



Development of a Daily Rainfall-Runoff Model to Simulate the Bukan Reservoir Inflow and Quantify the Effects of Severe Historical Drought Using WEAP Model and Multi-Objective Calibration

A. Meydani^{1*}, A. Dehghanipour², and M. Tajrishy³

Abstract

Urmia Lake has faced a water shortage crisis and a sharp decline in water level due to decreasing precipitation and increasing water consumption in the agricultural sector. This study aims to develop a hydrological model to simulate the daily inflow of Bukan reservoir and simulate the water balance components for the upstream sub-basins of this reservoir through a new approach. In this study, two separate storages are considered for daily simulation of snow and root zone soil moisture, and multi-objective calibration (MOPSO) is applied to simultaneously maximize the simulation accuracy of observed river discharge and logarithm of river discharge. The results showed a relatively little trade-off between maximizing the two objective functions to estimate the optimal value of the calibration parameters. In other words, there is no significant error in the model that simultaneously prevents improving both objective functions. Results showed that the average Nash-Sutcliffe criterion for simulation of river discharge and the logarithm of river discharge were respectively 0.43 and 0.63 in the calibration and 0.54 and 0.57 in the validation step. Water balance modeling indicated that precipitation and inflow to the reservoir were decreased respectively by 32% and 40% in severe drought years and soil moisture and snow accumulation were reduced by 32% and 158%, respectively, compared to the long-term period. The developed model can predict the effects of climate change and climate variability on Bukan reservoir inflow and optimally allocate reservoir water to satisfy water demand.

Keywords: Urmia Lake basin, Bukan Reservoir, Multi-objective Optimization, Soil Moisture Method.

Received: May 13, 2021

Accepted: October 2, 2021

توسعه مدل هیدرولوژیکی روزانه بارش- رواناب برای شبیه‌سازی آب ورودی به سد بوکان و کمی‌سازی تأثیرات خشکسالی شدید تاریخی با به کارگیری مدل WEAP و کالیبراسیون چند هدفه

امیررضا میدانی^{۱*}، امیرحسین دهقانی‌پور^۲ و مسعود تاجریشی^۳

چکیده

با افزایش خشکسالی‌ها و افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی، دریاچه ارومیه با بحران کم آبی روبرو شده است. هدف این تحقیق، توسعه یک مدل هیدرولوژیکی به منظور شبیه‌سازی روزانه رواناب ورودی به سد بوکان است تا از آن برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در زیرحوضه‌های بالادست این سد با نگرشی نوین نسبت به تحقیقات مشابه استفاده شود. با استفاده از روش رطوبت خاک، یک مخزن برای شبیه‌سازی روزانه ذخیره برف و مخزن دیگر برای شبیه‌سازی روزانه رطوبت منطقه ریشه در نظر گرفته می‌شود. به منظور تخمین مقدار بهینه پارامترهای کالیبراسیون، از کالیبراسیون دو هدفه MOPSO^۱ برای بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی دبی و لگاریتم دبی مشاهداتی استفاده شده است. نتایج نشان داد بین به حداکثر رساندن دو تابع هدف موازنه کمی وجود دارد، در واقع هیچ خطای بزرگی در مدل وجود ندارد که مانع از بهبود هم‌زمان هر دو تابع هدف شود. نتایج کالیبراسیون نشان می‌دهد که مقدار میانگین معیار نش-سانکلیف^۲ زیرحوضه‌های بالادست سد بوکان برای شبیه‌سازی دبی و لگاریتم دبی مشاهداتی به ترتیب برابر ۰/۴۳ و ۰/۶۳ و این مقادیر برای مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۵۴ و ۰/۵۷ بدست آمد. مدل‌سازی بیلان آب حاکی از آن است که بارش و رواناب ورودی به سد در دوره خشکسالی شدید به ترتیب ۳۲ و ۴۰ درصد و رطوبت خاک و ذخیره برف در منطقه به ترتیب ۱۵۸ و ۳۲ درصد نسبت به دوره بلندمدت کاهش یافته‌اند. مدل توسعه یافته می‌تواند به منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد و برنامه‌ریزی برای تخصیص بهینه منابع آب سد بوکان مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه، سد بوکان، بهینه‌سازی چند

هدفه، روش رطوبت خاک

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۰

1- M.Sc. Student of Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: amir.meydani@sharif.edu

2- Researcher of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Email: A.Dehghanipour@tudelft.nl

3- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: tajrishy@sharif.edu

*- Corresponding Author

Dor: [10.1001.1.17352347.1400.17.3.8.3](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.8.3)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۲- پژوهشگر مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و علوم زمین، دانشگاه صنعتی دلفت هلند.

۳- استاد گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکان‌پذیر است.



۱- مقدمه

شود. در مطالعه‌ای یک مدل بارش- رواناب با مقیاس ماهانه برای زیرحوضه آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود توسعه داده و پارامترهای کالیبراسیون این مدل به صورت تک‌هدفه و با استفاده از روش PEST برآورد شد، در نهایت، نتیجه‌گیری نشان داد که این مدل از قابلیت خوبی در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک برخوردار است (Ahmadaali et al., 2017). در ادامه با به کارگیری مدل‌های GCM و مدل بارش- رواناب ماهانه توسعه داده شده، نتیجه‌گیری شد که تغییر الگوی کشت به همراه افزایش راندمان آبیاری باعث بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی و کشاورزی در دوره‌های آبی خواهد شد (Ahmadaali et al., 2018).

Dehghanipour et al. (2020b) با به کارگیری یک مدل یکپارچه شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، سناریوهای بهینه را به منظور بهینه‌سازی همزمان آب ورودی به دریاچه ارومیه و سود کشاورزی در دشت میاندوآب ارائه نمودند. در این تحقیق، سناریوهای بهینه با فرض قطعی بودن^۴ شرایط اقلیمی و رواناب ورودی به سد بوکان شناسایی شدند. این داده‌ها مربوط به دوره تاریخی ۳۰ ساله ۱۹۸۴-۲۰۱۳ هستند که شامل دوره‌های مختلف خشکسالی است. محققان این مقاله در انتها به این موضوع که تغییر اقلیم در آینده منجر به تغییر و عدم قطعیت در رواناب ورودی به سد بوکان و برنامه‌ریزی مرتبط با آن می‌شود، اشاره کردند. در نتیجه، آنها توسعه یک مدل بارش- رواناب برای زیر حوضه‌های بالادست سد بوکان پیشنهاد دادند تا با استفاده از آن بتوان اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد بوکان و شناسایی سناریوهای بهینه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به این رواناب‌ها را در نظر گرفت.

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که با افزایش تعداد توابع هدف در فرآیند کالیبراسیون، عدم قطعیت مربوط به تخمین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی کاهش یافته و در نتیجه منجر به بهبود عملکرد مدل هیدرولوژیکی می‌شود (Her and Seong, 2018; Schoups et al., 2005). (Mostafazadeh and Alizadeh (2020) یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب با مقیاس ماهانه و با فرض قطعی بودن^۴ شرایط اقلیمی و رواناب رودخانه‌ها برای زیرحوضه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود توسعه دادند و پارامترهای این مدل برنامه‌ریزی منابع آب را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه کالیبره کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد بهتری برای کالیبراسیون مدل به همراه دارد.

در طول دو دهه اخیر نگرش یکپارچه در مدیریت منابع آب بیشتر شده است، به طوری که دیگر نیازهای مختلف تأمین آب، مسائل اقتصادی،

بخش کشاورزی، به منظور تأمین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان، بزرگترین مصرف کننده منابع آب به‌شمار می‌رود و حدوداً ۷۰ درصد برداشت از منابع آب شیرین سطحی و زیرزمینی به آبیاری در بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2013). افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی، منجر به ایجاد فشار بر منابع آب موجود برای تأمین نیازهای زیست‌محیطی و منجر به افزایش رقابت برای تأمین آب بین بخش‌های کشاورزی و زیست‌محیطی در اقصی نقاط جهان شده است (Dunn et al., 2003; Xue et al., 2017). رقابت بین این دو بخش با تغییر اقلیم، خشکسالی و سوءمدیریت منابع آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک تشدید می‌شود (Mancosu et al., 2015; Valipour, 2015; Valipour et al., 2015) و اثرات نامطلوبی از جمله تخریب اکوسیستم و بدنه‌های آبی طبیعی مانند دریاچه‌ها و تالاب‌ها را به همراه داشته است (Sisto, 2009). دریاچه ارومیه در شمال غربی کشور، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های شور دنیا از این موضوع مستثنی نبوده است. متأسفانه در طول ۲۵ سال اخیر، سدسازی و برداشت بی‌رویه از آب‌های سطحی برای تأمین آب بخش کشاورزی در حوضه آبریز ارومیه از یک سو و اثرات نامطلوب تغییر اقلیم و خشکسالی در این حوضه از سوی دیگر، باعث کاهش جریان آب در پایین‌دست رودخانه‌ها شده و در نتیجه، کاهش تراز و کوچک شدن دریاچه ارومیه را به همراه داشته است (Dehghanipour et al., 2020a; Schulz et al., 2020).

