

The effect of applying river environmental requirements on the design and operation characteristics of storage reservoirs using the Monte Carlo method (Case study: Nazlou reservoir dam)

Javad Heydari Koholi¹, Majid Montaseri², Somayeh Hejabi^{3*}

¹ PhD student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

² Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction

In recent years, one of the most significant challenges in planning and operating reservoir systems has been the estimation of actual environmental flows in rivers downstream during operational years and evaluating their effect on the performance of such reservoir systems. Failure to comply with the environmental flows of the rivers downstream has had long-term destructive consequences for socio-ecological systems. Therefore, accurate and timely estimation of environmental flow and its application in the operation of existing and new reservoir systems is of particular importance. Several studies have been conducted to assess environmental flows and the resulting changes in river ecology after the construction of reservoir dams. All studies have investigated and evaluated the flow regime before and after dam construction on rivers and have emphasized the need for timely allocation of environmental flows and changes in reservoir system operation patterns. Studies of the environmental flows of rivers have mostly focused on estimating environmental flows using various methods and comparing the river flow regime before and after dam construction in both current and ecosystem-compatible conditions in the historical period. However, the effect of the timely release of environmental demand compatible with the ecosystem on the long-term behavior of various important characteristics of the storage reservoir system (such as useful volume, command curve, hydrological behavior, critical period, evaporation losses, etc.) has not been considered in previous studies, and this could be an innovative approach in this field, which has been carried out in the present study. For this purpose, in this study, a comprehensive Monte Carlo simulation approach is used to compare several important common methods for estimating the environmental demand of the river (dam downstream) and evaluate their effects on important design characteristics (such as useful volume) and operation (such as the command curve) in Nazlou reservoir system. The Nazlou River is one of the important rivers of the Lake Urmia basin. After providing drinking and agricultural water to the lands under its coverage, it is discharged into Lake Urmia.

Materials and Methods

In this study, the Nazlou Reservoir Dam and the Nazlou River in Urmia were selected as a case study. Methods for determining environmental demands in the river downstream are classified into three groups: hydrological, hydraulic, and habitat simulation, but hydrological methods, with the availability of the required data, are used by researchers as reliable and common methods. In this study, five common hydrological methods, which are preferred by researchers, namely the Desktop Reserve Model, flow duration curve, Smakhtin, Tessman, and Tennant methods, were used to estimate environmental demands. This comprehensive study is based on a Monte Carlo simulation approach with a very large process (924,000 times) of stochastic simulation of the storage system, i.e. 1,000 time series of production flow, 7 demands ($D_{\text{Annual}}=0.1$ to 0.4 MAF, step 0.05), 11 time reliability indices ($Rel=0.9$ to 1.0 step 0.01), 2 vulnerability indices ($Vul=0.0$ and 0.3), and 6 methods of determining environmental demand (the 5 above-mentioned methods + 1 Method without applying environmental demands). The aforementioned Monte Carlo simulation approach is based on a hybrid model combining the Valencia-Shaake disaggregation stochastic model and the Modified Sequent Peak Algorithm (SPA) simulation model.

Results and Discussion

The main results of this study are summarized as follows: a) Comparison of the environmental demand values obtained from the five applied methods showed that the environmental demand based on the Tennant and Tessman methods were 20% (as minimum value) and 53% (as maximum value) of the average annual flow, respectively, and the obtained values of the other three methods are approximately close to each other and are about 28% of the average annual flow. The

monthly variation of the obtained environmental flow in the river also indicated that the results of the three methods, Tessman, FDC shifting (C), and DRM (C), had a similar behavior with the mean monthly historical flow values. b) The results showed that the performance of the used stochastic model in reproducing the statistical parameters of historical flow data at both annual and monthly levels and reproducing the correlation structure between the flows of different months and the correlation between the annual and monthly flows is quite desirable, and this plays a key role in a reservoir system simulation in real conditions. c) The results indicate a systematic long-term behavior of the main reservoir storage characteristics (i.e., active storage, resiliency index, evaporation loss, and critical period) against demand for two conditions, without and with the including environmental flow, except for the Tessman method.

Conclusion

The main outcome of the investigation could be summarized as follows: a) The ecological system of rivers often adapts to its monthly flow regime over time, therefore, using a method of estimating the ecological demands of a river in accordance with the monthly flow regime and with an appropriate amount (30-40% of the average monthly flow) has a more relative advantage than other methods. So, the FDC Shifting (C) method, with an average of 32 percent of the average monthly flow and the minimum coefficient of variation ($CV=0.20$), was the most appropriate method for estimating the environmental demand in the tested reservoir dam. b) The combination of the annual AR(1) model and the monthly Valencia-Shaake disaggregation model can reproduce the statistical characteristics of the historical streamflow values at both annual and monthly levels sufficiently, and this provides a reliable framework with high accuracy in the stochastic analysis of a reservoir system. c) The long-term storage-demand-performance relationships of the reservoir system due to environmental demand, except for the Tessman method, show a similar systematic behavior change for different methods of estimating environmental demand. d) By applying environmental demands to the analysis of storage reservoir systems, the active storage, evaporation loss, and critical period increase by 2 to 10 times.

Keywords: Environmental demand, Lake Urmia, Monte Carlo method, Supply-Demand-Performance relationships

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to Urmia University for the supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Javad Heydari Koholi: Software/ statistical analysis, Interpretation of results, Writing - original draft preparation;

Majid Montaseri: Conceptualization, Supervision, Results control, Manuscript editing; **Somayeh Hejabi:** Supervision, Interpretation of results, Manuscript editing and reviewing

*Corresponding Author, E-mail: Somayeh Hejabi, s.hejabi@urmia.ac.ir

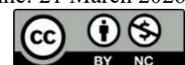
Citation: Heydari Koholi, Javad, Montaseri, Majid, Hejabi, Somayeh (2026) The effect of applying river environmental requirements on the design and operation characteristics of storage reservoirs using the Monte Carlo method (Case study: Nazlou reservoir dam). *Water and Soil Management and Modelling*, 6(1), 54 -76.

doi: 10.22098/mmws.2025.17691.1617

Received: 22 June 2025, Received in revised form: 20 June 2025, Accepted: 10 June 2025, Published online: 21 March 2026
Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 54-76.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)



اثر اعمال نیاز محیط زیستی رودخانه بر مشخصات طرح و بهره‌برداری مخازن ذخیره با استفاده از روش مونت کارلو (مطالعه موردی: سد مخزنی نازلو)

جواد حیدری کهلی^۱، مجید منتصری^۲، سمیه حجایی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۲ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

اغلب سیستم‌های مخازن ذخیره موجود در سراسر دنیا بدون اعمال نیاز محیط زیستی پایاب سد در رهاسازی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. این امر اثرات مخربی در اکوسیستم رودخانه در پایاب چنین سیستم مخازن ذخیره، از جمله در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به‌وجود آورده است. در حال حاضر بر روی تمامی رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه، سدهای مخزنی متعدد برای کنترل و تنظیم جریان رودخانه برای مصارف شرب و کشاورزی احداث یا در شرف احداث بوده و این سیستم‌ها غالباً بدون اعمال نیاز محیط زیستی پایاب رودخانه، خصوصاً حق‌آبه دریاچه ارومیه مورد بهره‌برداری قرار گرفته و احتمالاً موجب بحران خشک شدن دریاچه ارومیه شده است. در این مطالعه نوآورانه اثر اعمال نیاز محیط زیستی بر مشخصات طراحی و بهره‌برداری مخزن ذخیره فرضی رودخانه نازلوچای بر اساس پنج روش هیدرولوژیکی، Tennant, Tesson, Smakhtin, DRM و FDC Shifting مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور یک روش مونت کارلو گسترده با تولید ۱۰۰۰ سری جریان ماهیانه ۳۰ ساله با استفاده از رویکرد استوکاستیک توزیعی (ترکیب دو مدل AR(1) و Valencia and Schaake) برای محدوده وسیع از تقاضا (۷ مورد)، شاخص اعتمادپذیری (۱۱) و شاخص آسیب‌پذیری (۳) انجام پذیرفته است. نتایج نشان داد که روش FDC Shifting (C) با میزان متوسط ۳۲ درصد میانگین جریان ماهیانه و حداقل ضریب تغییرات (CV=0.20) مناسب‌ترین روش برآورد نیاز محیط زیستی پایاب مخزن ذخیره مورد مطالعه بوده و تخصیص ۹۵ میلیون مترمکعب در سال از سیستم ذخیره را لازم دارد. با اعمال نیاز محیط زیستی در تحلیل سیستم مخازن ذخیره، تغییرات حجم مفید، حجم تلفات تبخیر و دوره بحرانی با افزایش تقاضا به‌طور نمایی افزایش یافته و این افزایش در حدود ۲ برابر برای روش Tennant تا ۱۰ برابر برای روش Tesson نسبت به شرایط بدون اعمال نیاز محیط زیستی است. به‌طور خلاصه، یک روش برآورد نیاز محیط زیستی رودخانه در انطباق با رژیم جریان ماهیانه یا مبتنی بر الگوی رژیم جریان ماهیانه و با میزان مناسب (۴۰-۳۰ درصد متوسط جریان ماهیانه) مانند روش FDC Shifting (C) دارای مزیت نسبی بسیار بالاتری نسبت روش‌های دیگر است.

واژه‌های کلیدی: دریاچه ارومیه، روابط ذخیره-تقاضا-عملکرد، روش مونت کارلو، نیاز محیط زیستی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: سمیه حجایی، s.hejabi@urmia.ac.ir

استناد: حیدری کهلی، جواد، منتصری، مجید، حجایی، سمیه (۱۴۰۵). اثر اعمال نیاز محیط زیستی رودخانه بر مشخصات طرح و بهره‌برداری مخازن ذخیره با استفاده از روش مونت کارلو (مطالعه موردی: سد مخزنی نازلو). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱۶(۱)، ۵۴-۷۶.

doi: 10.22098/mmws.2025.17691.1617

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۵۴ تا ۷۶

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

از ابتدای قرن بیستم، توسعه صنعتی و کشاورزی و روند فزاینده جمعیت در سرتاسر جهان، باعث گسترش و احداث مخازن ذخیره جریان سطحی در اکثر رودخانه‌ها در سراسر دنیا شده است. مخازن ذخیره که برای کنترل و تنظیم جریان‌های رودخانه‌ها مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، مهم‌ترین اجزاء سیستم‌های منابع آب شناخته می‌شوند (Ortiz-Partida et al., 2019). اما از سوی دیگر تنظیم، کنترل و ذخیره جریان‌های سطحی در رودخانه‌ها سبب بر هم خوردن رژیم طبیعی جریان آب در بخش وسیعی از حوضه‌های آبخیز رودخانه‌ها می‌شود. بنابراین، طرح و احداث سدهای مخزنی دارای اثرات محیط زیستی متعددی خصوصاً در پایاب رودخانه است که تغییر رژیم طبیعی رودخانه و کاهش جریان سطحی پایین‌دست رودخانه از مهم‌ترین آن است (Schmutz and Moog, 2018). در حال حاضر حفظ سلامت اکولوژیکی رودخانه‌ها با روش‌های فعلی مدیریت و بهره‌برداری سیستم مخازن بدون در نظر گرفتن نیاز محیط زیستی پایاب رودخانه دارای چالش‌های اساسی بوده که نیازمند مطالعه و ارزیابی جامع در این زمینه است (Mezger et al., 2021). به طوری که در سال‌های اخیر یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم مخازن ذخیره برآورد واقعی یا به‌هنگام حق‌آبه محیط زیست در رودخانه‌ها در دوره بهره‌برداری و ارزیابی اثر آن در عملکرد چنین سیستم‌های ذخیره است (Warner et al., 2014; Zolfagharpour et al., 2021).

حق‌آبه محیط زیست در رودخانه‌ها متأثر از متغیرهای طبیعی، درک اهمیت حفاظت از منابع آب، تنوع زیستی و زیست‌بوم وابسته به جریان رودخانه است (Aguilar and Polo, 2016). جریان محیط زیست، توصیفی از زمان، کیفیت و کمیت جریان مورد نیاز برای حفظ آب شیرین، اکوسیستم مصب رودخانه، رفاه انسان و معیشت وابسته به آب است (Pahl-Wostl et al., 2013). در دو دهه گذشته کشورهای دنیا شاهد افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد تأمین مطمئن آب و غذا بوده‌اند. افزایش جمعیت، توسعه اقتصادی، تغییرات اقلیمی، میزان کاهش آب قابل دسترس و نحوه مصرف آن، افزایش ریسک جریان‌های کرانه‌ای پایین و بالا (خشکسالی - سیلاب) و تغییرات در رژیم جریان، تهدیدی برای کیفیت و کمیت آب در سطح جهانی بوده است (Cook and Bakker, 2012). عدم رعایت حق‌آبه (نیاز محیط زیستی) پایاب رودخانه‌ها در درازمدت پیامدهای مخربی برای سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی در پی دارد (Suwal et al., 2020). بنابراین، برآورد دقیق و به‌هنگام جریان محیط زیست و اعمال آن در

بهره‌برداری سیستم مخازن دارای اهمیت ویژه‌ای است (Efstratiadis et al., 2014).

(McMahon and Finlayson, 1995) اعلام داشتند با توجه به اینکه اکثر سدهای دنیا قبل از نگرانی‌های به‌وجود آمده در مورد اکولوژی رودخانه‌ها و عدم اطلاع در مورد عواقب تغییرات طولانی‌مدت در حجم جریان آب، کیفیت آب و الگوی بهره‌برداری آب، احداث شده‌اند، لزوم توجه به جریان‌های محیط زیست را دو چندان می‌کند. سؤال مهمی که در این پژوهش مطرح شد این بود که میزان و مقدار جریان محیط زیست در پایاب سیستم مخازن ذخیره جریان سطحی چگونه برآورد شود و همچنین آیا روش مدیریت و بهره‌برداری سنتی سیستم مخازن ذخیره توانایی تطبیق با شرایط جدید تأمین جریان محیط زیست پایاب این سازه‌های آبی را خواهد داشت. پیرو آن، مطالعات متعددی برای ارزیابی جریان محیط زیست و تغییرات حاصل در اکولوژی رودخانه‌ها بعد از احداث سدهای مخزنی صورت گرفته است. تمام مطالعات به بررسی رژیم جریان قبل و بعد از ساخت سد بر روی رودخانه‌ها پرداخته و بر لزوم تخصیص جریان‌های محیط زیست و به‌هنگام کردن الگوهای بهره‌برداری سیستم مخازن تأکید داشته‌اند (Batalla et al., 2004; Harman and Stewardson, 2005; Suen and Eheart, 2006; Gao et al., 2012; Yin et al., 2011; Shiau and Wu, 2013). Hu et al. (2008) در بررسی تأثیرات سدها بر روی وضعیت‌های اکولوژیکی در حوضه آبریز رودخانه Huai in چین، از رهیافت دامنه تغییرپذیری^۱ (RVA) استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که سدها اثرات منفی شدیدی بر وضعیت‌های اکولوژیکی حوضه آبریز Huai مخصوصاً در فصول خشک دارند. آن‌ها با توجه به بار آلودگی زیاد رودخانه در فصول خشک، از ۲۰ درصد متوسط چندساله جریان بر اساس ضوابط روش Tennant و RVA به‌عنوان نیاز زیست محیطی و اکولوژیکی در ماه‌های خشک استفاده کردند. Shiau and Wu (2013) در مطالعه‌ای لزوم گنجاندن نیازهای محیط زیست اکوسیستم در منحنی‌های بهره‌برداری مخازن چند منظوره را مطرح و در یک سیستم ذخیره در ویتنام برای بهینه کردن تقاضا مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها استراتژی روش نسبت نیاز محیط زیستی و روش رهاسازی متفاوت در سه مقطع زمانی و سناریوی بهره‌برداری چند دسترس را برای بهینه کردن عملکرد سد و تأمین نیاز محیط زیستی در بازه زمانی روزانه تا سالیانه را ارائه کردند. Yasi (2017) در مطالعه‌ای لزوم تجدید نظر در ارزیابی و برآورد نیاز محیط زیستی رودخانه‌های مهم حوضه دریاچه ارومیه با وجود سیستم مخازن ذخیره متعدد (حدود ۱۸ سد بزرگ) که حدود ۹۰ درصد جریان سطحی جاری به سمت دریاچه ارومیه را برای تأمین تقاضا برای مصارف مختلف تنظیم و

