

## Optimal Water Allocation for Drinking and Industrial Consumptions With Decision Support Systems and Time Series model Approach (Case Study: Neyshabur Bar Dam)

M.T. Karbasi Maroof<sup>1</sup>, H.R. Nassery<sup>2\*</sup>, F. Alijani<sup>3</sup>

1,2,3- PhD Student, Professor and Assistant professor of Hydrogeology, Department of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\* (Corresponding Author Email: H-nassery@sbu.ac.ir)

Received: 11-11-2021

Revised: 22-01-2022

Accepted: 24-01-2022

Available Online: 21-09-2022

## تخصیص بهینه برای مصارف شرب و صنعت با استفاده از رویکرد سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری و مدل سری‌های زمانی (مطالعه موردی: سد بار نیشابور)

محمدتقی کرباسی معروف<sup>۱</sup>، حمیدرضا ناصری<sup>۲\*</sup>، فرشاد علیجانی<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، استاد و استادیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\* ایمیل نویسنده مسئول: (E-Mail: H-nassery@sbu.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

### Abstract

Bar reservoir dam has been constructed in 23 km north-west Neyshabur, to provide the urban drinking water and Neyshabur steel factory water demand. Simulation-optimization model of water resources planning (MODSIM) along with the surface flow time series modeling (SARIMA) were utilized to achieve reliable measures for water allocation to forecast the next 10 years (1396-1406). The modeling has been made based on three time-series scenarios of long-term (1348-1396), short-term (recent 10 years 1386-1396), and forecast (next 10 years). The results of the study indicated the appropriate ability of the time series models to simulate river surface run-off. Modeling of water resources planning of the Bar project shows the reliability of water supply based on the long-term time-series information to provide the steel factory and the Neyshabur drinking water demand equal 80% and 74%, respectively. These values are estimated at 59% and 50%, respectively, according to the recent-10-year time series. That shows the impact of recent droughts and the need for altering the basin water allocation planning. Changes in reservoir water volume over the last ten years show that in the majority of the months of all years, except for 1388 and 1389, there is no water for allocation in the dam reservoir. Therefore, despite the high reliability of water allocation in the long term, the reliability in the short term is low and indicates high risk to supply water requirements.

**Keywords:** Water Allocation, Bar Dam, ARIMA Model, DSS, MODSIM.

### چکیده

سد مخزنی بار در ۲۳ کیلومتری شمال غرب شهر نیشابور با هدف تامین آب شرب شهر و آب مورد نیاز کارخانه فولاد نیشابور ساخته شده است. به منظور دستیابی به مقادیری قابل اعتماد برای تخصیص آب، از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مدیریت منابع آب MODSIM (مدل سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری) به همراه مدل‌سازی سری زمانی رژیم جریان سطحی SARIMA با هدف پیش‌بینی ۱۰ سال آینده (۱۳۹۶-۱۴۰۶)، بهره گرفته شده است. مدل‌سازی براساس سه سناریو سری زمانی دراز مدت (۱۳۴۸-۱۳۹۶ لغایت ۱۳۹۶)، کوتاه مدت (۱۰ ساله اخیر ۱۳۸۶-۱۳۹۶) و پیش‌بینی (۱۰ ساله آینده) انجام شده است. نتایج پژوهش نشان از توانایی مناسب شبیه‌سازی جریان سطحی رودخانه توسط مدل‌های سری زمانی می‌نماید. مدل‌سازی برنامه‌ریزی منابع آب طرح بار نشان می‌دهد، بر پایه اطلاعات سری زمانی دراز مدت رواناب رودخانه بار، قابلیت اطمینان تامین آب برای کارخانه فولاد ۸۰ درصد و برای شرب نیشابور ۷۴ درصد است. این ارقام برای سری زمانی رواناب ۱۰ ساله اخیر به ترتیب برابر ۵۹ و ۵۰ درصد می‌باشد که نشان از تأثیر خشکسالی‌های اخیر و لزوم تغییر برنامه‌ریزی تخصیص آب حوضه است. تغییرات حجم آب مخزن در دوره ۱۰ ساله اخیر نشان می‌دهد، به استثنای سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ در بیشتر ماه‌های سایر سال‌ها، آبی جهت تنظیم در مخزن سد وجود ندارد. به همین جهت با وجود قابلیت اطمینان بالای تخصیص آب در سری زمانی دراز مدت، قابلیت اطمینان در دوره کوتاه مدت اندک است و نشان از ریسک بالای طرح در تأمین نیازهای آبی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** تخصیص آب، سد بار، DSS، ARIMA، MODSIM.

جریان حداقل، نرمال و حداکثر را توسعه دادند. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از یک سری زمانی داده‌های تاریخی برای کشف تفاوت‌های میان DSS چند سناریویی زمان واقعی ناکافی است.

پیش‌بینی نقشی حیاتی در مدیریت پایدار منابع آب در بخش‌های اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی دارد و استفاده از مدل‌های داده محور (مدل‌سازی سری‌های زمانی) در فرایند پیش‌بینی، مدیریت و تخصیص منابع آب بسیار متداول است (Firat و همکاران، ۲۰۰۹؛ Caiado، ۲۰۱۰). به‌عنوان نمونه می‌توان به پیش‌بینی متوسط جریان سطحی ورودی به سد دز با استفاده از مدل  $ARIMA^2$  (Vahdat و همکاران، ۲۰۱۵)، مدل‌سازی استوکستیک رژیم جریان سطحی رودخانه شیرورو نیجریه با استفاده از مدل‌های  $ARMA$ ،  $AR$  و  $ARIMA$  و پیش‌بینی میزان استفاده موثر آب رودخانه برای مصرف کشاورزی (Musa، ۲۰۱۳)، مدل‌سازی سری زمانی (ARIMA) نوسان سطح آب زیرزمینی با دخالت نوسان‌های فصلی در منطقه لاتریت شرق بنگلادش (Vishwajith و همکاران، ۲۰۱۵)، پیش‌بینی کیفیت آب ساحلی با استفاده از تحلیل سری زمانی مانیتورینگ زمان واقعی در آب‌های ساحلی شانگهای (Zhao و An، ۲۰۱۷) و تحلیل نوسانات و پیش‌بینی حداکثر دمای آب رودخانه‌ها در شرق ماسدونیا یونان با استفاده از مدل یکپارچه فصلی خود همبستگی-میانگین متحرک (ARIMA) اشاره کرد (Papalaskaris و Kamps، ۲۰۱۷). همچنین پیش‌بینی کوتاه مدت تقاضای آب شهری به صورت روزانه، هفته‌ای و ماهانه برای مونترال، دومین شهر بزرگ کانادا، انجام شده است. نتایج تحقیق نشان داد برای پیش‌بینی‌های بلند مدت هفته‌ای و ماهانه، مدل‌های  $ARIMA$  و  $ARIMAX$  در مقایسه با مدل‌های شبکه عصبی پدیده‌ها را بهتر پیش‌بینی می‌کند (Mukesh و Adamowski، ۲۰۱۳). پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان کبودر آهنگ با استفاده از مدل‌سازی سری زمانی باکس جنکینز<sup>۳</sup> انجام شده است. نتایج تحقیق پیش‌بینی پنج متر افت سطح آب زیرزمینی طی سه سال آینده را نشان می‌دهد (Khorasani و همکاران، ۲۰۱۶).