رودخانه زرینه‌رود در جنوب دریاچه ارومیه با تأمین ۴۰ درصد از آب ورودی به دریاچه ارومیه، به‌عنوان اصلی‌ترین تأمین‌کننده نیاز زیست‌محیطی این دریاچه شناخته می‌شود (Ghaehri et al., 1999). در بالادست زرینه‌رود سد مخزنی بوکان به عنوان بزرگ‌ترین مخزن حوضه آبریز ارومیه قرار دارد که آب ورودی از ۴ رودخانه ساروق، سقر، خورخوره و زرینه‌رود وارد این مخزن می‌شود. سد مخزنی بوکان به دلیل تنظیم سیلاب، تأمین آب شرب تبریز و بوکان، تأمین نیاز کشاورزی دشت‌های کشاورزی صابین قلعه و میاندوآب به عنوان یک مخزن استراتژیک محسوب می‌شود (Ministry of Energy, 2016). (Emami and Koch (2019) اثرات تغییرات اقلیم بر رواناب ماهانه رودخانه زرینه‌رود را با استفاده از مدل‌های چرخه عمومی جو (GCM) و با به کارگیری مدل هیدرولوژیکی SWAT بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که رواناب رودخانه زرینه‌رود در بالادست مخزن سد بوکان، تا سال ۲۰۲۹ در حدود ۱۷ تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد و لازم است برنامه‌ریزی‌های لازم برای کاهش اثرات تغییر اقلیم به‌کار گرفته

سد بوکان پرداخته‌اند؛ اما این مدل‌ها پیچیده هستند و به داده‌های ورودی زیادی نیاز دارند و پارامترهای کالیبراسیون آنها زیاد است. از آنجا که داده‌های مورد نیاز این مدل‌ها در منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری نمی‌شود، از فرضیات ساده‌کننده‌ای برای تعیین این داده‌ها و پارامترهای مورد نیاز مدل استفاده شده است که منجر به ایجاد خطا و عدم قطعیت در شبیه‌سازی رواناب ورودی به سد بوکان می‌شود (Emami and Koch, 2019). در این تحقیق از روش رطوبت خاک که مدلی پیچیده برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در منطقه ریشه (شامل نیاز آبیاری، تبخیر و تعرق واقعی، رواناب سطحی، زیرسطحی و نفوذ به آب زیرزمینی) است استفاده شده است، اما در عین حال در مقایسه با مدل‌های پیچیده دیگر همچون SWAT به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد که تمامی آن‌ها در منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری می‌شود و پارامترهای مدل که نیاز به فرآیند کالیبراسیون دارد، تعداد محدودی است. لازم به ذکر است که در این تحقیق، مدل رطوبت خاک با مقیاس روزانه به کار گرفته می‌شود که دقت بیشتری برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب نسبت به تحقیقات گذشته با مقیاس ماهانه دارد (Dehghanipour et al., 2019). (۴) در اکثر تحقیقات گذشته از کالیبراسیون تک‌هدفه برای تخمین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی در زیرحوضه‌های بالادست سد بوکان استفاده شده است (Emami and Koch, 2019). این در حالی است که استفاده از کالیبراسیون چندهدفه در مقابل کالیبراسیون تک‌هدفه، باعث کاهش عدم قطعیت در تخمین پارامترهای کالیبراسیون می‌شود (Roodari et al., 2020; Schoups et al., 2005). تعیین توابع هدف کالیبراسیون چندهدفه خود یکی از مهمترین گام‌های توسعه مدل هیدرولوژیکی است، در مواردی به علت تنوع کم داده‌های مشاهداتی، عدم وجود داده‌های رطوبت خاک و تراز آب زیرزمینی و نیز آینده‌ی کم رودخانه‌های زیرحوضه، باید از رویکردی منحصر بفرد برای تعیین توابع هدف استفاده نمود. در این بین استفاده از رویکردهایی مانند معکوس دبی (Pushpalatha et al., 2012) و یا لگاریتم دبی (Oudin et al., 2006; Roodari et al., 2020) انتخاب‌های مناسبی برای توابع هدف هستند. به همین دلیل در تحقیق حاضر، علاوه بر بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی دبی مشاهداتی، بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی لگاریتم دبی مشاهداتی نیز به عنوان توابع هدف کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفت تا مقادیر دبی‌های پایه رودخانه به مقادیر تأثیرگذار در فرآیند کالیبراسیون تبدیل شود. در این تحقیق فرآیند کالیبراسیون با استفاده از مدل بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO و با اتصال دینامیکی مدل MATLAB به مدل WEAP انجام شده است.

اجتماعی و سایر موارد مربوط به منابع آب در کنار هم مورد توجه قرار می‌گیرند؛ همین امر موجب گسترش ابزارهای محاسباتی، مدل‌های نوین شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی سیستم‌های منابع آب شده است (Mukhtarov, 2007). در سال ۱۹۸۸، مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب WEAP توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم برای برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب توسعه داده شد (Yates et al., 2009). مدل WEAP با موفقیت برای توسعه مدل‌های هیدرولوژیکی و مدل‌های برنامه‌ریزی جامع منابع آب در بسیاری از مناطق دنیا مانند کالیفرنیا (Mehta et al., 2013)، اتیوپی (Adgolign et al., 2016)، یونان (Psomas et al., 2016)، چین (Faiz et al., 2018) و ایران (Abrishamchi et al., 2007) به کار گرفته شده است. مدل WEAP این امکان را دارد تا با الگوریتم‌های بهینه‌سازی به صورت یکپارچه (Fowe et al., 2015; Vonk et al., 2014) یا برای شبیه‌سازی توزیعی آب زیرزمینی به صورت دینامیکی به مدل MODFLOW متصل شود (Dehghanipour et al., 2019; Le Page et al., 2012; Nouiri et al., 2015).

به‌طور کلی این تحقیق در مقایسه با تحقیقات گذشته دارای نوآوری‌های زیر است. (۱) اکثر تحقیقات گذشته که هدف آنها ارائه سناریوهای بهینه برای دشت کشاورزی میاندوآب و صابین‌قلعه بوده است، با فرض قطعی بودن شرایط اقلیمی و رواناب رودخانه‌ها، از داده‌های تاریخی ورودی به سد بوکان استفاده کردند (Dehghanipour et al., 2020b; Mostafazade and Alizadeh, 2020). این در حالی است که تغییر اقلیم در آینده منجر به تغییر در متغیرهای اقلیمی مانند دما، بارش، برف و تبخیر و تعرق می‌شود که به نوبه خود منجر به تغییر و عدم قطعیت در رواناب ورودی به سد بوکان و برنامه‌ریزی مرتبط با آن می‌شود. بنابراین هدف این تحقیق، توسعه یک مدل بارش-رواناب برای زیرحوضه‌های بالادست سد بوکان است که با استفاده از آن بتوان اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد بوکان را در نظر گرفت و سناریوهای بهینه متناظر با رواناب پیش‌بینی شده را شناسایی کرد. (۲) به دلیل وجود مناطق کوهستانی در بالادست سد بوکان، ذخیره‌های برف در این مناطق وجود دارد که لازم است در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه مورد توجه قرار گیرد. شبیه‌سازی ذخیره برف نیازمند به‌کارگیری یک مخزن برف با مقیاس روزانه در مدل هیدرولوژیکی است و در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است؛ این در حالی است که اکثر تحقیقات گذشته به مدل‌سازی رواناب رودخانه زرینه‌رود با مقیاس ماهانه پرداختند و شبیه‌سازی ذخیره برف را در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در نظر نگرفته‌اند (Mostafazade and Alizadeh, 2020). (۳) اگرچه برخی از تحقیقات به توسعه مدل بارش-رواناب برای زیرحوضه‌های بالادست

پایین دست، بیش از ۴۰ درصد از کل جریانات زیست محیطی سالانه به دریاچه ارومیه را تأمین می کند و از اهمیت بالایی برای تأمین نیاز زیست محیطی این دریاچه برخوردار است (Ghaheeri et al., 1999). بزرگترین سد مخزنی حوضه آبریز ارومیه یعنی سد بوکان با حجم ذخیره ۶۵۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۹۷۱ (۱۳۵۰ شمسی) بر روی زربینه رود ساخته شد؛ در سال ۲۰۰۵ (۱۳۸۴ شمسی) به منظور افزایش نیازهای آبی و افزایش حجم استراتژیک در زمان های خشکسالی، پروژه افزایش ارتفاع سد به میزان ۲/۵ متر در بدنه و ۵ متر در سرریز انجام شد تا گنجایش حجمی آن به ۸۰۸ میلیون مترمکعب افزایش یابد. علاوه بر زربینه رود، جریان رودخانه های ساروق، خورخوره و سقر وارد مخزن سد بوکان می شود (شکل ۱). در سال های اخیر رشد و توسعه برداشت آب از رودخانه های بالادست سد، موجب کاهش جریان ورودی به سد بوکان شده است که عمده آن در بخش کشاورزی با مصرف سالیانه ۱۶۰ میلیون متر مکعب می باشد. افزایش مصرف در بالادست به همراه افزایش نیازهای کشاورزی پایین دست، موجب تخصیص های نامناسب به نیاز زیست محیطی دریاچه ارومیه شده است. به علت عدم وجود تصفیه خانه های فاضلاب در شهرهای بالادست سد بوکان، پساب تولید شده شهرها و روستاهای بالادست که سالیانه برابر ۲۸ میلیون مترمکعب می باشد، وارد چاه های جذبی می گردد که در نهایت نیمی از پساب های تولیدی به رودخانه ها راه پیدا می کند (Ministry of Energy, 2016).

(۵) از مدل هیدرولوژیکی توسعه داده شده به منظور نگرشی نوین در شبیه سازی مؤلفه های بیلان آب با مقیاس روزانه در بالادست مخزن سد بوکان به کار گرفته شده است. این شبیه سازی شامل شبیه سازی مؤلفه های بیلان آب در بلندمدت و همچنین کمی سازی اثرات شدیدترین خشکسالی در طول ۵۰ سال اخیر در جنوب غرب آسیا و خاورمیانه (شامل سال های ۱۹۹۹، ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸) بر مؤلفه های بیلان آب در این منطقه است (Barlow et al., 2016).

