

## بررسی عملکرد سیستم مخازن ذخیره منفرد با استفاده از شاخص‌های عملکرد (مطالعه موردی: سد مخزنی لار)

مونا احمدیان<sup>۱</sup> - مجید منتصری<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

### چکیده

سیستم مخازن ذخیره برای کنترل و تنظیم رژیم جریان رودخانه‌ها جهت تأمین تقاضا برای مصارف مختلف شرب، کشاورزی و ... طراحی و احداث می‌گردند. در این مطالعه سد مخزنی لار به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب تهران با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور با به‌کارگیری مدل استوکاستیک AR(1)، داده‌های جریان سالیانه تولید و سپس مقادیر جریان سالیانه با استفاده از مدل توزیعی والنسیا-شاکی در ماه‌های مختلف سال پخش یا توزیع شده است. در مرحله بعد، داده‌های ماهیانه تولیدی به‌عنوان جریانات ورودی به مخزن ذخیره برای شبیه‌سازی رفتار سد مخزنی لار با استفاده از روش Modified-SPA<sup>۳</sup> و با اعمال شاخص‌های عملکرد سیستم مخازن به‌کار گرفته شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که حجم ذخیره علاوه بر تقاضا، تابعی از تلفات ناشی از تبخیر و ضرایب اعتماد زمانی و آسیب‌پذیری بوده و از یک رابطه نمایی به‌ازای تقاضا تبعیت می‌کند. علاوه بر این در هر سه گونه SPA (version) اصلاح شده (SPA-I, SPA-II, and SPA-III) دو شاخص عملکرد مخزن، یعنی؛ اعتمادپذیری زمانی و آسیب‌پذیری قابل کنترل در تحلیل بوده و تحلیل سیستم ذخیره برای مقادیر معلوم یا مشخص شاخص‌های مذکور انجام می‌پذیرد. همچنین در روش‌های SPA-II و SPA-III امکان استفاده از رابطه غیرخطی یا رابطه واقعی سطح-حجم در برآورد حجم تلفات ناشی از تبخیر در سیستم ذخیره است. کنترل دو شاخص عملکرد مخزن و به‌کارگیری رابطه واقعی یا غیرخطی سطح-حجم مخزن در تحلیل سیستم مخازن ذخیره به‌همراه جواب یکتا به‌عنوان مزیت‌های اساسی و بسیار مهم روش‌های مذکور نسبت به روش آنالیز رفتاری (فرض خطی بودن رابطه سطح-حجم مخزن و کنترل تنها شاخص اعتمادپذیری در محاسبات) است.

**واژه‌های کلیدی:** تولید داده، روش SPA، سد مخزنی لار، شبیه‌سازی مخزن، مدل استوکاستیک

### مقدمه

عملکرد ایجاد می‌شوند (۲۲، ۲۴ و ۴۱). در طی فرآیند ذخیره آب در مخازن، جریان‌های تنظیم نشده ورودی به مخزن به سه صورت؛ آبدهی (yield) یا خروجی تنظیم شده جهت تأمین تقاضا برای مصارف مختلف، تلفات نفوذ و تبخیر از سطح دریاچه و سرریز آب اضافی یا مازاد در مخزن یا سیستم که بخشی از جریان غیرقابل تنظیم بوده و به‌صورت جریان خروجی تنظیم نشده باقی می‌ماند، می‌باشد (۸). سیستم مخازن ذخیره دارای دو رفتار درون‌سالی یا برون‌سالی بوده و سیستم‌های درون‌سالی مخازن ذخیره کوچک را شامل شده و این سیستم‌ها در طول هر سال حداقل یکبار پر و خالی می‌شوند و ممکن هست در طول سال چندین بار پر و خالی گردند. در حالی که رفتار برون‌سالی مربوط به سیستم مخازن ذخیره بزرگ بوده و این مخازن ذخیره چندین سال نیاز دارند که از حالت خالی به حالت پر یا برعکس یعنی از حالت پر به حالت خالی برسند (۲۴).

روش‌های مطرح تحلیل ذخیره-آبدهی-عملکرد سیستم مخازن ذخیره به دو گروه اصلی، یعنی؛ روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طبقه‌بندی شده و به‌طور گسترده‌ای در تحلیل سیستم مخازن ذخیره آب‌های سطحی در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند (۵)،

در دهه‌های اخیر با افزایش جمعیت دنیا و میزان تقاضای آب شیرین برای مصارف مختلف (شرب، کشاورزی و صنعت)، برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از مخازن آب‌های سطحی، خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به یکی از چالش‌های بسیار جدی و اساسی محققین و متخصصین صنعت آب در اکثر نقاط مختلف دنیا تبدیل شده است (۸، ۱۰ و ۳۴). در مخازن آب‌های سطحی، جریان تصادفی تنظیم نشده در دوره‌های پرابی برای استفاده در دوره‌های کم‌جریان ذخیره می‌شود (۸). بنابراین سدهای ذخیره آب‌های سطحی برای کنترل و تنظیم جریان رودخانه‌ها به‌منظور تأمین تقاضای مصارف مختلف در سطح مشخصی از شاخص‌های

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

\*- نویسنده مسئول (Email: m.montaseri@Urmia.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v33i6.77839

3- Sequent Peak Algorithm

ذخیره منفرد فرضی بر روی رودخانه‌های Earn (انگلستان)، Hatchie (امریکا)، Richmond (استرالیا) و Vis (افریقای جنوبی) مورد مطالعه قرار دادند. در این تحلیل رفتار بلندمدت سیستم‌های ذخیره منفرد از یک پروسه شبیه‌سازی مونت کارلو بر اساس مدل توزیعی استوکاستیک fragment و روش آنالیز رفتاری صورت گرفته است. نتایج مطالعه بیانگر ضرورت به‌کارگیری شبیه‌سازی مونت کارلو جهت تحلیل درست و دقیق رفتار بلندمدت سیستم مخازن ذخیره بوده و نتایج چنین مطالعاتی براساس داده‌های تاریخی جریان‌های رودخانه‌ای، نتایج غیرمطمئن و غیرقابل اتکاء برای پیش‌بینی‌های بلندمدت است. مک ماهان و همکاران (۲۶) عملکرد مدل تجربی Gould-Dincer برای برآورد حجم ذخیره آب سطحی مورد نیاز در ۷۲۹ رودخانه از نقاط مختلف دنیا را با سه مدل شبیه‌ساز کمبود مورد انتظار<sup>۵</sup>، آنالیز رفتاری و SPA مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند. بدین منظور رابطه ذخیره-آبدهی-اعتمادپذیری به‌ازای داده‌های جریان سالیانه رودخانه‌ها توسعه و استخراج شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که مدل Gould-Dincer برای طراحی مقدماتی منابع آب<sup>۶</sup> و تعیین حجم ذخیره مورد نیاز اولیه یا تقریبی در رودخانه‌های فاقد آمار و اطلاعات عملکرد قابل قبول یا مناسبی دارد. همچنین این مدل می‌تواند به‌طور مؤثری در تحلیل ساده و سریع اثرات تغییر اقلیم در عملکرد سیستم مخازن ذخیره، بدون نیاز به شبیه‌سازی مفصل و پیچیده سیستم‌های مذکور با استفاده از سری‌های زمانی جریان رودخانه‌ای، مورد استفاده قرار گیرند.