باتوجه به عدم قطعیت‌های حاکم بر رژیم رواناب رودخانه بار، سرمایه‌گذاری بالا و ریسک‌پذیری اندک تأمین آب برای بخش‌های شرب و صنعت، هدف از تحقیق تعیین میزان آب مطمئن و پایدار قابل تأمین از سد بار برای شرب شهر نیشابور و کارخانه فولاد، در شرایط کنونی و آینده است. بنابراین به‌منظور پیش‌بینی رواناب رودخانه بار تا ده سال آینده (۱۴۰۶)، از مدل‌سازی سری زمانی به روش باکس جنکینز استفاده شده و با تلفیق نتیجه شبیه‌سازی با مدل شبکه جریان MODSIM به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، قابلیت اطمینان تخصیص آب محاسبه شده است. معماری سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری باتوجه به اولویت‌ها و محدودیت‌های موجود و تلفیق مدل داده محور سری زمانی با مدل شبکه جریان MODSIM، از جمله نوآوری‌های پژوهش پیش‌رو می‌باشد.

دستیابی به اهداف توسعه اقتصادی پایدار بدون در نظر داشتن قیود مرتبط با شرایط محیطی و رویکرد مدیریت جامع منابع آب میسر نیست. از سوی دیگر مدیریت جامع منابع آب بر دو پایه بکارگیری کلیه گروداران به همراه پایش و مدل‌سازی در قالب سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS)<sup>۱</sup> استوار است (Almanos و همکاران، ۲۰۲۱). مدیریت منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز جزء مسایل پیچیده و بد ساختار محسوب می‌شود و استفاده از مدل‌های تحلیلی تصمیم‌گیری و دسترسی به بانک داده با هدف پشتیبانی تصمیم‌سازان در تصمیم‌گیری موثر در حل موضوعات پیچیده در قالب DSS ضروری است (Methlie و Klien، ۱۹۹۵). سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS) یک سیستم نرم‌افزار پایه اختصاصی به‌منظور مدیریت منابع آب است که چارچوبی عملیاتی شامل: مدل‌های شبیه‌ساز، برنامه‌ریزی مشارکتی و ابزار تصمیم‌گیری را در خود جای داده است. در این رویکرد فرایند تصمیم‌سازی برای دستیابی به استراتژی‌های مدیریتی با هدف رسیدن به بهترین شرایط اجتماعی، اقتصادی و شرایط محیطی محقق می‌شود (Bettilli و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا مدل MODSIM یک مدل عمومی سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری مدیریت حوضه آبریز است که به‌منظور استراتژی‌های گسترده حوضه برای مدیریت کوتاه مدت آب، طراحی و برنامه‌ریزی بلند مدت، طراحی احتمال وقوع خشکسالی، تحلیل حق‌آبه‌ها، حل منازعات کاربری آب میان بخش‌های شهری، کشاورزی و محیط‌زیستی توسعه داده شده است (Larsen و Labadie، ۲۰۰۶). در ادامه نمونه‌هایی از مدیریت منابع آب که در قالب سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری انجام شده، آورده شده است. در تحقیقی در سد بوکان حوضه دریاچه ارومیه تأثیر تغییرات آب و هوا بر سیستم عرضه آب پایدار با ترکیب مدل‌های SWAT و MODSIM بررسی شد (Koch و Emami، ۲۰۱۸). با واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT تأثیر تغییرات آب‌وهوا بر هیدرولوژی حوضه و ورودی به مخزن سد مشخص شده و برای دو سناریوی ادامه شرایط کنونی و تأمین پایدار آب با تغییر اولویت‌های تخصیص توسط MODSIM، پیش‌بینی انجام شده است. نتایج تحقیق نشان داد در صورت ادامه شرایط کنونی کاهش قابل توجهی در نسبت عرضه به تقاضای آب رخ خواهد داد. در پژوهشی مشابه اثرات توسعه بهره‌برداری از منابع آب در کشور افغانستان و اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، بر میزان تخصیص آب سد دوستی با تهیه مدل برنامه‌ریزی منابع آب ارزیابی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد، پایداری تأمین آب کشاورزی در کشورهای ایران و تاجیکستان به کمتر از ۳ درصد خواهد رسید (نظری و همکاران، ۱۳۹۸). Arena و همکاران (۲۰۱۹)، با معماری DSS زمان واقعی برای سیستم دو مخزنه در جنوب ایتالیا، تخصیص بهینه آب در ناحیه شهری و منطقه کشاورزی برای سه سناریوی

• منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی بار در ۲۳ کیلومتری شمال غرب شهر نیشابور با هدف تأمین آب شرب شهر و کارخانه فولاد نیشابور در خارج از بستر رودخانه و در دره‌ای عریض بر روی پی آبرفتی با دو سد خاکی (اصلی و فرعی) احداث شده است. با احداث بند انحرافی بر روی رودخانه بار و کانال انتقال به طول ۲۰۰ متر، سیلاب‌های رودخانه در مخزن سد ذخیره می‌شود (شکل ۱). حوضه آبریز رودخانه بار در دامنه جنوبی ارتفاعات بینالود از دو زیرحوضه اصلی بار اریه و طاغان تشکیل شده است. رواناب این رودخانه صرف تأمین نیازهای محیط‌زیستی، کشاورزی و تغذیه آبخوان آبرفتی نیشابور شده و در نهایت به کال شور نیشابور منتهی می‌شود. ایستگاه آسنجی بار اریه از سال آبی ۳۰-۱۳۲۹ لغایت ۹۶-۱۳۹۵ و طاغان از سال آبی ۵۷-۱۳۵۶ لغایت ۹۶-۱۳۹۵ دارای آمار دبی روزانه هستند. میانگین آبدهی دراز مدت رودخانه در محل ایستگاه بار اریه برابر ۰/۵۹ و در محل ایستگاه طاغان برابر ۰/۵۴ متر مکعب در ثانیه است. یکسان‌سازی آمار دو ایستگاه از سال ۱۳۲۹ لغایت ۱۳۹۶ با محاسبه ضریب روزانه به ماهانه ایستگاه آب‌سنجی بار و نسبت مساحت دو حوضه انجام شده است.

(ANFIS)، رگرسیون چند متغیره، رویکرد آشفتگی (Chaos Approach) اشاره نمود (Nasir و همکاران، ۲۰۱۷). در این پژوهش به دلیل کاربرد وسیع و متداول مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی رواناب، عدم آگاهی از عوامل موثر در تولید رواناب حوضه آبریز بار و در اختیار بودن داده‌های سری زمانی بلند مدت رودخانه بار (ایستگاه آب‌سنجی بار اریه کاملترین داده رواناب را در سطح استان خراسان دارد) از مدل داده محور سری زمانی ARIMA برای پیش‌بینی رواناب استفاده شده است. در تحلیل سری‌های زمانی با بررسی گذشته سری، الگوی احتمالی مولد داده‌ها شناسایی و بر مبنای آن رفتار آینده سری پیش‌بینی می‌شود. مدل‌های احتمالی سری زمانی بر مبنای ایستایی سری تعریف شده‌اند، به این معنی که قوانین احتمالی حاکم بر فرایند با زمان تغییر نکرده و سری در تعادل آماری می‌باشد (خرمی و بزرگ‌نیا، ۱۳۸۶). برای ایستای سازی داده‌ها از روش تفاضلی کردن (غیرفصلی و فصلی) جهت حذف روند استفاده شده و به منظور ایستایی واریانس، از تبدیل توانی باکس-کاکس بهره گرفته شده است (روابط ۱ تا ۳). این تبدیل علاوه بر ایستای نمودن واریانس یکی از روش‌های نرمال نمودن داده‌های سری زمانی محسوب می‌شود. در تحقیق پیش‌رو به منظور تجزیه و تحلیل سری زمانی از نرم‌افزار مینی‌تپ ۱۸ استفاده شده است.

$$\nabla^d = (1 - B)^d \quad (1)$$

$$\nabla_S^D = (1 - B^S)^D \quad (2)$$

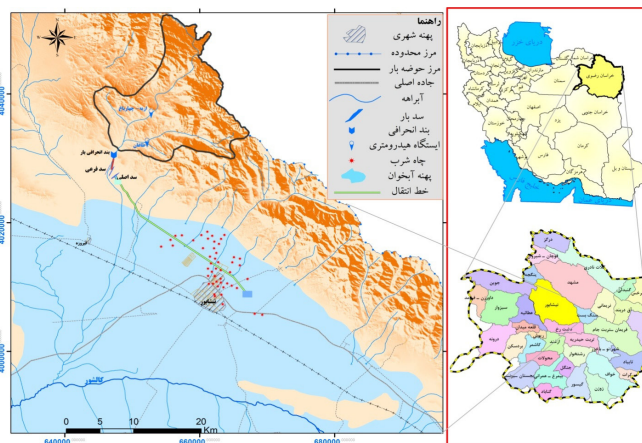
$$X_t^{(\lambda)} = \frac{X_t^\lambda - 1}{\lambda} \quad (3)$$

که:  $\nabla$  عملگر تفاضلی،  $B$  عملگر پس‌رو،  $D$  مرتبه تفاضلی،  $S$  مولفه اصلی،  $\lambda$  پارامتر تبدیل باکس-کاکس  $X_t$  داده‌های سری زمانی و  $X_t^{(\lambda)}$  تبدیل توانی باکس-کاکس هستند. مدل‌سازی سری زمانی شامل سه مرحله: تشخیص مدل آزمایشی، تخمین پارامترهای مدل و بررسی مناسب بودن مدل می‌باشد. توابع خود همبستگی (ACF) (رابطه ۴) و خودهمبستگی جزئی (PACF) (رابطه ۵) روابطی هستند که میزان وابستگی داده‌ها در سری زمانی را تعیین می‌کنند (Box و همکاران، ۲۰۰۸).

$$\rho_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad 1 \leq \rho_k \leq 1 \quad (4)$$

$$\varphi_k(k) = \frac{\rho_k - \sum_{i=1}^{k-1} \varphi_i(k-1)\rho_{k-i}}{1 - \sum_{i=1}^{k-1} \varphi_i(k-1)\rho_i} \quad (5)$$

که:  $\rho_i$  مقدار خود همبستگی تابع سری زمانی با تأخیر  $i$ ،  $\rho_k$  مقدار خودهمبستگی تابع سری زمانی با تأخیر  $k$ ،  $z_i$  و  $z_{i+k}$  مقدار متغیرها در مرحله  $i$  و با تأخیر  $k$ ، تعداد متغیرها،  $\bar{z}$  میانگین متغیرها،  $\varphi_i$  تابع خودهمبستگی جزئی سری زمانی با تأخیر  $i$  و  $\varphi_k$  تابع خودهمبستگی جزئی سری زمانی با تأخیر  $k$  است.



