواناب تولید شده در مخزن حوضه یک مقدار ثابت است که در حین واسنجی مدل، مقدار آن بهینه می شود، اما در مدل بیلان آب روزانه در هر گام مقدار $Q_{\max}$ با استفاده از تابع نمایی عملکرد مخزن به صورت معادله زیر محاسبه می شود.

$$Q_{\max} = k S^m \quad (12)$$

که در آن، S آب ذخیره شده در مخزن حوضه (میلی متر) و k و m ضرایب واسنجی تابع هستند. معادله دیفرانسیل بیلان برف در این مدل نیز مانند معادله (۲) محاسبه می شود. به منظور محاسبه ذوب برف از روش گروه مهندسی ارتش آمریکا استفاده شد.

$$M = (c + d P)T + e \quad (13)$$

در معادله بالا، M ارتفاع آب حاصل از ذوب برف، P مقدار بارش (میلی متر) و T دما (درجه سلسیوس)، c ، d و e نیز ضرایب واسنجی هستند (علیزاده، ۱۳۹۶). دبی روزانه خروجی حوضه با در نظر گرفتن اثر رواناب تولید شده در مخزن، رواناب مازاد بر ظرفیت مخزن و ذوب برف گام قبل در گام فعلی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$Q_{\text{sim}} = X(Q_{\text{bucket } i} + Q_{\text{spill } i} + M_i) + (1-X)(Q_{\text{bucket } i-1} + Q_{\text{spill } i-1} + M_{i-1}) \quad (14)$$

که در آن، X عامل تأخیر (بین صفر و یک) در اثر ذخیره است.

روش پژوهش

داده های مورد نیاز شامل سری زمانی بارش، دمای هوا، تبخیر-تعرق پتانسیل و دبی در مقیاس زمانی روزانه است که از شرکت سهامی آب منطقه ای و اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری تهیه شدند. به منظور محاسبه متوسط مکانی بارش، دما و تبخیر-تعرق پتانسیل در منطقه مورد مطالعه، از روش چندضلعی های تیسن استفاده شد. از آنجا که در هر دو مدل نیاز به داده های روزانه رواناب (بر حسب میلی متر) است و داده های دبی روزانه (مجموع رواناب و جریان پایه) بر حسب مترمکعب بر ثانیه هستند، مقادیر جریان پایه از مقادیر دبی روزانه مشاهداتی جدا شد. برای این منظور از نرم افزار WHAT (Web-based Hydrograph Analysis Tool) و روش فیلتر دیجیتال بازگشتی استفاده شد. معادله این روش به صورت زیر است (اکهاردت، ۲۰۰۸):

استفاده شد. ۰/۷۵ متوسط و بزرگتر از ۰/۷۵ خوب است (تاوئر و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین مقادیر نزدیک به یک ضریب همبستگی و مقادیر نزدیک به صفر ضرایب RMSE و MAE نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل هستند (چیکو و همکاران، ۲۰۲۱).

نتایج و بحث

هیدروگراف حاصل از جداسازی جریان پایه از جریان کل ایستگاه هیدرومتری ارمند در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین هیدروگراف رواناب مشاهداتی ایستگاه ارمند و رواناب شبیه‌سازی شده به وسیله مدل Exp-Hydro و مدل توسعه داده شده در این مطالعه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. تحلیل چشمی هیدروگراف‌ها در شکل ۵ مشخص می‌کند که عملکرد مدل بیلان آب روزانه توسعه داده شده در این مطالعه، در شبیه‌سازی نقاط پیک رواناب مشاهداتی نسبت به مدل Exp-Hydro دارای عملکرد بهتری است. به منظور نمایش بهتر و مقایسه راحت‌تر، روی قسمتی از نمودار بزرگ‌نمایی شده است. همچنین رواناب اوج مشاهداتی در ۱۳ مارس ۲۰۰۵ است، با وجود اینکه مدل توسعه داده شده، رواناب این روز را تاحدی کمتر از مقدار واقعی آن شبیه‌سازی کرده، با این حال دقت کلی آن نسبت به مدل Exp-Hydro به مراتب بیشتر بوده است. همچنین در حالت کلی، در جریان‌های با مقدار کم اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل توسعه داده شده کمتر است و می‌توان گفت نتایج مدل Exp-Hydro در برآورد این جریان‌ها کم‌برآوردی دارد.