عملکرد مدل ذخیره-آبدهی-اعتمادپذیری Vogel-Stedinger (V-S) به‌عنوان یک مدل رایج در برآورد حجم ذخیره مورد نیاز آب سطحی، با استفاده از سری زمانی جریان سه رودخانه در انگلستان توسط آدلوی و پال (۳) مطالعه گردید. در این مطالعه یک روش شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۷</sup> به‌کار گرفته شد و نتایج نشان داد که مدل Vogel-Stedinger در تقاضاهای بالا ( $MAF^A > 0.8$  تقاضا) یا برای سیستم مخازن کاملاً برون‌سالی دارای عملکرد قابل قبولی می‌باشد. با مرور مطالعات در دسترس محققین، توسعه روابط ذخیره-آبدهی-عملکرد سیستم مخازن ذخیره اغلب محدود به مخازن ذخیره منفرد فرضی یا واقعی برون‌سالی براساس داده‌های سالیانه با فرضیاتی از جمله: ناچیز بودن تلفات ناشی از تبخیر، تقاضای ثابت ماهیانه و با عدم اعمال شاخص‌های استاندارد عملکرد مخازن (۱۱) انجام پذیرفته است، لذا این مطالعه با دو هدف اصلی (الف) معرفی یک مدل شبیه‌ساز با قابلیت لازم برای تحلیل جامع سیستم مخزن ذخیره منفرد و (ب) توسعه روابط ذخیره-آبدهی-عملکرد در سیستم مخزن واقعی برای حالت منفرد ارائه شده است.

۷ و ۱۳). استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک (برنامه‌ریزی خطی و پویا) و فراکاوشی (از جمله الگوریتم ژنتیک) در تدوین الگوهای بهره‌برداری بهینه سیستم مخازن ذخیره به‌طور گسترده‌ای گزارش شده است. اما آنچه سبب ارزیابی دقیق و اعمال مناسب تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در یک سیستم ذخیره می‌شود، شبیه‌سازی سیستم مورد نظر است (۴، ۱۲، ۱۵ و ۱۶). روش‌های شبیه‌سازی به‌عنوان کاراترین ابزار در تحلیل طراحی و بهره‌برداری سیستم مخازن ذخیره بوده که نمایش جامع و کامل از سیستم ذخیره را نسبت به مدل‌های بهینه‌سازی ارائه می‌دهند و همچنین با استفاده از سری جریان‌های تولید شده مصنوعی، ویژگی تصادفی جریان‌های ورودی را در نظر می‌گیرند (۴۶). از طرف دیگر یک مدل شبیه‌ساز در شبیه‌سازی پاسخ سیستم، انعطاف‌پذیرتر و کاراتر است (۴۶).

از میان دو روش نهایی شبیه‌سازی یعنی روش آنالیز رفتاری و روش SPA اصلاح‌شده، روش SPA قابلیت و انعطاف‌پذیری لازم به‌منظور اعمال تمامی شرایط واقعی حاکم بر سیستم مخازن ذخیره از جمله کنترل شاخص‌های عملکرد اعتمادپذیری<sup>۱</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۲</sup> در تحلیل ذخیره-آبدهی-عملکرد را دارا می‌باشد (۲۴ و ۲۸). روش شبیه‌سازی SPA اولیه به‌عنوان روش محاسباتی منحنی جرم<sup>۳</sup> مطرح بوده که در اواخر قرن بیستم اصلاحات عمده‌ای برای افزایش قابلیت و کارایی آن انجام پذیرفته است. اولین سری اصلاحات به‌منظور اعمال تلفات ناشی از تبخیر و شاخص‌های عملکرد مخزن یعنی اعتماد زمانی<sup>۴</sup> و آسیب‌پذیری توسط لهله در سال ۱۹۸۷ انجام پذیرفته و سری اصلاحات بعدی، توسعه روش SPA توسط منتصری (۱۹۹۹) برای سیستم مخازن ذخیره چندگانه و استفاده از رابطه غیرخطی یا رابطه واقعی سطح-حجم برای اعمال تلفات ناشی از تبخیر بوده است (۲۹).

ووگل و بلوگنس (۴۵) با استفاده از روش مونت کارلو، یک روش سیستماتیک برای توصیف رفتار عمومی سیستم مخازن ذخیره برون‌سالی را با اعمال شاخص‌های عملکرد مخزن (اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری) توسعه دادند. بدین منظور مدل اتورگرسو مرتبه اول جهت تولید داده‌های مصنوعی جریان سالیانه با دو توزیع نرمال و لاگ‌نرمال استاندارد مورد استفاده قرار گرفته است. ایشان نتیجه‌گیری نمودند که این مطالعه یک تئوری بنیادی پایه برای درک تبادلات میان روابط ذخیره، آبدهی، اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری در سیستم مخازن ذخیره برون‌سالی را فراهم می‌کند.

