Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Integrating the Sacramento Conceptual Rainfall-Runoff Model and Reanalyzed Datasets for Runoff Simulation

Malihe Bayram[1], Asghar Azizian✉[2]
1. Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, bayrami@yahoo.com
2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, Azizian@Eng.ikiu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 13, 2022

Received: Apr. 5, 2022

Accepted: Apr. 26, 2022

Published online: June. 22, 2022

Keywords:
Rainfall-Runoff Model,
Lumped,
Remote Sensing,
Water Resources,
Flood

ABSTRACT

Accurate estimation of runoff plays an important role in water resources and hydrological studies. Due to simple structure and minimum data requirements, the conceptual hydrologic models are the best way to estimate runoff. The main objective of this study is to investigate the performance of Sacramento model in runoff simulation and determining the best reanalyzed evapotranspiration dataset for using in the model. In this study, four different datasets including HBV, ORCHIDEE, PCR-GLOBW, WATERGAP3 and W3RA are used in Sacramento model. Also, for estimation of basin-averaged rainfall time seri, the Thiessen method was used based on ground gage observations. Results indicate that using most of the reanalyzed datasets in Sacramento model lead to reliable outputs and the performance of model in simulation of daily stream flow is relatively high. However, the performance of model in the case of using W3RA and WATERGAP3 is better than the other data sources, and in both calibration and verification phases the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) is higher than 0.60 and 0.87, respectively. Moreover, findings show that the W3RA dataset is the best one for estimation of runoff volume, high flows (peak floods) and the time to peak flows. Overall, based on the outputs of this research, the reanalyzed datasets can be considered as an alternative or complementary in data-limited regions for water resources and hydrological studies.

Cite this article: Bayrami, M., & Azizian, A. (2022) Integrating the Sacramento Conceptual Rainfall-Runoff Model and Reanalyzed Datasets for Runoff Simulation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (4), 821-833.
© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.339096.669208

تلفیق مدل بارش-رواناب مفهومی Sacramento و داده‌های بازتحلیل شده مدل‌های جهانی برای شبیه‌سازی رواناب

ملیحه بایرام[۱]، اصغر عزیزیان[۲]✉

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، bayrami@yahoo.com

۲. گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، Azizian@Eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۴/۱

واژه‌های کلیدی:
مدل بارش ـ رواناب،
یکپارچه،
سنجش از دور،
منابع آب،
سیلاب

چکیده

برآورد صحیح رواناب برای تصمیم‌گیری در خصوص پروژه‌های منابع آب از اهمیت بالائی برخوردار است. یکی از راه‌های تخمین رواناب، استفاده از مدلهای هیدرولوژیکی مفهومی می‌باشد. علت استفاده از چنین مدلهایی در بسیاری از مطالعات، ساختار نسبتاً ساده و تعداد داده‌های ورودی کم آنها می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی عملکرد مدل بارش-رواناب مفهومی Sacramento در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه آبریز شاپور و نیز تعیین مناسب‌ترین داده بازتحلیل شده جهت تخمین تبخیروتعرق در بازه مطالعاتی می‌باشد. در پژوهش حاضر از نتایج چهار مدل باز تحلیل شده HBV-SIMREG، ORCHIDEE، PCR-GLOBW، WATERGAP3 و W3RA جهت برآورد سری زمانی تبخیروتعرق که یکی از مهمترین ورودی‌های مدل Sacramento می‌باشد، استفاده شده است. همچنین برای تخمین متوسط وزنی بارش در سطح حوضه، از داده‌های بارش روزانه ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در بازه مطالعاتی و روش Thiessen استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که داده‌های تبخیروتعرق بدست آمده از بیشتر مدلهای بازتحلیل شده مذکور، منجربه عملکرد مناسب مدل بارش-رواناب Sacramento در شبیه‌سازی دبی جریان روزانه می‌شود. هرچند لازم به ذکر است که عملکرد داده‌های W3RA، WATERGAP3 و PCR-GLOBW در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به دیگر داده‌ها از کارائی به مراتب بیشتری برخوردار می‌باشند. مقادیر شاخص آماری NSE برای سه مدل برتر در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب همواره بالاتر از ۰/۸۷ و ۰/۶۰ می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده بر اساس داده‌های W3RA نشان داد که میزان خطای مدل Sacramento در تخمین حجم رواناب و دبی‌های اوج سیلاب به کمترین مقدار خود می‌رسد. میزان خطای مدل در برآورد دبی اوج سیلاب و حجم رواناب در صورت استفاده از داده‌های W3RA به ترتیب کمتر از ۱۱ و ۱۵ درصد می‌باشد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان چنین عنوان نمود که داده‌های بدست آمده از مدلهای بازتحلیل شده می‌تواند به عنوان یک داده مکمل و حتی جایگزین به ویژه در حوضه‌های فاقد آمار و یا آمار ناکافی برای استفاده در مطالعات منابع آب و شبیه‌سازی رواناب مدنظر محققین قرار گیرد.

استناد: بایرامی، ملیحه؛ و عزیزیان، اصغر (۱۴۰۱). تلفیق مدل بارش رواناب مفهومی Sacramento و داده‌های بازتحلیل شده مدل‌های جهانی برای شبیه‌سازی رواناب. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۴)، ۸۲۱-۸۳۳.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.339096.669208

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

یکی از چالش‌های کلیدی در مطالعات هیدرولوژی، مدل‌سازی صحیح فرآیند بارش ـ رواناب است (Kratzert et al., 2018). یک مدل ریاضی نمایش ساده‌ای از دنیای واقعی است و بهترین مدل، مدلی است که با کمترین پارامترها و پیچیدگی‌ها نتایج نزدیک به واقعیت را ارائه دهد (Devia et al,2015). تعدادی طبقه‌بندی برای مدل‌های هیدرولوژیکی در چند دهه گذشته انجام شده است. یکی از این طبقه‌بندی‌ها براساس تغییرات مکانی پارامترها و داده‌های ورودی به مدلها بوده است. مدل‌ها بر این اساس به ۳ دسته مدل‌های توزیعی، نیمه توزیعی و یکپارچه تقسیم می‌شوند. در مدل‌های توزیعی، توزیع مکانی در متغیرهای ورودی و پارامترها در نظر گرفته می‌شود (Fazeli Sani et al. 2018; Zarei et al. 2010). در این مدل‌ها به دلیل گستردگی تغییرات مکانی، جمع‌آوری اطلاعات مکانی غیرممکن و پرهزینه است. در مدل‌های نیمه توزیعی حوضه آبخیز به واحدهای کوچک‌تر تقسیم و مدل یکپارچه برای هر یک از این واحدها در نظر گرفته می‌شود (Rezaei, 2005; Zarei et al. 2010). مدل‌های بارش رواناب توزیعی و نیمه توزیعی نیاز به داده‌های اولیه و پیچیدگی‌های زیادی دارند که استفاده از آن‌ها مستلزم صرف زمان و هزینه بالایی است اما در مقابل آن‌ها مدل‌های یکپارچه و مفهومی قرار دارند. مدل‌های یکپارچه و مفهومی با کمترین داده‌های ورودی و سادگی اجرا کار را برای مهندسان ساده‌تر نموده‌اند. اما با این وجود نمی‌توان به عملکرد چنین مدل‌هایی اعتماد نمود و قبل از انجام هر کاری لازم است این مدل‌ها ارزیابی شوند و کارایی آن‌ها در حوضه موردنظر بررسی گردد. در این مدل کل حوضه بعنوان یک سیستم در نظر گرفته می‌شود و رفتار آن در مقابل یک ورودی شبیه‌سازی می‌شود. از مهمترین ورودی‌های مدلهای مفهومی می‌توان به داده‌های بارش، تبخیروتعرق و داده‌های دبی برای واسنجی اشاره نمود. در حال حاضر دسترسی به داده‌های بارش و تبخیروتعرق در بسیاری از حوضه‌های آبریز به راحتی امکان‌پذیر نبوده و در صورت وجود ایستگاه‌های زمینی، عدم تراکم مناسب آنها فرآیند مدلسازی هیدرولوژیکی را با چالشی اساسی روبرو می‌نمایند. با توجه به گسترش تکنولوژی‌های ماهواره‌ای و افزایش قدرت محاسبات رایانه‌ای در سالهای اخیر، منابع اطلاعاتی متعدد و ارزشمندی در زمینه‌های مختلف توسعه داده شده است که عمدتاً مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور، داده گواری (Data Assimilation) و فرآیند بازتحلیل (Reanalysis Models) توسط مدلهای بزرگ مقیاس استوار می‌باشند. یکی از جدیدترین تلاش‌های صورت گرفته جهت فراهم نمودن بستری برای انجام مطالعات منابع آب در مقیاس بزرگ، پایگاه اطلاعاتی Earth2Observe است که توسط محققین اتحادیه اروپا توسعه داده شده است. پایگاه مزبور در ژانویه ۲۰۱۴ و با هدف یکپارچه‌سازی داده‌های مربوط به مشاهدات جهانی (Earth Observation)، داده‌های زمینی و داده‌های مربوط به مدلهای هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس (Large Scale Hydrological Models) و سطح زمین (Land Surface Models) به انجام رسیده است. در پایگاه مذکور خروجی حاصل از مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف با استفاده از فرآیند داده‌گواری و با کمک داده‌های زمینی بدست آمده از پایگاه هواشناسیWMO بازتحلیل شده و در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بصورت کاملا رایگان عرضه شده است (Koohi et al. 2019).