¹ Range of Variability Approach

و روزانه) قبل و بعد از احداث سدها، اعلام کردند که نوسانات حاصل (بعد از بهره‌برداری سدها) در رژیم طبیعی رودخانه، مطالعه جامع تخمین و تخصیص نیاز محیط زیستی پایاب سدهای مورد مطالعه را ضروری می‌نماید. (Wu et al. (2022) برای بهره‌برداری پایدار سد مخزنی Jiayan بر روی رودخانه Liuchong چین، برای تأمین آب مصارف مختلف، تولید برق آبی و نیاز محیط زیستی (WHE)، اثر بهره‌برداری تطبیقی از مخزن و آگاهی محیط زیست بر پیوند WHE را در قالب مدل پیوند WHE بررسی کردند. حالت‌های پیوند WHE که به ذخیره آب در مخزن، جمعیت، مصرف آب، تولید برق آبی، آگاهی محیط زیست و واکنش رفتاری جامعه اشاره دارند، با استفاده از مدل WHE شبیه‌سازی شدند. آن‌ها بدین منظور از الگوریتم ترکیبی POA-PSO (الگوریتم بهینه‌سازی پیشرونده و بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱) استفاده کردند. نتایج نشان داد که زمان تأخیر بین آگاهی محیط زیست و ترجیحات تصمیم‌گیری تحت تغییرات پارامترهای مورد آزمون از ۰ تا ۸ سال متغیر بود. (Dalcin et al. (2023) با ترکیب مدل هیدروکلیماتیک، مدل تصادفی صریح بهره‌برداری از مخزن و مدل پیش‌بینی فراوانی جذب ماهی مهاجر، به بررسی توانایی تطبیقی بهره‌برداری سیستم آبی بزرگ‌مقیاس حوضه رودخانه Paraná در برزیل، برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی بر روی اکوسیستم‌های آبی و تولید برق آبی، پرداختند. نتایج نشان داد که سیاست‌های بهره‌برداری را می‌توان برای بهبود تولید برق آبی در شرایط آب و هوایی متغیر با شرایط خشک‌تر، ۲ تا ۸ درصد در مقایسه با سیاست‌های بهره‌برداری فعلی، تطبیق داد. تطبیق بهره‌برداری با تغییرات اقلیمی، علی‌رغم کاهش عملکرد جذب ماهی در طول چند سال اولیه برای حفظ ذخیره‌سازی بالاتر، شانس تولید رهاسازی جریان را از نظر بزرگی، زمان بندی و مدت زمان در دوره‌های طولانی خشک‌تر بهبود بخشید. Naderi et al. (2023) در مطالعه‌ای به بررسی شاخص‌های جریان محیط زیست و مدل اکوهیدرولیکی PHABSIM در برآورد محدوده جریان رهاسازی بهینه اکولوژیکی از مخزن سد لتیان پرداختند. بر اساس نتایج مطالعه، جریان زیست محیطی با ترکیب روش‌های هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی زیستگاه در محدوده ۵/۵۵-۲/۱۸ متر مکعب بر ثانیه به‌عنوان میزان جریان رهاسازی مورد نیاز که باعث پایداری گونه‌های ماهی و زیستگاه رودخانه جاجرو می‌شوند، محاسبه شدند.

با توجه به سوابق مطالعاتی اثرات مخرب عدم تخصیص یا رهاسازی نیاز محیط زیستی رودخانه‌ها در پایاب اغلب سدهای مخزنی دنیا، نگرانی‌های عمیق در خصوص عملکرد و بهره‌برداری چنین سازه‌های آبی را پدید آورده است. بدین منظور در سال‌های

کنترل می‌کند، مطرح کردند. در منحنی فرمان سدهای حوضه دریچه ارومیه، سهم جریان محیط زیست پایاب رودخانه‌ها کمتر از ۱۳ درصد در نظر گرفته شده است. او نتیجه‌گیری کرد که سهم تخصیص جریان محیط زیست پایاب رودخانه‌های مختلف حوضه آبریز برای احیاء دریچه ارومیه در محدوده ۲۰ تا ۴۰ درصد جریان رودخانه‌ها با متوسط ۲۶ درصد از پتانسیل جریان حوضه قرار دارد. (Fallah-Mehdipour et al. (2020) رویکردهای یکپارچه و غیریکپارچه اقلیم-محیط-آب را برای بهره‌برداری از سیستم مخزن ذخیره کرخه در ایران ارائه کردند. سیستم مذکور، یک سیستم مخزن چند منظوره با هدف تأمین نیازهای آب شرب، محیط زیست و کشاورزی است. نتایج نشان داد که رویکرد یکپارچه، که مبتنی بر بهینه‌سازی چندمنظوره است، نیازهای آب شرب، محیط زیست و کشاورزی را در مقایسه با رویکرد غیریکپارچه با یک سیاست بهره‌برداری استاندارد، به ترتیب ۷۰، ۳۲ و ۶۵ درصد بهبود بخشید. (Shakeri Zare et al. (2020) با استفاده از چهار روش هیدرولوژیکی FDC shifting و DRM، Tennant، Tessman، به ارزیابی نیاز جریان محیط زیست بستر رودخانه مرزی هریرود واقع در مرز ایران و افغانستان بعد از آگیری سد سلما در افغانستان پرداخته و اعلام داشتند حداقل نیاز محیط زیستی این رودخانه در کلاس C و به‌طور متوسط ۳۰ درصد دبی متوسط سالیانه باید باشد تا از اثرات سوءطبیعی و محیط زیست در پایاب این سد جلوگیری شود. (Zolfagharpour et al. (2021) یک قانون بهره‌برداری خطی/غیرخطی از مخزن ذخیره رودخانه زاینده‌رود را با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-II برای حالت‌های خشکسالی هیدرولوژیکی و الزامات جریان محیط زیست بر اساس روش Tennant ارزیابی کردند. بدین منظور، مدل ارزیابی خاک و آب (SWAT) برای شبیه‌سازی رژیم جریان روزانه طبیعی با حذف اثرات انسانی به‌عنوان جریان ورودی به سیستم استفاده شد. نتایج نشان داد که لحاظ کردن حالت خشکسالی هیدرولوژیکی می‌تواند شاخص اعتماد زمانی سیستم مخزن را ۲۳ درصد نسبت به اجرای ساده قوانین تصمیم‌گیری غیرخطی (سیاست بهره‌برداری استاندارد) بهبود بخشد. هم‌چنین، آن‌ها بیان کردند که روش پیشنهادی میزان آب تخصیصی محیط زیست پایاب رودخانه زاینده‌رود و هم‌چنین تالاب گاوخونی در انتهای رودخانه را بیشینه کرده و به‌طور ضمنی دامنه تغییرات جریانات شدید را در حفظ بیش‌تر تنوع اکوسیستم به حداقل کاهش می‌دهد. (Mezger et al. (2021) مطالعه‌ای در پایین دست سدهای احداث شده بر روی رودخانه واقع در اسپانیا برای بررسی نوسانات رژیم هیدرولوژیکی بعد از احداث این سدها انجام دادند. آن‌ها با بررسی رژیم جریان رودخانه (سالیانه، ماهیانه

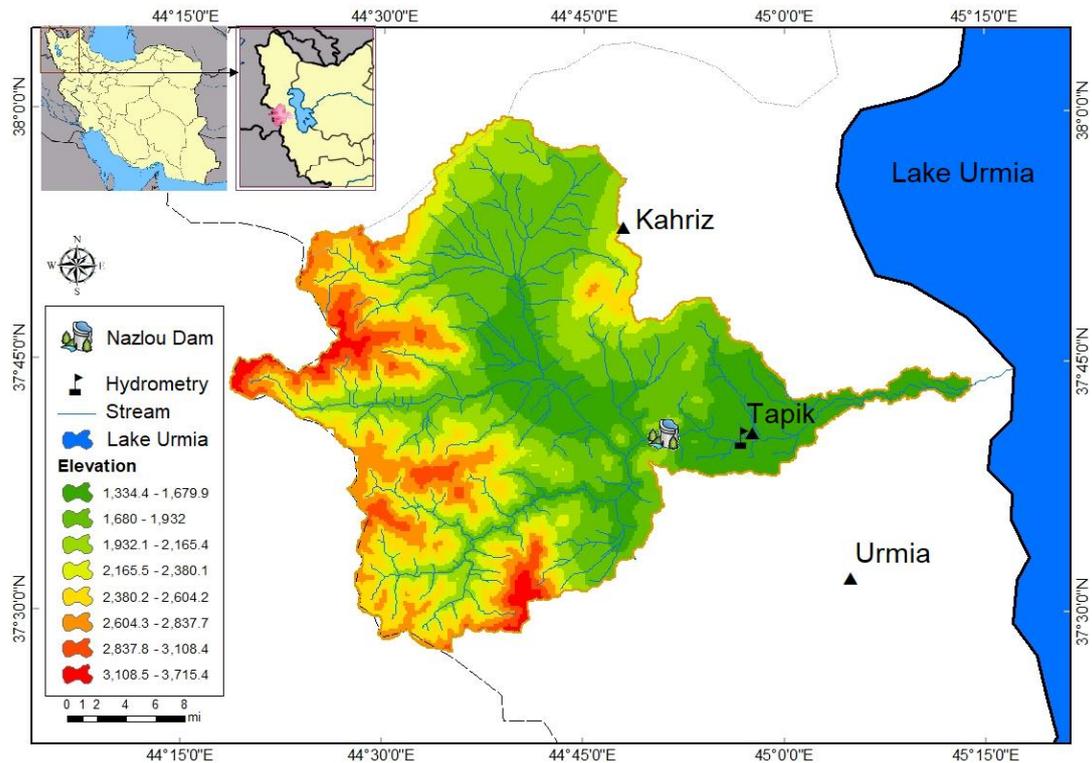
آخر توسعه و ارزیابی عملکرد روش‌های برآورد جریان محیط زیست رودخانه‌ها در حفظ و احیا بوم‌سازگان رودخانه‌ها خصوصاً در پایاب سیستم مخازن مورد توجه متخصصین و پژوهشگران مختلف در سرتاسر دنیا قرار گرفته است. به نظر می‌رسد ضرورت چنین مطالعاتی در یک اقلیم نیمه‌خشک و با تنش آبی بالا مانند حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وجود ۱۸ سد مخزنی بزرگ برای ذخیره و کنترل جریان رودخانه‌ای با شرایط حساس یا بحران خشک شدن دریاچه و همچنین اثرات بسیار منفی آن در اکوسیستم منطقه شمال غرب کشور ایران دارای اولویت بسیار بالایی است. چنین ارزیابی می‌تواند برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار از منابع آب تجدیدپذیر حوضه آبریز و همچنین بهره‌برداری بهینه از مخازن ذخیره جریان سطحی به‌عنوان منابع اصلی تأمین نیاز محیط زیستی پایاب رودخانه‌ها، حق‌آبه دریاچه ارومیه و همچنین اکوسیستم منطقه بسیار مؤثر باشد. از طرف دیگر مرور مطالعات معتبر نشان می‌دهد که مطالعات نیاز محیط زیستی رودخانه‌ها غالباً متمرکز بر تخمین نیاز محیط زیستی بر اساس روش‌های مختلف و مقایسه رژیم جریان رودخانه قبل و بعد از احداث سد در دو شرایط جاری و سازگار با اکوسیستم در دوره تاریخی بوده است. این درحالی است اثر رهاسازی نیاز محیط زیستی به‌هنگام سازگار با اکوسیستم بر رفتار بلندمدت خصوصیات مهم مختلف سیستم مخازن ذخیره (مانند حجم مفید، منحنی فرمان، رفتار هیدرولوژیکی، دوره بحرانی، تلفات ناشی از تبخیر و غیره) مورد توجه مطالعات پیشین قرار نگرفته و این امر می‌تواند یک رویکرد نوآورانه در این زمینه بوده که در مطالعه حاضر انجام پذیرفته است. بدین منظور در این مطالعه یک رویکرد جامع شبیه‌سازی مونت کارلو برای مقایسه چندین روش مهم تخمین نیاز محیط زیستی رودخانه (پایاب سد) و ارزیابی اثرات آن‌ها بر خصوصیات مهم طرح (مانند حجم مفید) و بهره‌برداری (مانند منحنی فرمان) در سیستم مخازن انجام می‌شود. بدین منظور سیستم ذخیره در شرایط فرضی متعدد از تقاضا (۹ گزینه)، شاخص‌های عملکرد (۱۰ گزینه) و نیاز محیط زیستی (پنج روش) بر روی رودخانه نازلو به‌عنوان رودخانه پرآب و مهم تأمین‌کننده نیاز محیط زیستی دریاچه ارومیه انجام پذیرفته است. این مطالعه بر پایه یک روش شبیه‌سازی گسترده مونت کارلو با محدوده وسیع از تقاضا (Demand=0.10 to 0.40, Step=0.05)، شاخص اعتماد زمانی (Rel=0.90 to 100)، شاخص آسیب‌پذیری

خبر توسعه و ارزیابی عملکرد روش‌های برآورد جریان محیط زیست رودخانه‌ها در حفظ و احیا بوم‌سازگان رودخانه‌ها خصوصاً در پایاب سیستم مخازن مورد توجه متخصصین و پژوهشگران مختلف در سرتاسر دنیا قرار گرفته است. به نظر می‌رسد ضرورت چنین مطالعاتی در یک اقلیم نیمه‌خشک و با تنش آبی بالا مانند حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وجود ۱۸ سد مخزنی بزرگ برای ذخیره و کنترل جریان رودخانه‌ای با شرایط حساس یا بحران خشک شدن دریاچه و همچنین اثرات بسیار منفی آن در اکوسیستم منطقه شمال غرب کشور ایران دارای اولویت بسیار بالایی است. چنین ارزیابی می‌تواند برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار از منابع آب تجدیدپذیر حوضه آبریز و همچنین بهره‌برداری بهینه از مخازن ذخیره جریان سطحی به‌عنوان منابع اصلی تأمین نیاز محیط زیستی پایاب رودخانه‌ها، حق‌آبه دریاچه ارومیه و همچنین اکوسیستم منطقه بسیار مؤثر باشد. از طرف دیگر مرور مطالعات معتبر نشان می‌دهد که مطالعات نیاز محیط زیستی رودخانه‌ها غالباً متمرکز بر تخمین نیاز محیط زیستی بر اساس روش‌های مختلف و مقایسه رژیم جریان رودخانه قبل و بعد از احداث سد در دو شرایط جاری و سازگار با اکوسیستم در دوره تاریخی بوده است. این درحالی است اثر رهاسازی نیاز محیط زیستی به‌هنگام سازگار با اکوسیستم بر رفتار بلندمدت خصوصیات مهم مختلف سیستم مخازن ذخیره (مانند حجم مفید، منحنی فرمان، رفتار هیدرولوژیکی، دوره بحرانی، تلفات ناشی از تبخیر و غیره) مورد توجه مطالعات پیشین قرار نگرفته و این امر می‌تواند یک رویکرد نوآورانه در این زمینه بوده که در مطالعه حاضر انجام پذیرفته است. بدین منظور در این مطالعه یک رویکرد جامع شبیه‌سازی مونت کارلو برای مقایسه چندین روش مهم تخمین نیاز محیط زیستی رودخانه (پایاب سد) و ارزیابی اثرات آن‌ها بر خصوصیات مهم طرح (مانند حجم مفید) و بهره‌برداری (مانند منحنی فرمان) در سیستم مخازن انجام می‌شود. بدین منظور سیستم ذخیره در شرایط فرضی متعدد از تقاضا (۹ گزینه)، شاخص‌های عملکرد (۱۰ گزینه) و نیاز محیط زیستی (پنج روش) بر روی رودخانه نازلو به‌عنوان رودخانه پرآب و مهم تأمین‌کننده نیاز محیط زیستی دریاچه ارومیه انجام پذیرفته است. این مطالعه بر پایه یک روش شبیه‌سازی گسترده مونت کارلو با محدوده وسیع از تقاضا (Demand=0.10 to 0.40, Step=0.05)، شاخص اعتماد زمانی (Rel=0.90 to 100)، شاخص آسیب‌پذیری