در هر دو ساختار مدل سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ برای دوره واسنجی و سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ برای دوره اعتبارسنجی استفاده شد. ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیز با استفاده از ضرایب کارایی NSE (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰)، KGE (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۹)، ضریب همبستگی (r)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط قدرمطلق خطا (MAE) انجام شد.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (18)$$

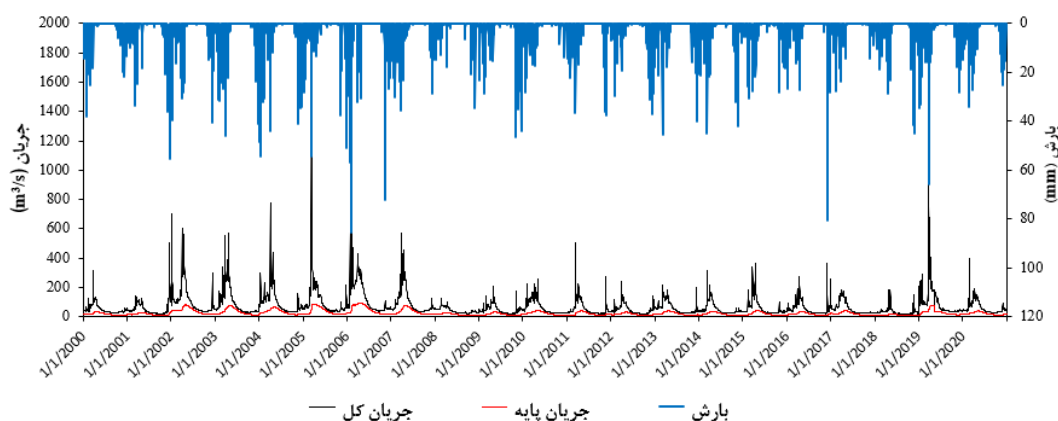
$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_s)^2}{\sum(Q_o - \overline{Q_o})^2} \quad (19)$$

$$r = \frac{Q_s \overline{Q_o} - \overline{Q_s} \overline{Q_o}}{\sqrt{(\overline{Q_o^2} - \overline{Q_o}^2) - (\overline{Q_s^2} - \overline{Q_s}^2)}} \quad (20)$$

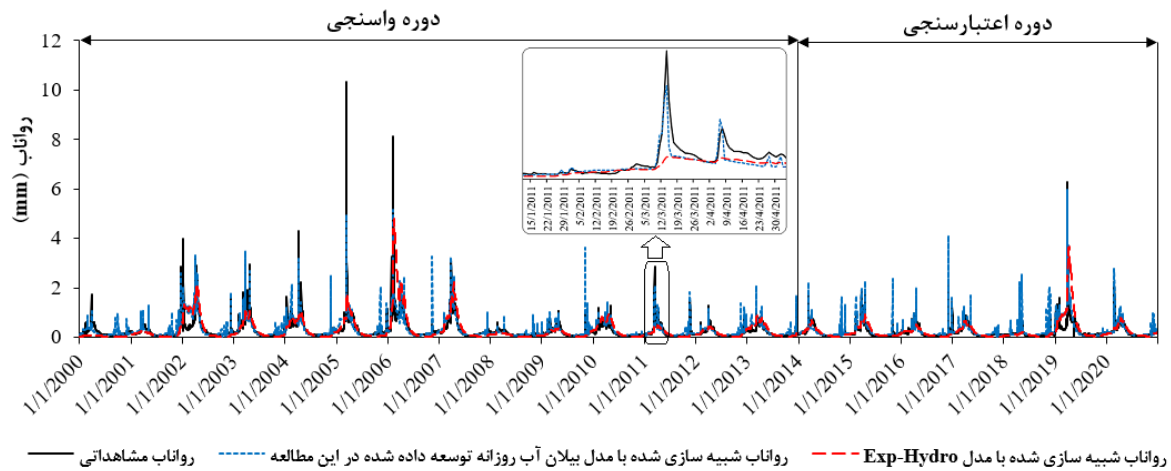
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_s - Q_o)^2}{N}} \quad (21)$$