شکل ۱- حوضه آبریز رودخانه بار، موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری، سد بار و طرح تأمین آب شهر نیشابور

• مدل‌سازی سری زمانی و پیش‌بینی

بدون تردید پیش‌بینی رواناب رودخانه مهمترین داده در برنامه‌ریزی منابع آب خصوصا در تخصیص منابع آب سطحی، برای مصارف گوناگون است. روش‌های بسیاری جهت پیش‌بینی رواناب رودخانه توسط محققین به کار گرفته شده است که از جمله می‌توان به: مدل‌های استوکستیک سری زمانی، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) سیستم عصبی فازی اقتباسی

برای تمامی خطوط (لینکها)  $Minimize \sum \sum c_{ij} q_{ij}$  (for all  $i \in N$ )

Subject to  $\sum q_{ij} - \sum q_{ji} = 0$  (A) برای همه گره‌ها

$$l_{ij} \leq q_{ij} \leq u_{ij} \quad (10)$$

که در آن: A مجموعه تمامی خطوط (لینکها)، N مجموعه کل گره‌ها،  $q_{ij}$  دبی جریان در خط متصل کننده گره i و j،  $c_{ij}$  ضریب پنالتی (هزینه‌ها، فاکتور وزن دهی و یا اولویت حقایبه‌ها) برای  $q_{ij}$ ،  $l_{ij}$  کران پایین  $q_{ij}$  و  $u_{ij}$  کران بالای  $q_{ij}$  می‌باشد.

باتوجه به نتایج مدل‌سازی برنامه‌ریزی منابع آب، قابلیت اطمینان تأمین آب با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌شود (Hashimoto, 1982).

$$Rel^i = \frac{\text{Number of time } Def_t^i = 0}{N} \quad (11)$$

که:  $Rel^i$  قابلیت اطمینان تأمین آب،  $Def_t^i$  کمبود آب i امین مصرف‌کننده و N کل دفعات تخصیص آب می‌باشد.

## نتایج و بحث

نمودار سری زمانی داده‌های حجم رواناب ماهانه رودخانه بار (مجموع رواناب سه زیرحوضه: بار، طاغان و میانی) در شکل (۲) نشان داده شده است. نمودارهای خودهمبستگی (ACF) و تابع خودهمبستگی جزئی (PACF) سری ایستا شده (حذف روند با تفاضلی کردن مرتبه اول و تبدیل باکس-کاکس برای ایستا کردن داده‌ها به جهت واریانس) نشان می‌دهد، تابع خودهمبستگی همبستگی بالایی در تأخیرهای ۱۲، ۲۴ و ۳۶ دارد که دلالت بر وجود مولفه قوی فصلی (با مرتبه ۱۲) است. بنابراین سری تفاضلی شده مجدد با مرتبه ۱۲ تفاضلی می‌شود (شکل ۳-الف و ب). نمودارهای ACF و PACF نشان می‌دهند مدل شکل میانگین متحرک فصلی (SMA) دارد، پس مدل فصلی ضرب‌پذیر  $ARIMA(p,I,q) \times (P,I,Q)_{12}$  پیشنهاد می‌شود. نتایج مدل‌سازی سری زمانی ماهانه برای سری‌های ۶۶ و ۴۸ ساله در جدول (۱) آورده شده است. بر پایه نتایج مدل‌سازی سری زمانی تنها در مدل  $(0,1,1) \times (0,1,4)$  آزمون پرت-منتو باقیمانده‌ها یک فرایند تصادفی محض (مقدار  $P\text{-value} < 0.05$ ) که دلالت بر ناهمبسته بودن باقیمانده‌ها می‌نماید) را نشان می‌دهند (جدول ۲).

تحلیل باقیمانده‌ها نشان می‌دهد سری برازش داده شده واجد خصوصیات توزیع نرمال و تصادفی محض است (شکل ۴). مقایسه نتایج تحلیل سری زمانی درازمدت ۶۶ ساله و ۴۸ ساله رواناب‌های رودخانه بار در جدول‌های (۱ تا ۳) دلالت بر مناسب‌تر بودن مدل ۴۸ ساله نسبت به ۶۶ ساله دارد (خطای استاندارد پایین‌تر).

پس از تعیین مدل مناسب لازم است پارامترهای مدل برآورد شده و مناسبت مدل بررسی شود در انتها نیز برازش مدل با پارامترهای بیشتر انجام می‌شود (به مخاطره انداختن مدل). آزمون و معیار آکائیک (AIC) یکی از روش‌های مقایسه مدل‌های مختلف است (رابطه ۶). به این ترتیب که از میان مدل‌های مناسب مدلی که کمترین ضریب آکائیک را دارد به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود (Box و همکاران، ۲۰۰۸). تعیین میزان خطای پیش‌بینی (معیارهای خطا) با استفاده از روابط (۷ تا ۹) محاسبه شده است.

$$AIC = n \times \ln(\sigma^{e^2}) + 2(p + q) \quad (6)$$

که:  $\sigma^{e^2}$  درست‌نمایی ماکزیمم، p و q پارامترهای مدل و n تعداد داده‌های سری زمانی هستند.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_{\text{actual}} - Y_{\text{forecast}})^2 \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{actual}} - Y_{\text{forecast}})^2}{n}} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{\text{actual}} - Y_{\text{forecast}}|}{n} \quad (9)$$

که: SSE مجموع مربعات خطا، RMSE جذر میانگین مربعات خطا، MAE میانگین مطلق خطا،  $Y_{\text{actual}}$  مقدار واقعی و  $Y_{\text{forecast}}$  مقدار پیش‌بینی شده برحسب میلیون متر مکعب در ماه است.

### • مدل‌سازی تخصیص آب (MODSIM)

در حال حاضر کل نیاز آبی شهر نیشابور و کارخانه فولاد از چاه‌های بهره‌برداری تأمین می‌شود و هدف از ساخت سد بار تأمین بخشی از نیازهای آبی شرب شهر نیشابور و کارخانه فولاد است. سه نهر: من قان، ده قره و زیرجوی در بالادست بند انحرافی، آب مورد نیاز کشاورزی منطقه را تأمین می‌کنند (با مجموع نیاز آبی ۷/۳ میلیون متر مکعب در سال). علاوه بر این تأمین نیاز محیط‌زیستی رودخانه بار (برابر با ۸ میلیون متر مکعب در سال) از جمله اولویت‌های بهره‌برداری است که قبل از انحراف آب به مخزن سد کسر می‌شود. لذا هدف از مدل‌سازی تخصیص آب، بهینه‌سازی میزان تخصیص آب برای شرب و صنعت باتوجه به ناپایداری رواناب رودخانه با اولویت تأمین نیازهای آبی موجود است.