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه و رودخانه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از شش حوضه اصلی ایران است که در شمال غرب کشور واقع شده است. ۱۳ رودخانه اصلی از جمله رودخانه پرآب نازلوچای به‌عنوان مطالعه موردی، جریان سطحی حوضه دریاچه ارومیه را زهکشی می‌کنند. رودخانه نازلو پس از تأمین آب شرب و کشاورزی اراضی تحت پوشش خود، به دریاچه ارومیه تخلیه شده و حدود ۸-۹ درصد جریان حق‌آبه یا نیاز محیط زیستی و اکوسیستم دریاچه را تأمین می‌کند. رژیم هیدرولوژیکی رودخانه نازلو رژیم بارانی-برفی بوده و متوسط جریان سالانه طبیعی شده (حذف روند) آن برابر ۳۲۶ میلیون مترمکعب در سال برای دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۵۱ بوده است. شکل (۱) محدوده جغرافیایی حوضه آبریز، موقعیت ایستگاه هیدرومتری مینا و محل پیشنهادی سد مخزنی رودخانه نازلو را نشان می‌دهد. در حال حاضر، دریاچه ارومیه به‌دلیل توسعه گسترده اراضی آبی، افزایش مصرف آب کشاورزی و اثرات تغییرات اقلیمی، تعادل هیدرولوژیکی خود را از دست داده است. در نتیجه، دریاچه بیش از ۹۰ درصد از حجم ذخیره خود را از دست داده و در معرض خطر خشک شدن قرار دارد. بنابراین، برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از سازه‌های کنترل و تنظیم جریان رودخانه‌های اصلی حوضه آبریز از جمله رودخانه نازلو با هدف تأمین نیاز محیط زیستی پایاب رودخانه و دریاچه ارومیه و همچنین دستیابی به شرایط پایدار اکوسیستم منطقه دارای اولویت پژوهشی بسیار بالایی است. لازم به یادآوری است احداث سد مخزنی نازلو جزء برنامه‌های توسعه وزارت نیرو در دو دهه گذشته بوده، ولی تکمیل ساختمانی آن به‌دلیل بحران دریاچه ارومیه متوقف شده است (Absaran, 1999).



شکل ۱- محدوده حوضه آبریز نازلو، موقعیت ایستگاه هیدرومتری و محل پیشنهادی احداث سد و توپوگرافی حوضه
Figure 1- Watershed area, location of hydrometric station, proposed site of dam construction, and topography of watershed

ایستگاه‌های هیدرومتری تپیک در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۵۱ به‌عنوان داده‌های مبنا یا جریان ورودی سیستم ذخیره رودخانه مورد مطالعه نازلو استفاده شد. جدول‌های ۱ و ۲ پارامترهای آماری داده‌های جریان طبیعی شده تاریخی (با حذف روند یا در شرایط ایستا) سالیانه و ماهیانه رودخانه نازلو در ایستگاه هیدرومتری مبنا را نشان می‌دهد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱- جریان سطحی، بارش و تبخیر

رودخانه نازلو در نزدیک محل پیشنهادی سدها مجهز به ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری به نام تپیک بوده که توسط امور مطالعات پایه شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در این مطالعه، از داده‌های جریان ماهیانه رودخانه در

جدول ۱- مشخصات عمومی و جغرافیایی ایستگاه مبنا و پارامترهای آماری داده‌های سالیانه جریان (۱۴۰۰-۱۳۵۱)، بارندگی (P) و تبخیر از سطح آزاد آب (E) (۱۳۶۸-۱۴۰۰) در محل سایت سد نازلو

Table 1- General and geographical characteristics of the base station and statistical parameters of annual flow (1351-1400), precipitation (P), and evaporation (E) (1368-1400) data from the free water surface at the site of Nazlou dam

Station	Geographic coordinates		Area-volume relationship and annual hydrological parameters at the dam site							
			Flow					E	P	Area-volume relationship
			Max. (MCM)	Min. (MCM)	Mean (MCM)	CV	Skewness			
Tapik	37° 40'	44° 54'	865	106	326.4	0.51	1.44	1002	397	A=1.6+0.035S

جدول ۲- پارامترهای آماری داده‌های ماهیانه جریان رودخانه نازلو در ایستگاه هیدرومتری مبنا تپیک در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۵۱

Table 2- Statistical parameters of monthly data of the Nazlou River flow at the base hydrometric station Tapik over the statistical period 1351-1400

Parameter	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Mean (MCM)	6.20	11.30	11.30	11.10	11.50	19.40	58.40	99.60	62.20	21.80	8.20	5.40
CV	0.70	0.60	0.48	0.44	0.37	0.49	0.49	0.52	0.74	0.97	0.96	0.86
Skewness	1.14	0.93	1.04	1.05	0.51	1.06	1.35	1.00	1.68	2.34	2.17	2.00

جدول ۳- مقادیر نسبی توزیع تقاضا سالیانه در ماه‌های مختلف سال برای سیستم مخزن ذخیره مورد مطالعه

Table 3- Relative values of annual demand distribution in different months of the year for the storage reservoir system under study

Dam	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Annual
Nazlou	5.60	3.20	2.60	2.60	2.60	2.60	5.30	13.60	20.50	20.50	11.50	9.50	100

۲-۳- روش‌های برآورد نیاز محیط زیستی

هدف تأمین جریان محیط زیست و حفظ اکوسیستم در رودخانه‌ها می‌تواند در سه سطح کیفی متفاوت باشد: الف) حالت آینده مطلوب (Desired Future State)، ب) کلاس مدیریت محیط زیست (Environmental Management Class) و ج) رده مدیریت اکولوژیکی (Ecological Management Category). سطح کیفی بالاتر از وضعیت محیط زیست به جریان بیش‌تری برای حفظ اکوسیستم نیاز دارد. از طرف دیگر، روش‌های مختلف برآورد نیاز محیط زیستی رودخانه‌ها در سه گروه: هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و شبیه‌ساز زیستگاه طبقه‌بندی می‌شوند. با این وجود، اکثر رودخانه‌های دنیا فاقد اطلاعات لازم اکولوژیکی و هیدرولیکی لازم و کافی در این زمینه بوده و بنابراین، روش‌های هیدرولوژیکی با توجه به ماهیت و دسترسی به داده‌های جریان در اغلب رودخانه‌ها، به‌عنوان روش‌های قابل اتکا و رایج مورد استفاده پژوهشگران قرار می‌گیرد (Yin et al., 2011; Pahl-Wostl et al., 2013) که در ادامه توضیح مختصر روش‌های به‌کار رفته در مطالعه ارائه شده است.

۲-۳-۱- روش Tennant

Tennant (1976) روشی برای تعیین جریان محیط زیست مورد نیاز برای حفظ حیات ماهی‌ها یا آبزیان در رودخانه معرفی کرد. این روش در صدی از متوسط جریان سالیانه را برای تعیین کیفیت لازم زیستگاه ماهیان به‌کار می‌برد. بر اساس مطالعه ایشان در ۵۸ مقطع عرضی از ۱۱ رودخانه در Montana، Nebraska، Wyoming آمریکا، ۱۰ درصد و ۳۰ درصد متوسط جریان سالیانه^۱ (MAF) به‌ترتیب در فصول کم و پر آبی رودخانه، حداقل نیاز محیط زیستی رودخانه برای حفظ حیات آبزیان در رودخانه است.

۲-۳-۲- روش Tessman

Tessman (1980) با اقتباس از پیشنهادات فصلی روش Tennant، روش خود را با ترکیبی از متوسط جریان ماهیانه^۲ (MMF) و متوسط جریان سالیانه (MAF) برای تعیین حداقل جریان محیط زیست ماهیانه (EF) مطابق رابطه ۱ تعریف کرد.

$$\begin{cases} \text{if } (MMF > MAF). \rightarrow EF = 0.4MMF \\ \text{if } (0.4MAF < MMF < MAF). EF = 0.4MAF \\ \text{if } (MMF < 0.4MAF). \rightarrow EF = MMF \end{cases} \quad (1)$$

۲-۳-۳- روش Smakhtin

Smakhtin et al. (2004) با ترکیب دو شاخص حداقل جریان محیط زیست^۳ (LFR) و حداکثر جریان محیط زیست^۴ (HFR)، رابطه

پارامترهای آماری جریان سالیانه (جدول ۱) رودخانه نشان می‌دهد که رودخانه نازلو با دبی ویژه و ضریب تغییرات برابر ۰/۱۹ (MCM/Km²) و ۰/۵۱ پتانسیل پایین با دامنه تغییرات بالاتر در تولید جریان دارد و این امر عدم قطعیت بیش‌تری یا ریسک بیش‌تر در مدیریت و بهره‌برداری سیستم ذخیره نازلو را ایجاد می‌کند. هم‌چنین جدول ۲ نشان می‌دهد که جریان ماهیانه رودخانه دائمی مورد مطالعه در دو فصل پرآبی (اسفند تا تیر ماه) و کم آبی (مرداد تا بهمن ماه) قابل تفکیک است. متوسط (حجم) جریان ماهیانه رودخانه نازلو در فصل پرآبی در محدوده ۱۰۰-۲۰ میلیون مترمکعب و در فصل کم آبی با دامنه تغییرات جزئی برابر ۹/۳ میلیون مترمکعب است. افزایش جریان رودخانه در فصل پرآبی ناشی از رژیم هیدرولوژیک برفی-بارانی رودخانه و ذوب ذخیره برفی در اثر افزایش دما و بارش‌های قابل توجه بهاره در منطقه مطالعاتی است.

داده‌های بارش و تبخیر در ایستگاه تپیک نیز برای دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۶۸ به‌طور ماهیانه در دسترس بوده که در اعمال تلفات ناشی از تبخیر در شبیه‌سازی سیستم مخازن ذخیره استفاده شد. متوسط سالیانه بارش و تبخیر در محل سایت سدها در جدول ۱ آمده و نشان از تفاوت قابل توجه میزان تبخیر و بارش سالیانه در منطقه مطالعاتی بوده، به‌طوری‌که میزان تبخیر حدوداً ۲/۵ برابر بارش در سایت تپیک بوده و این امر بیانگر اثر معنی‌دار تلفات ناشی از تبخیر در طرح و بهره‌برداری سیستم مخزن مورد مطالعه است. برای اطمینان از کیفیت داده‌های جریان طبیعی شده تاریخی رودخانه نازلو در ایستگاه تپیک، آزمون‌های اولیه برای همگنی، تصادفی بودن و ایستایی به‌ترتیب با استفاده از روش‌های جرم مضاعف، آزمون ران و اسپیرمن انجام شد. نتایج، فرضیه‌های همگنی، تصادفی بودن و ایستایی داده‌های طبیعی شده جریان رودخانه‌ای در سایت مورد مطالعه را تأیید کرد.

۲-۲-۲- تقاضا و رابطه سطح-حجم

بر اساس اهداف مطالعه، میزان تقاضای سالیانه سیستم ذخیره به‌طور فرضی برابر ۱۰، ۱۵، ... و ۴۰ درصد متوسط جریان سالیانه تعیین شده که امکان تحلیل برای شرایط رفتاری مختلف فراهم شود. هم‌چنین، توزیع تقاضای سالیانه در ماه‌های مختلف سال بر اساس مقادیر نسبی تقاضای ماهیانه طرح پیشنهادی وزارت نیرو شامل نیاز آب شرب و کشاورزی مطابق جدول ۳ انجام شده است. هم‌چنین، در اغلب روش‌های نهایی تحلیل سیستم مخازن برای اعمال تلفات ناشی از تبخیر در محاسبات، از رابطه خطی سطح-حجم دریاچه سد استفاده می‌شود. بنابراین، رابطه خطی سطح-حجم سد مخزنی نازلو برای بخش حجم مفید مخزن با استفاده از روش رگرسیون تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است.

³ Lowest Flow Requirement

⁴ Highest Flow Requirement

¹ Mean Annual Flow

² Mean Monthly Flow

مطالعه، از نرم افزار GEFC که توسط Smakhtin and Anputhas (2006) توسعه یافته است، استفاده شد.

۲-۳-۵- روش ذخیره رومیزی^۳ (DRM)

(Hughes and Hannart 2003) در مطالعه‌ای بر روی رودخانه‌های آفریقای جنوبی، مدلی به نام ذخیره رومیزی را برای برآورد سریع و تقریبی نیاز محیط زیستی اکولوژیکی رودخانه‌ها با داده‌های محدود معرفی کردند. در این روش چهار کلاس مدیریت محیط زیست ممکن (A-D) به ترتیب زیر تعریف می‌شوند: الف) کلاس A شامل رودخانه‌های طبیعی و تغییر نیافته، ب) کلاس B رودخانه‌های تغییر یافته ولی تا حد زیادی طبیعی، ج) کلاس C رودخانه‌های نسبتاً تغییر یافته و د) کلاس D رودخانه‌های تا حد زیادی تغییر یافته با خسارات زیاد به زیستگاه طبیعی. همچنین، علاوه بر کلاس‌بندی اصلی بالا، کلاس انتقالی یا میانی ما بین چهار کلاس اصلی (مثلاً A/B و B/C و C/D) برای افزایش دقت در تخمین جریان محیط زیست تعریف و استفاده می‌شود. در روش DRM نیاز محیط زیستی رودخانه بر اساس هفت کلاس وضعیت مدیریت محیط زیست (چهار کلاس اصلی و سه کلاس میانی) با استفاده از نرم‌افزار Desktop Reserve Model برآورد می‌شود. لازم به یادآوری است که در این روش کلاس مدیریتی بالاتر آب بیش‌تری برای حفظ اکوسیستم در نظر می‌گیرد. همچنین، در این مطالعه با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و قضاوت کارشناسان کلاس مدیریتی C برای برآورد نیاز محیط زیستی رودخانه برای روش‌های FDC Shifting و DRM در نظر گرفته شده است.