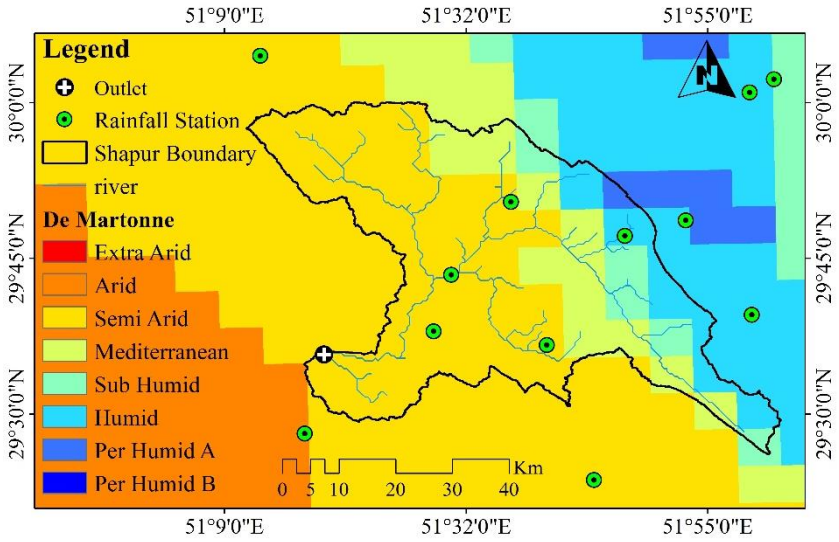
به‌طور کلی مجموعه داده‌های بازتحلیل شده و مبتنی بر سنجش از دور، اطلاعات ارزشمند و مفیدی از متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی در سراسر جهان ارائه می‌دهند، که در صورت عدم وجود داده‌های زمینی مناسب حتی می‌توانند به عنوان مکمل و یا جایگزین داده‌های زمینی مدنظر قرار گیرند. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه ارزیابی داده‌های بازتحلیل شده و داده‌های مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور جهت برآورد رواناب، تبخیروتعرق، بارش و رطوبت خاک در بخشهای مختلف دنیا به انجام رسیده است. به عنوان مثال، Schellekens et al. 2017 به بررسی داده‌های بدست آمده از ۱۰ مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس و مدل سطح زمین برای دوره زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۷ و با مقیاس مکانی ۰/۵ درجه در سطح کل دنیا پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که برای برآورد مولفه‌های هیدرولوژیکی مانند رواناب، تبخیروتعرق و رطوبت خاک عمده مدلهای مذکور از عملکرد رضایت‌بخشی در بخشهای عمده‌ای از جهان برخوردار می‌باشند (Schellekens *et al.*, 2017). همچنین تحقیقات انجام شده توسط Beck et al. 2017 در زمینه ارزیابی عملکرد مدلهای موجود در پایگاه Earth2Observe جهت تخمین رواناب در ۹۶۶ حوضه سراسر جهان نشان داد که استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس منجربه نتایج به مراتب بهتری نسبت به مدل‌های سطح زمین می‌گردد. Yang (2017) نیز به ارزیابی عملکرد مدل GLEAM جهت برآورد تبخیروتعرق واقعی در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه در کشور چین پرداخت و به این نتیجه رسید که مدل مذکور به جز منطقه جنگلی زیشوانگ بانا از دقت قابل قبولی برای تخمین تبخیروتعرق واقعی در بخشهای مختلف چین برخوردار است. Lopez et al. 2017 با استفاده از داده‌های تبخیروتعرق بدست آمده از مدل GLEAM و رطوبت خاک منبع ESA-CCI به واسنجی مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس PCR-GLOBW در حوضه آبریز امازون طی دوره آماری ۲۶ ساله (۲۰۱۰-۱۹۷۹) و در دو سناریوی تک هدفه و چند هدفه پرداختند. یافته‌های این محققین نشان داد که واسنجی چند هدفه و با استفاده از داده‌های رطوبت و تبخیروتعرق با دارا بودن شاخص نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) ۰/۵ تا ۰/۷۵ عملکرد مناسبی در برآورد رواناب خروجی از حوضه داشته است. Koohi et al. 2020 با استفاده از مقادیر تبخیروتعرق بدست آمده از مدل‌های بازتحلیل شده W3RA، GLEAM و HBV-SIMREG به واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC-3L در حوضه آبریز سفیدرود پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از داده‌های مدل بازتحلیل شده GLEAM بمنظور واسنجی مدل توزیعی VIC-3L، سری زمانی جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل دارای بیشترین تطابق (NS= ۰/۹۵ و CC=۰/۸) با داده‌های دبی مشاهداتی در محل ایستگاه هیدرومتری گیلوان می‌باشند. (Kim et al., 2018).

اگرچه در سالهای اخیر پایگاه‌های بازتحلیل شده مختلفی همچون GLDAS و Earth2Observe (که مبتنی بر فرآیند داده گواری و ادغام مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی هستند) توسط مراکز علمی جهان توسعه داده شده‌اند، اما متاسفانه تاکنون در سطح کشور در کمتر تحقیقی به اهمیت این منابع اطلاعاتی و کارائی آنها پرداخته شده است. از آنجائی که یکی از مهمترین ورودی‌های مدلهای هیدرولوژیکی مفهومی داده تبخیروتعرق می‌باشد، پژوهش حاضر با هدف بررسی دقت و کارایی داده‌های تبخیروتعرق بدست آمده از مدلهای بازتحلیل جهانی برای شبیه‌سازی دبی جریان با استفاده از مدل مفهومی Sacramento به انجام رسیده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز شاپور از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده '۲۶ °۲۹ تا '۰۰ °۳۰ عرض شمالی تا '۱۱ °۵۱ تا '۰۲ °۵۲ طول شرقی قرار گرفته است و با مساحتی در حدوده ۲۳۷۴ کیلومترمربع بخشی از حوضه آبریز حله می‌باشد. با توجه به تقسیم‌بندی مرکز تحقیقات منابع آب ایران (تماب) ایستگاه هیدرومتری ۰۴۳-۲۳ در انتهای حوضه واقع‌شده است و مقادیر جریان ثبت‌شده در این ایستگاه در مقیاس روزانه می‌باشد. طبق روش دومارتن اصلاح شده (Rahimi et al. 2017) این حوضه در یک اقلیم غالبا نیمه خشک واقع شده است. دو نوع توده هوا بر این حوضه وارد می‌شود: ۱) توده هوایی که از نواحی غرب و شمال غرب (منشأ آن دریای سیاه و مدیترانه) وارد شده و زمان فعالیت آن از آبان تا اردیبهشت بوده است. ۲) توده هوایی که از نواحی جنوب غرب کشور و شبه‌جزیره عربستان وارد شده و زمان فعالیت آن از مهر تا اردیبهشت است (Zanganeh et al. 2019).