$$MAE = \frac{\sum|Q_s - Q_o|}{N} \quad (22)$$

که N تعداد داده‌ها، Q_s دبی شبیه‌سازی شده، Q_o دبی مشاهداتی، $\overline{Q_{obs}}$ و $\overline{Q_{obs}}$ به ترتیب میانگین دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، r ضریب همبستگی خطی پیرسون بین دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده، α نسبت انحراف معیار دبی شبیه‌سازی شده به دبی مشاهداتی و β نسبت میانگین مقادیر دبی شبیه‌سازی شده به دبی مشاهداتی است. عملکرد مدل مطابق با ضریب NSE بین ۰/۷۵ تا ۱ بسیار خوب، بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ خوب، بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ رضایت‌بخش و کمتر از ۰/۵ غیرقابل قبول است (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷؛ کلت و همکاران، ۲۰۱۴). عملکرد مدل با ضریب KGE کمتر از صفر خیلی ضعیف، بین ۰ تا ۰/۵ ضعیف، بین ۰/۵ تا



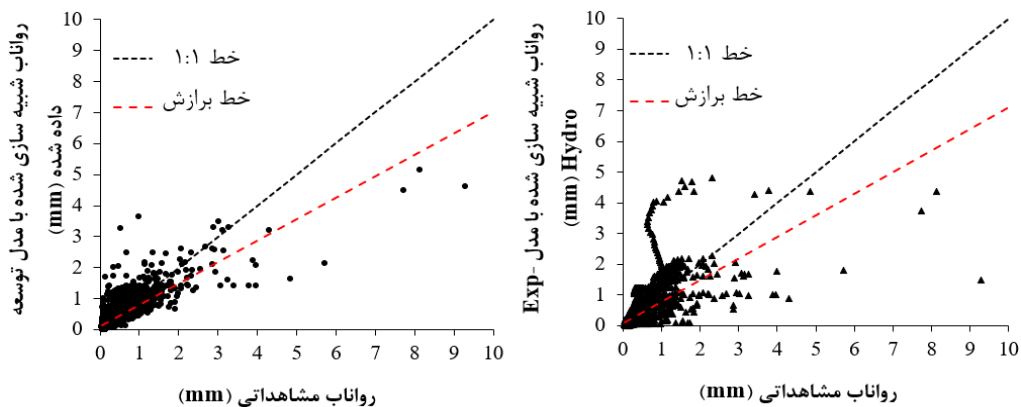
شکل ۴- هیدروگراف جداسازی جریان پایه روزانه از جریان کل ایستگاه هیدرومتری ارمند (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰)



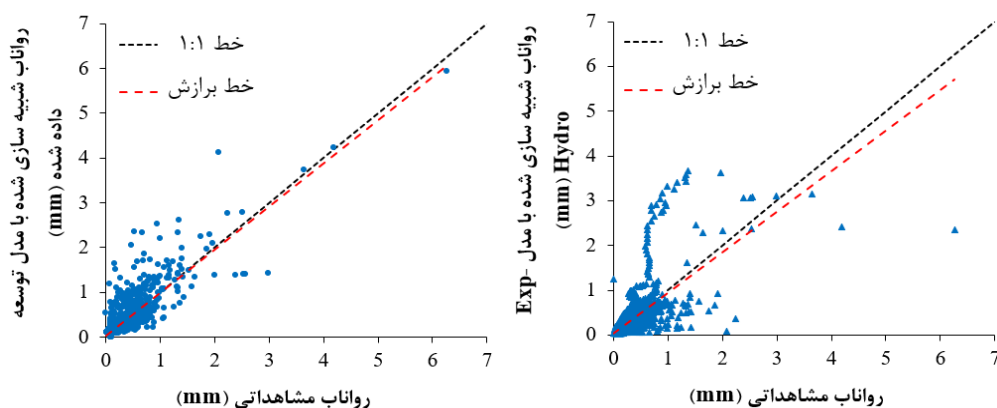
شکل ۵- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده حوضه آبخیز کارون ۴ (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰)