۲-۴- روش شبیه‌سازی مونت کارلو

مطالعات رفتار و عملکرد سیستم‌های مختلف منابع آب در آینده از جمله سیستم مخازن ذخیره و پایش خشکسالی یا بر اساس داده‌های تاریخی (ثبت شده) و یا با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود. در حالت اول، تحلیل سیستم آبی مورد نظر با فرض تکرار رخداد‌های تاریخی در دوره بهره‌برداری یا آینده بوده و شانس رخداد خشکسالی‌های شدیدتر از خشکسالی‌های دوره تاریخی بسیار ناچیز و نزدیک صفر فرض می‌شود. در حالی که این امر دارای احتمال بسیار ضعیفی بوده و تردیدهای جدی نسبت به نتایج چنین مطالعاتی وجود دارد (Chow et al., 1988). در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، سری داده‌های مصنوعی هیدرولوژیکی در نمونه‌های بسیار مثلاً ۱۰۰۰ سری، به‌عنوان سری داده‌های جانشین با استفاده از یک مدل استوکاستیک مناسب تولید می‌شود. چنین سری‌های تولیدی ویژگی‌های رخداد‌های هیدرولوژیکی (مانند جریان و بارندگی) که

را برای برآورد نیاز محیط زیستی رودخانه‌ها معرفی کردند. آن‌ها بیان کردند که LFR حداقل آب مورد نیاز ماهیانه رودخانه برای حفظ زندگی آبزیان مانند ماهی در رودخانه است و HFR یعنی حداکثر جریان محیط زیست، در موارد سیلاب و تأثیر آن در شکل رودخانه و گیاهان اطراف رودخانه نمود پیدا می‌کند. در روش Smakhtin، مقدار LFR برای دستیابی به شرایط اکوسیستم "نسبتاً خوب" رودخانه برابر Q90، یعنی جریانی که ۹۰ درصد مواقع سال دبی جریان رودخانه بیش‌تر از آن بوده، در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار HFR نیز بر اساس سطح کمی Q90 و نوع رژیم هیدرولوژیکی رودخانه مطابق جدول (۴) در چهار طبقه مختلف تعریف می‌شود. لازم به یادآوری است که این روش براساس بررسی و مطالعه بر روی ۱۲۸ رودخانه در نقاط مختلف دنیا توسعه یافته است.

جدول ۴- طبقه بندی برآورد شاخص حداکثر نیاز محیط زیستی در رودخانه‌ها به روش Smakhtin

Table 4- Classification of the estimation of the maximum environmental demand index in rivers using the Smakhtin method

Description	Maximum environmental demand index (HFR)	Minimum environmental demand index (Q90)
River with variable flow regime caused mainly by flooding in the wet season	HFR=0.20MAF HFR=0.15MAF	Q90<0.10MAF 0.10MAF<Q90<0.20MAF
River with a nearly constant flow regime	HFR=0	0.70MAF<Q90

۲-۳-۴- روش انتقال منحنی‌های تداوم جریان FDC Shifting

(Smakhtin and Anputhas 2006) روش انتقال منحنی‌های تداوم جریان را برای برآورد نیاز محیط زیستی ماهیانه توسعه داده و جزئیات مراحل محاسباتی آن را تشریح کردند. این روش شامل چهار مرحله اصلی الف) شبیه‌سازی وضعیت‌های هیدرولوژیکی موجود (تعیین منحنی تداوم جریان^۲ (FDC) ماهیانه مشاهداتی)، ب) تعریف کلاس‌های مدیریت محیط زیست، ج) تولید منحنی تداوم جریان محیط زیست در کلاس مدیریتی مورد نظر و د) تولید سری زمانی جریان محیط زیست ماهیانه است. در این مطالعه برای استفاده از روش FDC Shifting برای تخمین جریان محیط زیست رودخانه‌های مورد

¹ Environmental Water Flow

² Flow duration curve

³ Desktop Reserve Model

$$X_i = AZ_i + BV_i \quad (3)$$

که در آن، X_i یک بردار (12×1) مقادیر جریان ماهیانه، V_i یک بردار (12×1) متغیرهای تصادفی از توزیع نرمال استاندارد (با میانگین صفر و انحراف معیار یک) و مستقل از مقدار Z_i ، Z_i مقدار جریان سالیانه تولید شده و A و B ماتریس ضرایب است که ابعاد آن‌ها به ترتیب برابر (12×1) و (12×12) است. مقادیر ماتریس ضرایب A و B با استفاده از سری زمانی جریان سالیانه و ماهیانه تاریخی برآورد می‌شود (Lin and Lee, 1992).

یک گام اساسی در تولید داده مصنوعی برای شبیه‌سازی مونت کارلو، انتخاب توزیع آماری مناسب داده‌های مورد استفاده است. بدین منظور در این مطالعه برای تعیین توزیع آماری مناسب داده‌های جریان سالیانه و ماهیانه از روش ضریب همبستگی نمودار احتمال² (PPCC) به‌عنوان مناسب‌ترین روش تعیین توزیع احتمالی برتر به ازای پنج توزیع احتمالی نرمال، لاگ نرمال دو پارامتری، لاگ نرمال سه پارامتری، پیرسون تیپ سوم و لاگ پیرسون تیپ سوم استفاده شده است. نتایج آزمون PPCC نشان می‌دهد که توزیع پیرسون تیپ سوم به‌عنوان توزیع برتر داده‌های جریان ماهیانه و سالیانه در رودخانه نازلو است. برازش گرافیکی داده‌های سالیانه و ماه اردیبهشت به‌عنوان پر آب‌ترین ماه سال برای رودخانه نازلو با توزیع پیرسون نوع سوم به‌عنوان توزیع برتر در شکل 2 نشان داده شده است.

2-5- روش شبیه‌سازی سیستم مخازن ذخیره (توسعه روابط ذخیره-تقاضا-عملکرد)

توصیف عملکرد احتمالی سیستم مخازن ذخیره به‌ازای مقادیر مختلف تقاضا، شاخص‌های عملکرد و شرایط هیدرولوژیکی محتمل در طول دوره بهره‌برداری، با استفاده از روابط ذخیره-تقاضا-عملکرد مخازن مهیا می‌شود. رابطه ذخیره-تقاضا-عملکرد مخازن علاوه بر ارائه یک تصویر روشن‌تر از ظرفیت مخزن، عملکرد سیستم و سیاست بهره‌برداری محتمل و تعیین ترکیب بهینه برای چنین سیستم‌هایی را امکان‌پذیر می‌کند (McMahon and Adeloje, 2005). سه شاخص اصلی عملکرد، قابلیت اعتماد زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، در ارزیابی عملکرد سیستم مخازن ذخیره نقش اساسی داشته و ترکیب مقادیر سه شاخص مذکور معیار عملکرد مطلوب یا نامطلوب چنین سیستم‌هایی را تعیین می‌کنند. شاخص قابلیت اعتماد زمانی (δ) احتمال بهره‌برداری به‌طور نرمال سیستم ذخیره در طول دوره طرح یا بهره‌برداری را بیان می‌کند. شاخص برگشت‌پذیری (λ) بیانگر احتمال رسیدن از حالت شکست سیستم به حالت بهره‌برداری نرمال یا رضایت‌بخش است. شدت و درجه آسیب در پریدهای (مقاطع زمانی) شکست یک سیستم با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری (η)

احتمال رخداد آن‌ها در آینده وجود دارد، به‌طور واقعی‌تر توصیف می‌کنند و شبیه‌سازی سیستم‌های مختلف منابع آب براساس چنین سری‌های زمانی مصنوعی منجر به تحلیل درست و واقعی‌تر از عملکرد سیستم مورد نظر خواهد بود (Montaseri and Adeloje, 2002; Salas et al., 2010).

در این مطالعه یک مدل استوکاستیک توزیعی برای تولید سری زمانی ماهیانه جریان رودخانه با ترکیب مدل خودهمبسته با تأخیر یک سال، $AR(1)$ ، و مدل توزیعی والنسیا-شاکی¹ به‌ترتیب برای تولید سری زمانی جریان سالیانه و توزیع جریان سالیانه تولیدی در ماه‌های مختلف سال استفاده شده است. این مدل استوکاستیک توزیعی توانایی حفظ یا بازتولید پارامترهای آماری تاریخی یا مشاهداتی را در دو سطح سالیانه و ماهیانه سری زمانی جریان تولیدی دارد که دیگر مدل‌های استوکاستیک مستقیم ماهیانه از جمله $ARMA(p,q)$ و Thomas-Fiering فاقد آن بوده و فقط می‌توانند مشخصات آماری تاریخی را در سطح ماهیانه در سری‌های زمانی تولیدی حفظ کرده و مشخصات آماری تاریخی مانند توزیع احتمال، میانگین، انحراف معیار و غیره در سطح سالیانه را تخریب می‌کنند. در حالی که حفظ مشخصات آماری تاریخی در دو سطح سالیانه و ماهیانه داده‌های تولیدی در یک مطالعه جامع سامانه آبی مانند سیستم مخازن با گستره‌ای از رفتار دورن‌سالی و برون‌سالی دارای مزیت بالایی در تحلیل و استخراج نتایج مطمئن و دقیق‌تر از خصوصیات و عملکرد واقعی سیستم ذخیره در دوره زمانی بهره‌برداری در آینده است.

بنابراین، در این رویکرد، ابتدا سری زمانی جریان سالیانه با استفاده از مدل $AR(1)$ را تولید و سپس مقادیر سالیانه تولیدی با استفاده از مدل توزیعی والنسیا-شاکی در ماه‌های مختلف سال توزیع می‌شود. مدل $AR(1)$ به‌دلیل سادگی و عملکرد بسیار مطلوب در تولید سری زمانی مصنوعی جریان یا بارندگی سالیانه به‌طور وسیع در تحلیل سیستم‌های مختلف منابع آب در چند دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (Guimarães and Santos, 2011). رابطه ریاضی مدل $AR(1)$ به‌صورت زیر ارائه شده است:

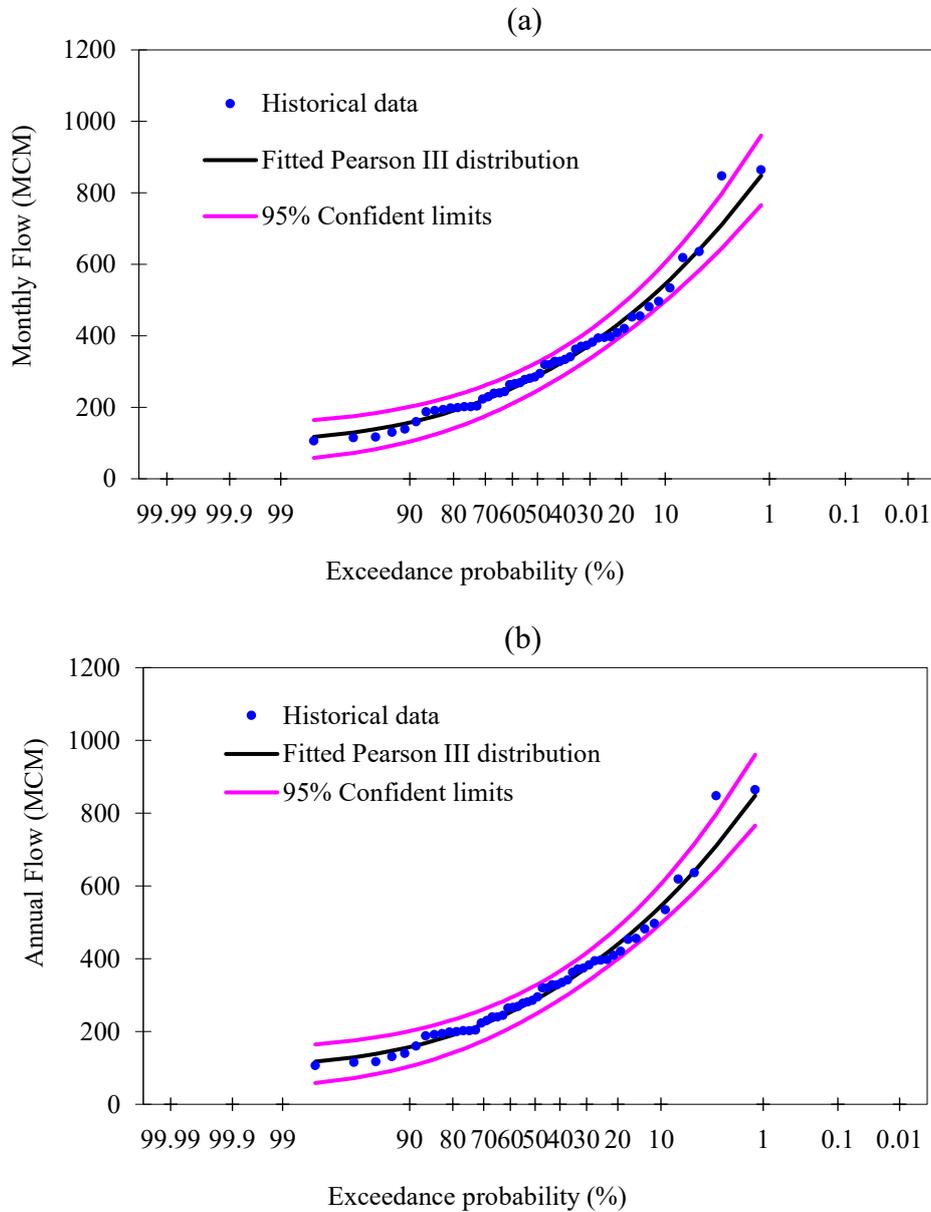
$$Q_{i+1} = \bar{Q} + \rho(Q_i - \bar{Q}) + v_i s \sqrt{1 - \rho^2} \quad (2)$$

که در آن، Q_i و Q_{i+1} به‌ترتیب جریان سالیانه تولید شده مربوط به سال i و $i+1$ میانگین جریان سالیانه تاریخی (مشاهداتی) v_i متغیر تصادفی از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس واحد، ρ ضریب خود همبستگی با تأخیر یک و S انحراف معیار جریان تاریخی سالیانه است. سپس جریان سالیانه تولیدی مدل $AR(1)$ به‌وسیله مدل توزیعی والنسیا-شاکی به مقادیر جریان ماهیانه در 12 ماه سال تبدیل و توزیع می‌شود. مدل والنسیا-شاکی برای توزیع جریان سالیانه در ماه‌های مختلف مطابق رابطه³ تعریف می‌شود:

¹ Valencia-Schaake disaggregation model

² probability plot correlation coefficient

تعریف می‌شود. همچنین، از ترکیب سه شاخص مذکور، شاخص شایستگی (φ) برای مقایسه و تعیین موقعیت بهینه سیستم تعریف و مورد استفاده قرار می‌گیرد (Loucks and Gladwell, 1999).



شکل ۲- برازش گرافیکی داده‌های سالیانه (a) و ماه اردیبهشت (b) رودخانه نازلوچای با توزیع احتمال پیرسون نوع سوم
Figure 2- Graphical fitting of annual (a) and Ordibehesht (May) (b) data of the Nazlou River with the Pearson type III probability distribution

که در آن‌ها، R_t و R_t^* ، به ترتیب، تخصیص و تقاضای آب در پریود t ؛ f و T تعداد پریودهای شکست و کل دوره طرح و f_s تعداد پریودهای شکست پیوسته هستند.

تحلیل ذخیره- تقاضا- عملکرد سیستم مخازن ذخیره مورد مطالعه با استفاده از روش اصلاح شده Modified Sequent Peak Algorithm (Modified SPA-II) انجام پذیرفته است (Montaseri, 1999; Montaseri and Adeloye, 2004;)

در این مطالعه از سه شاخص عملکرد مذکور مطابق روابط زیر استفاده شده است:

$$\delta = \left(1 - \frac{f}{T}\right) \tag{۴}$$

$$\lambda = \left(1 - \frac{f_s}{f}\right) \tag{۵}$$

$$\eta = \frac{\left(\sum_{t \in f} R_t^* - \sum_{t \in f} R_t\right)}{\sum_{t \in f} R_t^*} \tag{۶}$$

(shifting) با استفاده از سری زمانی جریان تاریخی برآورد شد. هم‌چنین در این مرحله، پارامترهای دو مدل استوکاستیک AR(1) و مدل توزیعی والنسیا-شاکی با استفاده از سری زمانی سالیانه و ماهیانه طبیعی شده تاریخی محاسبه شد. در قدم بعدی ابتدا با استفاده از مدل AR(1)، سری زمانی جریان سالیانه جانشین یا مصنوعی تولید و سپس مقادیر جریان سالیانه تولیدی با استفاده از مدل توزیعی والنسیا-شاکی در ماه‌های مختلف سال توزیع و در نتیجه 1000 سری زمانی جریان جانشین یا مصنوعی ماهیانه حاصل شد. در مرحله انتهایی یک شبیه‌سازی بسیار وسیع یعنی برابر 924 هزار بار، سیستم مخزن ذخیره (924000=11×2×6×1000) براساس 1000 سری زمانی جریان ماهیانه تولیدی یا مصنوعی برای ترکیب‌های متعدد تقاضا (D_{Annual}=0.1 to 0.4 MAF, step 0.5)، شاخص قابلیت اعتماد زمانی (Rel=0.9 to 1.0 step 0.01)، شاخص آسیب‌پذیری (Vul=0.0 and 0.3) و روش‌های برآورد نیاز محیط زیستی (پنج روش + یک روش بدون اعمال نیاز محیط زیستی) انجام شد. در نهایت اثر اعمال نیاز محیط زیستی در تخصیص از سد‌ها بر مشخصات یا خصوصیات رفتار بلندمدت و عملکرد سیستم مخازن در مرحله طراحی و بهره‌برداری استخراج و خلاصه شد. لازم به ذکر است بدین منظور کدهای کامپیوتری مدل استوکاستیک و شبیه‌سازی سیستم ذخیره در محیط نرم‌افزار ویژوال فرترن در قالب نرم افزار StoResSim توسعه یافته است.