۲- روش شناسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت تقریبی ۵۱۷۶۰ کیلومتر مربع در ناحیه کوهستانی شمال غرب ایران واقع شده است و یکی از پرآب ترین و بزرگترین حوضه های آبریز بسته ایران محسوب می شود. دریاچه ارومیه در کانون این حوضه قرار دارد و محل جمع آوری آب های سطحی کل حوضه است. رودخانه های متعددی از اطراف وارد دریاچه ارومیه می شوند که می توان به زربینه رود، سیمینه رود، آجی چای، قلعه چای، صوفی چای، گدارچای، مهابادچای، باراندوزچای، نازلوچای، شهرچای و زولاچای اشاره کرد. در تحقیق حاضر، حوضه آبریز زربینه رود در بالادست سد بوکان به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است که موقعیت آن در شکل ۱ نشان داده شده است. رودخانه زربینه رود با متوسط تخلیه سالانه حدود ۲۰۰۰ میلیون مترمکعب در

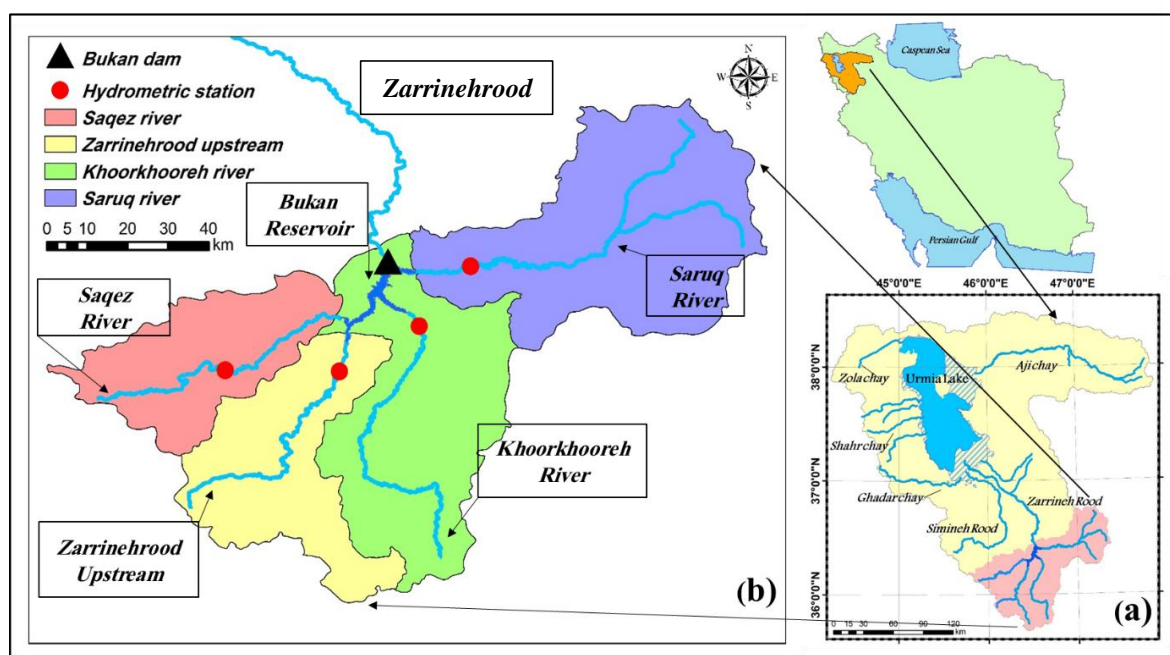


Fig. 1- Location of Urmia Lake basin, its main rivers, and study area (a); the location of study area catchments, its rivers, and Bukan reservoir

شکل ۱- جانمایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، رودخانه های اصلی آن و منطقه مورد مطالعه (a)؛ محل زیرحوضه های مورد بررسی بالادست سد بوکان، رودخانه های منتهی به سد و سد بوکان (b)

۲-۲- مدل‌سازی بارش- رواناب بر پایه روش رطوبت خاک^۵

برای محاسبه رواناب ورودی به سد بوکان حاصل از بارش و ذوب برف و شبیه‌سازی معادلات و پارامترهای بیلان آب، از مدل مخزن برف و مدل رطوبت خاک استفاده شده است. شکل ۲، نشان‌دهنده یک شکل مفهومی از مدل مخزن برف و مدل رطوبت خاک استفاده شده در تحقیق حاضر می‌باشد. پارامترهای ارائه شده در این شکل برای هر دو مخزن برف و رطوبت خاک به ترتیب در جدول ۱ و ۲ به‌طور کامل بررسی شده‌اند و روابط مربوط به محاسبه آن‌ها ارائه شده است. معادلات بیلان آب بصورت روزانه در مدل مخزن برف و مدل رطوبت خاک برای هر زیرحوضه اعمال شده است، به‌طوری‌که هر مؤلفه بیلان آب باعث تغییرات در ذخیره‌سازی مخزن برف و مخزن رطوبت خاک برای منطقه ریشه می‌شود. مؤلفه ورودی به مخزن برف شامل بارش و خروجی آن شامل بارش مؤثر (P_e) حاصل از بارندگی و ذوب برف است (جدول ۱). بارش‌ها با توجه به دمای محیط و مقایسه آن با دمای انجماد (T_F) و ذوب (T_M) در نهایت به‌صورت بارش مؤثر (P_e) وارد مخزن رطوبت خاک می‌شود. مؤلفه ورودی به مخزن رطوبت خاک در منطقه ریشه، شامل بارش مؤثر (P_e) و مؤلفه‌های خروجی شامل تبخیر و تعرق واقعی (ET_{act})، آبیاری ($Q_{ISW} + Q_{IGW}$)، رواناب سطحی (Q_{sur})، جریان زیرسطحی (Q_{int}) و نفوذ به آب‌زیرزمینی (Q_r) است. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده، این مؤلفه‌ها بر پایه توابع تجربی و بر حسب مقدار رطوبت نسبی خاک^۶ که با نماد $Z1$ نمایش داده شده است، محاسبه می‌شوند. مقدار $Z1$ بین ۰ تا ۱ متغیر است که

این دو عدد به ترتیب متناظر با خاک خشک و اشباع هستند (Sieber and Purkey, 2015). در این تحقیق، معادلات تجربی برای روش رطوبت خاک دارای ۶ پارامتر کالیبراسیون در مخزن برف و مخزن رطوبت خاک است. این پارامترها در مخزن برف عبارتند از (۱) دمای انجماد و نگهداشت برف (T_F) و (۲) دمای ذوب کامل برف (T_M)، و در مخزن رطوبت خاک عبارتند از (۳) ضریب مقاومت تشکیل رواناب (RRF) که رواناب سطحی را کنترل می‌کند به‌طوری‌که مقادیر بزرگ RRF باعث تولید رواناب سطحی کمتری می‌شود، این ضریب به پوشش گیاهی بستگی دارد. (۴) ضریب هدایت منطقه ریشه (K) که تابعی از جنس خاک است. (۵) درصد رطوبت اولیه لایه بالایی خاک ($Z1$) و (۶) ظرفیت نگهداشت آب در خاک (SWC).

۲-۳- ساختار پیاده‌سازی مدل رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق برای مدل‌سازی بارش- رواناب از روش رطوبت خاک در مدل WEAP با مقیاس روزانه استفاده شد. از جمله جزئیات این روش، پارامترها و معادلات اصلی در بخش قبل ارائه شده است. برای این منظور، حوضه آبریز زرینه‌رود در بالادست سد بوکان به ۴ زیرحوضه برای ۴ رودخانه زرینه‌رود، ساروق، خورخوره و سقز تقسیم‌بندی (شکل ۱- b) و برای هر یک از این زیرحوضه‌ها یک حوضه آبریز در مدل WEAP در نظر گرفته شد.

Table 1- Water balance equations and variables of snow storage

جدول ۱- معادلات و پارامترهای بیلان آب ذخیره برف

Variable	Unit	Equation or input data
Effective precipitation	L/T	$P_e = P_i m_c + m_r$ (Calculated based on separating total precipitation into rainfall and snowmelt)
Snowmelt coefficient	-	$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_F \\ 1 & T_i > T_M \\ \frac{T_i - T_F}{T_M - T_F} & T_F < T_i < T_M \end{cases}$
Amount of snow accumulation	L/T	$Ac_i = Ac_{i-1} + (1 - m_c) P_i$
Amount of melted snow	L/T	$m_r = Ac_i m_c$
Observed precipitation	L/T	P_i
Freezing point	Celsius	T_F : Calibration parameter
Melting point	Celsius	T_M : Calibration parameter
Observed temperature	Celsius	T_i

Table 2- Water balance equations and variables of soil storage

جدول ۲- معادلات و پارامترهای بیلان آب ذخیره خاک

Variable	Unit	Equation or input data
Storage change	L ³ /T	$\frac{\Delta S_{tz}}{\Delta t} = SWC.A \frac{\Delta z}{\Delta t} = P_e A - ET_{act}.A - Q_{sur} - Q_{int} - Q_r + Q_{ISW} + Q_{IGW}$
Relative soil water content	-	$z_{t+1} = z_t + \Delta z$
Actual evapotranspiration	L/T	$ET_{ac} = (PET) K_c \left(\frac{5z_1 - 2z_1^2}{3} \right)$
Surface runoff	L ³ /T	$Q_{sur} = (Q_{ISW} + Q_{IGW} + P_e A) z^{RRF}$
Interflow	L ³ /T	$Q_{int} = f K z^2 A$
GW recharge	L ³ /T	$Q_r = (1-f) K z^2 A$
Irrigation with surface water	L ³ /T	Q_{ISW}
Irrigation with GW	L ³ /T	Q_{IGW}
Effective precipitation	L/T	P_e (This is calculated from Table 1)
Irrigated area for each crop in each zone	L ²	A
Potential Evapotranspiration	L/T	PET (Using the method of Penman-monteith (Sieber and Purkey, 2015))
Crop coefficient	-	K_c
Runoff resistance factor	-	RRF: Calibration parameter
Preferred flow direction	-	$f = 1$ (There is no GW in the area, based on the Yekom consulting engineers' report (Ministry of Energy, 2016))
Root zone conductivity	L/T	K : Calibration parameter
Soil water capacity	L	SWC: Calibration parameter
Relative soil water content	-	z_1 : Calibration parameter