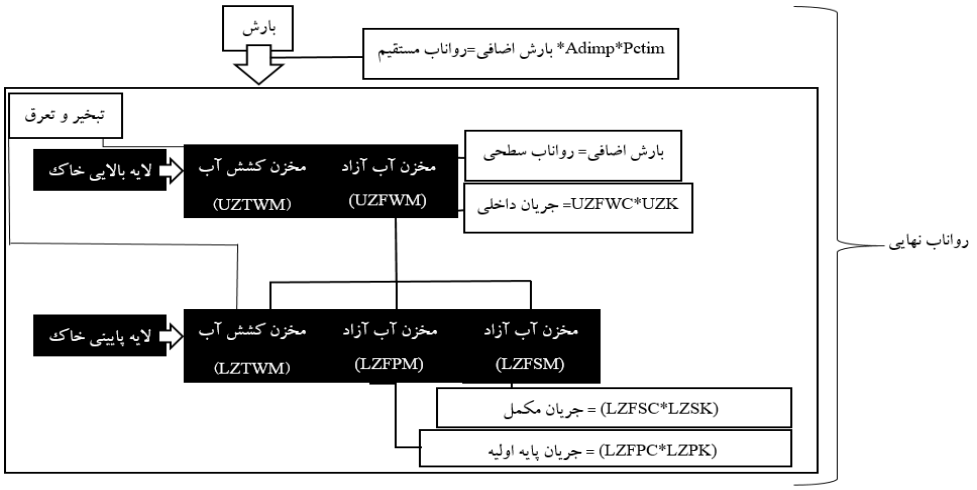


شکل ۱- تقسیم‌بندی آب و هوایی دمارتن و موقعیت حوضه شاپور

ساختار مدل Sacramento

مدل بارش ـ رواناب Sacramento مطابق شکل (۲) خاک را به صورت دو لایه (بالایی و پایینی) در نظر می‌گیرد. در این مدل، دو مخزن در لایه بالایی و سه مخزن در لایه پایینی وجود دارد. در لایه بالایی خاک، مخزن کشش آب (UZTWM) و مخزن آب آزاد (UZFWM) واقع شده است. در هنگام بارش و برف ابتدا مخزن کشش آب لایه بالایی اشباع می‌شود و سپس رطوبت اضافی در دسترس مخزن آب آزاد قرار می‌گیرد و مخزن آب آزاد، آب را به مخازن لایه پایینی هدایت می‌کند.

اگر مخزن آب آزاد لایه بالایی از قبل اشباع شده باشد مقدار اضافی به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. آب موجود در مخزن آب آزاد لایه بالایی در اثر جریان و نفوذ عمودی از بین می‌رود (Leisenring, 2011). لایه پایینی خاک شامل یک مخزن کشش آب (LZTWM) و دو مخزن آب آزاد (LZFPM) و (LZFSM) است. مخازن آب آزاد باعث حرکت آب به صورت عمودی به لایه بالایی خاک (جریان زیرقشری) و یا لایه پایینی خاک (جریان پایه) می‌گردد. مخازن آب آزاد منجر به تولید رواناب می‌شود. ضریب تخلیه در مخزن لایه بالایی خاک برای مخزن (UZFWM)،UZK است و برای لایه پایینی مخازن LZFPM و LZFSM به ترتیب LZPK و LZSK است. Rserve نیز کسر آب آزاد غیرقابل دسترس موجود در منطقه پایینی برای تعرق است.

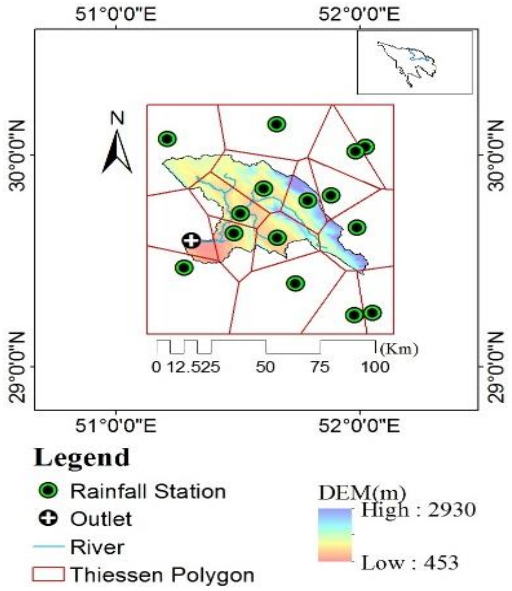


شکل ۲- نمایش پارامترهای مدلSacramento (Podger, 2004)

اجزای SAC-SMA عبارت‌اند از: آب تنشی، آب آزاد، جریان سطحی، زهکشی جانبی، تبخیر و تعرق (ET) و زهکشی عمودی (نفوذ). مدل توزیع رطوبت را به‌صورت فیزیکی واقع‌گرایانه در مناطق فرضی ستون خاک نشان می‌دهد. مدل سعی در حفظ ویژگی‌های نفوذ برای شبیه-سازی سهم جریان از یک حوضه دارد (Podger ,2004). در مدل Sacramento، از روش بهینه‌سازی Pattern Search Multi-Start برای تخمین پارامترهای مدل استفاده می‌گردد. روش مذکور با نمونه‌گیری اولیه از فضای هر پارامتر، پتانسیل پیدا کردن بهینه نهایی را بدون خطا و با نقاط از پیش تعیین شده فراهم می‌کند. در این روش برای هریک از نقاط شروع ممکن جستجوی الگو انجام می‌شود و بهترین حالت به‌عنوان جواب بهینه نهایی انتخاب می‌شود (Podger ,2004).

داده‌های مورد استفاده در پژوهش

ورودی مدل مفهومی Sacramento، متغیرهای اقلیمی بارش و تبخیروتعرق پتانسیل است. داده‌های دبی جریان در مقیاس زمانی روزانه (در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵) و از ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه دریافت شد. از آنجائی که مدل بارش-رواناب مذکور نیازمند متوسط وزنی بارش در سطح حوضه می‌باشد، بایستی از یک روش مناسب برای این منظور استفاده نمود (Blöschl and Grayson, 2001). در پژوهش حاضر و برای محاسبه ضریب وزنی مربوط به هر ایستگاه هواشناسی از روش پرکاربرد Thiessen استفاده بعمل آمد. در این روش، ابتدا نقاط بارش شبکه‌بندی شده و با رسم عمودمنصف‌های اضلاع، پلیگون‌هایی حاصل می‌شود که هر ایستگاه باران‌سنجی داخل یکی از آنها قرار می‌گیرد. در شکل (۳) پلیگون‌های Thiessen برای حوضه شاپور نمایش داده شده است. در مرحله بعد پلیگون‌های ایجاد شده بر اساس مرز حوضه برش خورده و مساحت هر چندضلعی محاسبه می‌شود و مطابق فرمول ۱ مقادیر متوسط بارش در سطح حوضه محاسبه می‌شود.