۳- نتایج و بحث

نتایج این مطالعه در چهار زیر بخش اصلی تهیه و تنظیم شد. زیر بخش نخست، مقایسه نیاز محیط زیستی روش‌های پنجگانه و جریان ماهیانه تاریخی را شامل شده است. در زیر بخش بعد ارزیابی عملکرد مدل‌های استوکاستیک در تولید سری‌های زمانی جانشین جریان رودخانه و حفظ یا بازتولید پارامترهای آماری تاریخی در داده‌های تولیدی در دو سطح سالیانه و ماهیانه تشریح شده است. در زیر بخش سوم و چهارم، مقایسه و ارزیابی اثر روش‌های مختلف تخمین نیاز محیط زیستی به ترتیب بر مشخصات مهم سیستم مخازن ذخیره و الگوی بهره‌برداری در مراحل طرح و بهره‌برداری انجام شده است.

(McMahon et al., 2006). این تکنیک به‌عنوان یک روش صریح و سریع برای کمینه کردن حجم ذخیره مورد نیاز مطرح بوده و قادر به اعمال تلفات تبخیر و شاخص‌های عملکرد مخزن در شبیه‌سازی سیستم مخازن ذخیره است که برای تحلیل دقیق چنین سیستم‌هایی ارزشمند است. هم‌چنین، روش SPA توسط Montaseri (1999) برای کاربرد در سیستم مخازن ذخیره چندگانه توسعه داده شده است. روش‌های SPA اصلاح‌شده برای مخازن منفرد و چندگانه در منابع Montaseri (1999) و McMahon and Adeloye (2005) در دسترس است. روابط محاسباتی روش Basic SPA در رابطه 7 و 8 نشان داده شده است.

$$K_t = \begin{cases} K_{t-1} + R_t + EV_t + EF_t - I_t, & \text{if } > 0.0 \\ 0.0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$, t = 1, \dots, T$$

$$K_a = \max(k_t), \quad t=1, \dots, T \quad (8)$$

که در آن ظرفیت حجم مفید، K_t و K_{t-1} ، به ترتیب مقدار کسری یا کمبود حجم ذخیره در مخزن در انتهای پرپود t و $t-1$ حجم جریان ورودی به مخزن در طول پرپود t ، R_t حجم جریان تخصیص از مخزن در طول پرپود t ، EV_t حجم آب تلفات ناشی از تبخیر در طول پرپود t ، EF_t حجم جریان حق‌آبه محیط زیست و T تعداد کل پرپود در دوره آماری است.

۲-۶- مراحل پژوهش

در این مطالعه سری زمانی جریان ماهیانه و سالیانه تاریخی 50 ساله (1400-1351) رودخانه نازلو در ایستگاه هیدرومتری تپیک به‌عنوان داده پایه مورد استفاده قرار گرفت. در اولین قدم سه آزمون اولیه کیفی داده‌های جریان یعنی همگنی، تصادفی بودن و ایستایی داده‌ها برای تأیید صحت و سقم داده‌های جریان انجام شد. لازم به یادآوری است که داده‌های جریان رودخانه دارای گرایش کاهشی بوده که برای ادامه مطالعه روند داده‌ها حذف و داده‌های طبیعی شده جریان مورد استفاده قرار گرفته است. سپس سری زمانی جریان ماهیانه و سالیانه با توزیع‌های احتمالی مختلف تطبیق و توزیع احتمال برتر آن‌ها براساس آزمون نکویی برازش PPCC تعیین شد. در مرحله بعد، مقادیر جریان محیط زیست ماهیانه رودخانه بر اساس پنج روش هیدرولوژیکی منتخب (Tennant، Tessman، Smakhtin، DRM و FDC)

جدول 5- مقادیر نسبی نیاز محیط زیستی سالیانه و ماهیانه (%) پایاب رودخانه نازلو به‌ازای 5 روش مورد آزمون

Table 5- Relative values of annual and monthly environmental demand (%) of the Nazlou River catchment for the 5 tested methods

Method	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Annual	MCM
Historical	1.90	3.50	3.50	3.40	3.50	5.90	17.90	30.50	19.10	6.70	2.50	1.70	100.00	326.40
Tennant	0.80	0.80	0.80	0.80	2.50	2.40	2.50	2.50	2.50	2.50	0.90	0.90	19.90	64.80
Tessman	1.90	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	7.20	12.20	7.60	3.40	2.50	1.70	52.60	171.70
Smakhtin	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.10	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	26.60	87.00
FDC Shifting(C)	0.50	1.20	1.30	1.30	1.40	2.40	4.80	7.60	5.20	2.30	0.70	0.40	29.20	95.40
DRM(C)	0.70	0.90	0.90	1.00	1.00	1.70	4.40	8.00	3.70	2.80	1.00	0.80	27.00	87.90

جدول ۶- مقایسه مشخصات آماری داده‌های سالیانه تاریخی و تولیدی رودخانه نازلو در محل سایت سد مخزنی

Table 6- Comparison of statistical characteristics of historical and production annual data of the Nazlou River at the reservoir dam site

River	Data type	Mean	St. dev.	CV	Skewness	ρ	Hurst
Nazlou chay	Observation	326.40	165.50	0.51	1.44	0.39	0.76

نتایج بیانگر عملکرد مطلوب مدل استوکاستیک (AR(1) در بازتولید مشخصات آماری میانگین، ضریب تغییرات، انحراف معیار، چولگی، خودهمبستگی با تأخیر یک و شاخص هارست (Hurst) داده‌های سالیانه تاریخی در داده‌های تولیدی بوده است. این درحالی است که شاخص هارست به‌عنوان شاخص گرایش بلندمدت در ساختمان مدل کوتاه مدت (AR(1) اعمال نشده، و این امر به‌عنوان یک مزیت نسبی مهم این مدل همانند مدل‌های مدل‌های با گرایش بلندمدت مانند Broken line و Fractional Gussian Noise محسوب می‌شود و این نتیجه در مطالعات متعدد دیگری نیز تأیید شده است (Montaseri and Heydari, 2017; Koutsoyiannis, 2002).

شکل (۳) ارزیابی عملکرد مدل توزیعی والنسیا-شاکلی در بازتولید مشخصات آماری در سطح ماهیانه را با مقایسه میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی و همبستگی مابین جریان ماهیانه و سالیانه داده‌های تاریخی و تولیدی نشان می‌دهد. نتایج در شکل مذکور نشان از عملکرد بسیار مطلوب مدل والنسیا-شاکلی در حفظ خصوصیات آماری جریان در سطح ماهیانه و همچنین حفظ همبستگی جریان‌های ماهیانه با سالیانه بود. حفظ همبستگی جریان‌های ماهیانه و سالیانه در تحلیل و ارزیابی مطمئن و دقیق سیستم‌های آبی با مجموعه‌ای از رفتارهای دورن‌سالی تا برون‌سالی همانند مطالعه حاضر بسیار ضروری است (Montaseri and Heydari, 2017; Srikanthan and McMahon, 2001). از طرف دیگر، رخدادهای جریان ماه‌های مختلف در رودخانه‌های منطقه، متأثر از رژیم هیدرولوژیکی برفی-بارانی رودخانه دارای وابستگی مستمر یا پیوسته معنی‌دار با جریان در ماه‌های پیشین در دو سطح دورن‌سالی (۱ تا ۱۲ ماه) و برون‌سالی (بالتر از ۱۲ ماه) است. بنابراین، بازتولید ساختمان همبستگی دورن‌سالی یعنی همبستگی جریان مابین ماه‌های مختلف سال و همچنین خود همبستگی جریان سالیانه (جدول ۶) به‌عنوان همبستگی برون‌سالی نقش کلیدی را برای یک شبیه‌سازی سیستم ذخیره در شرایط واقعی یا بسیار نزدیک به واقعیت دارند. در جدول ۷ ضرایب همبستگی جریان مابین ماه‌های مختلف تاریخی و برآوردی آمده و بیانگر عملکرد بسیار مطلوب مدل استوکاستیک والنسیا-شاکلی در بازتولید ساختمان همبستگی جریان ماه‌های مختلف سال است.

۳-۱- جریان محیط زیست قبل و بعد احداث سیستم ذخیره
مقادیر نسبی (EF/MAF×100) نیاز محیط زیستی سالیانه و ماهیانه (درصد) رودخانه نازلو به‌ازای پنج روش مورد آزمون در پایاب سد نازلو تخمین و در جدول ۵ ارائه شده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که نیاز محیط زیستی برآوردی با روش Tennant و Tessman در رودخانه نازلو حداقل ۲۰ درصد و حداکثر ۵۳ درصد میزان متوسط جریان سالیانه را به خود اختصاص داده و مقادیر تخمینی سه روش دیگر تقریباً نزدیک به هم بوده و در حدود ۲۸ درصد متوسط جریان سالیانه است. دو روش Tennant و Tessman در تخمین مقادیر محیط زیست سالیانه صرفاً وابسته به مقدار میانگین جریان سالیانه است و کاملاً مستقل از سایر خصوصیات مهم آماری داده‌ها مانند دامنه تغییرات یا پراکندگی و میزان تقارن داده‌ها است. درحالی‌که مبنای تئوریک سه روش دیگر بر مبنای تقریباً تمام خصوصیات آماری داده‌ها استوار بوده و شاخص‌های مهم پراکندگی و تقارن داده‌ها در میزان تخمین نیاز محیط زیستی ماهیانه تأثیر قابل‌توجهی دارند.

توزیع ماهیانه جریان محیط زیست پایاب سیستم مخزن ذخیره در ماه‌های مختلف سال (جدول ۵) نیز نشان می‌دهد که توزیع ماهیانه حاصل برای سه روش Tessman، (C) FDC shifting و DRM (C) تطبیق مناسبی با مقادیر مشاهداتی داشته و این امر به‌خصوص برای دو روش Tessman و (C) FDC shifting با ضریب همبستگی حدود ۹۹ درصد همراه است.

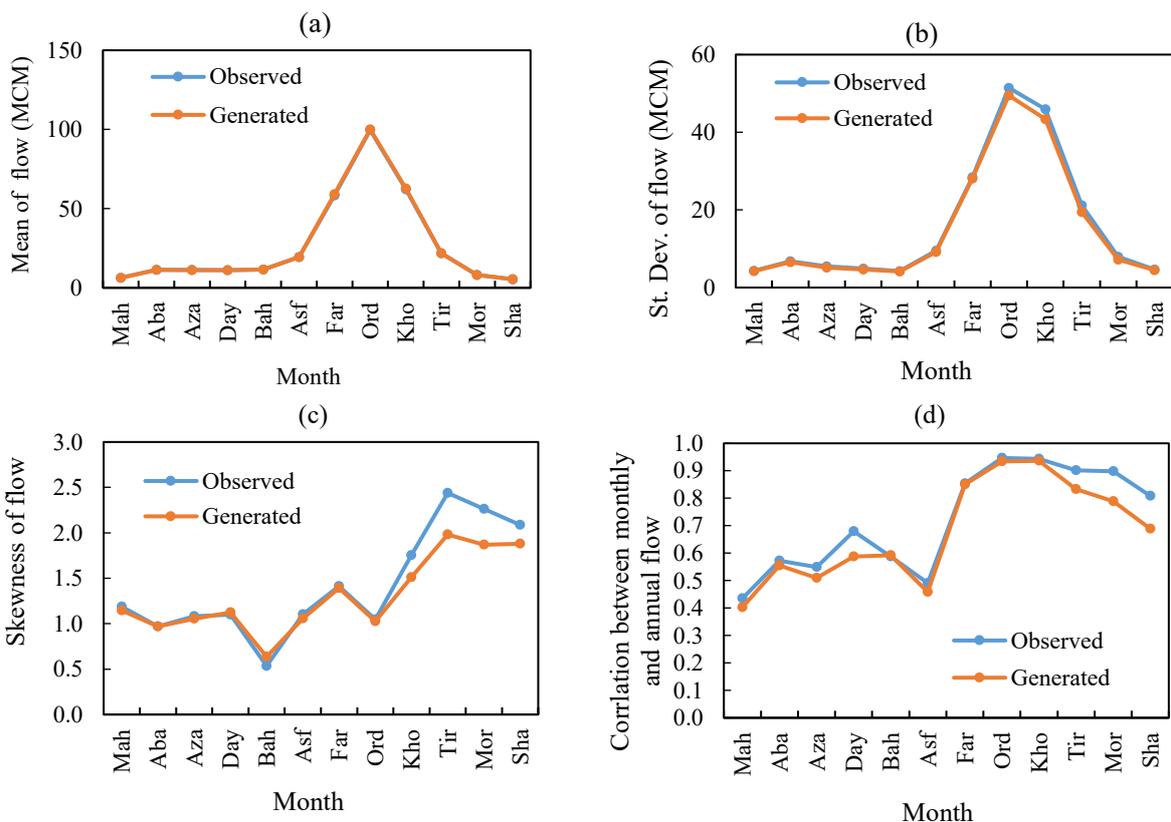
۳-۲- عملکرد مدل استوکاستیک در تولید داده جریان

تحلیل روابط ذخیره-تقاضا-عملکرد سیستم مخازن ذخیره و تعیین رفتار عمومی چنین سیستم‌هایی در یک گستره‌ای از رفتار دورن‌سالی تا رفتار برون‌سالی (یعنی شامل مخازن ذخیره کوچک تا بزرگ) نیازمند به‌کارگیری یک مدل استوکاستیک مناسب در تولید سری‌های زمانی جریان با توانایی حفظ یا بازتولید مشخصات آماری در داده‌های تولیدی جریان در دو سطح سالیانه و ماهیانه است (Montaseri and Adeloye, 2004; Montaseri and Heydari, 2017; Amirataee and Montaseri, 2024). مقایسه مشخصات آماری داده‌های سالیانه تاریخی (مشاهداتی) و تولیدی در جدول ۶ آمده است.