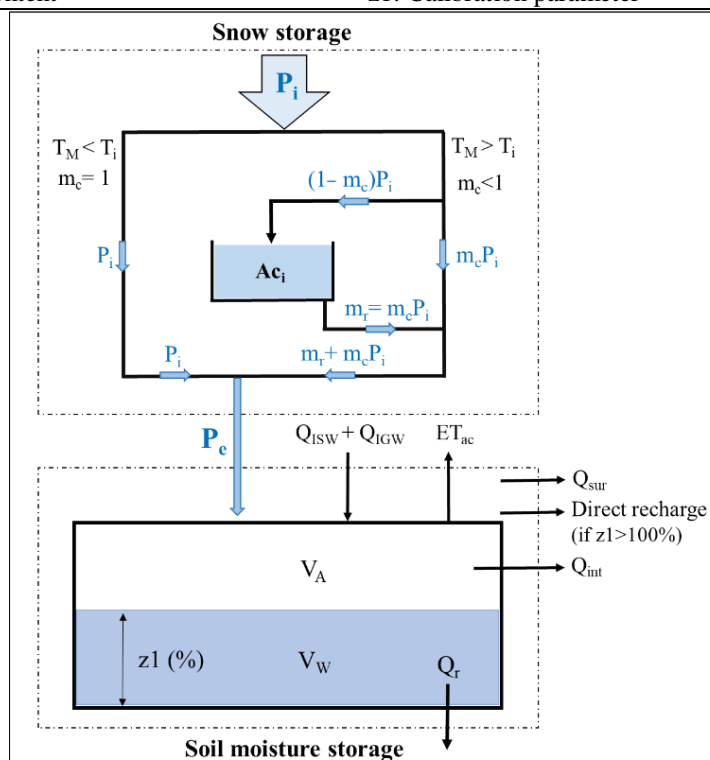


Fig. 2- Schematic diagram of the function of soil moisture model including snow and soil moisture storages

شکل ۲- نمودار طرح کلی از کارکرد مدل رطوبت خاک شامل مخزن برف و رطوبت خاک

کالیبراسیون استفاده شده است. بارش‌ها در بالادست سد بوکان از اواسط بهار تا اواسط پاییز نزدیک به صفر بوده و آب ورودی به سد بوکان در این ماه‌های گرم سال از ذوب برف تأمین می‌شود. بنابراین، دبی رودخانه‌ها در این ایام کم و در برخی از اوقات نزدیک به صفر است. به همین دلیل بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی لگاریتم دبی مشاهداتی، تأثیر دبی‌های پایه رودخانه را در فرآیند کالیبراسیون پررنگ‌تر می‌کند و در مقابل بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی دبی مشاهداتی تأثیر دبی‌های بزرگتر را در فرآیند کالیبراسیون پررنگ‌تر می‌نماید.

$$NSE_Q = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_s^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

$$NSE_{LogQ} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\text{Log}Q_s^t - \text{Log}Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (\text{Log}Q_o^t - \overline{\text{Log}Q_o})^2} \quad (2)$$

در این معادلات، Q_s^t و Q_o^t به ترتیب بیانگر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در گام زمانی t ، \bar{Q}_o میانگین دبی مشاهداتی در کل دوره می‌باشد (Roodari et al., 2020). خروجی کالیبراسیون دو هدفه یک جبهه پارتو است که با استفاده از معادله ۳ که همان حداقل فاصله اقلیدسی است، بهترین جواب ممکن از بین جبهه‌های پارتو گزارش می‌شود (Hrachowitz and Clark, 2017).

$$ED = \sqrt{(1 - NSE_Q)^2 + (1 - NSE_{LogQ})^2} \quad (3)$$

در این تحقیق، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)، برای کالیبراسیون دو هدفه مدل هیدرولوژیکی استفاده شده است. دلیل انتخاب این الگوریتم سرعت همگرایی بالا برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است.

هریک از این رودخانه‌ها تأمین‌کننده نیاز زیرحوضه خود هستند و از طرف دیگر به علت کوهستانی بودن منطقه، آبخوان مشخصی در این زیرحوضه‌ها وجود ندارد (Ministry of Energy, 2016). در فرآیند مدل‌سازی با مدل رطوبت خاک، مصارف بخش کشاورزی و زهاب برگشتی از این مناطق در نظر گرفته شده است. داده‌های هواشناسی مورد نیاز این مدل شامل بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی است که این داده‌ها از سازمان هواشناسی و وزارت نیرو تهیه شده است. اطلاعات کاربری اراضی مورد نیاز با توجه به گزارشات ستاد احیای دریاچه ارومیه و گزارشات فائو وارد شده است (FAO and RS center of Tarbiat Modarres University, 2015). کاربری اراضی غالب در منطقه مورد مطالعه در سه گروه اراضی دیم، آبی و مرتع و سهمی مطابق جدول ۳ دارد.

۴-۲- کالیبراسیون چندهدفه با الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO

توابع هدف استفاده شده در این تحقیق شامل بیشینه‌سازی دقت دبی و لگاریتم دبی شبیه‌سازی شده در مقابل دبی و لگاریتم دبی مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری و بر پایه معیار نش^۵ است (معادله ۱ و ۲). در این تحقیق از کالیبراسیون چندهدفه برای فرآیند کالیبراسیون استفاده شده است که کاهش عدم قطعیت تعیین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی را در مقایسه با فرآیند کالیبراسیون تک هدفه به همراه دارد. از آنجا که در بالادست سد بوکان آبخوان معینی وجود ندارد، داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری، تنها داده‌های موجود برای تعیین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی است. به همین دلیل با به کارگیری رویکرد (Roodari et al., 2020)، در مطالعه حاضر از بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی دبی و لگاریتم دبی به عنوان توابع هدف

Table 3- Area and land cover classification of catchments
جدول ۳- مساحت و نوع سطح زیر کشت زیرحوضه‌ها (Ministry of Energy, 2016)

Catchment	Hydrometric station	Crop		Orchard		Rainfed	Rangeland
		Area [km ²]	No. categories	Area [km ²]	No. categories	Area [km ²]	Area [km ²]
Saruq river	Safakhaneh	37	4*	39.5	5**	312.5	2013.7
Khoorkhooreh river	Darrepanbedan					218.6	1622.7
Zarrinehrood upstream	Polesaheb	150.8	7***	37.5	5**	149.8	1224.1
Saqez river	Qabqabloo					239.7	858.6
Total Area [km ²]		187.8		77		920.6	5719.1

*Crops include alfalfa, barley, vegetable and wheat.

**Orchards include apple, conifer tree, grapes, stone fruits and walnut.

***Crops include alfalfa, barley, bean, sugarbeet, sunflower, vegetable and wheat.

استفاده از معادله ۵ به روزرسانی شود. الگوریتم MOPSO از یک مکانیسم نزدیکی-تصادفی برای انتخاب R_h استفاده می‌کند. سرعت بالای الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO ممکن است به سمت جبهه نادرستی از پارتو همگرا شود. برای غلبه بر این مشکل و به عنوان آخرین مرحله در هر تکرار، یک عملگر نخبه‌گرایی-جهش^۷ به منظور ارتقاء قابلیت جستجوی جامع الگوریتم و تنوع بخشیدن به مجموعه جواب‌های پارتو استفاده می‌شود. برای مطالعه جزئیات بیشتر برای الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO به مقاله (Coello et al. (2004) مراجعه نمایید.

دوره کالیبراسیون برای سال آبی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ و به مدت ۱۱ سال در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور اعتبارسنجی مدل دوره آبی ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ به مدل داده شد تا علاوه بر اعتبار سنجی مدل، سال‌های خشک را نیز در بر گیرد.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

در این مطالعه از کامپیوتری با پردازنده مرکزی (CPU) با سرعت 2.8 GHz و حافظه RAM برابر با 16 GB استفاده شده است. در فرآیند کالیبراسیون، هر اجرای مدل WEAP در دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۳ و با گام زمانی روزانه به همراه محاسبات توابع هدف کالیبراسیون در محیط MATLAB به طور متوسط ۳۵ ثانیه به طول انجامیده است. از زمان مذکور، حدود ۳۰ ثانیه به اجرای مدل WEAP و حدود ۵ ثانیه به فراخوانی نتایج شبیه‌سازی جریان آب‌سطحی در محیط MATLAB، محاسبه توابع هدف کالیبراسیون و معرفی پارامترهای کالیبراسیون جدید اختصاص داشته است. به عنوان نمونه، مدل پیوند داده شده WEAP و MATLAB برای زیرحوضه ساروق در مدت ۵ روز، ۱۴۵۰۰ بار اجرا شد تا نتایج بهینه‌سازی همگرا شود.

شکل ۳ به عنوان نمونه‌ای از نتایج بهینه‌سازی الگوریتم MOPSO برای زیرحوضه ساروق^۸ ارائه شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که موازنه^۲ کمی بین دو تابع هدف وجود دارد و بهبود یک تابع هدف تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد تابع هدف دیگر ندارد.

این الگوریتم با الهام از رفتار دسته‌جمعی پرواز پرندگان ارائه شده و مبتنی بر جمعیت بوده که ترکیبی از یادگیری فردی و رفتارهای اجتماعی است. در الگوریتم MOPSO، یک مخزن خارجی برای ذخیره و نگهداری مجموعه‌های پارامتر غیرمغلوب یا جواب‌های نامغلوب در فضای جستجو وجود دارد (Coello et al., 2004).

این الگوریتم با تولید جمعیت اولیه ذرات x_i شروع می‌شود، به طوری که هر ذره دارای یک مجموعه n بعدی برای n پارامتر کالیبراسیون است. برای مثال در این تحقیق، هر ذره یک مجموعه ۶ پارامتری از پارامترهای کالیبراسیون مخزن برف و مخزن رطوبت خاک $\{SWC, K, RRF, z1, T_F, T_M\}$ است (جدول ۱ و ۲ را مشاهده نمایید) که حد بالا و پایین آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. تمام پارامترهای کالیبراسیون بوسیله توابع هدف NSE_Q و NSE_{logQ} با یکدیگر مقایسه شده و ذرات نامغلوب در مخزن خارجی ذخیره می‌شوند. مجموعه پارامترهای هر ذره متعاقباً از طریق تکرار t تا $t+1$ با استفاده از معادلات ۴ و ۵ به روزرسانی می‌شود تا در نهایت مدل بهینه‌ساز به سمت حداکثر NSE_Q و NSE_{logQ} برای ذرات پیش رود.