مک ماهان و همکاران (۲۵) با استفاده از ۵ شاخص عملکرد رایج، یعنی اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، ریسک خشکسالی و پایداری، روابط ذخیره-آبدهی-عملکرد را در چهار سیستم مخزن

5- Extended Deficit Analysis  
6- Preliminary Water Resources Planning  
7- Monte Carlo Simulation Framework  
8- Mean Annual Flow

1- Reliability  
2- Vulnerability  
3- Mass Curve  
4- Time-based Reliability

جدول ۱- مختصات جغرافیایی و مشخصات آماری جریان، بارندگی و تبخیر سالیانه در سد لار

Table 1- Geographic coordinates and annual statistical parameters of streamflow, rainfall and evapotranspiration in Lar dam

ارتفاع Height (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	جریان رودخانه Streamflow				بارندگی Precipitation (mm)	تبخیر Evaporation (mm)
			میانگین Mean (MCM)	ضریب تغییرات Coefficient of variation	ضریب چولگی Skewness	ضریب خود همبستگی Lag-1 Auto Correlation ( $\rho$ )		
2531	52° 00'	35° 53'	439.23	0.24	-0.19	0.34	694.58	806.2

MCM: میلیون متر مکعب، p: ضریب خود همبستگی جریان‌های سالیانه با تأخیر یک (Lag- one Auto-Correlation Coefficient)، mm: میلی‌متر

در این مطالعه به منظور استفاده از داده‌های جریان رودخانه در مدل‌سازی سری‌های زمانی جریان رودخانه، آزمون‌های اولیه همگنی، تصادفی و ایستایی انجام گرفته است (۳۲ و ۱). بدین منظور روش‌های جرم مضاعف، همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن و ران تست به ترتیب برای آزمون‌های همگنی، ایستایی و تصادفی بودن داده‌های جریان رودخانه‌ای استفاده شده است (۱۷ و ۳۹). نتایج آزمون جرم مضاعف برای داده‌های جریان رودخانه‌ای ورودی سد مخزنی لار، نشان‌دهنده همگنی داده‌ها با ضریب همبستگی ۰/۹۹ می‌باشد. علاوه بر این، نتایج حاصل از دو آزمون همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن و ران- تست درستی فرضیه (H<sub>0</sub>) ایستایی و تصادفی بودن داده‌های جریان رودخانه‌ای لار را تأیید می‌کند.

یکی دیگر از گام‌های اساسی در مدل‌سازی سری زمانی داده‌های جریان رودخانه تعیین تابع توزیع احتمالی داده‌ها می‌باشد. لذا در این مطالعه ۵ تابع توزیع احتمال رایج (نرمال، لاگ نرمال دو و سه پارامتری، پیرسون و لاگ پیرسون نوع سوم)، با استفاده از آزمون نکویی برازش<sup>۱</sup> PPCC به عنوان مناسب‌ترین تکنیک، مورد ارزیابی قرار گرفته است (۱۸، ۴۳ و ۴۴) نتایج آزمون نکویی برازش<sup>۲</sup> PPCC نشان داد که توزیع احتمالی غالب و برتر داده‌های جریان ماهیانه و سالیانه رودخانه لار توزیع پیرسون نوع سوم می‌باشد.

#### مدل‌سازی استوکاستیک سری داده‌های جریان رودخانه

مدل‌های استوکاستیک امکان تولید سری‌های زمانی هیدرولوژیک جانشین (مانند بارندگی و جریان) که احتمال رخداد آن‌ها در آینده وجود دارد را فراهم می‌کنند. از طرف دیگر تحلیل رفتار بلندمدت سیستم‌های مختلف منابع آب خصوصاً سیستم مخازن ذخیره در گرو دسترسی به سری‌های زمانی جریان رودخانه‌ای مورد انتظار در سال‌های بهره‌برداری در آینده می‌باشد. لذا به کارگیری مدل‌های

بدین منظور سد مخزنی لار در مرکز ایران واقع در زیرحوضه‌های جنوبی سلسله کوه‌های البرز به عنوان مطالعه موردی جهت بررسی رفتار و عملکرد سیستم مخازن ذخیره منفرد با استفاده از روش مونت کارلو مورد تحلیل قرار گرفته است. سد مخزنی لار به صورت سیستم ذخیره منفرد طراحی شده و یکی از ۵ مخزن اصلی جهت تأمین آب شرب کلان‌شهر تهران و کشاورزی در منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه ارزیابی عملکرد یک مخزن ذخیره واقعی با پوشش کامل رفتار درون‌سالی و برون‌سالی مورد نظر بوده، لذا توسعه روابط ذخیره-آبدهی-عملکرد برای ترکیب‌های مختلفی از تقاضا (۱۰ تا ۸۰ درصد متوسط جریان سالیانه)، ضرایب اعتماد زمانی (۹۰ تا ۱۰۰ درصد) و آسیب‌پذیری (۰ تا ۳۰ درصد) برای شرایط فرضی جهت پوشش کامل رفتار درون‌سالی و برون‌سالی انجام پذیرفته است.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

رودخانه پرآب لار از دامنه‌های جنوبی و شرقی سلسله کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و در جهت جنوب-شرق جاری و وارد استان تهران می‌شود. این رودخانه یکی از رودخانه‌های مهم به عنوان منبع اصلی تأمین آب شرب کلان‌شهر تهران می‌باشد. بدین منظور سد لار در دهه ۴۰ برای کنترل و تنظیم جریان رودخانه مذکور جهت تأمین بخشی از آب شرب کلان‌شهر تهران احداث و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

داده‌های مورد نیاز در این تحقیق شامل داده‌های جریان رودخانه‌ای، بارندگی، تبخیر، تقاضا و رابطه سطح-حجم سد لار بوده که از وزارت نیرو اخذ گردیده است. داده‌های جریان رودخانه‌ای، تبخیر و بارندگی سد لار برای دوره آماری ۳۲ ساله (۱۳۹۲-۱۳۶۱) در دسترس بوده که به صورت ماهیانه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. موقعیت جغرافیایی و مشخصات آماری داده‌های جریان، بارندگی و تبخیر سالیانه در سیستم ذخیره مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

1- Goodness-of-fit test

2- Probability Plot Correlation Coefficient

شده با توزیع نرمال و میانگین صفر،  $A$  و  $B$  ماتریس ضرایب به ترتیب با ابعاد  $(NM \times N)$  و  $(NM \times NM)$  بوده که عناصر آن‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی یا مشاهداتی انتقال یافته به توزیع نرمال به دست می‌آیند و  $V_i$ : یک بردار از متغیرهای تصادفی نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس واحد می‌باشند. ضمناً  $M$  و  $N$  به ترتیب تعداد ماه یا فصل در سال و سال‌های آماری داده‌های تاریخی است. این مدل مذکور نیز همانند اکثریت مدل‌های دیگر برای سری‌های زمانی تصادفی دارای توزیع نرمال توسعه یافته و برای استفاده از این مدل برای داده‌های دارای توزیع غیر نرمال بایستی ابتدا داده‌ها با استفاده از یک تابع یا رابطه منتقل کننده (transformation) مناسب به توزیع نرمال انتقال یابند (۳۵).