جدول ۷- مقایسه ساختمان همبستگی متقابل جریان مابین ماه‌های مختلف سال داده‌های تاریخی و برآوردی در رودخانه نازلو

Table 7- Comparison of streamflow cross-correlation structure between different months of the year for historical and estimated data in the Nazlou River

Month	Data type	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct	Observed	1.00	0.58	0.65	0.47	0.40	0.15	0.30	0.27	0.32	0.29	0.40	0.51
	Generated	1.00	0.56	0.63	0.44	0.39	0.16	0.31	0.27	0.31	0.27	0.36	0.49
Nov	Observed	-	1.00	0.84	0.66	0.68	0.45	0.43	0.43	0.43	0.35	0.44	0.42
	Generated	-	1.00	0.83	0.64	0.65	0.43	0.43	0.43	0.42	0.33	0.41	0.41
Dec	Observed	-	-	1.00	0.87	0.75	0.39	0.38	0.39	0.35	0.26	0.39	0.47
	Generated	-	-	1.00	0.86	0.73	0.38	0.39	0.39	0.35	0.25	0.37	0.47
Jan	Observed	-	-	-	1.00	0.75	0.42	0.44	0.53	0.44	0.37	0.49	0.54
	Generated	-	-	-	1.00	0.74	0.41	0.44	0.51	0.42	0.34	0.45	0.52
Feb	Observed	-	-	-	-	1.00	0.71	0.41	0.44	0.47	0.47	0.49	0.48
	Generated	-	-	-	-	1.00	0.69	0.42	0.44	0.46	0.43	0.45	0.47
Mar	Observed	-	-	-	-	-	1.00	0.41	0.28	0.37	0.39	0.34	0.36
	Generated	-	-	-	-	-	1.00	0.41	0.28	0.35	0.36	0.31	0.34
Apr	Observed	-	-	-	-	-	-	1.00	0.81	0.75	0.69	0.62	0.54
	Generated	-	-	-	-	-	-	1.00	0.79	0.72	0.63	0.56	0.52
May	Observed	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.90	0.75	0.73	0.59
	Generated	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.87	0.70	0.68	0.56
Jun	Observed	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.87	0.78	0.64
	Generated	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.83	0.74	0.60
Jul	Observed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.89	0.72
	Generated	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.86	0.67
Aug	Observed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.81
	Generated	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.77
Sep	Observed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00
	Generated	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00



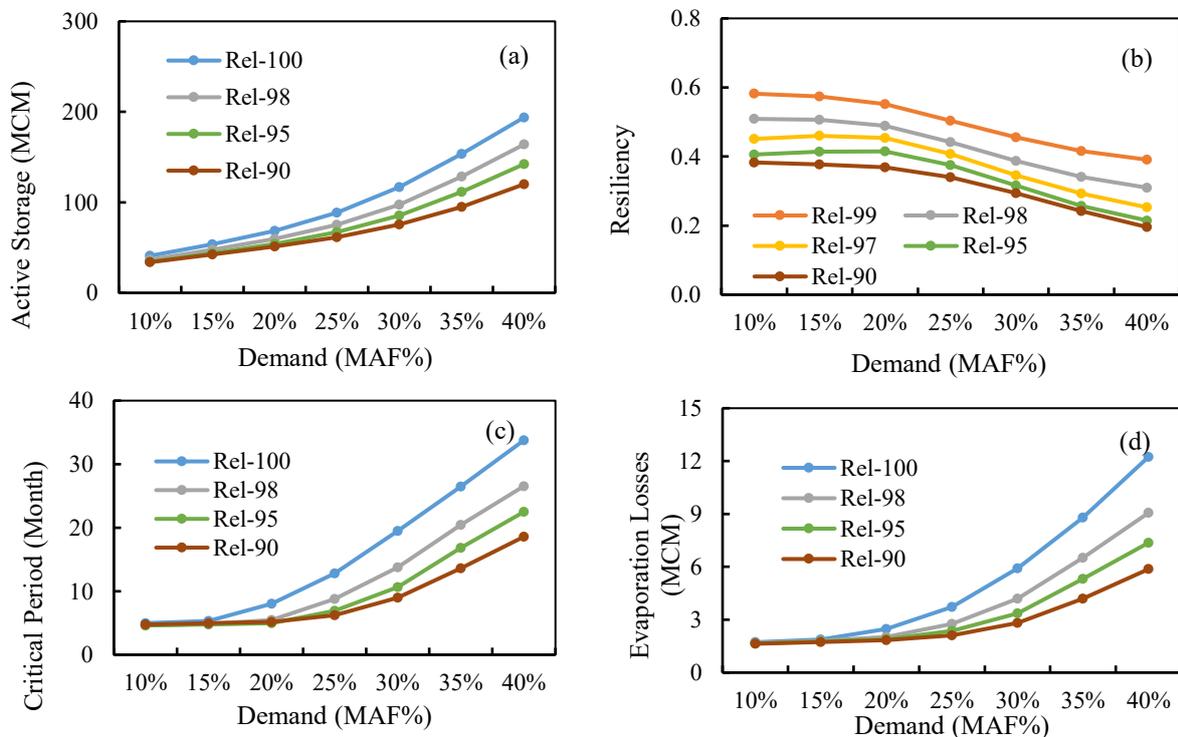
شکل ۳- مقایسه مشخصات آماری ماهیانه میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی و همبستگی متقابل جریان سالیانه با جریان در ماه‌های مختلف سال برای داده‌های مشاهداتی و برآوردی

Figure 3- Comparison of monthly statistical characteristics of mean, standard deviation, skewness coefficient, and cross-correlation of annual flow with flow in different months of the year for observed and estimated data

روابط مذکور با کاهش شاخص قابلیت اعتماد زمانی به طور محسوس کاهش پیدا می‌کند. رابطه شاخص برگشت‌پذیری و تقاضا برای هر کدام از مقادیر مختلف اعتمادپذیری (شکل 4b)، نشان از مقادیر تقریباً برابر شاخص برگشت‌پذیری تا تقاضای ۲۰ درصد بوده که در این شرایط، مخزن ذخیره رفتار کاملاً دورن‌سالی ($CP < 12$ months) داشته (شکل 4b) و سپس با افزایش تقاضا با شیب نسبتاً تندی برای سیستم مخزن ذخیره با رفتار انتقالی (تقاضا ۲۰ تا ۳۰ درصد) و کاملاً برون‌سالی (تقاضا ۳۵ تا ۴۰ درصد) کاهش پیدا می‌کنند. این درحالی است که این رفتار بلندمدت سیستماتیک برای روش Tessman، به دلیل قرار گرفتن سیستم ذخیره برای تمام تقاضاها در کلاس کاملاً برون‌سالی (یعنی $30 < CP < 50$ months)، حاصل نشده است. لازم به ذکر است در روش Tessman حجم نیاز محیط زیستی سالانه حدود ۵۳ درصد حجم جریان متوسط سالیانه رودخانه نازلو بوده و میزان آب تحویلی سیستم ذخیره برای کوچک‌ترین مخزن ($Demand = 10\% MAF$) برابر ۶۳ درصد (۵۳+۱۰ درصد) متوسط جریان سالیانه رودخانه است. بنابراین، استفاده از روش Tessman برای برآورد نیاز محیط زیستی رودخانه در طرح و بهره‌برداری سیستم مخازن ذخیره همراه با تردیدهای بسیار جدی در توجیه هیدرولوژیکی، فنی و اقتصادی چنین سیستم‌هایی است.

۳-۳- اثر اعمال نیاز محیط زیستی در روابط ذخیره-تقاضا- عملکرد مخزن

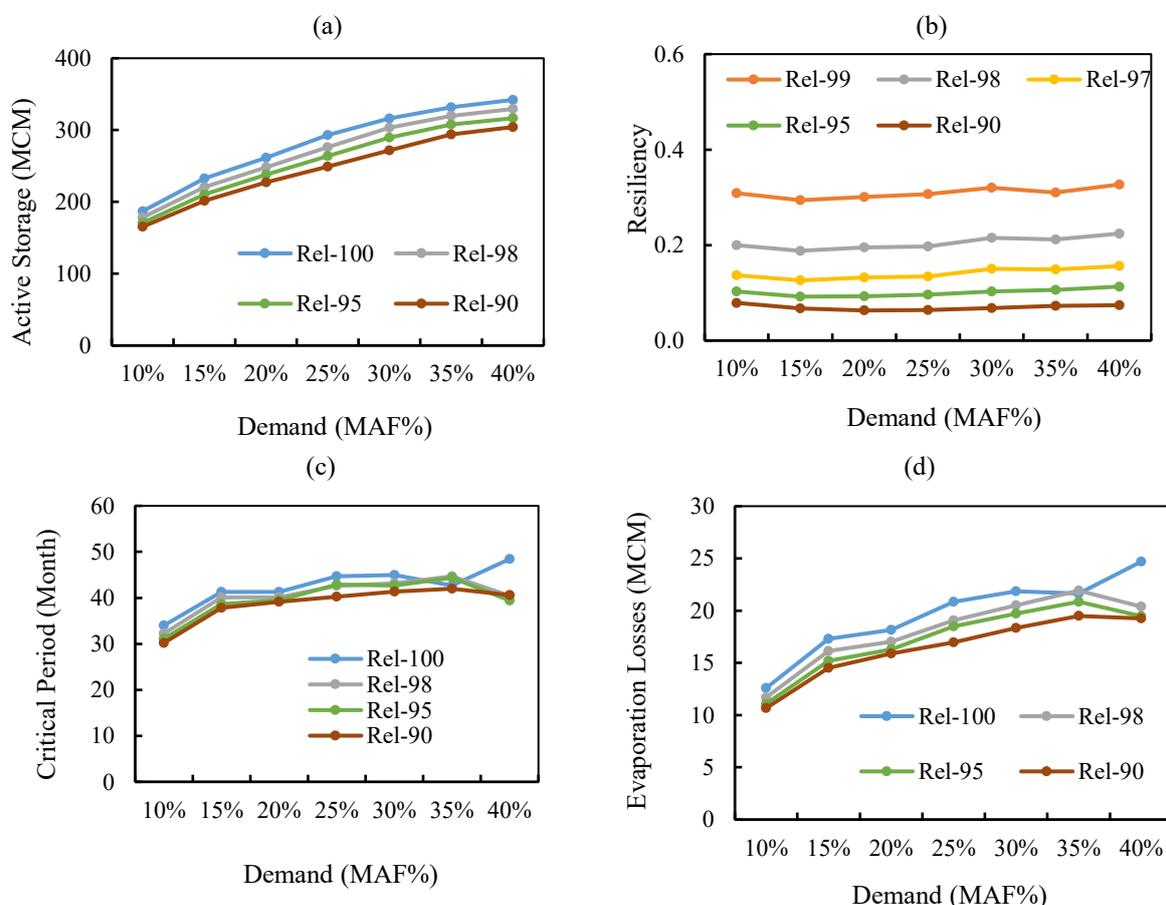
در این پژوهش روابط ذخیره-تقاضا- عملکرد سیستم مخازن ذخیره با اعمال اثر نیاز محیط زیستی به‌طور نوآورانه توسعه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، برای خلاصه کردن و ارائه مناسبی از نتایج پژوهش، نتایج گزارش شده در ادامه صرفاً به اثر نیاز محیط زیستی در رفتار بلندمدت مشخصات طراحی و بهره‌برداری سیستم مخازن ذخیره متمرکز شده است. شکل‌های ۴ و ۵ رفتار بلندمدت خصوصیات حجم مفید (ذخیره مورد نیاز) (a)، شاخص برگشت‌پذیری (b)، طول دوره بحرانی (c) و حجم تلفات ناشی از تبخیر (d) با تغییرات تقاضا برای ضرایب اعتماد زمانی ۹۰ تا ۱۰۰ درصد با اعمال نیاز محیط زیستی دو روش Tennant و Tessman را نشان می‌دهد. شکل ۴ بیانگر یک رفتار بلندمدت سیستماتیک خصوصیات چهارگانه مخزن ذخیره نازلو به‌ازای تقاضا و شاخص قابلیت اعتماد زمانی مختلف بوده و این رفتار سیستماتیک برای سه روش برآورد نیاز محیط زیستی دیگر (Smakhtin, FDC Shifting and DRM) و روش بدون اعمال نیاز محیط زیستی (Non-EF) نیز تکرار شده است. به‌طوری‌که میزان حجم مفید، طول دوره بحرانی و حجم تلفات ناشی از تبخیر با افزایش تقاضا به‌صورت نمایی افزایش یافته و میزان درجه غیرخطی یا نمایی



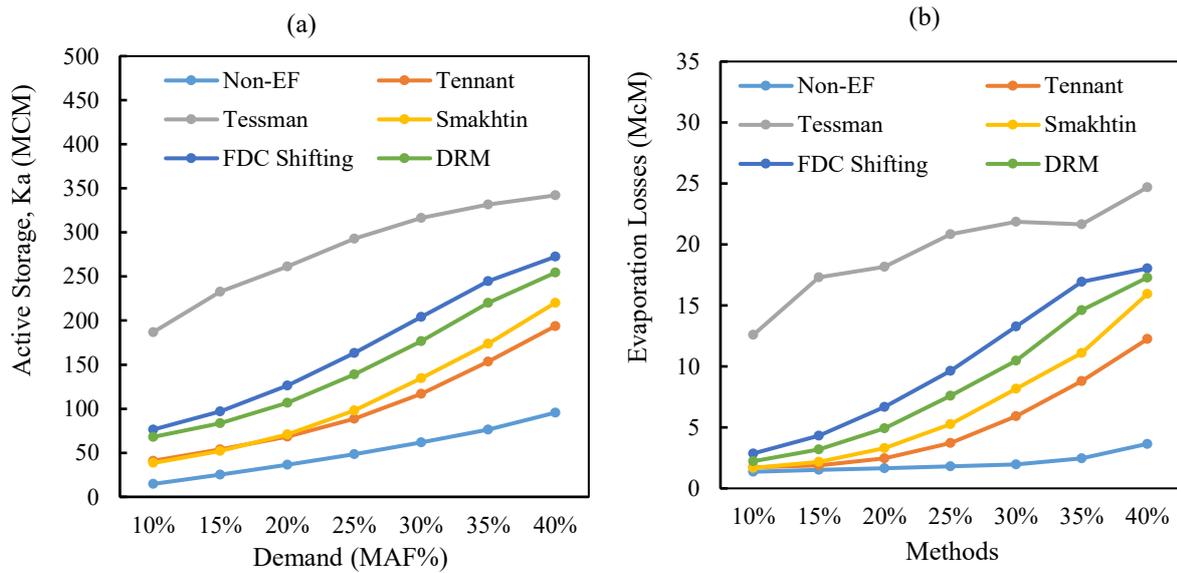
شکل ۴- نمودار رفتار بلندمدت تغییرات خصوصیات اصلی سیستم مخازن ذخیره شامل: حجم مفید (a)، شاخص برگشت‌پذیری (b)، طول دوره بحرانی (c) و حجم تلفات ناشی از تبخیر (d)، با تقاضا برای ضرایب اعتماد زمانی ۹۰ تا ۱۰۰ درصد با اعمال نیاز محیط زیستی به روش Tennant
Figure 4 - Long-term behavior diagram of changes in the main characteristics of the storage reservoir system, including: useful volume (a), resiliency index (b), critical period length (c) and volume of losses due to evaporation (d), with the demand for time reliability coefficients of 90 to 100% by applying environmental requirements according to the Tennant method.

تولیدی (مقادیر حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو) در شکل ۷ ارائه شده است. شکل ۷a نشان می‌دهد که حجم مفید با اعمال نیاز محیط زیستی بر اساس دو روش Tennant و Smakhtin تقریباً دو برابر حجم مفید بدون اعمال نیاز محیط زیستی ($K_{a,Non-EF}$) برای تقاضای مورد آزمون (۱۰ درصد تا ۴۰ درصد MAF) بوده، در حالی که این نسبت برای دو روش FDC Shifting و DRM تقریباً معادل سه برابر و برای روش Tessman این نسبت برای تقاضای مختلف متفاوت بوده و مقدار آن ۱۲ برابر برای تقاضای ۱۰ درصد بوده و به‌طور لگاریتمی به مقدار ۴ برابر برای تقاضای ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.