این مطالعه بهتر بوده است. در دوره واسنجی برای مقادیر بیشتر رواناب، پراکندگی نقاط در هر دو مدل نسبت به نیم‌ساز ۴۵ درجه زیاد است و مدل‌ها مقادیر رواناب را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند، با این حال فاصله نقاط در مدل توسعه‌داده‌شده در این مطالعه نسبت به نیم‌ساز ۴۵ درجه کمتر از مدل Exp-Hydro است.

مطابق با شکل‌های ۶ و ۷ پراکنش نقاط رواناب مشاهداتی در مقابل شبیه‌سازی‌شده در مدل Exp-Hydro بیشتر است. هرچه خط برازش‌شده به خط ۱:۱ نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد که مدل مقادیر واقعی را بهتر شبیه‌سازی می‌کند که مطابق با شکل‌های ارائه‌شده، شبیه‌سازی در دوره اعتبارسنجی به‌خصوص برای مدل توسعه‌داده‌شده در



شکل ۶- پراکنش نقاط رواناب مشاهداتی در مقابل رواناب شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل‌ها در دوره واسنجی ۲۰۱۳-۲۰۰۰



شکل ۷- پراکنش نقاط رواناب مشاهداتی در مقابل رواناب شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل‌ها در دوره اعتبارسنجی ۲۰۲۰-۲۰۱۴

این مدل در دوره واسنجی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ (نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل) و در دوره اعتبارسنجی در محدوده ۰/۵ تا ۰/۶۵ (نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل) بود. در حالی که این ضرایب در مدل Exp-Hydro چندان رضایت‌بخش نبوده است. در مورد سایر معیارها (RMSE، r و MAE) نیز مدل توسعه‌داده‌شده در این مطالعه عملکرد بهتری داشته است. درباره مدل Exp-Hydro ضریب KGE در هر دو دوره بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ و نشان‌دهنده عملکرد متوسط بود.

شاخص‌های آماری ارزیابی مدل‌ها با استفاده از ضرایب کارایی ذکرشده در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به ۵ ضریب کارایی محاسبه‌شده، نتایج جدول مذکور نشان داد که عملکرد مدل بیلان آب روزانه توسعه‌داده‌شده در این مطالعه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی بهتر از مدل Exp-Hydro بوده است. در مدل بیلان آب روزانه توسعه‌داده‌شده در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی ضریب KGE بزرگ‌تر از ۰/۷۵ بوده که نشان‌دهنده عملکرد خوب این مدل است. همچنین ضریب NSE برای

جدول ۱- نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌ها برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در حوضه آبخیز کارون ۴

دوره	معیار	مدل بیلان آب روزانه توسعه‌داده‌شده در این مطالعه	مدل Exp-Hydro
واسنجی	KGE	۰/۷۶	۰/۶۹
	NSE	۰/۶۹	۰/۳۷
	r	۰/۸۳	۰/۶۹
	RMSE	۰/۲۵	۰/۳۵
	MAE	۰/۱۱	۰/۱۴
اعتبارسنجی	KGE	۰/۷۶	۰/۶
	NSE	۰/۶۲	۰/۱۹
	r	۰/۸۵	۰/۷۱
	RMSE	۰/۱۹	۰/۲۸
	MAE	۰/۰۹	۰/۱۱

به‌وسیله مدل دارند؛ به‌طوری‌که با کاهش مقادیر آن‌ها مقادیر رواناب شبیه‌سازی‌شده مدل کاهش یافته و کمتر از مقادیر رواناب مشاهداتی می‌شود.