شکل ۳- پلیگون‌بندی Thiessen ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه شاپور

$$\bar{P}=\left(\frac{A_1}{A_T}\times TS_1\right)+\left(\frac{A_2}{A_T}\times TS_2\right)+\left(\frac{A_3}{A_T}\times TS_3\right)+\ldots+\left(\frac{A_n}{A_T}\times TS_n\right)$$ رابطه ۱)

که در آن:

$\bar{P}$ = متوسط وزنی بارش در سطح حوضه

$A_1, A_2, A_3, \ldots, A_n$ = مساحت چندضلعی‌های حاصل از پلیگون‌بندی به روش Thiessen

A_T = مساحت کل حوضه

$TS_1, TS_2, TS_3, \ldots, TS_n$ = سری زمانی بارش در محل هر کدام از ایستگاه‌های هواشناسی واقع در محدوده مطالعاتی

داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل

همانطور که در بخشهای قبل نیز عنوان شد، داده تبخیروتعرق یکی از داده‌های مهم ورودی به مدلهای بارش–رواناب مفهومی می‌باشد. در حال حاضر روشهای مختلف برای اندازه‌گیری و یا تخمین این مولفه اقلیمی وجود دارد که هر کدام از آنها نیازمند الزامات و داده‌های مختلفی هستند. در پژوهش حاضر به جای استفاده از روشهای مذکور (به علت عدم دسترسی به داده‌های ورودی روشهای مختلف و نیز عدم توزیع صحیح مکانی آنها در سطح حوضه) از داده‌های تبخیروتعرق پتانسیل شبیه‌سازی شده توسط مدلهای بازتحلیل شده جهانی مانند: W3RA، ORCHIDEE، WaterGAP3، PCR-GLOBWB و HBV-SIMREG استفاده گردید. برای دسترسی به داده‌های مذکور می‌توان از سامانه اطلاعاتی توسعه یافته توسط اتحادیه اروپا به نشانی https://wci.earth2observe.eu استفاده نمود. توان تفکیک مکانی داده‌های موجود در این سامانه در دو مقیاس ۰/۲۵ و ۰/۵۰ درجه می‌باشد و در تحقیق حاضر از داده‌های با ابعاد سلولی ۰/۲۵ درجه استفاده شده است. در ادامه به توضیح مختصری در مورد هر کدام از مدلهای بازتحلیل شده مذکور پرداخته شده است.

PCR-GLOBWB[۱] این مدل برای پیش‌بینی مولفه‌های هیدرولوژیکی فصلی، مدل‌سازی اثرات هیدرولوژیکی تغییرات آب و هوایی، مدل‌سازی تغییرات سطح آب تالاب‌ها، مدل‌سازی ذخیره آب زمینی و منابع آب جهانی در زمینه تنش آبی استفاده می‌شود (Van Beek و Bierkens، ۲۰۰۹).

W3RA[۲] توسط اداره هواشناسی استرالیا برای ارزیابی و محاسبه روزانه بیلان آب ارائه شده است (Koohi et al. 2020). سیستم ارزیابی منابع آب W3RA بر مبنای نمایشی از جزء هیدرولوژی مدل با سیستم AWRA است. AWRA-L ترکیب مدل سطح زمین مبتنی بر شبکه و مدل یکپارچه برای مدل کردن حوضه است که برای هر سلول به‌صورت جداگانه اعمال می‌شود (Dutra, 2015).

ORCHIDEE[۳] یک مدل سطح زمین که از ادغام مدل سطح زمین SECHIBA و مدل کربن و مدل گیاهی (Carbon and Vegetation model) STOMATE تشکیل شده است. ORCHIDEE (Bhuiyan, 2005 ; Krinner et al. 2018) یک ساختار پیچیده سطح زمین که از یک ماژول هیدرولوژیکی، روندیابی و ماژول دشت سیلابی تشکیل شده است.

HBV-SIMREG یک مدل ساده هیدرولوژیکی مفهومی است (Lindström et al. 1997).

WaterGAP3[۴] این مدل هیدرولوژیکی توسط محققین دانشگاه کسل آلمان توسعه داده شده است (Koohi et al. 2020). این مدل یک مدل بارش ـ رواناب توزیعی در مقیاس جهانی است(Eisner,2016).

پس از تهیه مقادیر تبخیروتعرق با استفاده از مدلهای بازتحلیل مختلف، مدل Sacramento برای محدوده مطالعاتی اجرا و خروجی آن با داده‌های دبی روزانه ثبت شده در خروجی حوضه مقایسه می‌گردد تا بهترین مدل بازتحلیل شده تبخیروتعرق مشخص گردد. در نهایت عملکرد مدل Sacramento در شبیه‌سازی و تخمین مولفه‌های هیدرولوژیکی مهمی همچون حجم رواناب روزانه، دبی‌های اوج روزانه و زمان رخداد دبی‌های اوج مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت تا مناسب‌ترین منبع تبخیروتعرق برای هر کدام از موارد مذکور مشخص گردد.

شاخص‌های آماری مورد استفاده در پژوهش

در این پژوهش به جهت ارزیابی کارایی مدل از شاخص‌های آماری جدول (۲) استفاده شده است. شاخص ارزیابی نش ـ ساتکلیف (NSE) نشان‌دهنده میزان شباهت بین رواناب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است. اگر این شاخص برابر یک باشد بیانگر مطابقت کامل داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است و اگر بین ۰/۱ تا یک باشد قابل قبول و اگر کوچک‌تر از صفر باشد نتیجه شبیه‌سازی غیرقابل قبول فرض می‌شود

---

۱ PCRaster Global Water Balance model

۲ Worldwide Water Resources Assessment

۳ Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems

۴ Water – Global Assessment and Prognosis-3

(Meng et al. 2017). DRMS نیز نشان‌دهنده مقدار متوسط خطا در برآورد دبی است و واحد این شاخص مترمکعب بر ثانیه است. شاخص PBias بیانگر انحراف داده‌های شبیه‌سازی شده است و مقادیر کم آن نشان‌دهنده شبیه‌سازی دقیق مدل است و واحد این شاخص نیز مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مقادیر مثبت، تخمین‌های کمتر از حد و مقادیر منفی این شاخص، تخمین بیش از حد را نشان می‌دهد. مقدار صفر بهترین مقدار و نشان دهنده عدم وجود اریب در داده‌های شبیه‌سازی شده است (Gupta et al. 1999). شاخص کلینگ گوپتا (KGE) (Gupta et al. 2009) نیز یکی از شاخص‌های ارزیابی است و هر چقدر به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر است. درصد خطا در برآورد دبی اوج (PEP) نیز نشان‌دهنده انحراف بین دبی اوج شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی است.