بهینه‌سازی تخصیص آب براساس اولویت‌های بهره‌برداری، تابع هدف سیستم، تجربه‌های بهره‌برداری، حقایبه‌ها و سایر سازوکارها مانند عوامل اقتصادی انجام می‌شود. سیستم پایه MODSIM یک الگوریتم شبکه جریان جدید است که هزینه شبکه را برای یک ظرفیت خاص با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی خطی حداقل می‌نماید. این مدل مکانیسم تخصیص آب در حوضه آبریز را با تکرار بهینه‌سازی شبکه جریان برای تمام دوره‌های زمانی شبیه‌سازی می‌کند (Labadie و Larson، ۲۰۰۰). فرم عمومی مسئله برنامه‌ریزی شبکه جریان به صورت زیر است:



جدول ۱- مدل‌سازی سری زمانی ماهانه برای سری‌های درازمدت ۶۶ و ۴۸ ساله

سری	نوع مدل	خطای استاندارد	تخمین پارامتر	آماره t (توزیع t-استیودنت)	P-value
دراز	MA1	۰/۳۴۴۷	۰/۰۳۳۷	۱۱/۲۲	۰/۰۰۰
مدت	MA2	۰/۳۰۰۷	۰/۰۳۶۵	۸/۲۴	۰/۰۰۰
۶۶	MA3	۰/۱۸۲۵	۰/۰۳۶۵	۵	۰/۰۰۰
ساله	MA4	۰/۱۴۱۲	۰/۰۳۵۰	۴/۰۳	۰/۰۰۰
	SMA	۰/۹۷۴۲	۰/۰۱۰۷	۹۱/۱۵	۰/۰۰۰
دراز	MA1	۰/۳۴۴۱	۰/۰۳۹۰	۸/۸۳	۰/۰۰۰
مدت	MA2	۰/۲۷۶۲	۰/۰۴۳۰	۶/۴۲	۰/۰۰۰
۴۸	MA3	۰/۲۱۷۰	۰/۰۴۳۳	۵/۰۲	۰/۰۰۰
ساله	MA4	۰/۱۳۶۶	۰/۰۴۱۵	۳/۲۹	۰/۰۰۰
	SMA	۰/۹۵۹۴	۰/۰۲۰۷	۵۶/۳۱	۰/۰۰۰

جدول ۲- آزمون پرت- منتو (باکس پیرسن اصلاح شده)

دراز	Lag	۱۲	۲۴	۳۶	۴۸
مدت	Chi-Square	۶/۸	۹/۴	۱۵/۱	۳۷/۹
۶۶	درجه آزادی	۷	۱۹	۳۱	۴۳
	P-value	۰/۴۵۱	۰/۹۶۶	۰/۹۹۲	۰/۶۹۴
دراز	Lag <th>۱۲</th> <th>۲۴</th> <th>۳۶</th> <th>۴۸</th>	۱۲	۲۴	۳۶	۴۸
مدت	Chi-Square	۴/۲	۸/۵	۲۰/۹	۳۲/۲
۴۸	درجه آزادی	۷	۱۹	۳۱	۴۳
	P-value	۰/۷۵۹	۰/۹۸۱	۰/۹۱۶	۰/۸۸۵

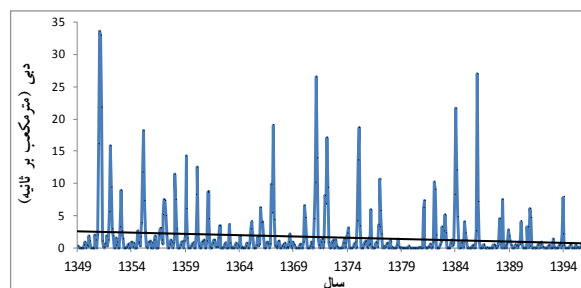
جدول ۳- بررسی خطای مدل‌سازی نتایج تحلیل سری زمانی دراز مدت ۶۶ ساله و ۴۸ ساله

سری زمانی	نوع مدل	SSE	MAE	RSME
درازمدت ۶۶ ساله	$(0,1,4) \times (0,1,1)_{12}$	۷۴۶۶	۱/۳۳	۳/۰۷
درازمدت ۴۸ ساله	$(0,1,4) \times (0,1,1)_{12}$	۴۰۶۸	۱/۲۳	۲/۶۹

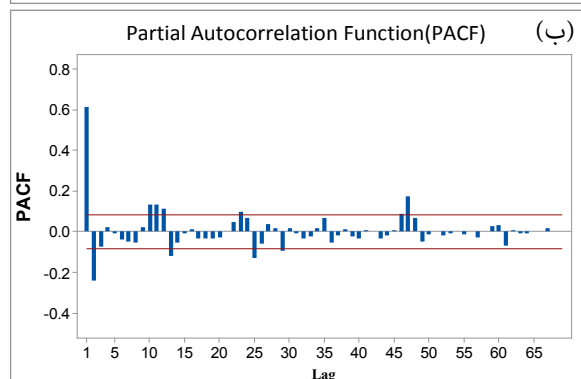
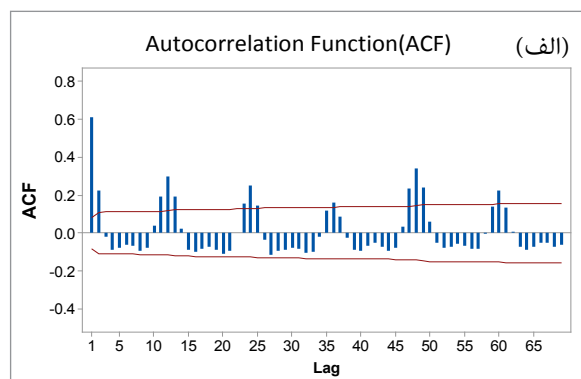
جدول ۴- محاسبه معیار آکائیک با برازش مدل‌های پارامترهای متفاوت بر سری زمانی