نتیجه‌گیری

در یک جمع‌بندی کلی مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، مدل بیلان آب توسعه‌داده‌شده در این مطالعه نسبت به مدل Exp-Hydro در شبیه‌سازی جریان حوضه آبخیز کارون ۴ دقت بهتری داشته است. در برآورد جریان‌های کم مشاهداتی مدل توسعه‌داده‌شده موفق‌تر عمل کرده و مدل Exp-Hydro کم‌برآوردی دارد. با اینکه هر دو مدل، جریان‌های سیلابی را کمتر از مقادیر واقعی برآورد کرده‌اند، با این حال اختلاف جریان‌های سیلابی مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل توسعه‌داده‌شده، کمتر بود. مقایسه عملکرد مدل‌ها براساس ضرایب کارایی KGE، NSE، r ، RMSE و MAE نیز نشان داد که نتایج

مقدم بر مرحله واسنجی تحلیل حساسیت مدل‌ها نیز به‌صورت دستی با تغییر هر پارامتر مدل، مقایسه تغییرات بین هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده صورت گرفت و مقدار ضرایب کارایی نیز کنترل شد. در این تحلیل مشخص شد که در مدل Exp-Hydro از آنجا که f پارامتر کنترل‌کننده کاهش رواناب وابسته به ذخیره است، این پارامتر رابطه معکوسی با مقدار رواناب شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل دارد؛ به‌طوری‌که با کاهش مقدار f مقادیر رواناب شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل افزایش یافته و بیشتر از مقادیر رواناب مشاهداتی می‌شود. همچنین این پارامتر حساس‌ترین پارامتر در مدل Exp-Hydro است که با نتایج پژوهش پاتیل و استیگلitz (۲۰۱۴) مطابقت دارد. در مدل بیلان آب توسعه‌داده‌شده در این مطالعه نیز ضریب واسنجی m در محاسبه Q_{max} با استفاده از تابع نمایی عملکرد مخزن و ضریب واسنجی e در محاسبه ذوب برف حساس‌ترین پارامترها بودند. این پارامترها رابطه معکوسی با مقدار رواناب شبیه‌سازی‌شده

خودکار الگوریتم ژنتیک. مجله تحقیقات آب و خاک

ایران (علوم کشاورزی ایران). ۵۰(۷): ۱۷۵۹-۱۷۶۹.

7. Adane G.B. Hirpa B.A. Gebru B.M. Song C. and Lee W.K. 2021. Integrating satellite rainfall estimates with hydrological water balance model: rainfall-runoff modeling in Awash River basin, Ethiopia. Water. 13(6): 1-19.
8. Barrera J. Alvarez-Bajo O. Flores J.J. and CoelloCoello C.A. 2016. Limiting the velocity in the particle swarm optimization algorithm. Computacion y Sistemas. 20(4): 635-645.
9. Chicco D. Warrens M.J. and Jurman G. 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science. 7: 1-24.
10. Dingman S.L. 2002. Physical hydrology. 2nd Edition, Prentice Hall: New Jersey. 646p.
11. Eckhardt K. 2008. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. Journal of Hydrology. 352(1-2): 168-173.
12. Gupta H. V. Kling H. Yilmaz K. K. and Martinez G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology. 377(1-2): 80-91.
13. Hamon W. R. 1963. Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. International Association of Hydrological Sciences Publication. 63: 52-62.
14. Juma L.A. Nkongolo N.V. Raude J.M. and Kiai C. 2022. Assessment of hydrological water balance in Lower Nzoia Sub-catchment using SWAT-model: towards improved water governace in Kenya. Heliyon 8(7): 1-12.
15. Kennedy J. and Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks, November 27 - December 1, Perth, Western Australia, IEEE. 4: 1942-1948.
16. Kult J. Choi W. and Choi J. 2014. Sensitivity of the Snowmelt Runoff Model to snow covered area and temperature inputs. Applied Geography. 55: 30-38.
17. Moriasi D.N. Arnold J.G. Van Liew M.W. Bingner R.L. Harmel R.D. and Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 50(3): 885-900.