جدول ۲- شاخص‌های آماری مورد استفاده در پژوهش حاضر

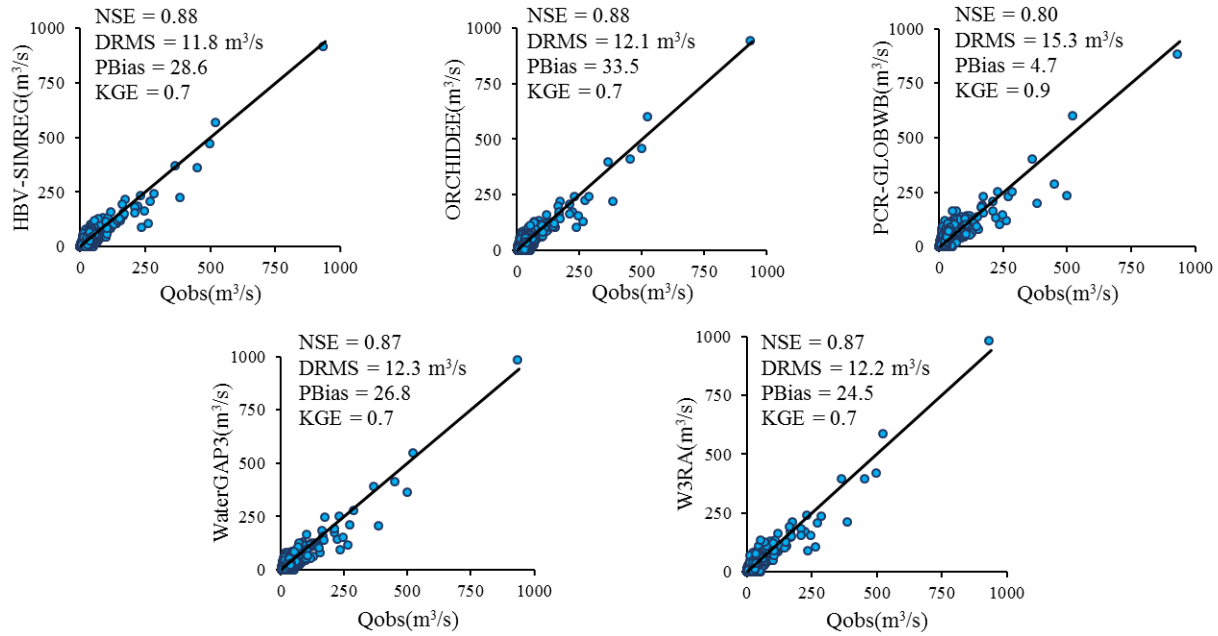
شاخص آماری	فرمول
نش ـ ساتکلیف	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$
متوسط خطا	$DRMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim} - Q_{obs})^2}$
اریبی	$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^{n} Q_{obs}} \times 100$
کلینگ گوپتا	$KGE = 1 - \sqrt{(\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (CC - 1)^2}$
درصد خطا دبی اوج	$PEP = (1 - \frac{Q_{sim}}{Q_{obs}}) \times 100$
درصد خطا حجم رواناب	$PEV = (1 - \frac{V_{sim}}{V_{obs}}) \times 100$

نتایج و بحث

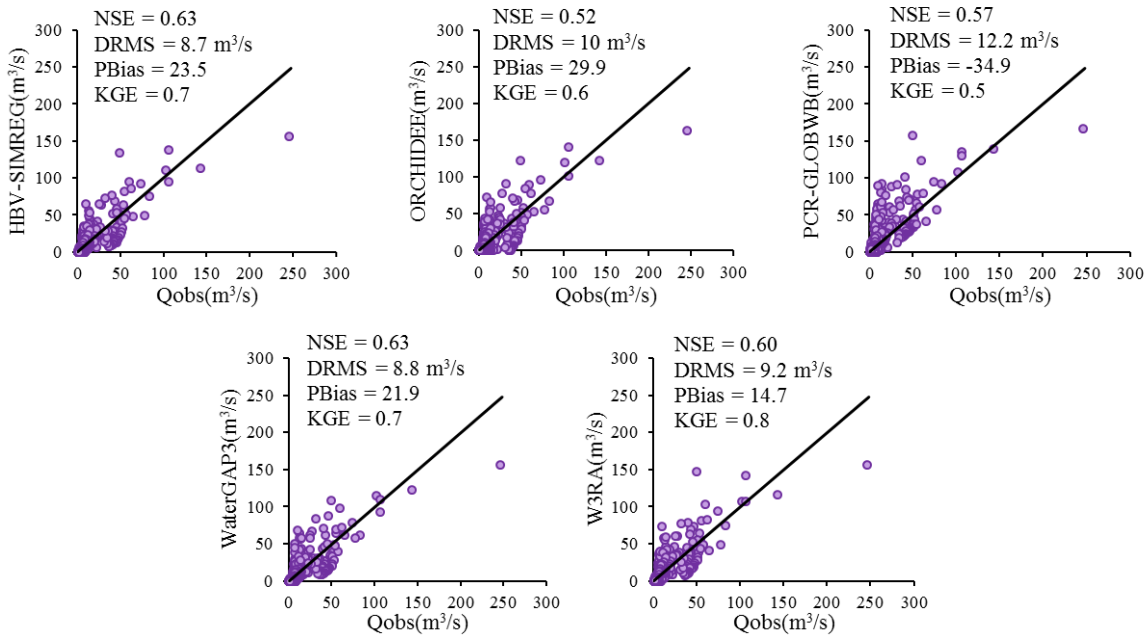
ارزیابی عملکرد داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل بدست آمده از مدلهای بازتحلیل شده مختلف بر عملکرد مدل Sacramento

به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل Sacramento به ترتیب از داده‌های دبی روزانه ثبت شده در بازه زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۴ و ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ استفاده شد. نتایج بدست آمده در دوره واسنجی (شکل ۴) نشان داد که داده‌های تبخیروتعرق بدست آمده از اکثر مدلهای بازتحلیل شده منجربه شبیه‌سازی مناسب دبی جریان می‌گردند. مقادیر شاخصهای آماری NSE و KGE به ترتیب در تمامی موارد همواره بزرگتر از ۰/۸۰ و ۰/۷ می‌باشند. همچنین داده‌های بدست آمده از مدلهای بازتحلیل شده PCR-GLOBW و W2EA به ترتیب با دارا بودن PBias معادل ۴/۷ و ۲۴/۵ درصد، منجربه ایجاد اریب کمتری در نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل Sacramento شده‌اند.

همچنین در دوره صحت‌سنجی (شکل ۵) و بر اساس شاخص KGE عملکرد داده‌های بدست آمده از مدل‌های HBV-SIMREG، WaterGAP3 و W3RA بسیار مناسب بوده و مقدار این شاخص همواره بالاتر از ۰/۷ می‌باشد. کمترین مقدار شاخص اریبی PBias متعلق به داده‌های مدل W3RA و بیشترین مقدار آن برای مدل PCR-GLOBWB است. بر اساس شاخص DRMS نیز نتایج بدست آمده از داده‌های تبخیروتعرق مدل‌های HBV-SIMREG، WaterGAP3 و W3RA به ترتیب با دارا بودن مقادیر ۸/۷، ۸/۸ و ۹/۲ مترمکعب بر ثانیه نسبت به سایر مدل‌ها دارای کمترین مقدار است. مقدار شاخص NSE نیز برای داده‌های بدست آمده از مدل‌های HBV-SIMREG، WaterGAP3 و W3RA بالای ۰/۶ است. علی‌رغم اینکه مدل PCR-GLOBW در دوره واسنجی دارای نتایج خوبی بوده اما در دوره صحت سنجی چندان مناسب عمل نکرده است. در جدول ۳ مقادیر شاخص‌های آماری تمامی مدلهای بازتحلیل شده ارائه شده است.



شکل ۴- مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی



شکل ۵- مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی

با توجه به توضیحات فوق، عملکرد مدل‌های بازتحلیل شده HBV-SIMREG، WaterGAP3 و W3RA نسبت به دیگر مدلها، منجربه عملکرد به مراتب بهتر مدل هیدرولوژیکی Sacramento شده‌اند. در نهایت از میان مدل‌های مذکور و بر اساس شاخص‌های آماری مختلف، مدل W3RA به عنوان مناسب‌ترین مدل بازتحلیل شده برای تخمین تبخیروتعرق انتخاب گردید. یافته‌های این پژوهش در تطابق مناسبی با نتایج حاصل از تحقیقات Salmani et al (2014) دارد. این محققین نیز با ارزیابی سه مدل AWBM، Sacramento و TANK در حوضه آبریز اراز کوسه گرگان به این نتیجه رسیدند که مدل Sacramento در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دارای عملکرد به مراتب بهتری نسبت به مدلهای دیگر می‌باشد. همچنین در زمینه ارزیابی منابع مختلف برآورد تبخیروتعرق نیز Azizian et al. (2020) با ارزیابی مدلهای بازتحلیل شده در اقلیم های مختلف به این نتیجه رسیدند که داده‌های بدست آمده از مدلهای HBV-SIMREG، WaterGAP3 و W3RA از بیشترین تطابق با داده‌های لایسیمتری برخوردار بوده و در حوضه‌های فاقد آمار از آنها می‌توان به عنوان یک منبع داده ارزشمند برای مطالعات خشکسالی، کشاورزی و هیدرولوژیکی استفاده نمود.