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + r_1 [P_i(t) - x_i(t)] + r_2 [R_h(t) - x_i(t)] \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t) \quad (5)$$

در رابطه بالا w یک ضریب ثابت و برابر با 0.4 ، r_1 و r_2 اعداد تصادفی یکنواخت بین 0 تا 1 و P_i بهترین عملکرد برای پارامتر کالیبراسیون فعلی برای ذره i است. R_h پارامتری است که از مخزن خارجی در هر تکرار t انتخاب شده و $v_i(t)$ سرعت فعلی ذره i است. مقدار اولیه P_i برابر با مجموعه پارامترهای اولیه ذره i است و سپس بدین صورت به روزرسانی می‌شود: (۱) اگر $P_i(t)$ فعلی بر پارامتر جدید $x_i(t+1)$ غالب باشد، در نتیجه $P_i(t+1) = P_i(t)$ ، (۲) اگر پارامترهای ذره جدید $x_i(t+1)$ بر $P_i(t)$ غالب باشد، در نتیجه $P_i(t+1) = x_i(t+1)$ ، (۳) اگر هیچکدام از $P_i(t)$ و $x_i(t+1)$ بر یکدیگر غالب نباشند، یکی از آن‌ها به صورت تصادفی برای $P_i(t+1)$ انتخاب می‌شود. در مخزن خارجی مدل MOPSO، چندین مجموعه پارامتر غیرغالب به یک اندازه خوب ذخیره می‌شود. یکی از مجموعه پارامترهای ذخیره شده در مخزن توسط الگوریتم به عنوان R_h انتخاب می‌شود تا سرعت هر ذره با

Table 4- Calibration parameters and their threshold for multi-objective optimization

جدول ۴- پارامترهای کالیبراسیون و حدود بالا و پایین برای کالیبراسیون دو هدفه

Calibration parameter	SWC [mm]	RRF	K [mm/day]	$z1^1$	$T_{Freezing}$ [Celcius]	$T_{Melting}$ [Celcius]
Range	[50:1500]	[0:20]	[0:300]	[5:45]	[-2.5:2.5]	[-2.5:10]

¹ Initial value of $z1$ at the beginning of simulation

تعیین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی (پارامترهای متناظر با نقطه B) در مقایسه با فرآیند کالیبراسیون تک هدفه (پارامترهای متناظر با نقطه A) می‌شود.

شکل ۴ نشان دهنده نمودار پراکندگی توابع هدف در مقابل پارامترهای کالیبراسیون برای زیرحوضه ساروق^۷ می‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد با افزایش SWC، ابتدا مقادیر دو تابع هدف زیاد شده و سپس کم می‌شوند، به طوری که مقدار بهینه در نوک قله و نزدیک به ۳۰۰ میلی‌متر رخ می‌دهد. پراکندگی نقاط در نمودار K و z1 در سمت چپ نمودار برای هر دو تابع هدف آشکار است، این موضوع نشان می‌دهد که مقادیر بهینه برای این دو پارامتر، به حد پایین در نظر گرفته شده در جدول ۴ نزدیکتر است. در تفسیر نتیجه z1 که متناظر با رطوبت نسبی خاک در اولین روز شبیه‌سازی (۱ اکتبر) است؛ از آنجایی که بارش تنها مؤلفه آب ورودی به زیرحوضه‌هاست و در اول اکتبر (۹ مهر) بارش کمی در منطقه رخ می‌دهد، مقدار رطوبت اولیه خاک کم است. در تفسیر نتیجه K نیز می‌توان گفت که به دلیل کوهستانی بودن منطقه، نفوذپذیری خاک و به تبع آن مقدار K کم است.

این موضوع نشان‌دهنده این است که هیچ خطای بزرگی در مدل وجود ندارد که مانع از بهبود هم‌زمان شبیه‌سازی دبی رودخانه و لگاریتم دبی رودخانه شود. این درحالی است که اگر کالیبراسیون تک‌هدفه برای تخمین پارامترهای کالیبراسیون به کار گرفته می‌شد، خطا و عدم قطعیت زیادی را برای تخمین پارامترهای کالیبراسیون به همراه داشت. برای مثال سه نقطه A، B و C متناظر با ماکزیمم‌سازی دقت شبیه‌سازی لگاریتم دبی، حداقل فاصله اقلیدسی و بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی دبی است. برای نمونه، اگر از کالیبراسیون تک‌هدفه برای بیشینه‌سازی NSE_{LogQ} استفاده می‌شد، مقدار NSE_{LogQ} برابر با ۰/۵۵ به دست می‌آمد (متناظر با نقطه A) که در مقایسه با مقدار متناظر با کمترین فاصله اقلیدسی در کالیبراسیون دوهدفه که ۰/۵۴ است (نقطه B)، اندکی بیشتر است؛ اما مقدار NSE_Q در کالیبراسیون تک‌هدفه برابر با ۰/۲ بود (نقطه A) که با مقدار متناظر با کمترین فاصله اقلیدسی در کالیبراسیون دوهدفه که برابر با ۰/۵۵ است (نقطه B) اختلاف خیلی زیادی دارد. این نتایج نشان می‌دهد که اگر از کالیبراسیون چندهدفه برای فرآیند کالیبراسیون استفاده شود منجر به کاهش عدم قطعیت

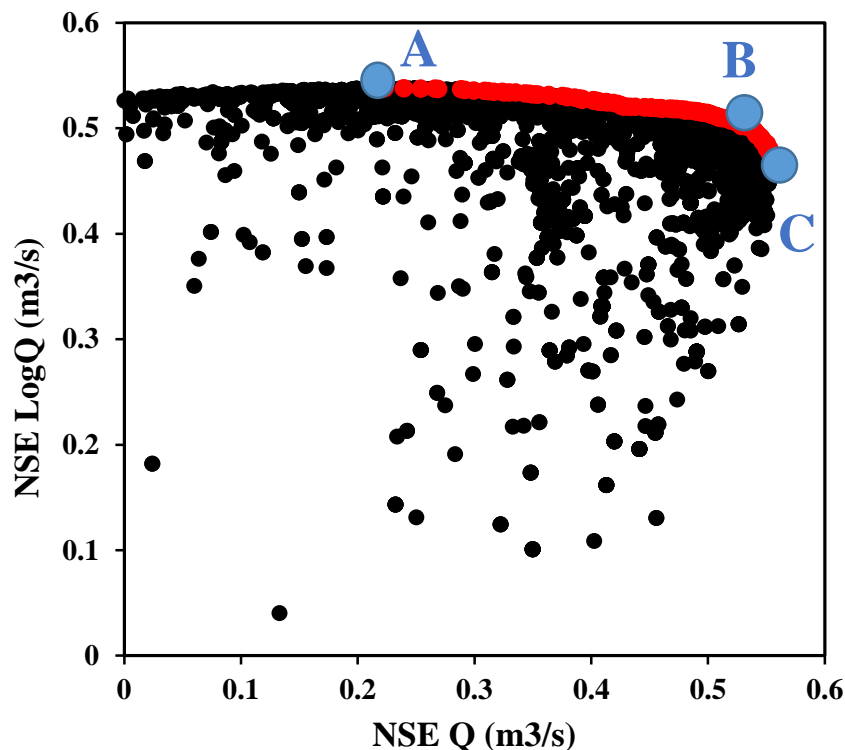


Fig. 3- Pareto plot for Saruq river sub-basin, each point shows one simulation of WEAP model, and red points are pareto front.

شکل ۳- نمودار پارتو برای بهینه‌سازی چندهدفه زیرحوضه ساروق، هر نقطه نشانگر یک بار شبیه‌سازی در WEAP و نقاط قرمز نشانگر جبهه پارتو است.

حوضه‌های مختلف نزدیک به حد پایین به دست آمده‌است. در نهایت مقادیر بهینه SWC و RRF با توجه به شرایط زیرحوضه برای مخزن رطوبت خاک متناظر با هر زیر حوضه نتیجه شد.

جدول ۶ نشانگر شاخص NSE زیرحوضه‌ها برای شبیه‌سازی روزانه دبی و لگاریتم دبی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی آن‌ها ارائه شده است. اکثر نتایج به دست آمده در این جدول از ۰/۵ بیشتر است و از آنجا که این تحقیق به شبیه‌سازی روزانه دبی و لگاریتم دبی پرداخته نسبت به تحقیقات مشابه که عدد ۰/۵ را برای شبیه‌سازی دبی ماهانه مناسب می‌دانند، نتیجه و عملکرد بهتری را به دست آورده است (Moriasi et al., 2007)؛ برای نمونه، در تحقیقات گذشته برای شبیه‌سازی دبی رودخانه ساروق با گام زمانی ماهانه، مقدار NSE را برابر با ۰/۴ گزارش کرده‌اند (Emami and Koch, 2019). درحالی که خطا در هنگام کار با گام زمانی روزانه به مراتب بیش‌تر است؛ بنابراین کالیبراسیون با توابع هدف بیشه‌سازی دقت شبیه‌سازی دبی و لگاریتم دبی مشاهداتی عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است.

در شکل ۵ سری زمانی دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی رودخانه ساروق به عنوان نمونه ارائه شده است. نتایج NSE جدول ۶ و سری زمانی مقایسه دبی مدل و مشاهداتی شکل ۵ نشان می‌دهد مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی دوره‌های تر و خشک هر سال آبی و همچنین شبیه‌سازی دوره‌های خشکسالی و تر سالی دارد.

با توجه به شکل ۴، مقادیر NSE حساسیت بالایی به دماهای انجماد و ذوب برف دارد و این نتیجه نشان می‌دهد که سرد بودن منطقه در زمستان باعث می‌شود تا بیشتر بارش‌ها بصورت برف ذخیره شده و این برف‌ها دیرتر ذوب و به رواناب تبدیل شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انباشت برف عاملی تأثیرگذار در معادله بیلان آب و رواناب رودخانه در این منطقه است.