مدل	تعداد داده (n)	پارامترهای مدل (m)	حداکثر درست نمایی	معیار آکائیک (AIC)
ARIMA(۰,۱,۲),(۰,۱,۱)	۵۶۳	۳	۸/۲۶	۵۲۲/۳
ARIMA(۰,۱,۳),(۰,۱,۱)	۵۶۳	۴	۷/۶۳	۵۰۴/۹
ARIMA(۰,۱,۴),(۰,۱,۱)	۵۶۳	۵	۷/۵	۵۰۲/۷
ARIMA(۰,۱,۵),(۰,۱,۱)	۵۶۳	۶	۷/۶۴	۵۰۹/۲

لذا برای پیش‌بینی رواناب رودخانه بار از داده‌های ماهانه سری زمانی ۴۸ سال اخیر بهره گرفته شده است. همچنین مدل  $(0,1,1) \times (0,1,4)_{12}$  با کمترین ضریب آکائیک به‌عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود (جدول ۴). سری زمانی تولید شده توسط مدل (شبه‌سازی) با داده‌های سری زمانی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی برای ۱۰ سال آینده در شکل (۵) ارائه شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است نتایج شبه‌سازی با مشاهده در طول دوره آماری، به استثنای پیک سیلاب‌های شدید، انطباق نسبتاً مناسبی دارد. در طول دوره پیش‌بینی نیز روند کاهش دبی و دوره‌های سیلابی با مشاهدات موجود در حوضه منطبق است. تنها ضعف مدل، شبه‌سازی سیلاب‌های شدید در دوره‌های ترسالی می‌باشد که یکی از ضعف‌های مدل‌های سری زمانی به‌شمار می‌رود.

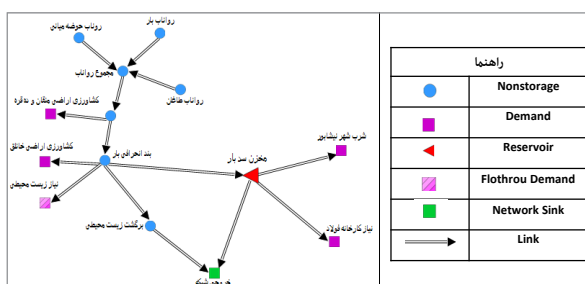


شکل ۲- روند نزولی دبی در سری زمانی جریانات سطحی رودخانه بار



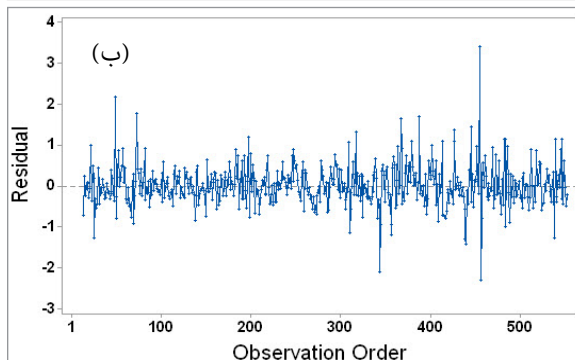
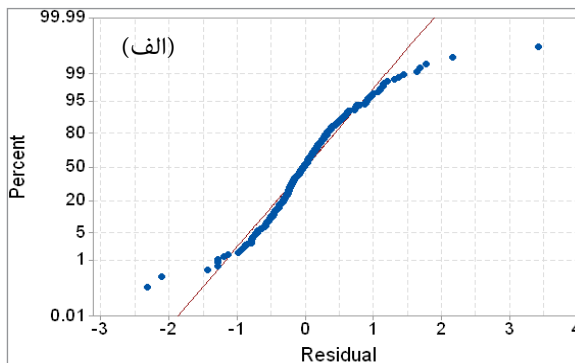
شکل ۳- نمودار خود همبستگی (ACF) و خود همبستگی جزئی (PACF) تفاضلی فصلی داده‌ها (الف و ب)

اولویت‌های تخصیص آب حوضه آبریز بار به ترتیب عبارتند از: تأمین حقایق کنونی کشاورزان، تأمین آب برای شبکه کشاورزی اراضی پایاب، تأمین نیاز محیط‌زیستی پایاب حوضه و تخصیص آب به سد بار (جهت تأمین نیاز آبی صنعت فولاد و بخشی از نیاز آبی شرب شهر نیشابور). میزان تخیر و بارش بر روی مخزن سد بار براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی ساخته شده در محل سد استخراج و در مدل وارد شده است. همچنین باتوجه به سیمای مخزن، اطلاعات سطح-حجم-ارتفاع آب در گره مخزن وارد شده است. بر پایه شش دوره آبیگری آزمایشی سد بار (سال‌های ۱۳۹۳ لغایت ۱۳۹۸)، میزان تلفات نشت ماهانه به صورت میانگین حدود ۵ درصد حجم آب موجود در مخزن سد محاسبه شده است.