### شاخص‌های عملکرد سیستم مخازن ذخیره

عملکرد محتمل سیستم‌های مخازن ذخیره اغلب به وسیله شاخص‌های عملکرد<sup>۶</sup> که براساس جنبه‌های بخصوص از بهره‌برداری غیرمطلوب یا غیر رضایت بخش در طول پریودهای شکست<sup>۷</sup> بنا نهاده شده، اندازه‌گیری و ارزیابی می‌شوند. یک بهره‌برداری غیرمطلوب اغلب به عنوان یک شکست نامیده شده که به عنوان عدم توانایی یک سیستم مخزن ذخیره برای تأمین تقاضای هدف یا طرح در یک پریود مشخص تعریف می‌شود (۴۵). بنابراین، شاخص‌های عملکرد جهت تصمیم‌گیری مناسب به منظور الف- انتخاب ظرفیت ذخیره مخزن، ب- پیکربندی سیستم، ج- سیاست‌های بهره‌برداری و د- اهداف سیستم ذخیره مورد نیاز است (۱۱). هاشیموتو و همکاران (۱۱) سه شاخص عملکرد، یعنی اعتمادپذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را به عنوان شاخص‌های عملکرد پایه و اصلی سیستم مخازن برای طراحی و بهره‌برداری سیستم مخازن ذخیره معرفی نمودند.

اعتمادپذیری به عنوان احتمال این که سیستم در یک حالت رضایت‌مندی یا مطلوب (بدون شکست) باشد، تعریف می‌شود. این ضریب می‌تواند هم به صورت ترم‌هایی از نسبت کل زمان، یعنی؛ اعتمادپذیری زمانی (۱۱) یا نسبتی از مقدار کل آب مورد تقاضا که توسط مخزن تأمین می‌شود، یعنی؛ اعتمادپذیری حجمی بیان شود. معادله ۳ اعتمادپذیری زمانی را تعریف می‌کند:

$$\delta = \left(1 - \frac{f}{T}\right) \quad (3)$$

که در آن  $\delta$  اعتمادپذیری زمانی ( $0 \leq \delta \leq 1$ )،  $f$  و  $T$  به ترتیب تعداد پریودهای شکست و تعداد کل پریودهای تاریخی یا مشاهداتی می‌باشند.

درست همانند معیار عملکرد قابلیت اطمینان بحث شده در بالا، برای تعریف برگشت‌پذیری چندین تعریف استفاده شده است (۹): با

استوکاستیک و تولید داده‌های مصنوعی برای ارزیابی دقیق و بدون انحراف طرح، بهره‌برداری و مدیریت بهینه سیستم مخازن ذخیره و تدوین رفتار بلندمدت آن‌ها کاملاً لازم و ضروری است (۲۲، ۲۴، ۳۷ و ۴۲).

سیستم مخازن ذخیره اغلب دارای رفتار توأم درون‌سالی و برون‌سالی بوده، لذا برای تحلیل دقیق و رضایت‌بخش رفتار بلندمدت آن‌ها بایستی از مدل استوکاستیک با توان حفظ خصوصیات آماری داده‌های تاریخی در هر دو سطح ماهیانه و سالیانه یعنی مدل‌های توزیعی<sup>۱</sup> استفاده شود (۳۰ و ۳۱). از این‌رو در این مطالعه، ترکیبی از مدل اتورگرسیو با تأخیر یک ساله<sup>۲</sup>  $(AR(1))$  برای تولید داده‌های سالیانه و مدل والنسیا- شاکی<sup>۳</sup> برای توزیع جریان‌های سالیانه به جریان‌های ماهیانه با قابلیت و ظرفیت کاربرد در سیستم مخازن ذخیره منفرد و چندگانه جایگزین یک مدل منفرد برای تولید جریان‌های ماهیانه به‌طور مستقیم، مانند مدل‌های ARMA و توماس- فایرینگ<sup>۴</sup>، شده است. مدل منفرد  $AR(1)$  برای تولید داده‌های سالیانه در سیستم مخازن منفرد با رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$q_{i+1} = \bar{q} + \rho(q_i - \bar{q}) + (s\sqrt{1-\rho^2})e_i \quad (1)$$

که در آن  $q_i$  و  $q_{i+1}$  جریان‌های سالیانه مربوط به  $i$  و  $i+1$  امین سال،  $\bar{q}$  میانگین جریان‌های سالیانه،  $S$  انحراف معیار جریان‌های سالیانه،  $\rho$  ضریب خود همبستگی جریان‌های سالیانه با تأخیر یک<sup>۵</sup> و  $e_i$  مقدار مستقل تصادفی از توزیع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و واریانس واحد می‌باشند. مدل فوق برای داده‌های با توزیع نرمال توسعه یافته و برای به کارگیری این مدل جهت سری‌های زمانی تاریخی با توزیع‌های احتمالی دیگر یا غیر نرمال بایستی ابتدا داده‌ها با استفاده از یک تابع انتقال (transformation) مناسب به توزیع نرمال انتقال یافته و سپس پارامترهای مدل  $(\bar{q}, S, \rho)$  از سری زمانی تاریخی انتقال یافته به نرمال یا نرمال شده محاسبه گردند (۳۵). لازم به ذکر است که در این مطالعه به دلیل تبعیت داده‌های جریان ماهیانه و سالیانه رودخانه لار از توزیع پیرسون نوع سوم، تابع تبدیل Wilson-Hilferty، به عنوان مناسب‌ترین رابطه، برای انتقال داده‌های جریان رودخانه لار به توزیع نرمال استفاده شده است (۲۲ و ۲۴).