مقدار یک پارامتر کالیبره شده لزوماً در هر زیرحوضه با یکدیگر برابر نیست و مدل بسته به شرایط فیزیکی هر زیرحوضه، مقادیر بهینه متفاوتی را برای پارامترهای کالیبراسیون تعیین کرده است. مقادیر بهینه پارامترهای کالیبراسیون در زیرحوضه‌های Zarrineh و Saqez river, upstream و Saruq river به ازای بیشه‌سازی NSE و NSE_{LogQ} و کمترین فاصله اقلیدسی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در هر سه حالت، دمای انجماد (T_F) و ذوب (T_M) بهینه شده برای مخزن برف این زیرحوضه‌ها نزدیک به حد بالای این پارامترها در جدول ۴ است که این موضوع کوهستانی بودن منطقه مطالعاتی، انجماد زود هنگام بارش در زمستان و دیر ذوب شدن برف در بهار را نشان می‌دهد. همچنین، پارامترهای Z1 و K برای مخزن رطوبت خاک این زیرحوضه‌ها به حد پایین آن‌ها در جدول ۴ نزدیک است. Z1 رطوبت نسبی اولیه خاک در اول اکتبر (اواسط مهر) است که به دلیل بارش کم در این زمان مقدار آن نزدیک به حد پایین برای زیر حوضه‌های مختلف به دست آمده و به دلیل کوهستانی و کم بودن نفوذپذیری خاک منطقه، مقدار K برای زیر

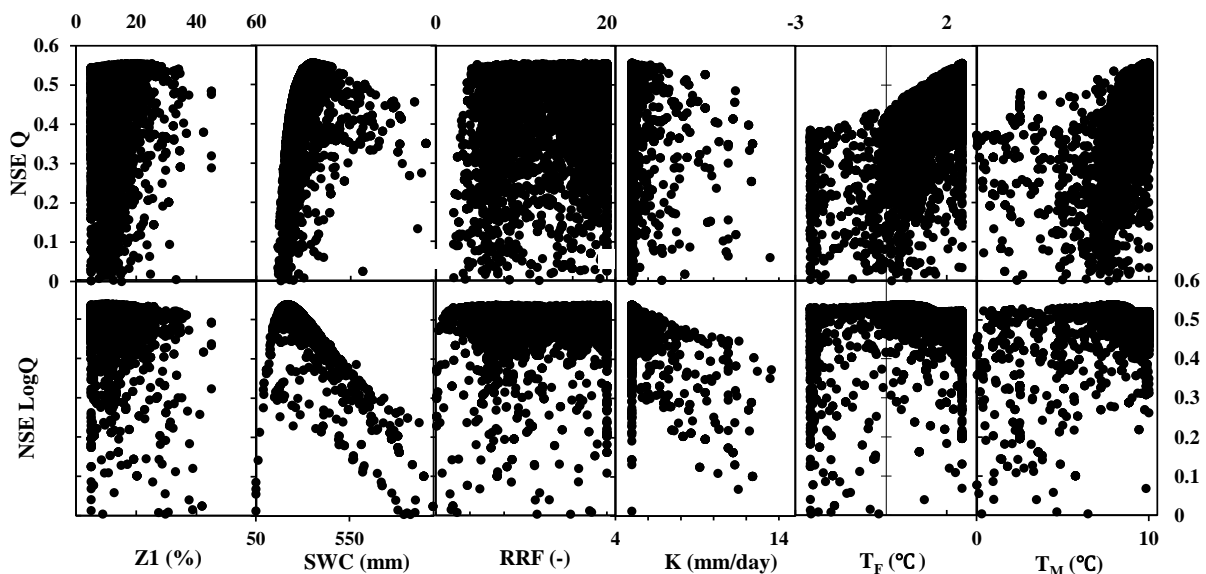


Fig. 4- Scatter plots of calibration parameters against two objective functions for Saruq river sub-basin
شکل ۴- نمودار پارامترهای کالیبراسیون به ازای توابع هدف بهینه‌سازی در زیرحوضه ساروق

Table 5- Calibrated parameter values corresponded to NSE values

جدول ۵- مقادیر پارامترهای کالیبراسیون با توجه به مقادیر NSE

Catchment	Parameter	Maximum NSE _Q	Maximum NSE _{LogQ}	Minimal Euclidean Distance
Saruq river	SWC [mm]	354.1	219.4	310.8
	RRF	17.5	8.9	17
	K [mm/day]	5	5	5
	Z1	20.5	8.6	16.3
	T _F [Celsius]	2.5	0.5	2.5
	T _M [Celsius]	10	7.7	10
Khoorkhooreh river	SWC [mm]	606.9	450.5	504.4
	RRF	5.1	2.8	5.7
	K [mm/day]	5	5	5
	Z1	14	8.4	10.1
	T _F [Celsius]	2.2	2.4	2.1
	T _M [Celsius]	3.8	3.6	3.4
Zarrinehrood upstream	SWC [mm]	1234.1	195.2	242.5
	RRF	20	16.1	20
	K [mm/day]	300	6	12.5
	Z1	5	5	7.6
	T _F [Celsius]	2.5	2.5	2.5
	T _M [Celsius]	10	9.4	10
Saqez river	SWC [mm]	1006.9	180.3	224.5
	RRF	15.9	19.3	5.5
	K [mm/day]	300	5	12.8
	Z1	5.6	21.1	18.7
	T _F [Celsius]	2.5	2.5	2.5
	T _M [Celsius]	10	9.9	10

Table 6- Calibrated parameters for minimum Euclidean distance

جدول ۶- مقادیر پارامترهای کالیبره شده به ازای حداقل فاصل اقلیدسی

Catchment	Calibration period		Validation period	
	NSE _Q	NSE _{LogQ}	NSE _Q	NSE _{LogQ}
Saruq river	0.55	0.54	0.6	0.46
Khoorkhooreh	0.45	0.71	0.64	0.78
Zarrinehrood upstream	0.33	0.64	0.50	0.51
Saqez river	0.38	0.64	0.43	0.54
Average	0.43	0.63	0.54	0.57

سال‌های با شدیدترین خشکسالی در طول ۵۰ سال اخیر (یعنی ۱۹۹۹، ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸) است. حجم آب ورودی به زیرحوضه‌های بالادست شامل بارش‌ها بر روی زیر حوضه و آبیاری زمین‌های کشاورزی به ترتیب ۲۴۶۵ و ۱۴۶ میلیون مترمکعب برای میانگین بلندمدت می‌باشد.

مؤلفه‌های بیلان آب خروجی حوضه شامل تبخیر و تفرق واقعی و رواناب خروجی رودخانه (شامل رواناب‌های سطحی و زیرسطحی) است که برای میانگین بلندمدت به ترتیب برابر با حجم سالانه ۱۳۹۱ و ۱۲۳۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. به دلیل ماهیت کوهستانی منطقه و وسعت بسیار کم دشت‌ها و نیز مطالعات انجام شده توسط مهندسی مشاور یکم در این منطقه، مقدار نفوذ به آبخوان برابر با صفر است (Ministry of Energy, 2016).

از آنجا که فرآیند اجرای مدل WEAP-MATLAB زمانبر است، در این تحقیق از مقادیر پیشنهادی (Coello et al., 2004) برای پارامترهای مدل بهینه‌سازی MOPSO استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده در صورت دسترسی به ابر کامپیوترها، از فرآیند آنالیز حساسیت برای تعیین پارامترهای مدل بهینه‌سازی استفاده و مقادیر مطلوب برای آن‌ها تعیین شود. همچنین می‌توان از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری همچون NSGA-II برای فرآیند کالیبراسیون استفاده و نتایج آن را با نتایج این تحقیق مقایسه کرد.

۳-۱- بیلان آب

جدول ۷ نشان دهنده مؤلفه‌های بیلان آب در بالادست سد مخزنی بوکان، برای میانگین بلندمدت (سال‌های آبی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴) و

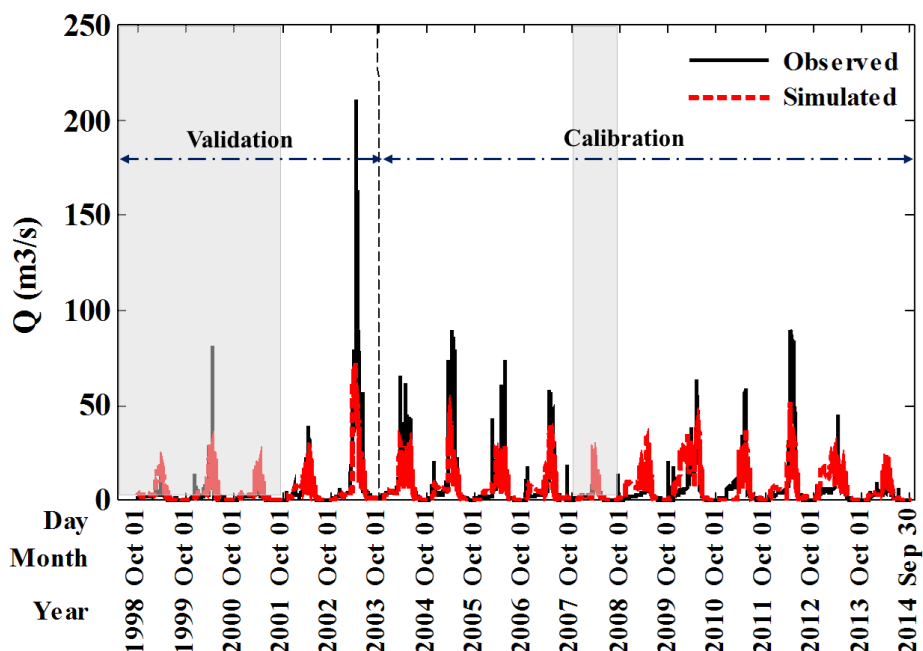


Fig. 5- Daily time series of observed and simulated streamflow of Saruq river; gray box is showing dry years. شکل ۵- سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای رودخانه ساروق، با کس خاکستری رنگ نشان دهنده سال‌های خشک است.

است. تغییرات ذخیره برف سال‌های خشک نیز نسبت به میانگین بلندمدت ۳۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

نمودارهای شکل ۶ مقایسه‌ای از پارامترهای بارش، تبخیر و تعرق واقعی، رواناب، ذخیره برف و رطوبت نسبی خاک برای میانگین بلندمدت و سال‌های با خشکسالی شدید را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، بارش روزانه برای سال‌های با خشکسالی شدید نسبت به میانگین بلندمدت کاهش چشم‌گیری داشته است. این تغییرات منجر به کاهش شدید ذخیره برفی، تبخیر و تعرق واقعی و در نهایت منجر به کاهش شدید رواناب ورودی به سد در سال‌های با خشکسالی شدید نسبت به میانگین بلندمدت شده است.