جدول ۳- شاخص‌های آماری مدل‌های بازتحلیل شده مختلف در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

شاخص آماری	منبع تبخیروتعرق	مرحله واسنجی	مرحله صحت‌سنجی
NSE (-)	HBV-SIMREG	0.88	0.63
	ORICHIDEE	0.88	0.52
	PC-GLOBW	0.80	0.57
	W3RA	0.87	0.60
	WaterGAP3	0.87	0.63
DRMS (m^3/sec)	HBV-SIMREG	11.80	8.70
	ORICHIDEE	12.11	10.0
	PC-GLOBW	15.30	12.2
	W3RA	24.50	14.7
	WaterGAP3	12.30	21.9
PBias (%)	HBV-SIMREG	28.60	23.5
	ORICHIDEE	33.50	29.9
	PC-GLOBW	4.70	-34.9
	W3RA	24.50	14.7
	WaterGAP3	26.80	21.9
KGE (-)	HBV-SIMREG	0.70	0.70
	ORICHIDEE	0.70	0.60
	PC-GLOBW	0.90	0.50
	W3RA	0.70	0.80
	WaterGAP3	0.70	0.70

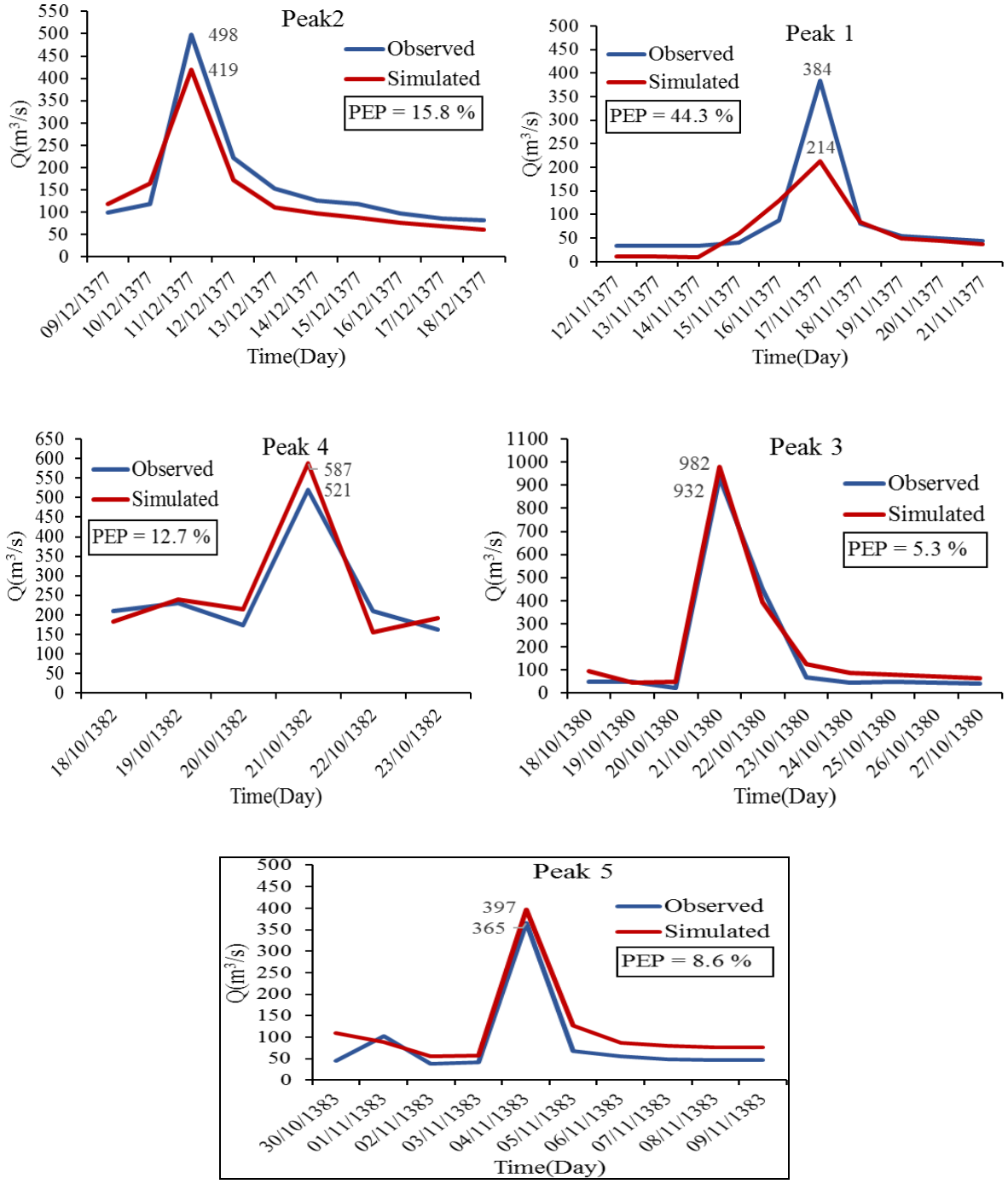
ارزیابی عملکرد مدل Sacramento در تخمین مولفه‌های هیدروگراف جریان روزانه

برای اینکه عملکرد مدل Sacramento در برآورد مولفه‌های مختلف هیدروگراف جریان روزانه (دبی اوج، زمان وقوع دبی اوج و حجم سیلاب) نیز مورد ارزیابی قرار داد، پنج سیلاب با دبی بزرگتر از ۳۶۰ مترمکعب بر ثانیه در حوضه آبریز شاپور و تاریخ‌های ۱۳۷۷/۱۱/۱۷، ۱۳۷۷/۱۲/۱۱، ۱۳۸۰/۱۰/۲۱، ۱۳۸۲/۱۰/۲۱ و ۱۳۸۴/۱۱/۴ انتخاب گردید. محاسبات صورت گرفته در مرحله واسنجی حاکی از آن است که در عمده بازه‌های زمانی، عملکرد مدل Sacramento در تخمین دبی اوج روزانه بسیار قابل قبول بوده و متوسط خطا در برآورد این مولفه مهم هیدرولوژیکی چیزی در حدود ۱۱ درصد می‌باشد. همچنین در مرحله صحت‌سنجی نیز مقدار این خطا به کمتر از ۲۰ درصد محدود می‌گردد. اگرچه مدل مذکور یک مدل بیلان می‌باشد ولی ترکیب آن با داده‌های تبخیروتعرق بازتحلیل شده و نیز ساختار مناسب مدل Sacramento منجربه تخمین بسیار مناسب دبی-های پیک روزانه می‌گردد. نکته مهم دیگر، توانائی بالای مدل در تخمین زمان رخداد دبی‌های اوج جریان روزانه می‌باشد، که با توجه به عملکرد قابل قبول آن در تخمین دبی‌های پیک از کارائی مناسبی در سامانه‌های هشدار و پیش‌بینی سیلاب می‌تواند برخوردار باشد. در تمامی سیل‌های مورد ارزیابی، مقدار اختلاف زمانی بین دبی اوج مشاهداتی و شبیه‌سازی صفر می‌باشد و این به خوبی گویای عملکرد بسیار مناسب این مدل هیدرولوژیکی می‌باشد. در شکل‌های (۶) و (۷)، کارائی مدل Sacramento در تخمین دبی اوج جریان روزانه سیلابهای مختلف در مرحله واسنجی و صحت-سنجی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در صورت استفاده از داده‌های مناسب ورودی همچون داده تبخیروتعرق می‌توان عملکرد مدلهای هیدرولوژیکی را تا حد زیادی ارتقا داد.