رابطه ریاضی مدل توزیعی والنسیا- شاکی جهت توزیع داده‌های سالیانه به ماهیانه به صورت رابطه ۲ می‌باشد (۳۵):

$$X_i = AZ_i + BV_i \quad (2)$$

که در آن  $X_i$   $(NM \times 1)$  یک بردار از جریان‌های ماهیانه تولید شده با میانگین صفر،  $Z_i$   $(N \times 1)$  یک بردار از جریان سالیانه تولید

- 1- Disaggregation models
- 2- Auto Regressive Lag-1
- 3- Valencia- Schaake (V-S)
- 4- Thomas- Fiering
- 5- Lag- one Serial Correlation Coefficient

6- Performance Indies

7- Failure Periods

### روش حداکثرهای متوالی (SPA)

روش SPA اولیه، روش شبیه‌سازی بر اساس دوره بحرانی (شدیدترین دوره خشکی مشاهداتی) برای سیستم مخازن ذخیره منفرد بوده که در آن معادله توازن جرمی براساس میزان کمبود آب در هر پریود بسط داده شده است. این الگوریتم (SPA) مانند روش تحلیل رفتاری<sup>۲</sup> (BA)، سری زمانی جریان روخانه را به‌طور مستقیم به‌کار گرفته و در نتیجه اثرات فصلی، همبستگی داخلی و سایر پارامترهای جریان به‌طور مستقیم در تحلیل سیستم ذخیره در نظر گرفته می‌شوند (۲۵). در روش SPA اولیه، تحلیل سیستم ذخیره با فرض ناچیز بودن تلفات ناشی از تبخیر (صرفنظر کردن از تلفات ناشی از تبخیر) و ضریب اعتمادپذیری ۱۰۰٪ انجام می‌پذیرد. لذا اصلاحات اساسی روش SPA اولیه، به‌دلیل ساختار تئوریک مناسب، به‌سطح یک روش نهایی در تحلیل سیستم مخازن ذخیره از تلاش‌های مؤثر محققین در دهه‌های گذشته بوده است. اولین مجموعه از اصلاحات، توسط له‌له (۱۹) گزارش شده که SPA اصلاح شده توسط ایشان (SPA-I) قابلیت منظور نمودن حجم تلفات تبخیر (با فرض رابطه خطی سطح و حجم مخزن) و ضریب اعتمادپذیری کمتر از ۱۰۰٪ را در محاسبات فراهم کرده است. توانایی بررسی تغییرات وابسته به سطح مخزن (تلفات ناشی از تبخیر) در مناطقی که شدت تبخیر خیلی زیاد است و همچنین برای مطالعه میزان حساسیت تغییرات اقلیمی، قابل توجه می‌باشد.

متنصری (۲۷) علاوه بر تکمیل اصلاحات قبلی (ارائه الگوریتم SPA-II برای رفع نقیصه SPA-I در اعمال تلفات ناشی از تبخیر در محاسبات)، روش SPA را برای به‌کارگیری در سیستم مخازن چندگانه SPA-III با اعمال تلفات ناشی از تبخیر و سه شاخص عملکرد، اعتمادپذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری توسعه داد. در هر سه گونه (version) SPA های اصلاح شده ( SPA-I, SPA-II, and SPA-III) دو شاخص عملکرد مخزن یعنی اعتمادپذیری زمانی و آسیب‌پذیری قابل کنترل در تحلیل بوده و تحلیل سیستم ذخیره برای مقادیر معلوم یا مشخص شاخص‌های مذکور انجام می‌پذیرد. همچنین در روش‌های SPA-II و SPA-III امکان استفاده از رابطه غیرخطی یا رابطه واقعی سطح-حجم در برآورد حجم تلفات ناشی از تبخیر در سیستم ذخیره است. کنترل دو شاخص عملکرد مخزن و به‌کارگیری رابطه واقعی یا غیرخطی سطح-حجم مخزن در تحلیل سیستم مخازن ذخیره به‌همراه جواب یکتا به‌عنوان مزیت‌های اساسی و بسیار مهم روش‌های مذکور نسبت به روش آنالیز رفتاری (فرض خطی بودن رابطه سطح-حجم مخزن و کنترل تنها شاخص اعتمادپذیری در محاسبات) است.

متنصری (۲۷) روش LP و الگوریتم‌های SPA-I, SPA-II را برای ارزیابی کاربرد و عملکرد روش SPA به‌عنوان یک روش

این حال، تعریفی که به‌طور گستره مورد استفاده قرار می‌گیرد تعریف ارائه شده توسط هاشیموتو و همکاران (۱۱) است. ایشان برگشت‌پذیری را به‌عنوان احتمالی که یک سیستم مخزن پس از حالت شکست بهبود می‌یابد تعریف نمودند، یعنی؛

$$\lambda = \frac{1}{f_s} \quad (4)$$

که در آن  $\lambda$  برگشت‌پذیری ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ) و  $f_s$  تعداد دنباله‌های پیوسته پریودهای شکست می‌باشند ( $f$ : تعداد کل پریودهای شکست). برای اولین بار هاشیموتو و همکاران (۱۱) آسیب‌پذیری را به‌عنوان متوسط شکست‌های بیشینه در طول هر دوره (چند پریود) شکست پیوسته تعریف نموده‌اند. زانگ و همکاران (۴۷) تمام شکست‌ها را به‌جای مقدار حداکثر در هر دوره شکست پیوسته در نظر گرفتند و آسیب‌پذیری را به‌صورت نسبت کل کسری آب تحویلی به تقاضای هدف یا طرح در طول پریودهای شکست (رابطه ۵) تعریف کردند؛

$$\eta = \frac{(\sum_{i \in T} R_i^* - \sum_{i \in T} R_i)}{\sum_{i \in T} R_i^*} \quad (5)$$

که در آن  $\eta$  آسیب‌پذیری،  $R_i$  مقدار آب تحویلی در طول  $t$  امین پریود شکست و  $R_i^*$  مقدار تقاضای هدف در طول  $t$  امین پریود شکست است. در معادله ۵، آسیب‌پذیری در بازه ( $0 \leq \eta \leq 1$ ) قرار می‌گیرد، همانند دو معیار عملکرد، یعنی؛ اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری. موی و همکاران (۳۲) در یک مطالعه وسیع، عدم تعامل (trade-offs) موجود مابین سه شاخص اعتمادپذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را به‌صورت گسترده‌ای بررسی نمودند. چنین رفتاری، استفاده از این معیارها برای مدیریت بهینه سیستم‌های منابع آب را شدیداً محدود می‌کند. با این وجود، اگر یک شاخص واحدی که شامل اثرات ترکیبی این شاخص‌ها است، بتواند استخراج شود، آنگاه پیچیدگی‌های مرتبط با عدم تعامل مابین آن‌ها عمدتاً منتفی خواهد شد. سیمونویک (۳۸) این شاخص‌های یکپارچه را به‌عنوان معیار شایستگی<sup>۱</sup> (FM) نامید. لاکس (۲۳) سه شاخص اعتمادپذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را به‌منظور تعریف یک شاخص پایداری (sustainability FM) ( $\phi$ ) برای طراحی و بهره‌برداری سیستم مخازن مطابق رابطه ۶ ترکیب نمود:

$$\phi = \delta \lambda (1 - \eta) \quad (6)$$

که در آن  $\phi$ : شاخص پایداری،  $\delta$ : شاخص اعتمادپذیری زمانی،  $\lambda$ : شاخص برگشت‌پذیری و  $\eta$ : شاخص آسیب‌پذیری می‌باشند. همچنین ساندوال و همکاران (۳۶)، معادله بالا را در فرم معادله ۷ اصلاح و نتیجه‌گیری نمودند که معادله جدید نتایج دقیق‌تری را فراهم می‌کند. معادله ۶ و ۷ به‌طور منطقی درست بوده، زیرا پایداری یک سیستم ذخیره برای اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری بیشتر و آسیب‌پذیری کوچک‌تر افزایش می‌یابد.