مدل بیلان آب روزانه توسعه داده شده، خوب و رضایت بخش بوده است. نتایج حساسیت سنجی مدل ها نیز در این پژوهش نشان داد که حساس ترین پارامتر در مدل Exp-Hydro پارامتر کنترل کننده کاهش رواناب f (رابطه معکوسی با مقدار رواناب شبیه سازی شده به وسیله مدل دارد) و در مدل بیلان آب روزانه توسعه داده شده، ضریب واسنجی m در محاسبه Q_{max} با استفاده از تابع نمایی عملکرد مخزن و ضریب واسنجی e در محاسبه ذوب برف (رابطه مستقیم با مقدار رواناب شبیه سازی شده به وسیله مدل دارند) در شبیه سازی جریان حوضه آبخیز کارون ۴ بودند.

منابع

۱. رضوی کهنمویی س. داوری ک. قهرمان ب. ضیایی ع.ن. ایزدی ع. اسحاقیان ک. شاهی م. و طالبی ف. ۱۳۹۵. توسعه مدل شبه توزیعی برای برآورد بیلان (QDWB) و ارزیابی آن در محدوده مطالعاتی رخ-نیشابور. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۰(۶): ۱۸۸۸-۱۹۰۴.
۲. رضوی کهنمویی س. داوری ک. قهرمان ب. و جودوی ع. ۱۳۹۸. مروری بر مدل های بیلان آب: بررسی مدل های ریاضی مفهومی برای حوضه آبریز. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳(۴): ۱۲۶-۱۳۵.
۳. شیرالی ع. نیکبخت شهبازی ع. ر. فتحیان ح. ظهراپی ن. و مبارک حسن ا. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل WRF برای شبیه سازی بارش و پیش بینی سیلاب در حوضه آبریز کارون ۴. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۸): ۱۹۰۷-۱۹۲۰.
۴. علیزاده ا. ۱۳۹۶. اصول هیدرولوژی کاربردی. مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، ۹۴۲ ص.
۵. فاضلی ثانی ا. معتمد وزیری ب. و قادری ک. ۱۳۹۵. مروری بر نرم افزارهای مدل سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز، معرفی و کاربردها. کنفرانس بین المللی عمران، معماری، مدیریت شهری و محیط زیست در هزاره سوم. ۱۴ شهریور. رشت.
۶. محمدی وند م.ر. عراقی نژاد ش. ابراهیمی ک. و مدرسی ف. ۱۳۹۸. ارزیابی عملکرد مدل های AWBM، Sacramento و SimHyd در شبیه سازی رواناب حوضه امامه با استفاده از بهینه ساز واسنجی

18. Nash J.E. and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-290.
19. Ochoa-Sanchez A. Crespo P. Carrillo-Rojas G. Sucozhanay A. and Celleri R. 2019. Actual evapotranspiration in the high Andean grasslands: A comparison of measurement and estimation methods. *Frontiers in Earth Science*. 7: 1-16.
20. Patil S. and Stieglitz M. 2014. Modelling daily streamflow at ungauged catchments: what information is necessary? *Hydrological Processes* 28(3): 1159-1169.
21. Patil S. D. and Stieglitz M. 2015. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*. 525: 409-417.
22. Patil S. D. Wigington Jr P. J. Leibowitz S. G. Sproles E. A. and Comeleo R. L. 2014. How does spatial variability of climate affect catchment streamflow predictions? *Journal of Hydrology*. 517: 135-145.
23. Sharma N. K. Kanwar V. S. and Kandra H. S. 2019. Water balance evaluation of Chandigarh region, India. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 8(11): 2278-3075.
24. Sood A. and Smakhtin V. 2015. Global hydrological models: a review. *Hydrological Sciences Journal*. 60(4): 549-565.
25. Towner J. Cloke H. L. Zsoter E. Flamig Z. Hoch J. M. Bazo J. Coughlan de Perez E. and Stephens E.M. 2019. Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23(7): 3057-3080.
26. Woolhiser D. A. 1973. Hydrologic and watershed modeling—state of the art. *Transactions of the ASAE*. 16(3): 553-559.