در شکل (۶) نمودار تغییرات حجم مفید و حجم تلفات ناشی از تبخیر با تقاضا برای شاخص قابلیت اعتماد زمانی ۱۰۰ درصد و روش‌های مختلف نیاز محیط زیستی ارائه شده است. نمودار مذکور تأییدی بر وجود یک رفتار بلندمدت سیستماتیک خصوصیات چهارگانه سیستم مخزن ذخیره مذکور به‌ازای تقاضا برای روش‌های مختلف برآورد نیاز محیط زیستی به استثنای روش Tessman در محاسبات بوده است و این رفتار سیستماتیک مطابق با رفتار سیستم در شرایط عدم اعمال نیاز محیط زیستی (Non-EF) است. همچنین، مقادیر نسبی حجم مفید با اعمال نیاز محیط زیستی به حجم مفید بدون اعمال نیاز محیط زیستی ($K_a/K_{a,Non-EF}$) و ضریب تغییرات مقادیر حجم مفید

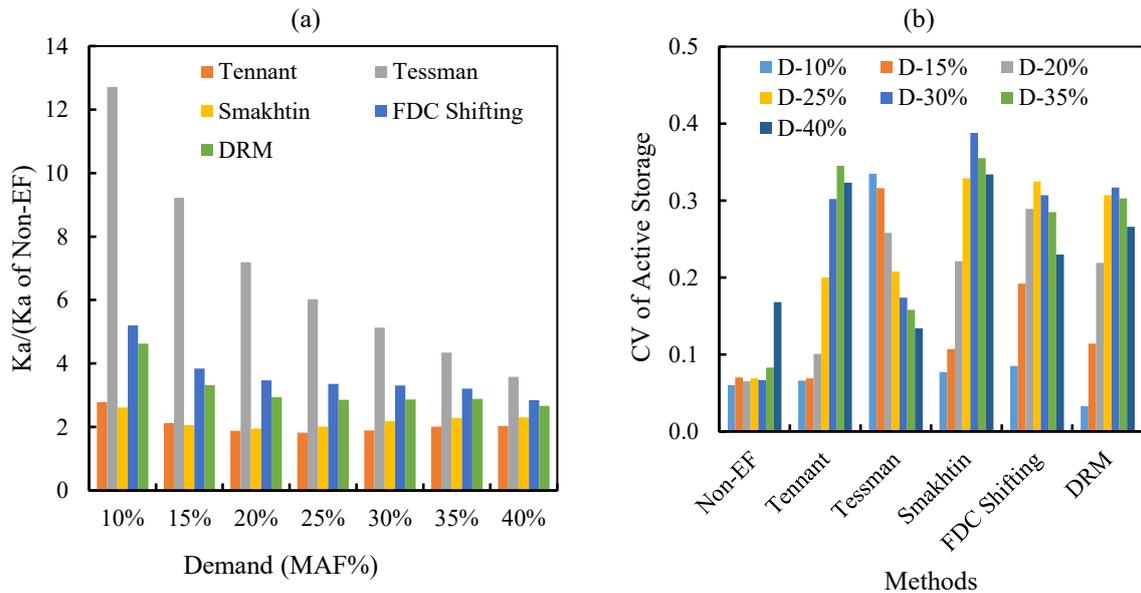


شکل ۵: نمودار رفتار بلند مدت تغییرات خصوصیات اصلی سیستم مخازن ذخیره شامل: حجم مفید (a)، شاخص برگشت‌پذیری (b)، طول دوره بحرانی (c) و حجم تلفات ناشی از تبخیر (d)، با تقاضا برای ضرایب اعتماد زمانی ۹۰ تا ۱۰۰ درصد با اعمال نیاز محیط زیستی به روش Tessman
Figure 5 - Long-term behavior diagram of changes in the main characteristics of the storage reservoir system, including: useful volume (a), resiliency index (b), critical period length (c), and volume of losses due to evaporation (d), with the demand for time reliability coefficients of 90 to 100% by applying environmental requirements according to the Tessman method



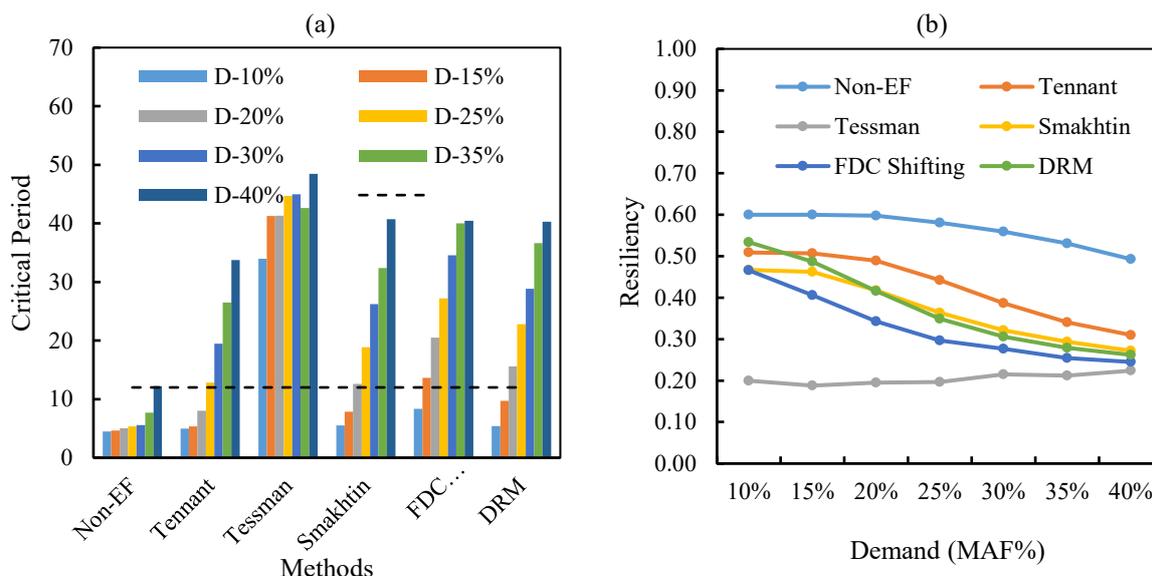
شکل ۶- نمودار تغییرات حجم مفید (a) و حجم تلفات ناشی از تبخیر در مخزن (b) با تقاضا برای شرایط با و بدون اعمال اثر نیاز محیط زیستی در سیستم ذخیره نازلو

Figure 6 - Diagram of changes in useful volume (a) and volume losses due to evaporation in the reservoir (b) with demand for conditions with and without applying the effect of environmental demand in the Nazlou storage system



شکل ۷- نمودار تغییرات نسبت حجم مفید با اعمال نیاز محیط زیستی به حجم مفید بدون اعمال نیاز محیط زیستی با تقاضا (a) و مقادیر ضریب تغییرات حجم مفید تولیدی در شرایط با و بدون اعمال نیاز محیط زیستی برای تقاضاهای مختلف (b) در سیستم ذخیره نازلو

Figure 7- Diagram of changes in the ratio of useful volume with environmental requirements to useful volume without environmental requirements with demand (a) and coefficient of variation of produced useful volume in conditions with and without environmental requirements for different demands (b) in the Nazlou storage system



شکل ۸- نمودار تغییرات دوره بحرانی بدون و با اعمال نیاز زیست محیطی برای تقاضاهای مختلف (a) و مقادیر شاخص برگشت پذیری با و بدون اعمال نیاز زیست محیطی برای تقاضاهای مختلف (b) در سیستم ذخیره نازلو

Figure 8- Diagram of changes in the critical period without and with environmental requirements for different demands (a) and the values of the resiliency index with and without environmental requirements for different demands (b) in the Nazlou storage system

شاخص برگشت‌پذیری با تقاضا برای روش‌های مختلف نیاز محیط زیستی (شکل ۸b) نشان می‌دهد که مقادیر برگشت‌پذیری به‌طور قابل‌توجهی نسبت به شرایط عدم اعمال نیاز محیط زیستی کاهش یافته ولی این کاهش برای روش Tessman بیش‌ترین مقدار را داشته و به مقدار تقریباً ثابت برابر ۰/۲ برای تمام تقاضاها رسیده است.

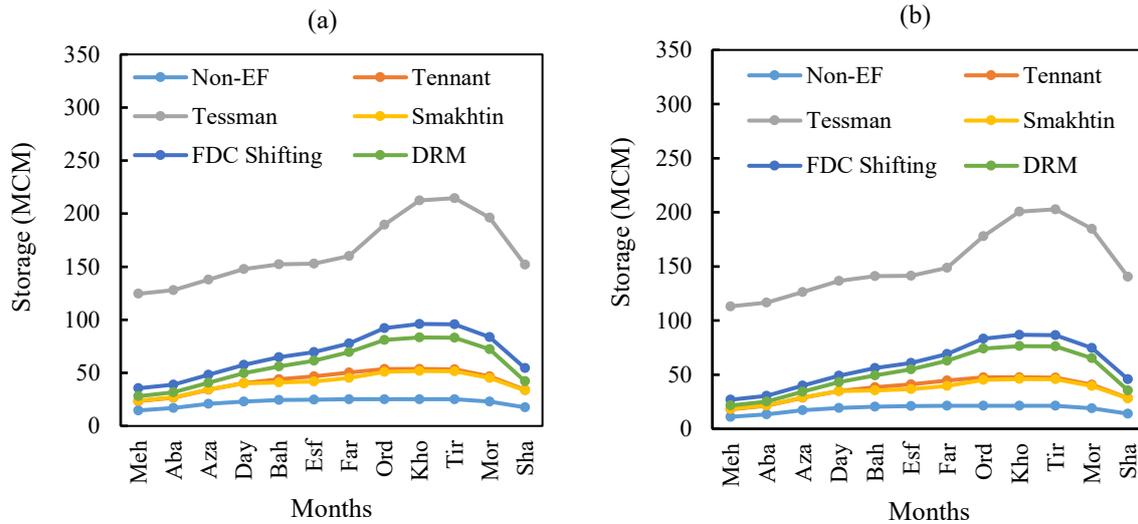
یکی از مؤلفه‌های اساسی از روابط ذخیره-تقاضا- عملکرد سیستم مخازن ذخیره، تدوین دستورالعمل بهره‌برداری از سیستم تحت شرایط بهره‌برداری نرمال و شکست (پرتش) به‌ازای مقادیر مورد نظری از شاخص‌های عملکرد سیستم، شاخص قابلیت اعتماد زمانی و شاخص آسیب‌پذیری است. چنین دستورالعمل بهره‌برداری باید رابطه میزان تخصیص از سیستم را براساس میزان ذخیره مخزن، پیش‌بینی جریان ورودی مخزن و ترکیبی مناسب از شاخص‌های عملکرد برای بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره فراهم نماید. دستورالعمل بهره‌برداری سیستم مخازن ذخیره خصوصاً در سیستم مخازن واقعی به‌صورت توسعه دیگرام تغییرات (متوسط) حجم ذخیره سیستم و میزان تخصیص بهینه در ماه‌های مختلف برای شرایط هیدرولوژیکی پرابی (سیلاب)، نرمال و کم آبی (شکست یا پرتش) انجام می‌شود. چنین دستورالعملی در سیستم مخازن ذخیره اصطلاحاً به‌عنوان منحنی کنترل^۱ یا الگوی بهره‌برداری^۲ شناخته شده که در مرحله طرح توسعه یافته و می‌تواند در مرحله بهره‌برداری با تغییر شرایط حاکم بر سیستم ذخیره (مانند شرایط هیدرولوژیکی، اکولوژیکی، اهداف و غیره) اصلاح و به‌هنگام شود.

همچنین، مقادیر ضریب تغییرات حجم مفید برای چهار روش Tennant, Smakhtin, FDC Shifting and DRM (شکل ۸b) نشان می‌دهد که مقدار آن با افزایش حجم مفید از شرایط رفتار درون‌سالی تا رفتار انتقالی، افزایش یافته و بعد با افزایش حجم مفید و رسیدن به شرایط رفتار برون‌سالی دوباره کاهش پیدا می‌کند. این نشان می‌دهد که سیستم ذخیره مورد مطالعه در شرایط انتقالی، نامطمئن‌ترین وضعیت را در دوره بهره‌برداری خواهد داشت. این رفتار برای روش Tessman با داشتن دوره بحرانی بالاتر از ۳۰ ماه برای تمام تقاضاها و قرار گرفتن آن‌ها در رده سیستم مخازن برون‌سالی ملاحظه نشده است.

شکل ۸ نمودار تغییرات دوره بحرانی و شاخص برگشت‌پذیری با تقاضا را برای شاخص قابلیت اعتماد زمانی ۹۸ درصد با و بدون اعمال نیاز محیط زیستی در محاسبات نشان می‌دهد. نمودار تغییرات دوره بحرانی با تقاضا نشان می‌دهد که دوره بحرانی برای شرایط بدون اعمال نیاز محیط زیستی، برای تمام تقاضاها، کم‌تر از ۱۲ ماه بوده و در کلاس سیستم‌های درون‌سالی طبقه‌بندی می‌شوند، در حالی که مقدار دوره بحرانی سیستم ذخیره با اعمال نیاز محیط زیستی افزایش یافته و این افزایش برای تقاضای بالاتر از ۲۰ درصد شدت بالاتری داشته و مقدار آن برای تقاضای ۴۰ درصد به ۴۰-۵۰ ماه می‌رسد. همچنین، شکل مذکور نشان می‌دهد که تغییرات مقادیر دوره بحرانی با تقاضا برای روش‌های مختلف نیاز محیط زیستی به استثنای روش Tessman تقریباً دارای گرایش یا رفتار مشابه هم هستند. تغییرات

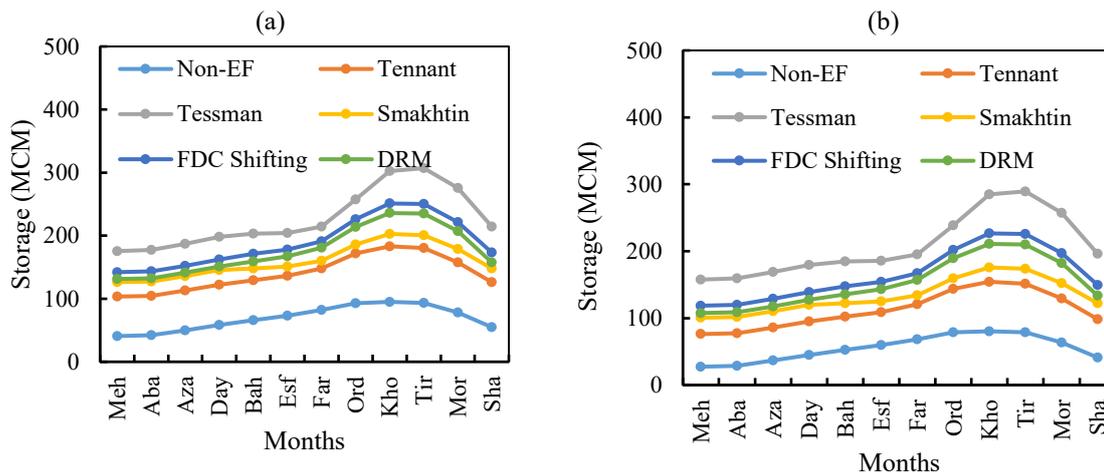
² Operation rule

¹ Control Curve



شکل ۹- مقایسه منحنی‌های بهره‌برداری با اعمال نیاز محیط زیستی از روش‌های مختلف برای تقاضای ۱۵ درصد متوسط ماهیانه و قابلیت اعتماد زمانی ۱۰۰ درصد (a) و ۹۸ (b)

Figure 9 - Comparison of control curves with environmental demand application from different methods for 15 percent of monthly average demand and 100% (a) and 98% (b) reliability



شکل ۱۰- مقایسه منحنی‌های بهره‌برداری با اعمال نیاز محیط زیستی از روش‌های مختلف برای تقاضای ۴۰ درصد متوسط ماهیانه و قابلیت اعتماد زمانی ۱۰۰ درصد (a) و ۹۸ (b)

Figure 10- Comparison of control curves with environmental demand application from different methods for 40 percent of the monthly average demand and 100% (a) and 98% (b) reliability