$$\phi = [\delta \lambda (1 - \eta)]^{1/3} \quad (7)$$

### عملکرد مدل استوکاستیک جریان رودخانه

در این بخش ارزیابی عملکرد مدل استوکاستیک در حفظ یا دوباره تولید خصوصیات آماری داده‌های تاریخی به تفکیک در سطح سالیانه و ماهیانه انجام پذیرفته است. پارامترهای آماری داده‌های تولیدی از متوسط‌گیری مقادیر پارامترها از ۱۰۰۰ سری زمانی تولیدی یا استوکاستیک استخراج شده است. جدول ۱ مقایسه مشخصات آماری داده‌های جریان سالیانه تولیدی (استوکاستیک) و تاریخی در سد مورد مطالعه را نشان می‌دهد. براساس جدول ۱، عملکرد مدل AR(1) در حفظ یا دوباره تولید مشخصات آماری مهم، یعنی؛ میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی و همبستگی داخلی با تأخیر یک‌ساله یا خود همبستگی یک‌ساله در حد بسیار مناسبی بوده که این امر در تبیین دقیق و درست رفتار برون‌سالی سیستم مخازن ذخیره بسیار مهم است (۳۹ و ۴۰).

جهت ارزیابی عملکرد مدل والنسیا-شاکی در توزیع داده‌های جریان سالیانه در ماه‌های مختلف سال، پارامترهای آماری ماهیانه میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی، همبستگی دو ماه متوالی و نیز همبستگی مابین ماه با سال داده‌های جریان تولیدی و تاریخی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل ۱ مقایسه مقادیر پارامترهای آماری ماهیانه پنج‌گانه مذکور سری زمانی تاریخی و تولیدی را در سد مخزنی لار نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مدل توزیعی مورد استفاده در این مطالعه با ترکیب AR(1) و والنسیا-شاکی دارای عملکرد بسیار مطلوبی در حفظ یا دوباره تولید مشخصات آماری داده‌های جریان رودخانه در دو سطح سالیانه و ماهیانه، یعنی؛ میانگین، انحراف معیار و ضریب چولگی، ساختمان همبستگی مابین ماه‌های مختلف سال و همبستگی مابین داده‌های ماهیانه و سالیانه بوده است. لازم به ذکر است که حفظ یا دوباره تولید ضریب چولگی در داده‌های تولیدی به دلیل تطبیق و انتخاب توزیع پیرسون نوع سوم به‌عنوان توزیع برتر داده‌های تاریخی بوده است. در صورتی که توزیع احتمال انتخابی توزیع دیگری مانند توزیع نرمال یا گامبل (چولگی برابر مقدار ثابت) تعیین شود، امکان حفظ ضریب چولگی توسط داده‌های تولیدی در هر دو سطح ماهیانه و سالیانه فراهم نشده و ضریب چولگی در سری داده‌های تولیدی کاملاً تخریب می‌شود. بر اساس شکل ۱-۳، ضرایب چولگی سری‌های زمانی تولیدی به نسبت کوچکتر از مقادیر تاریخی بوده که این امر ناشی از عدم قطعیت در انتقال داده‌ها به توزیع نرمال بیش از مدل‌سازی استوکاستیک و تصادفی است (۳۹، ۶). به هر حال، چنین انحراف کوچکی در تحلیل سیستم مخازن ذخیره حائز اهمیت نبوده، زیرا برآورد حجم ذخیره مورد نیاز عمدتاً متأثر از ضریب تغییرات داده‌ها بوده و کمتر تحت تأثیر ضریب چولگی داده‌ها قرار می‌گیرد (۶ و ۳۹).

جایگزین در طراحی مخازن مقایسه کرد. نتایج نشان داد که LP و SPA-II (SPA اصلاح شده توسط منتصری (۲۷)) به نتایج کاملاً یکسانی منجر می‌شوند، در حالی که نتایج الگوریتم SPA-I که توسط لهله (۱۹) ارائه شده در برخی حالات با نتایج LP و SPA-II متفاوت است و حجم ذخیره را اندکی کمتر از دو روش دیگر برآورد کرده است. این تفاوت ناشی از تشخیص نادرست طول دوره بحرانی در روش SPA-I است. همچنین روش SPA-II در برخی حالات حجم ذخیره منفی را نشان می‌دهد که این مسأله نیز مربوط به روش اعمال تلفات ناشی از تبخیر در تحلیل می‌باشد.

در نسخه اولیه این روش که تحت عنوان Basic-SPA مطرح می‌باشد، ظرفیت ذخیره مفید مخزن به‌ازای اعتمادپذیری ۱۰۰٪ در یک دوره T پربودی بدون در نظر گرفتن تلفات ناشی از تبخیر از مخزن، برآورد می‌گردد. در این روش حجم مفید مخزن بر اساس رابطه ۸ تعیین می‌گردد (۲۳).