با توجه به جدول ۷ حجم بارش سالانه در سال‌های با خشکسالی شدید نسبت به میانگین بلندمدت حدود ۳۲ درصد کاهش داشته است. مقدار رواناب برای سال‌های با خشکسالی شدید کاهش ۴۰ درصدی را نسبت به مقدار میانگین بلندمدت نشان می‌دهد؛ در مقابل تبخیر و تعرق ۲۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد. پوشش گیاهی که بیشتر آن را اراضی دیم و مراتع تشکیل می‌دهد (جدول ۳) تا حد ممکن توانسته است به هنگام کاهش بارش، نیاز آبی خود را از طریق رطوبت خاک ناشی از بارش تأمین نماید، در نتیجه میزان کاهش رواناب تولیدی به نسبت بارش‌ها مقدار بزرگ‌تری است. با توجه به جدول ۷، تغییرات ذخیره رطوبت خاک در سال‌های با خشکسالی شدید به میزان ۲۴ میلیون متر مکعب از میانگین بلندمدت کمتر است و ۱۵۸ درصد کاهش داشته

Table 7- Simulated annual water balance components for total upstream sub-basins over long-term period (1998-2014) in comparison with dry years (1999, 2000, 2001 and 2008), expressed in MCM

جدول ۷- مقایسه پارامترهای بیلان سالانه آب مجموع زیرحوضه‌های بالادست سد بوکان برای میانگین بلندمدت (دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴) و سال‌های با خشکسالی شدید (۱۹۹۹، ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸) (میلیون متر مکعب)

	Water balance component	Soil moisture method (SMM)		
		All years	Dry years	Change (%)
Input	Precipitation	2465.3	1687	-31.5
	Irrigation	145.7	132.8	-8.8
Output	ET actual	1390.7	1116	-19.8
	Runoff	1235.7	743.5	-39.8
Delta storage	Soil moisture	-15.4	-39.7	-157.8
Delta snow	-	-3.03	-2.07	-31.7

در شکل ۶ و نمودار a بارش‌ها عمدتاً از نوامبر (اواسط آبان) آغاز شده و تا ماه می (اواخر اردیبهشت) ادامه می‌یابند، در این مدت بارش میانگین سال‌های خشک کاهش شدیدی را نسبت به میانگین بلندمدت از خود نشان می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داده شده در نمودار b شکل ۶ حاکی از تفاوت در میانگین تعداد روزهای هر ماه سال‌های خشک با دوره بلندمدت دارد، به‌طوری‌که تعداد روزهای بارانی سال‌های خشک کاهش زیادی به خصوص در زمستان و اوایل بهار دارد. هم‌زمان با کاهش بارش سال‌های خشک، ذخیره برف سال‌های خشک تا اوایل بهار افت حجمی زیادی را نسبت به میانگین بلندمدت داشته است؛ به‌طوری‌که با شروع ماه مارس (اواسط اسفند) و گرم شدن هوا، ذخیره برف در هر دو سری زمانی تقریباً به هم رسیده‌اند (نمودار c در شکل ۶). با بررسی نمودار رواناب (نمودار d در شکل ۶) و مقایسه آن با نمودار ذخیره برف می‌توان نتیجه گرفت که با وجود ادامه بارش‌ها، از یک زمانی به بعد (از ابتدای اکتبر (اوایل مهر) برای سال‌های خشک و ابتدای دسامبر (اواسط آذر) برای میانگین بلندمدت) رواناب ورودی به سد ثابت مانده و هم‌زمان ذخیره برف در حال افزایش است؛ به‌طوری‌که با گرم شدن هوا نمودارهای رواناب و ذخیره برف این بار عکس هم عمل می‌کنند (کاهش ذخیره برف با افزایش رواناب همراه است). مدل به خوبی توانسته آن‌ها را شبیه‌سازی نماید. نمودار ذخیره نسبی رطوبت خاک روندی تقریباً مشابه با نمودار رواناب دارد (نمودار e در شکل ۶)، به‌طوری‌که کاهش رطوبت نسبی خاک در سال‌های خشک نسبت به میانگین بلندمدت در مقایسه با سایر پارامترها افت شدیدتری را تجربه کرده است. تبخیر و تعرق واقعی در سال‌های خشک نیز کاهش را نسبت به میانگین بلندمدت نشان می‌دهد و در بهار این پارامتر در سال‌های خشک تقریباً نصف شده است، البته تبخیر و تعرق واقعی ماه‌های اکتبر (مهر) تا آوریل (فروردین) در دو سری زمانی تفاوت ناچیزی دارد که ناشی عدم رشد و نمو گیاهان مرتعی در این بازه زمانی بخاطر سرما است (نمودار f در شکل ۶).

۴- جمع‌بندی

شبیه‌سازی رواناب ورودی به سد بوکان به دلیل برنامه‌ریزی بهینه برای تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه و تأمین نیاز کشاورزی و شرب پایین دست از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، یک مدل هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی رواناب ورودی به مخزن سد بوکان ارائه شده است. به منظور توسعه مدل بارش-رواناب، یک مخزن برف برای شبیه‌سازی روزانه ذخیره برف و یک مخزن رطوبت خاک به منظور شبیه‌سازی روزانه مؤلفه‌های بیلان آب و رطوبت منطقه ریشه در نظر

گرفته شده است. فرآیند کالیبراسیون به منظور تعیین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی، با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO انجام شده است. توابع هدف کالیبراسیون شامل بیشینه‌سازی دقت شبیه‌سازی دبی و لگاریتم دبی مشاهداتی بر مبنای معیار نش-ساتکلیف هستند.

نتایج حاصل از کالیبراسیون دوهدفه مدل هیدرولوژیکی نشان می‌دهد که بین به حداکثر رساندن توابع هدف برای دقت بیشتر شبیه‌سازی دبی و لگاریتم دبی، موازنه^۲ کمی وجود دارد و بهبود یک تابع هدف تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد تابع هدف دیگر ندارد. این موضوع نشان‌دهنده این است که هیچ خطای بزرگی در مدل وجود ندارد که مانع از بهبود هم‌زمان هر دو تابع هدف شود. همچنین، نتایج حاصل از کالیبراسیون دوهدفه نشان می‌دهد که کالیبراسیون دوهدفه باعث کاهش عدم قطعیت در تخمین پارامترهای کالیبراسیون در مقایسه با کالیبراسیون تک‌هدفه می‌شود. میانگین پارامتر کارایی نش-ساتکلیف در دوره کالیبراسیون برای توابع هدف دبی و لگاریتم دبی زیرحوضه‌های آبریز بالادست سد بوکان، به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۶۳ و در دوره اعتبار سنجی به ترتیب برابر ۰/۵۴ و ۰/۵۵ بدست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی روزانه دبی ورودی به سد بوکان در این تحقیق عملکرد و توانایی بالاتری در مقایسه با شبیه‌سازی ماهانه دبی ورودی به سد بوکان در تحقیقات مشابه دارد.

در نهایت از مدل هیدرولوژیکی کالیبره شده به منظور شبیه‌سازی تأثیر سال‌های با شدیدترین خشکسالی در طول ۵۰ سال اخیر بر مؤلفه‌های بیلان آب بالادست سد بوکان استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که حجم بارش‌ها حدود ۳۲ درصد و حجم رواناب ورودی به سد بوکان در دوره خشکسالی شدید در حدود ۴۰ درصد نسبت به میانگین بلندمدت کاهش یافته است. همچنین، تبخیر و تعرق واقعی و آبیاری در دوره خشکسالی شدید نسبت به متوسط بلندمدت به ترتیب با کاهش حدود ۹ و ۲۰ درصدی روبرو بوده است. رطوبت خاک و ذخیره برف نیز به ترتیب کاهش ۱۵۸ و ۳۲ درصدی را نشان می‌دهند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل توسعه داده شده در این تحقیق برای شبیه‌سازی روزانه رواناب ورودی به سد بوکان، ذخیره برف و تغییرات رطوبت خاک از دقت بالایی برخوردار است. در تحقیقات آتی، این مدل می‌تواند به منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن بوکان و برنامه‌ریزی بهینه به منظور تخصیص بهینه منابع آب از این سد مورد استفاده قرار بگیرد.