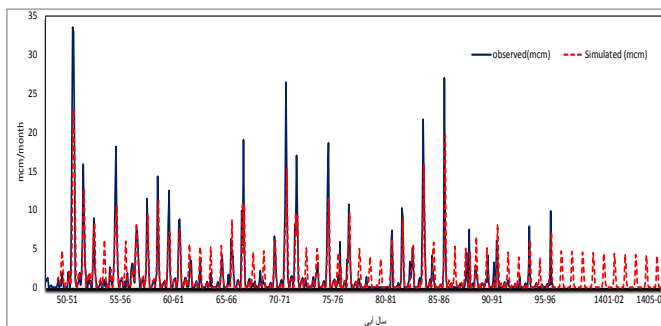


شکل ۶- نمایی از برنامه‌ریزی تخصیص آب در سطح حوضه در محیط MODSIM

مدل‌سازی تخصیص آب حوضه آبریز بار به صورت ماهانه و باتوجه به الگوی تخصیص مصوب، برای سه سناریوی تخصیص دراز مدت (۴۸ ساله)، ده ساله اخیر (۱۳۸۶ لغایت ۱۳۹۶) و ده ساله آینده (۱۳۹۶ لغایت ۱۴۰۶)، با استفاده از نتایج مدل‌سازی سری زمانی صورت گرفته است. در جدول‌های (۵ و ۶) خلاصه نتایج مدل‌سازی ارائه شده است. رژیم سیلابی و ناپایداری رواناب حوضه موجب انحراف معیار بالای سری زمانی شده است. همچنین دوره‌های خشکسالی باعث شده میزان سرریز در دوره آماری ده ساله اخیر صفر باشد. میانگین رواناب ورودی به مخزن برای دوره ده ساله اخیر تنها ۷/۸۵ میلیون متر مکعب محاسبه شده و راندمان طرح (نسبت تلفات به آب تنظیمی) برابر ۸۱ درصد برآورد شده است. باتوجه به اینکه پیش‌بینی انجام شده برای ده سال آینده بر مبنای سری زمانی دراز مدت صورت گرفته افزایش قابل توجهی در متوسط رواناب ورودی ده سال پیش‌بینی و به تبع آن افزایش میزان تخصیص آب شرب در ده سال آینده نسبت به ده سال اخیر مشاهده می‌شود (عمده اختلاف به دلیل توسعه شدید بهره‌برداری در سطح حوضه آبریز بار در ده سال اخیر می‌باشد). نسبت تلفات (تخیر و نشت) به آبیگری مخزن، در دوره‌های کوتاه مدت با کاهش آبیگری و تخصیص سریعتر آب ورودی، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (از حدود ۳۰ درصد برای سری بلند مدت به کمتر از ۲۰ درصد در دوره‌های کوتاه مدت کاهش یافته است). باوجود آبیگری قابل توجه سد بر



شکل ۴- تجزیه و تحلیل باقیمانده‌های سری زمانی، (الف) نرمال بودن باقیمانده‌ها و (ب) ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها



شکل ۵- شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز بار برای سری درازمدت ۴۸ ساله و ۱۰ سال آینده بر اساس مدل SARIMA

در شکل (۶) نمایی از نظام تخصیص آب حوضه آبریز رودخانه بار در محیط نرم‌افزار MODSIM ارائه شده است. رواناب سه زیرحوضه: بار، طاغان و میان حوضه، به‌عنوان پتانسیل‌های تولید آب ورودی‌های سیستم می‌باشند. نیازهای مصرفی کشاورزی نهرهای من قان، ده قره و اراضی خانلق (زیرجوی)، گره‌های مصرفی تا قبل از بند انحرافی و نیاز محیط‌زیستی پایاب حوضه به‌عنوان گره آبیگری تا محل بند انحرافی می‌باشند. رواناب مازاد از محل بند انحرافی، سری زمانی ورودی به مخزن سد را تشکیل می‌دهد (به‌طور عمده سیلاب‌ها). برابر با تخصیص مصوب (مدیریت منابع آب ایران)، میزان تخصیص به کارخانه فولاد ماهانه ۰/۴ میلیون متر مکعب به صورت ثابت و شرب شهر نیشابور ماهانه ۱/۲ میلیون متر مکعب برای شش ماهه اول هر سال آبی از سد بار در نظر گرفته شده است.

پایه سری دراز مدت (میانگین ۲۱/۵۶ میلیون متر مکعب)، مقدار سرریز قابل توجه، راندمان اندک (۵۹ درصد) و مقدار تلفات بالاست (۳۰ درصد).

قابلیت اطمینان تأمین آب (رابطه ۱۱) بر پایه نتایج مدل سازی تخصیص آب از سد بار برای کارخانه فولاد و شهر نیشابور در جدول (۶) آورده شده است. قابلیت اطمینان تأمین آب براساس مدل سازی ده ساله اخیر کاهش چشمگیری در مقایسه با سری دراز مدت دارد.

به دلیل ماهیت سیلابی رواناب ورودی و نیاز آبی یکنواخت کارخانه فولاد، قابلیت اطمینان برای دوره ده ساله اخیر و پیش بینی ده ساله آینده، نسبتاً پایین و عدم قطعیت بالا دارد. در مقابل تأمین آب شرب شهر نیشابور با وجود اولویت پایین تر و نیاز آبی بالاتر به دلیل الگوی تخصیص مناسب تر، قابلیت اطمینان بالاتری دارد. در مجموع قابلیت اطمینان تأمین آب بر پایه سری دراز مدت، ده ساله اخیر و ده سال آینده به ترتیب: ۷۷٪، ۵۳٪ و ۶۵٪ محاسبه می شود.

جدول ۵- خلاصه نتایج مدل سازی برنامه ریزی منابع آب سد بار (ارقام به میلیون متر مکعب)

دوره	راندمان (%)	ورودی		سرریز		تلفات تبخیر		تلفات نشت	
		متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار
دراز مدت	۵۹	۲۱/۵۶	۱۸/۵	۶/۰۲	۱/۵۲	۲/۵۲	۳/۳۳	۳/۸۳	۰/۶۳
ده ساله اخیر	۸۱	۷/۸۵	۰	۰	۰/۶۸	۰/۸۸	۰/۷	۰/۶۳	۰/۶۳
ده سال آینده	۸۳	۹/۰۳	۰/۸	۰	۰/۱۲	۰/۶۵	۰/۱۱	۰/۶۱	۰/۶۱

جدول ۶- خلاصه نتایج برنامه ریزی تخصیص آب از سد بار

پارامتر	شرب شهر نیشابور (میلیون متر مکعب)		کارخانه فولاد (میلیون متر مکعب)	
	دراز مدت	۱۰ سال اخیر	دراز مدت	۱۰ سال اخیر
متوسط	۵/۳	۳/۵۷	۳/۸۵	۲/۴
انحراف معیار	۲/۵	۲/۸۸	۱/۱۷	۰/۱۶
قابلیت اطمینان (%)	۷۴	۵۰	۸۰	۵۰

تغییرات حجم آب مخزن در دوره ده ساله اخیر نشان می دهد، به استثنای سال های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ در سایر سال ها در بیشتر ماه ها آبی جهت تنظیم در مخزن وجود ندارد. به همین جهت با وجود قابلیت اطمینان بالای تخصیص آب در سری زمانی دراز مدت، قابلیت اطمینان در دوره کوتاه مدت پایین می باشد. بر پایه نتایج تحقیق پیشنهاد می شود از سایر روش های پیش بینی از جمله: سیستم عصبی-فازی و رگرسیون چند متغیره نیز جهت تدقیق نتایج مدل سازی سری زمانی استفاده شود. همچنین جهت کاهش تلفات، تخصیص موجود بازنگری شده و مدت زمان ماند آب در مخزن سد کاهش یابد.