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

$$K_a = \text{Max}(K_t); \quad t=1, T \quad (8)$$

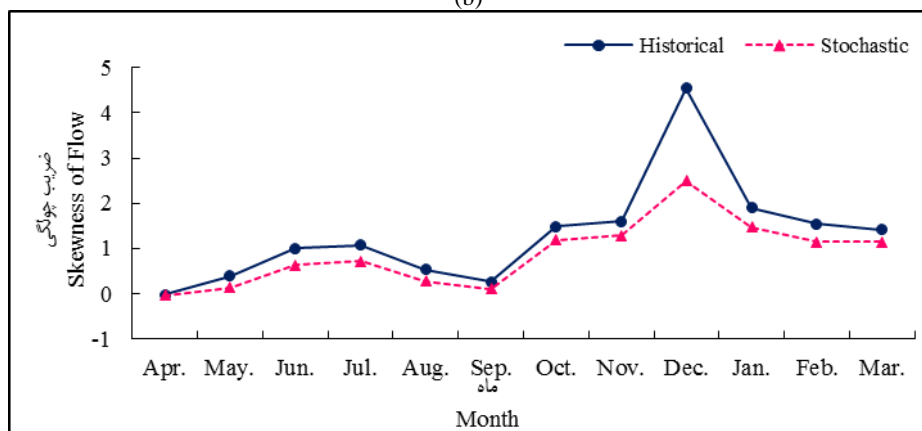
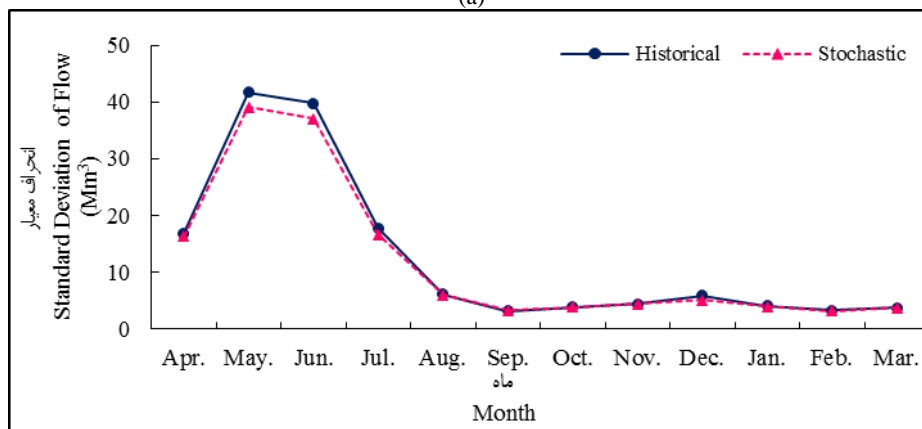
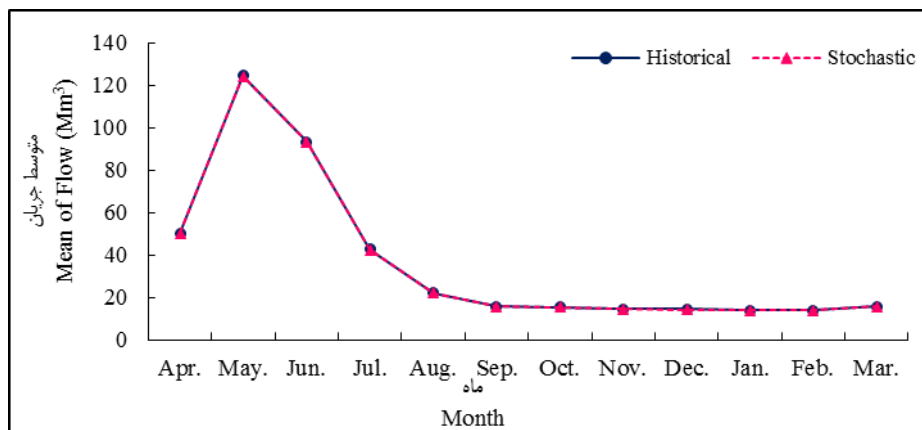
که در آن  $K_a$ : حداقل ظرفیت ذخیره مورد نیاز یا حجم مفید مخزن،  $K_t$  و  $K_{t-1}$ : به ترتیب مقدار کمبود حجم ذخیره یا حجم خالی مخزن در انتهای پربودهای  $t-1$  و  $t$ : مقدار حجمی تقاضا یا عرضه آب از مخزن در طول پربود  $t$ :  $EV_t$ : مقدار حجمی تلفات آب (از قبیل تبخیر و نشت ... ) در طول پربود  $t$ :  $I_t$ : مقدار حجمی جریان ورودی به مخزن در طول پربود  $t$  و  $T$ : طول دوره آماری یا تعداد کل پربودها می‌باشد.

### نتایج و بحث

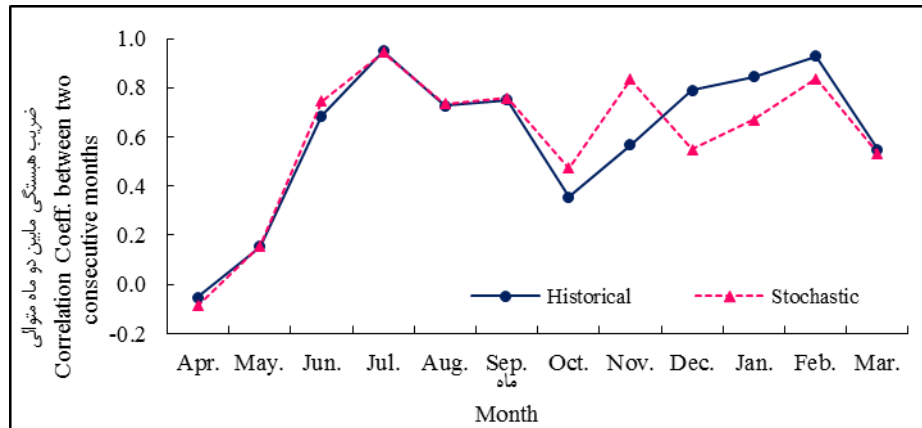
نتایج این مطالعه در ۳ بخش اصلی تفکیک و ارائه شده است. در بخش اول، نتایج عملکرد مدل استوکاستیک به کار رفته (مدل سالیانه و ماهیانه) و ارزیابی عملکرد آن در تحلیل مخزن بررسی شده است. در بخش دوم، نتایج حاصل از مشخصات اصلی سیستم مخزن ذخیره از جمله تغییرات حجم مفید، دوره بحرانی و تلفات ناشی از تبخیر مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش آخر، عملکرد سیستم مخزن ذخیره درون‌سالی و برون‌سالی بر اساس چهار شاخص اصلی ضرایب اعتماد زمانی، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجایی که هدف اصلی این تحقیق تعیین و ارزیابی عملکرد و رفتار عمومی سیستم مخزن ذخیره منفرد بوده، لذا نتایج ارائه شده در بخش دوم و سوم بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی استوکاستیک مخزن براساس داده‌های تولیدی جریان رودخانه (۱۰۰۰ سری) به‌عنوان جمعیت خصوصیات سیستم مخازن استخراج شده است. ضمناً نتایج ارائه شده به‌صورت میانگین ۱۰۰۰ سری به‌عنوان میانگین جمعیت یا به‌صورت سری کامل داده‌های جمعیت مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲- مقایسه پارامترهای آماری داده‌های جریان سالیانه تولیدی و تاریخی در سد مخزنی لار  
 Table 2- Comparison of annual statistical characteristics of historical and generated values in Lar dam