Tessiman است. درحالی‌که چنین انتقال افزایشی برای سیستم ذخیره با تقاضای ۴۰ درصد برای چهار روش Tennant, Smakhtin, FDC Shifting and DRM به‌طور متوسط معادل ۲/۵ و برای روش Tessiman حدوداً ۳/۴ برابر حجم ذخیره شرایط بدون اعمال نیاز محیط زیستی است.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه موردی در این پژوهش یک سیستم مخزن ذخیره فرضی بر روی رودخانه نازلو-ارومیه در شمال غرب ایران بوده است. بدین منظور داده‌های تاریخی ۵۰ ساله (۱۳۵۱-۱۴۰۰) جریان طبیعی شده رودخانه

شکل‌های ۹ و ۱۰ منحنی‌های کنترل مخزن ذخیره رودخانه نازلو برای شاخص قابلیت اعتماد زمانی ۱۰۰ و ۹۸ درصد و شاخص آسیب‌پذیری ۳۰ درصد را به‌ترتیب برای تقاضای ۱۵ درصد و ۴۰ درصد به‌عنوان نماینده دو سیستم دورن‌سالی و برون‌سالی نشان می‌دهد. نتایج در شکل ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که منحنی کنترل مخزن در شرایط دورن‌سالی و برون‌سالی با اعمال نیاز محیط زیستی انتقال افزایشی متفاوتی در حجم ذخیره از خود نشان داد، به‌طوری‌که سیستم ذخیره با تقاضای ۱۰ درصد نیازمند حجم ذخیره ماهانه حدوداً ۲/۳ شرایط بدون اعمال نیاز محیط زیستی برای چهار روش Tennant, Smakhtin, FDC Shifting and DRM و ۷/۵ برابر برای روش

سپاسگزاری

از حمایت‌های معنوی دانشگاه ارومیه برای انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

جواد حیدری کهلی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، تفسیر نتایج، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ مجید منتصری: مفهوم‌سازی، راهنمایی، کنترل نتایج، بازبینی متن مقاله؛ سمیه حاجی: راهنمایی، تفسیر نتایج، ویرایش و بازبینی مقاله

منابع

- آبساران (۱۳۷۸). گزارش فنی منابع آب سد مخزنی نازلو، مهندسین مشاور آبساران، شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ۴۴۰ ص.
- شاکری زارع، حجت، کرم، امیر، صفاری، امیر، و کیانی، طیبه (۱۳۹۹). ارزیابی نیاز جریانی محیط زیست بستر رودخانه مرزی هریود بعد از احداث آبیگری سد سلما افغانستان (با روش‌های هیدرولوژیکی)، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹(۲)، ۲۰۷-۲۲۴. doi: 10.22067/geo.v9i2.85447
- منتصری، مجید، و حیدری، جواد (۱۳۹۴). مقایسه عملکرد مدل‌های استوکاستیک در تولید داده‌های ماهیانه جریان و بارندگی، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۱(۳)، ۶۹-۸۴.
- نادری، محمدحسن، باقری خانقاهی، مرضیه، و سالاری جزی، میثم. (۱۴۰۲). بررسی شاخص‌های جریان زیست محیطی و مدل اکوهیدرولیکی PHABSIM در برآورد محدوده جریان رهاسازی بهینه اکولوژیکی از مخزن سد لتیان، *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۲۳(۸۹)، ۲۱-۴۶. doi: 10.22092/idser.2023.361807.1537
- یاسی، مهدی (۱۳۹۷). مدیریت رودخانه‌ها و سدها در تأمین و هدایت آب به دریاچه ارومیه، *پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱(۱)، ۵۹-۷۶. doi: 10.22047/srjasnr.2017.110559

References

- Absaran (1999). Technical report on water resources of Nazlou reservoir dam, Absaran Consulting Engineers, West Azerbaijan Regional Water Company, 440 p. [In Persian]
- Aguilar, C., & Polo, M. J. (2016). Assessing minimum environmental flows in nonpermanent rivers: The choice of thresholds. *Environmental*

نازلو در ایستگاه هیدرومتری تپیک، نزدیک محل سایت سیستم ذخیره، به‌عنوان داده‌های پایه برای برآورد پارامترهای دو مدل استوکاستیک مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی مونت کارلو یعنی AR(1) و Valencia and Schaake disaggregation model مورد استفاده قرار گرفته است. این پژوهش جامع با یک شبیه‌سازی بسیار وسیع سیستم ذخیره مورد مطالعه، بر اساس ۱۰۰۰ سری جریان تولیدی برای ترکیب‌های متعدد تقاضا (۹ مورد)، شاخص قابلیت اعتماد زمانی (۱۱ مورد)، شاخص آسیب‌پذیری (۲ مورد) و روش‌های برآورد نیاز محیط زیستی (پنج روش + یک مورد بدون اعمال نیاز محیط زیستی) برای استخراج مشخصات بلندمدت مخزن ذخیره در مرحله طرح و بهره‌برداری انجام پذیرفته است. در نهایت یافته‌های مهم این مطالعه در بندهای زیر خلاصه شده است:

- مقایسه و ارزیابی عملکرد پنج روش هیدرولوژیکی مورد آزمون (FDC shifting و DRM, Smakhtin, Tessman, Tennant) نشان داد که روش انتقال منحنی تداوم جریان در کلاس زیست محیطی C با میزان متوسط ۳۲ درصد میانگین جریان ماهیانه و حداقل ضریب تغییرات (CV=0.20) مناسب‌ترین روش برآورد نیاز محیط زیستی پایاب مخزن ذخیره مورد مطالعه بوده است.

- عملکرد رویکرد استوکاستیک مورد استفاده در مطالعه نشان داد که ترکیب مدل سالیانه AR(1) و مدل ماهیانه توزیعی Valencia-Shaake disaggregation model توانایی حفظ خصوصیات آماری جریان تاریخی در دو سطح سالیانه و ماهیانه داده‌های تولیدی در سطح بسیار مطلوب داشته و این امر یک شرایط مطمئن با دقت بالا را در تحلیل استوکاستیک یک سیستم مخازن ذخیره فراهم می‌کند. روابط بلند مدت ذخیره-تقاضا-عملکرد سیستم مخازن در اثر اعمال نیاز محیط زیستی، تغییر رفتار سیستماتیک مشابه به‌ازای روش‌های مختلف برآورد نیاز محیط زیستی باستانی روش Tessman نشان می‌دهند. به‌طوری‌که حجم مفید، حجم تلفات تبخیر و دوره بحرانی با افزایش تقاضا به‌صورت نمایی افزایش و شاخص برگشت‌پذیری به‌صورت پله‌ای کاهش می‌یابد. در اثر اعمال نیاز محیط زیستی در تحلیل مخازن ذخیره، حجم ذخیره مورد نیاز، حجم تلفات تبخیر و دوره بحرانی افزایش ۲ تا ۱۰ برابر پیدا می‌کنند. این امر می‌تواند توجیه هیدرولوژیکی، اقتصادی و غیره سیستم مخازن ذخیره خصوصاً مخازن ذخیره موجود را به‌دلیل کاهش قابل‌توجه از تقاضا مصارف مختلف مانند شرب و کشاورزی با چالش‌های اساسی مواجه کند.

استفاده از سایر روش‌های هیدرولوژیکی و روش‌های هیدرولیکی و شبیه‌ساز زیستگاه و همچنین توسعه این روش برای سیستم مخازن چندگانه برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

- basin, China. *Ecological Engineering*, 33(3-4), 233-241. doi: 10.5555/20083233047
- Hughes, D. A., & Hannart, P. (2003). A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 270(3-4), 167-181. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00290-1
- Koutsoyiannis, D. (2002). The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 573-595. doi: 10.1080/02626660209492961
- Lin, G. F., & Lee, F. C. (1992). An aggregation-disaggregation approach for hydrologic time series modelling. *Journal of Hydrology*, 138(3-4), 543-557. doi: 10.1016/0022-1694(92)90136-J
- Loucks, D. P., & Gladwell, J. S. (1999). *Sustainability criteria for water resource systems*. Cambridge University Press.
- McMahon, T. A., & Adeloje, A. J. (2005). *Water resources yield*. Water Resources Publication.
- McMahon, T. A., & Finlayson, B. L. (1995). Reservoir system management and environmental flows. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 1(1), 65-76. doi: 10.1111/j.1440-1770.1995.tb00007.x
- McMahon, T. A., Adeloje, A. J., & Zhou, S. L. (2006). Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 359-382. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.030
- Mezger, G., del Tánago, M. G., & De Stefano, L. (2021). Environmental flows and the mitigation of hydrological alteration downstream from dams: The Spanish case. *Journal of Hydrology*, 598, 125732. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125732
- Montaseri, M., & Adeloje, A. J. (2002). Effects of integrated planning on capacity-yield-performance functions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(6), 456-461. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:6(456)
- Montaseri, M., & Adeloje, A. J. (2004). A graphical rule for volumetric evaporation loss correction in reservoir capacity-yield-performance planning in Urmia region, Iran. *Water resources management*, 18, 55-74. doi: 10.1023/B:WARM.0000015389.70013.e4
- Montaseri, M., & Heydari, J. (2016). A comparison among the performance of the stochastic models in generating the monthly streamflow and rainfall data. *Iran-Water Resources Research*, 11(3), 69-84. [In Persian]
- Montaseri, M. (1999). Stochastic investigation of the planning characteristics of within-year and over-year reservoir systems (Doctoral dissertation, Heriot-Watt University).
- Naderi, M. H., Bagheri Khaneghahi, M., & Salarijazi, M. (2023). Study Indicators of Environmental Flow and PHABSIM EcoHydraulic Model to modelling & software, 79, 120-134. doi: 10.1016/j.envsoft.2016.02.003
- Amirataee, B., & Montaseri, M. (2023). Joint probability analysis of storage reservoir system characteristics. *Journal of Hydrology*, 622, 129753. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129753
- Batalla, R. J., Gomez, C. M., & Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of hydrology*, 290(1-2), 117-136. doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.002
- Chow, V.T, Maidmen., D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. International Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Cook, C., & Bakker, K. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global environmental change*, 22(1), 94-102. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011
- Dalcin, A. P., Brêda, J. P. L. F., Marques, G. F., Tilmant, A., De Paiva, R. C. D., & Kubota, P. Y. (2023). The role of reservoir reoperation to mitigate climate change impacts on hydropower and environmental water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 149(4), 04023005. doi: 10.1061/JWRMD5.WRENG-581
- Efstratiadis, A., Tegos, A., Varveris, A., & Koutsoyiannis, D. (2014). Assessment of environmental flows under limited data availability: case study of the Acheloos River, Greece. *Hydrological Sciences Journal*, 59(3-4), 731-750. doi: 10.1080/02626667.2013.804625
- Fallah-Mehdipour, E., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2020). Climate-environment-water: integrated and non-integrated approaches to reservoir operation. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-10. doi: 10.1007/s10661-019-8039-2
- Gao, B., Yang, D., Zhao, T., & Yang, H. (2012). Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology*, 448, 30-38. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.03.045
- Guimarães, R. C., & Santos, E. G. (2011). Principles of stochastic generation of hydrologic time series for reservoir planning and design: Case study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(11), 891-898. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000037
- Harman, C., & Stewardson, M. (2005). Optimizing dam release rules to meet environmental flow targets. *River Research and Applications*, 21(2-3), 113-129. doi: 10.1002/rra.836
- Hirji, R., & Davis, R. (2009). Environmental flows in water resources policies, plans, and projects: findings and recommendations. World Bank Publications.
- Hu, W. W., Wang, G. X., Deng, W., & Li, S. N. (2008). The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River

- sciences*, 5(4), 653-670. doi: 10.5194/hess-5-653-2001
- Suen, J. P., & Eheart, J. W. (2006). Reservoir management to balance ecosystem and human needs: Incorporating the paradigm of the ecological flow regime. *Water resources research*, 42(3). doi: 10.1029/2005WR004314
- Suwal, N., Huang, X., Kuriqi, A., Chen, Y., Pandey, K. P., & Bhattarai, K. P. (2020). Optimisation of cascade reservoir operation considering environmental flows for different environmental management classes. *Renewable Energy*, 158, 453-464. doi: 10.1016/j.renene.2020.05.161
- Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10. doi: 10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2
- Tessmann, S. (1980). Environmental assessment, technical appendix E in environmental use sector reconnaissance elements of the Western Dakotas region of South Dakota study. *Water resources research institute, South dakota state university, Brookings, SD*.
- Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River research and applications*, 19(5-6), 397-441. doi: 10.1002/rra.736
- Warner, A. T., Bach, L. B., & Hickey, J. T. (2014). Restoring environmental flows through adaptive reservoir management: planning, science, and implementation through the Sustainable Rivers Project. *Hydrological Sciences Journal*, 59(3-4), 770-785. doi: 10.1080/02626667.2013.843777
- Wu, Z., Liu, D., Mei, Y., Guo, S., Xiong, L., Liu, P., ... & Zeng, Y. (2022). Delayed feedback between adaptive reservoir operation and environmental awareness within water supply-hydropower generation-environment nexus. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131181. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131181
- Yasi, M., (2017). Management of rivers and dams in supplying and delivering water to urmia lake. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 2(1), 59-76. doi: 10.22047/srjasnr.2017.110559 [In Persian]
- Yin, X. A., Yang, Z. F., & Petts, G. E. (2011). Reservoir operating rules to sustain environmental flows in regulated rivers. *Water Resources Research*, 47(8). doi: 10.1029/2010wr009991
- Zolfagharpour, F., Saghafian, B., & Delavar, M. (2021). Adapting reservoir operation rules to hydrological drought state and environmental flow requirements. *Journal of Hydrology*, 600, 126581. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126581
- Estimation of Ecological Optimal Release Flow Range from Latyan Dam Reservoir. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 23(89), 21-46. doi: 10.22092/idser.2023.361807.1537 [In Persian]
- Ortiz-Partida, J. P., Kahil, T., Ermolieva, T., Ermoliev, Y., Lane, B., Sandoval-Solis, S., & Wada, Y. (2019). A two-stage stochastic optimization for robust operation of multipurpose reservoirs. *Water Resources Management*, 33, 3815-3830. doi: 10.1007/s11269-019-02337-1
- Pahl-Wostl, C., Arthington, A., Bogardi, J., Bunn, S. E., Hoff, H., Lebel, L., ... & Tsegai, D. (2013). Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3-4), 341-351. doi: 10.1016/j.cosust.2013.06.009
- Salas, J. D., Fu, C., & Rajagopalan, B. (2010, November). Long Range Streamflow Forecasting Based on Hydrologic and Climatic Data. In *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change* (pp. 2340-2351). doi: 10.1061/41114(371)242
- Schmutz, S., & Moog, O. (2018). Dams: ecological impacts and management. *Riverine ecosystem management: Science for governing towards a sustainable future*, 111-127. doi: 10.1007/978-3-319-73250-3_6
- Shakeri Zare, H., Karam, A., Saffari, A. & Kiyani, T. (2020). Assessment of Environmental Flow Needs of Harirud Border Riverbed after Construction and Dewatering of Salma Dam in Afghanistan (by Hydrological Methods). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(2), 207-224. doi: 10.22067/geo.v9i2.85447 [In Persian]
- Shiau, J. T., & Wu, F. C. (2013). Optimizing environmental flows for multiple reaches affected by a multipurpose reservoir system in Taiwan: Restoring natural flow regimes at multiple temporal scales. *Water Resources Research*, 49(1), 565-584. doi: 10.1029/2012WR012638
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water international*, 29(3), 307-317. doi: 10.1080/02508060408691785
- Smakhtin, V.U. & Anputhas, M. (2006). An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. IWMI Research Report 107. *International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka*, 36p.
- Srikanthan, R., & McMahon, T. A. (2001). Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. *Hydrology and earth system*