#### پی نوشت ها

- 1-Decision Support Systems
- 2-Auto Regressive Integrated Moving Average
- 3-Box-Jenkins
- 4-Artificial Neural Network
- 5-Auto Correlation Function
- 6-Partial Auto Correlation Function
- 7-Akaike Criterion
- 8-Seasonal Moving Average

#### نتیجه گیری

مدل سازی سری زمانی رواناب ماهانه رودخانه بار نشان می دهد، اگرچه این روش از قابلیت شبیه سازی مناسب رواناب رودخانه بار به استثنای سیلاب های با دوره بازگشت بالا، حکایت می کند ولی پیش بینی رواناب رودخانه بر پایه اطلاعات سری دراز مدت، به دلیل تعدیل تأثیر پدیده توسعه بهره برداری در سال های اخیر در سطح حوضه بار، به نتایجی بالاتر از حد انتظار منجر شده است. مدل فصلی-ضربی  $(0,1,1) \times (0,1,4)$  با کس جنکینز، بهترین مناسب را برای مدل سازی دارد. بررسی دراز مدت سری زمانی آبیگری مخزن سد بار نشان می دهد، با توجه به تخصیص های موجود میزان تلفات حدود ۳۰ درصد حجم آبیگری است (راندمان ۵۹ درصد). دوره های خشکسالی و توسعه بهره برداری در سطح حوضه باعث شده رژیم رواناب رودخانه بار در سال های اخیر در مقایسه با سری دراز مدت، کاهش شدیدی را نشان دهد و به کمتر از ۴۰ درصد تقلیل یابد. در حالی که حجم مخزن سد در تراز نرمال ۲۴ میلیون متر مکعب است، بالاترین حجم آب قابل ذخیره در مخزن براساس آمار رواناب ۱۰ ساله اخیر از ۱۱/۷ میلیون متر مکعب (کمتر از نیمی از حجم مخزن) تجاوز نمی کند. ارقام تخصیص پیش بینی شده در اهداف طرح برای مصارف کارخانه فولاد و شرب نیشابور، با آبیگری مخزن و تلفات متناسب نیست.

- evaluation. *Water Resources Research*, 18(1): 14-20.
- Khorasani M., Ehteshami M. and Salari M. 2016. Assessing groundwater resources nitrate contamination using time series analyses SARIMA Modeling. *International Journal of Faring and Allied Sciences*, 5(5): 397-407.
- Klien M.R. and Methlie L.B. 1995. Knowledge-based decision support systems with applications in business. John Wiley & Sons. Inc. 2nd edition. Hoboken, New Jersey
- Labadie J., Azero L., Gates T., Fontane D. and Porto R. 2000. Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(2): 85-97.
- Labadie J. and Larson R. 2006. MODSIM: River basin management decision support system. User Manual. Department of Civil Engineering. Colorado, USA.
- Mukesh K. and Adamowski J. 2013. Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-bootstrap-neural network models. *Water Resources Research*, 49(10): 6486-6507.
- Musa J.J. 2013. Stochastic Modelling of Shiroro River Stream flow Process. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2(6): 49-54.
- Nasir N., Samsudin R. and Shabri A. 2017. Monthly streamflow forecasting with auto-regressive integrated moving average. *Journal of Physics Conference Series*, IOP Publishing. Kuantan, Pahang, Malaysia.
- Pierce S., Sharp J., Guillaume J., Mace R. and Eaton D. 2013. Aquifer-yield continuum as a guide and typology for science-based groundwater management. *Journal of Hydrogeology*, 21(2): 331-340.
- Papalaskaris T. and Kampas G. 2017. Time Series Analysis of Characteristics of Streams in Eastern Macedonia-Thrace Greece. *European Water*, 57: 93-100.
- Vahdat S.F., Sarraf A., Shamsina A. and Shahidi N. 2011. Prediction of mean Inflow to Dez Dam reservoir time series models (Box-Jenkins). *International Conference on Environmental and Industrial Innovation*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Vishwajith K.P., Sahu P.K., Dhekale B.S., Noman M. and Narsimhaiah L. 2015. Modeling of groundwater table in three districts of Red and Laterite zone of West Bengal. *Journal of Ecosystem*, 5(3A): 6-12.
- خرمی، م. و بزرگ‌نیا، ا. ۱۳۸۶. تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی با نرم‌افزار مینی تب ۴. انتشارات سخن گستر. مشهد، ایران.
- نظری، ح.، مریدی، ع.، یزدی، ج. و خزائی، ا. ۱۳۹۸. چشم‌انداز پایداری تأمین نیازهای شرب و کشاورزی سد دوستی تحت سناریوهای تغییر اقلیم و بهره‌برداری از سد سلما. *نشریه تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۳): ۱۷-۳۲.
- An Q. and Zhao M. 2017. Time Series Analysis in the Prediction of Water Quality. In 7th International Conference on Education, Management, Information and Mechanical Engineering, Atlantis Press. Shenyang, China.
- Almanos A., Rolston A. and Papaioannou G. 2021. Development of a Decision Support System for Sustainable Environmental Management and Stakeholder Engagement, *Journal of Hydrology*, 8(1): 40.
- Arena C., Cannarozzo M., Oliva F. and Mazzola M.R. 2019. A multi-scenario Decision Support System for real-time operation of over-year multi-reservoir systems 2 DSS simulation, 23rd International Congress on Modelling and Simulation. Canberra, Australia.
- Bettli L., Pek E. and Salman M. 2019. A decision support system for water resources management: the case study of Mubuku irrigation scheme Uganda. *MDPA. Sustainability*, 11(22): 6260.
- Box G., Jenkins G. and Reinsel G. 2008. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. First published. Wiley. Hoboken, New Jersey.
- Caiado J. 2010. Performance of combined double seasonal univariate time series models for forecasting water demand. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(3): 215-222.
- Emami F. and Koch M. 2018. Sustainability assessment of the water management system for the Boukan Dam Iran using CORDEX South Asia Climate Projections. *Journal of Water*, 10(12): 1723.
- Firat M., Turan M.E. and Yurdusev M.A. 2009. Comparative analysis of fuzzy inference systems for water consumption time series prediction. *Journal of Hydrology*, 374(3-4): 235-241.
- Hashimoto T. 1982. Reliability, Resiliency, and Vulnerability criteria for water resources system performance