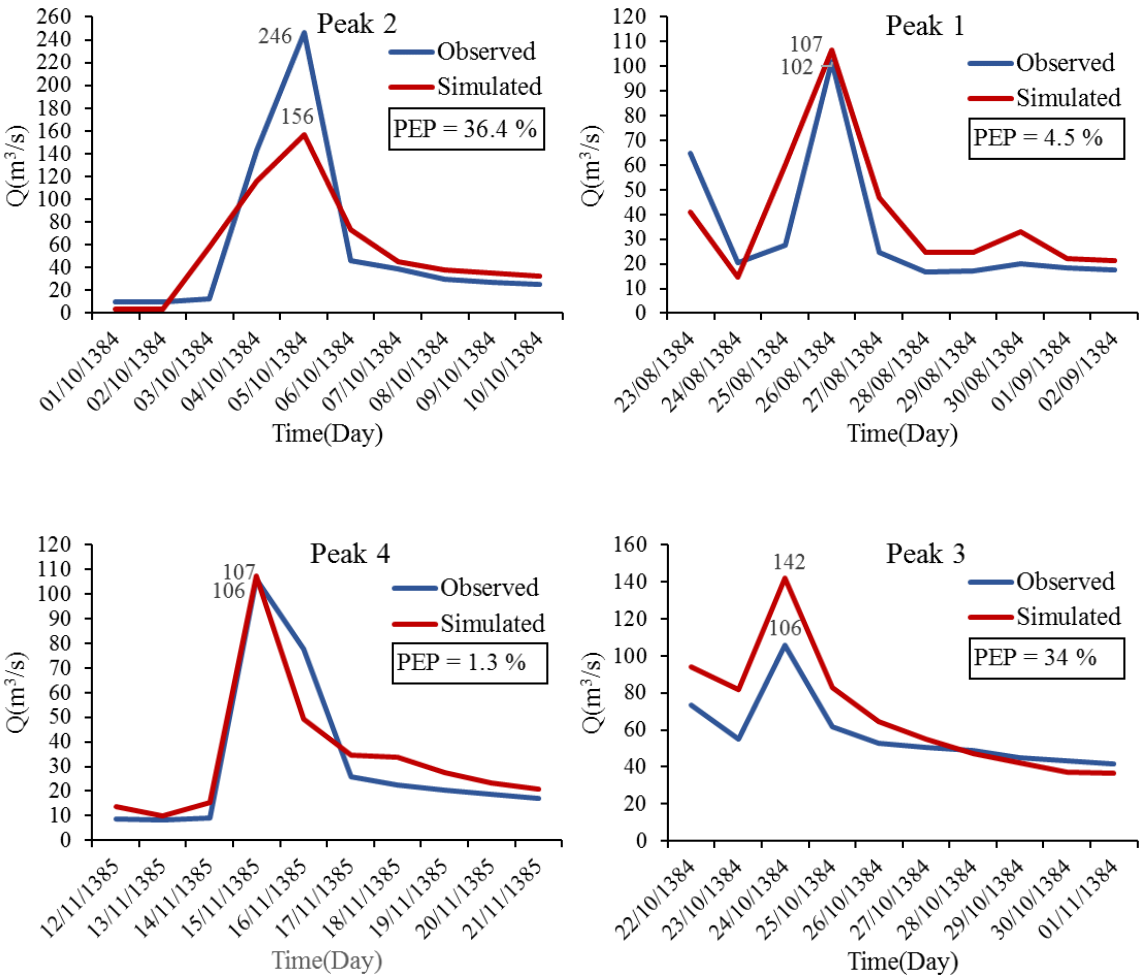
یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که تاکید بر پیوسته بودن یا رخدادمحور بودن یک مدل هیدرولوژیکی نمی‌تواند تضمینی بر کاربرد آن برای یک مقصد خاص (مانند شبیه‌سازی بیلان یا رخدادهای سیلابی) باشد. آنچه که از اهمیت بالائی برخوردار می‌باشد، اندرکنش مناسب بین داده-های ورودی، ساختار مدل و پارامترهای ورودی آن می‌باشد. ترکیب مناسب این عوامل می‌تواند یک مدل مفهومی بیلان را در حد یک مدل رخدادمحور (که توانائی مناسبی برای تخمین دبی‌های بالا و زمان رسیدن به دبی اوج سیلاب دارد) ارتقا دهد. در همین راستا Qi et al. (2016) با ارزیابی منابع بارشی مختلف برای شبیه‌سازی رواناب به این نتیجه رسید که لزوماً عملکرد مناسب در تخمین بارش نمی‌تواند تضمین کننده عملکرد مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی رواناب باشد و اندرکنش صحیح بین ساختار مدل هیدرولوژیکی و منبع بارشی می‌تواند تا حدود زیادی، عدم قطعیت خروجی مدل را کاهش دهد.

در نهایت ارزیابی عملکرد مدلهای مختلف در برآورد حجم رواناب روزانه نیز حاکی از آن است که داده‌های بدست آمده از دو مدل بازتحلیل شده W3RA و Water GAP در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی از عملکرد مناسبی در تخمین میزان آوردهای جریان روزانه برخوردار می-باشند. طبق محاسبات، میزان خطا در برآورد حجم رواناب روزانه در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در صورت استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق مدل

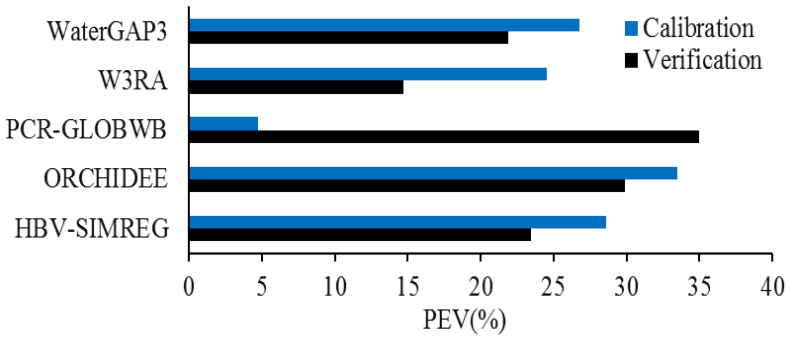
W3RA به ترتیب در حدود ۲۴/۵ و ۱۴/۷ درصد می‌باشد. بطورکلی نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های مدل بازتحلیل شده W3RA در دوره واسنجی و صحت‌سنجی دارای نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها است. هم‌چنین مدل ORCHIDEE نیز با مقادیر درصد خطای بالای ۳۰ درصد، دارای عملکرد نسبتاً ضعیفی نسبت به سایر مدل‌های بازتحلیل شده است. نتایج بدست آمده در هماهنگی خوبی با تحقیقات پژوهشگران دیگر می‌باشد. به عنوان مثال، Koohi et al. (2020) به ارزیابی کارائی داده‌های تبخیروتعرق بدست آمده از مدلهای بازتحلیل شده W3RA، GLEAM و HBV بر حجم رواناب روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل توزیعی VIC-3L پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در صورت استفاده از داده‌های مذکور حجم رواناب روزانه شبیه‌سازی شده به کمتر از ۱۴ درصد محدود می‌گردد. همچنین بررسی هیدروگراف‌های جریان روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل مفهومی Sacramento با استفاده از منابع تبخیر و تعرق بازتحلیل شده، حاکی از عملکرد بسیار مناسب این منابع در شبیه‌سازی بازوی پایین‌رونده هیدروگراف جریان روزانه می‌باشد. از علت‌های اصلی آن نیز می‌توان به اهمیت و تاثیر بالای تبخیر و تعرق نسبت به سایر پارامترها بر بیلان حوضه بویژه در مواقعی که رطوبت خاک کم است، اشاره نمود.