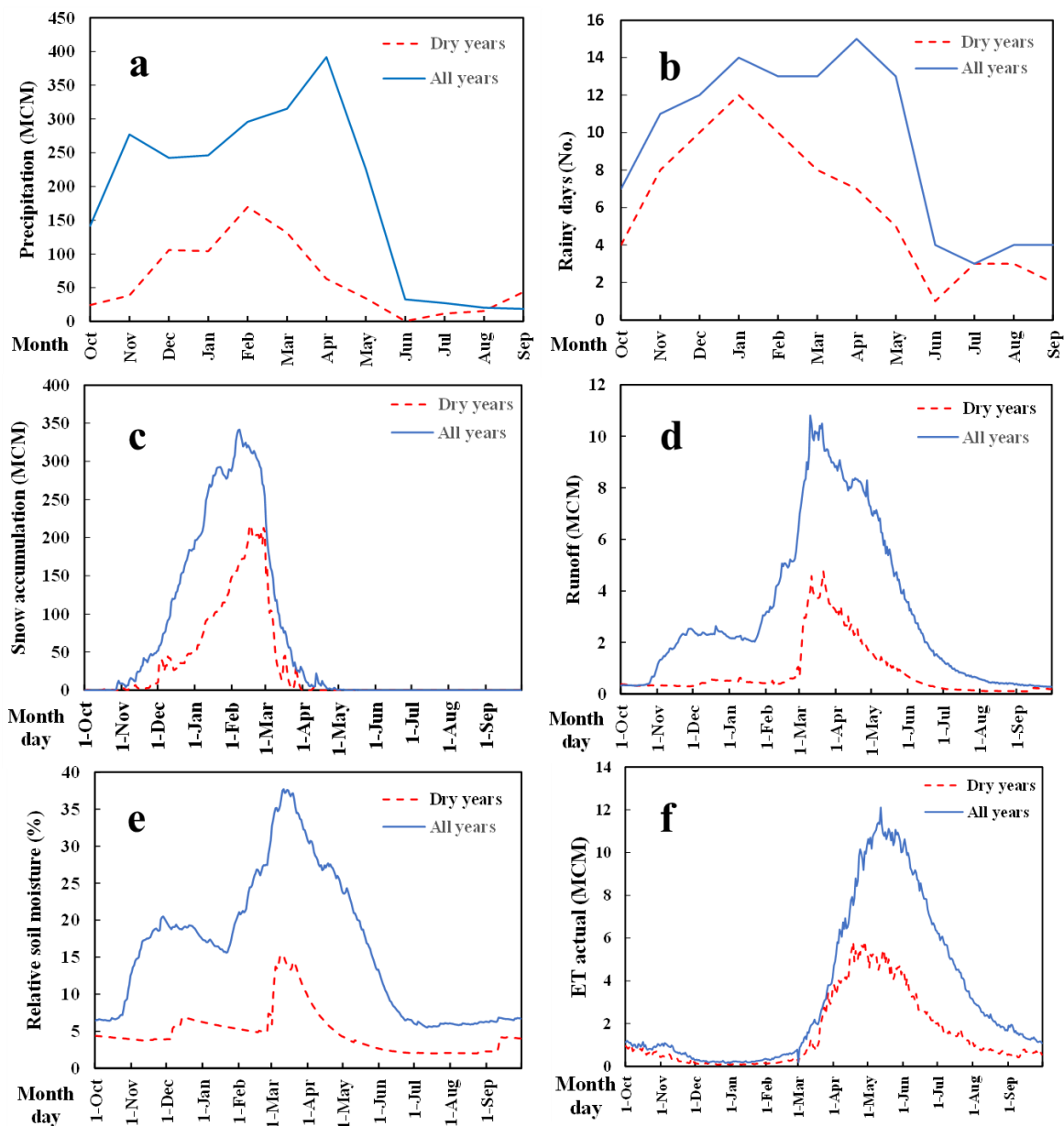


Fig. 6- Comparison of monthly average of precipitation and number of rainy days; daily average parameters of runoff, evapotranspiration, relative soil moisture and snow accumulation in dry years and long-time period

شکل ۶- مقایسه میانگین ماهانه بارش و تعداد روزهای بارانی و میانگین روزانه پارامترهای رواناب، تبخیر و تعرق، رطوبت نسبی و ذخیره برف در سال‌های خشکسالی شدید و دوره بلندمدت ۱۶ ساله

پی‌نوشت‌ها

- 6- Relative Storage
- 7- Elitist-Mutation
- 8- Saruq River Catchment

- 1- Multi-Objective Particle Swarm Optimization
- 2- Trade-off
- 3- Nash-Sutcliffe Efficiency
- 4- Perfect Foresight (Deterministic)
- 5- Soil Moisture

۵- مراجع

- Abrishamchi A, Alizadeh H, Tajrishy M, and Abrishamchi A (2007) Water resources management scenario analysis in Karkheh River Basin, Iran, using WEAP model. *Hydrological Science and Technology* 23(1):1-12
- Adgolign TB, Rao GVRS, and Abbulu Y (2016) WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, Springer International Publishing 2(1):55-70
- Ahmadaali J, Barani G-A, Qaderi K, and Hessari B (2017) Calibration and Validation of model WEAP21 for Zarrineh Rud and Simineh Rud Basins. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48(4):823-839 (In Persian)
- Ahmadaali J, Barani GA, Qaderi K, and Hessari B (2018) Analysis of the effects of water management strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of Urmia Lake Basin, Iran. *Water (Switzerland)* 10(2):160
- Barlow M, Zaitchik B, Paz S, Black E, Evans J and Hoell A (2016) A review of drought in the Middle East and southwest Asia. *Journal of Climate* 29(23):8547-8574
- Coello CAC, Pulido GT, and Lechuga MS (2004) Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions ON Evolutionary Computation* 8(3):256-279
- Dehghanipour AH, Panahi DM, and Mousavi H (2020a) Effects of water level decline in Lake Urmia, Iran. *Water (Switzerland)* 12(8):2153
- Dehghanipour AH, Schoups G, Zahabiyou B, and Babazadeh H (2020b) Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: A simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran. *Agricultural Water Management*, Elsevier 241(April):106353
- Dehghanipour AH, Zahabiyou B, Schoups G, and Babazadeh H (2019) A WEAP-MODFLOW surface water-groundwater model for the irrigated Miyandoab plain, Urmia lake basin, Iran: Multi-objective calibration and quantification of historical drought impacts. *Agricultural Water Management*, Elsevier 223(July):105704
- Dunn SM, Stalham M, Chalmers N, and Crabtree B (2003) Adjusting irrigation abstraction to minimise the impact on stream flow in the east of Scotland. *Journal of Environmental Management* 68(1):95-107
- Emami F and Koch M (2019) Modeling the impact of climate change on water availability in the Zarrine River Basin and inflow to the Boukan Dam, Iran. *Climate* 7(4):51
- Faiz MA, Liu D, Fu Q, Uzair M, Khan MI, Baig F, Li T, and Cui S (2018) Stream flow variability and drought severity in the Songhua River Basin, Northeast China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Springer Berlin Heidelberg 32(5):1225-1242
- FAO and RS center of Tarbiat Modarres University (2015) Land cover classification of Urmia Lake basin. A Report
- Fowe T, Nouiri I, Ibrahim B, Karambiri H, and Paturel JE (2015) Optiwam: An intelligent tool for optimizing irrigation water management in coupled reservoir-groundwater systems. *Water Resources Management* 29(10):3841-3861
- Ghaheri M, Baghal-Vayjooee MH, and Naziri J (1999) Lake Urmia, Iran: A summary review. *International Journal of Salt Lake Research* 8(1):19-22
- Her Y and Seong C (2018) Responses of hydrological model equifinality, uncertainty, and performance to multi-objective parameter calibration. *Journal of Hydroinformatics* 20(4):864-885
- Hrachowitz M and Clark MP (2017) HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Journal of Earth System Science* 21:3953-3973
- Le Page M, Berjamy B, Fakir Y, Bourgin F, Jarlan L, Abourida A, Benrhanem M, Jacob G, Huber M, Sghrer F, ... Chehbouni G (2012) An integrated DSS for groundwater management based on remote sensing, The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco. *Water Resources Management* 26(11):3209-3230
- Mancosu N, Snyder RL, Kyriakakis G, and Spano D (2015) Water scarcity and future challenges for food production. *Water (Switzerland)* 7(3):975-992
- Mehta VK, Haden VR, Joyce BA, Purkey DR, and Jackson LE (2013) Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agricultural Water Management*, Elsevier B.V. 117:70-82
- Ministry of Energy (2016) Implementing solutions to reduce the agricultural water consumption of the Zarrinehrood and Siminehrood sub-basin by 40%. Report (In Persian)
- Moriassi DN, Arnold JG, Liew MW Van, Bingner RL, Harmel RD, and Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in

- watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885–900
- Mostafazade M and Alizadeh H (2020) Calibration of a water resource planning model using many-objective optimization. *Iran-Water Resources Research* 15(4):200-213 (In Persian)
- Mukhtarov FG (2007) Intellectual history and current status of Integrated Water Resources Management: A global perspective. *Adaptive and Integrated Water Management* Springer, Berlin, Heidelberg, 167–185
https://doi.org/10.1007/978-3-540-75941-6_9
- Nouri I, Yitayew M, Maßmann J, and Tarhouni J (2015) Multi-objective optimization tool for integrated groundwater management. *Water Resources Management* 29(14):5353–5375
- Oudin L, Andréassian V, Mathevet T, Perrin C, and Michel C (2006) Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research* 42(7):1–10
- Psomas A, Panagopoulos Y, Konsta D, and Mimikou M (2016) Designing water efficiency measures in a catchment in Greece using WEAP and SWAT models. *Procedia Engineering* 162:269–276
- Pushpalatha R, Perrin C, Le N, and Andréassian V (2012) A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V. 420–421:171–182
- Roodari A, Hrachowitz M, Hassanpour F, and Yaghoobzadeh M (2021) Signatures of human intervention – or not? Downstream intensification of hydrological drought along a large Central Asian River: the individual roles of climate variability and land use change. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(4):1943–1967
- Schoups G, Addams CL and Gorelick SM (2005) Multi-objective calibration of a surface water-groundwater flow model in an irrigated agricultural region: Yaqui Valley, Sonora, Mexico. *Hydrology and Earth System Sciences* 9(5):549–568
- Schulz S, Darehshouri S, Hassanzadeh E, Tajrishy M, and Schüth C (2020) Climate change or irrigated agriculture– what drives the water level decline of Lake Urmia. *Scientific Reports* 10(1):1–10
- Sieber J and Purkey D (2015) *Water evaluation and planning system user guide*. U.S. Center: Stockholm Environment Institute
- Sisto NP (2009) Environmental flows for rivers and economic compensation for irrigators. *Journal of Environmental Management*, Elsevier Ltd 90(2):1236–1240
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2013). *World Population Prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables*. Working Paper No. ESA/P/WP.228
https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2012_HIGHLIGHTS.pdf
- Valipour M (2015) A comprehensive study on irrigation management in Asia and Oceania. *Archives of Agronomy and Soil Science* 61(9):1247–1271
- Valipour M, Ziatabar Ahmadi M, Raeini-Sarjaz M, Gholami Sefidkouhi MA, Shahnazari A, Fazlola R, and Darzi-Naftchali A (2015) Agricultural water management in the world during past half century. *Archives of Agronomy and Soil Science* 61(5):657–678
- Vonk E, Xu YP, Booij MJ, Zhang X, and Augustijn DCM (2014) Adapting multireservoir operation to shifting patterns of water supply and demand: A case study for the Xinanjiang-Fuchunjiang reservoir cascade. *Water Resources Management* 28(3):625–643
- Xue J, Gui D, Lei J, Sun H, Zeng F, and Feng X (2017) A hybrid Bayesian network approach for trade-offs between environmental flows and agricultural water using dynamic discretization. *Advances in Water Resources*, Elsevier Ltd 110:445–458
- Yates D, Purkey D, Sieber J, Huber-lee A, Galbraith H, West J, Herrod-julius S, Young C, Joyce B, and Rayej M (2009) Of the Sacramento Basin , California. *Journal of Water Resources Planning and Management* 135(October):303–313