شکل ۶- ارزیابی عملکرد مدل Sacramento در تخمین دبی‌های اوج سیلاب (مرحله واسنجی)



شکل ۷- ارزیابی عملکرد مدل Sacramento در تخمین دبی‌های اوج سیلاب (مرحله صحت‌سنجی)



شکل ۸- ارزیابی عملکرد مدل Sacramento در تخمین حجم رواناب روزانه در داده‌های مختلف

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارائی داده‌های تبخیروتعرق بدست آمده از مدلهای بازتحلیل شده جهانی برای شبیه‌سازی رواناب با مدل مفهومی Sacramento در حوضه شاپور به انجام رسیده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که داده‌های تبخیروتعرق بدست آمده از مدلهای بازتحلیل شده HBV-SIMREG، WaterGAP3 و W3RA از عملکرد مناسبی جهت شبیه‌سازی دبی جریان برخوردار می‌باشند و مقادیر شاخص‌های آماری NSE و KGE همواره بالاتر از ۰/۷ می‌باشد. بررسی عملکرد مدل در تخمین حجم رواناب نیز نشان دهنده این موضوع است که داده‌های بدست آمده از دو مدل بازتحلیل شده W3RA و Water GAP در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی از عملکرد مناسبی در تخمین میزان آوردهای جریان برخوردار می‌باشند. همچنین داده‌های بدست آمده از مدل ORCHIDEE نیز با مقادیر درصد خطای بالای ۳۰ درصد، دارای عملکرد نسبتاً

ضعیفی نسبت به سایر مدل‌های بازتحلیل شده است.

از میان مدل‌های مذکور و بر اساس شاخص‌های آماری مختلف، مدل W3RA به عنوان مناسب‌ترین مدل بازتحلیل شده برای تخمین تبخیروتعرق و استفاده از آن به عنوان ورودی مدل مفهومی Sacramento انتخاب گردید. برای اینکه بهتر بتوان عملکرد داده‌های مذکور را بر خروجی مدل Sacramento مورد ارزیابی قرار داد، چندین دبی اوج در هیدروگراف جریان روزانه شناسائی و با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید. محاسبات صورت گرفته حاکی از آن است که در عمده بازه‌های زمانی، عملکرد مدل Sacramento در تخمین دبی اوج جریان بسیار قابل قبول بوده و متوسط خطا در برآورد این مولفه مهم هیدرولوژیکی چیزی در حدود ۱۱ درصد می‌باشد. نکته مهم دیگر، توانائی بالای مدل در تخمین زمان رخداد دبی‌های اوج می‌باشد. یافته‌های این پژوهش به خوبی گویای این مطلب است که مولفه‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدلهای بازتحلیل شده را می‌توان به عنوان یک داده جایگزین و یا مکمل برای داده‌های زمینی به ویژه در مطالعات منابع آب، مدلسازی هیدرولوژیکی و حتی پایش وضعیت خشکسالی مدنظر قرار داد. ایران به عنوان یک کشور در حال توسعه با مشکلات متعددی از جمله عدم وجود یک شبکه منظم پایش زمینی مولفه‌های اقلیمی–هیدرولوژیکی (همچون بارش، دما، تبخیروتعرق، رطوبت خاک، دبی جریان و . . .) روبرو می‌باشد و لذا استفاده از داده‌های مبتنی بر مشاهداتی جهانی می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی در حوضه‌های دارای آمار کم و حتی فاقد آمار زمینی مناسب مدنظر محققین قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abbott M. B., Bathurst J. C., Cunge J. A., O'Connell P. E. and Rasmussen J. (1986) An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europ ` een (SHE): 1. History and philosophy of a physically- ´ based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87:45–59.

Beven K. J., Warren R. and Zaoui J. SHE. (1987) Towards a methodology for physically-based distributed forecasting in hydrology. *Int. Assoc. Sci. Hydrol.* Publ. No., 129:133–137.

Bhuiyan, M.A.E. (2018). Uncertainty of Global Precipitation Datasets and Its Propagation in Hydrological Simulations (Doctoral dissertation, University of Connecticut).

Devia, G.K., Ganasri, B.P. and Dwarakish, G.S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic procedia*, 4, 1001-1007.

d'Orgeval, T., Polcher, J., and de Rosnay, P. (2008). Sensitivity of the West African hydrological cycle in ORCHIDEE to infiltration processes, *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 12, 1387-1401, doi:10.5194/hess-12-1387-2008.

Dutra, E. (2015). Report on the current state-of-the-art Water Resources Reanalysis, *Earth2observe deliverable* no. D. 5.1.

Eisner, S. (2016). Comprehensive evaluation of the WaterGAP3 model across climatic, physiographic, and anthropogenic gradients (Doctoral dissertation).

Grayson, R. and Blöschl, G. (2001). Spatial patterns in catchment hydrology: *observations and modelling*. CUP Archive.

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.

Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic engineering*, 4(2), 135-143.

Haddeland, I., Clark, D.B., Franssen, W., Ludwig, F., Vo, F., Arnell, N.W., Bertrand, N., Best, S., Gerten, D. and Gomes, S. (2011). Multimodel estimate of the global terrestrial water balance: Setup and first results. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 869-884.

Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K. and Herrnegger, M. (2018). Rainfall–runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6005-6022.

Krinner, G., Viovy, N., N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., F riedlingstein, P., Ciais, P., Stich, S., and Prentice, I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupledatmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cy*, 19 (1), 10-25.

Leisenring, M. (2011). Implications of Hydrologic Data Assimilation in Improving Suspended Sediment Load Estimation in Lake Tahoe, *California*.

Li, H., Zhang, Y., Chiew, F.H.S., Xu, S. (2009). Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinanjiang model with MODIS leaf area index. *Journal of hydrology*, 370 (1–4), 155–162.

Li, Y., Grimaldi, S., Pauwels, V.R. and Walker, J.P. (2018). Hydrologic model calibration using remotely sensed soil moisture and discharge measurements: The impact on predictions at gauged and ungauged locations. *Journal of hydrology*, 557, 897-909.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of hydrology*, 201(1-4), 272-288.

Meng, X.Y., Wang, H., Cai, S.Y., Zhang, X.S., Leng, G.Y., Lei, X.H., Shi, C.X., Liu, S.Y. and Shang, Y. (2017). The China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model (CMADS) application in China: *A case*

study in Heihe river basin.

Muthuwatta, L.P. et al. (2009). Calibration of a semi-distributed hydrological model using discharge and remote sensing data. In: Yilmaz, K.K. et al. (Eds.), New Approaches to Hydrologiocal Prediction in Data-Sparse Regions. *IAHS, Hydrabad*, 52–58.

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.

Ngo-Duc, T., Laval, K., Ramillien, G., Polcher, J., and Cazenave, A. (2007). Validation of the land water storage simulated by Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE) with Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data, *Water Resour. Res*, 43, 4-20.

Perrin, C., Michel, C. and Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289.

Podger, G., 2004. Rainfall runoff library user guide. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.

Qi, W., et al. (2016). Evaluation of global fine-resolution precipitation products and their uncertainty quantification in ensemble discharge simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 903–920.

Sood, A. and Smakhtin, V. (2015). Global hydrological models: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 60(4), 549-565.

Van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P. (2009). The Global Hydrological Model PCR-GLOBWB: Conceptualization, Parameterization and Verification. *Department of Physical Geography*, Faculty of Earth Sciences Utrecht University.