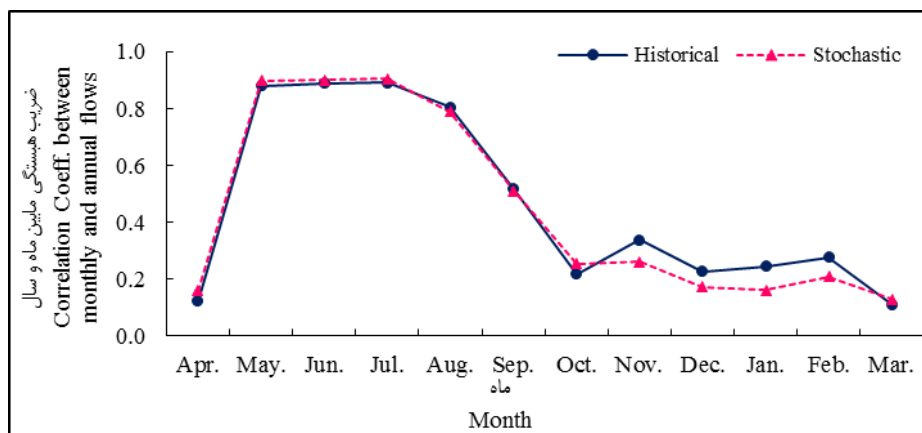
سد Dam	داده‌های تاریخی Historical data				داده‌های تولیدشده Generated data			
	میانگین Mean (MCM)	انحراف معیار Standard deviation (MCM)	ضریب چولگی Skewness	همبستگی Correlation	میانگین Mean (MCM)	انحراف معیار Standard deviation (MCM)	ضریب چولگی Skewness	همبستگی Correlation
(لار) Lar	435.38	104.49	0.19	0.41	434.64	97.82	0.13	0.34







(d)



(e)

شکل ۱- مقایسه پارامترهای آماری ماهیانه داده‌های جریان تاریخی و تولیدی؛ (a) میانگین، (b) انحراف معیار، (c) ضریب چولگی، (d) ضریب همبستگی مابین دو ماه متوالی و (e) ضریب همبستگی مابین داده‌های ماهیانه و سالیانه - سد لار

Figure 1- Comparison of statistical characteristics of historical and generated monthly streamflow data; a) mean, b) standard deviation, c) skewness, d) correlation coefficient between two consecutive months, and e) correlation coefficient between different months and annual values- Lar dam

ذخیره با میزان آسیب‌پذیری سیستم بوده و با افزایش مقدار آسیب‌پذیری، مقدار حجم ذخیره مورد نیاز کاهش پیدا می‌کند.

### دوره بحرانی

تعیین رفتار درون‌سالی و برون‌سالی سیستم مخازن ذخیره در برنامه‌ریزی و توسعه الگوی‌های بهره‌برداری بهینه چنین سیستم‌هایی بسیار حائز اهمیت است (۲۸ و ۳۹). بدین منظور مطالعات متعددی با ساده‌سازی سیستم مخازن ذخیره مانند فرض تقاضای ثابت ماهیانه، فرض ناچیز بودن تلفات ناشی از تبخیر، عدم اعمال شاخص‌های عملکرد مخزن و استفاده از داده‌های سالیانه جهت مدل‌سازی، و توسعه شاخص مناسب برای تعیین رفتار سیستم مخازن ذخیره انجام یافته است (۳، ۲۴ و ۴۵). با این وجود دوره بحرانی دقیق‌ترین شاخص تعیین و ارزیابی مستقیم رفتار درون و برون‌سالی سیستم مخازن ذخیره شناخته شده است (۲۸).

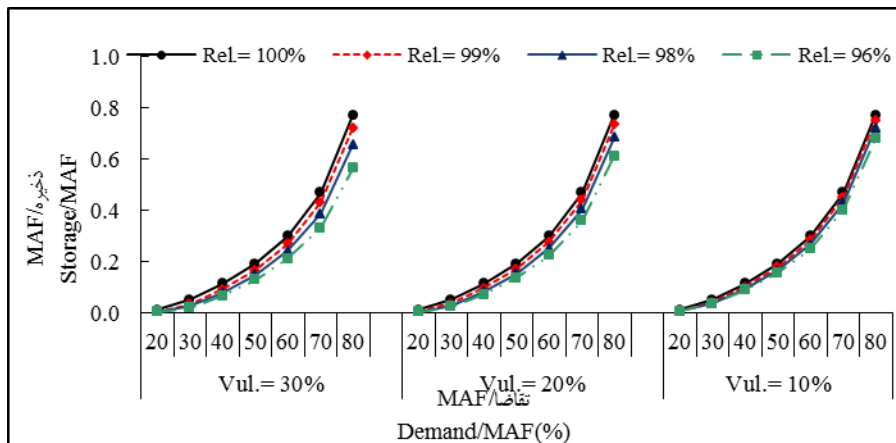
### خصوصیات اصلی سیستم مخازن ذخیره

در این بخش از نتایج به ارزیابی رفتار ویژگی‌های مهم سیستم مخزن ذخیره، یعنی؛ حجم ذخیره مورد نیاز، دوره بحرانی و تلفات ناشی از تبخیر بر اساس جمعیت داده‌های خصوصیات سیستم مخزن ذخیره و داده‌های جریان تولیدی پرداخته شده است.

### حجم ذخیره مورد نیاز

نمودار تغییرات میانگین حجم ذخیره استوکاستیک به‌ازای تقاضاها (MAF: ۸۰٪-۲۰٪)، ضرایب اعتماد زمانی (۱۰٪-۹۵٪) و آسیب‌پذیری‌های (۳۰٪-۱۰٪) مختلف برای سد لار در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمودار تغییرات حجم ذخیره مورد نیاز به‌ازای تقاضا از یک رابطه نمایی تبعیت نموده و با افزایش تقاضا، میزان حجم ذخیره مورد نیاز به‌طور نمایی افزایش می‌یابد. با این وجود شیب افزایش حجم ذخیره مورد نیاز به‌ازای تقاضا برای محدوده رفتار درون‌سالی سیستم ملایم بوده و برای دوره انتقالی و برون‌سالی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. ضمناً نتایج بیانگر وابستگی مستقیم حجم





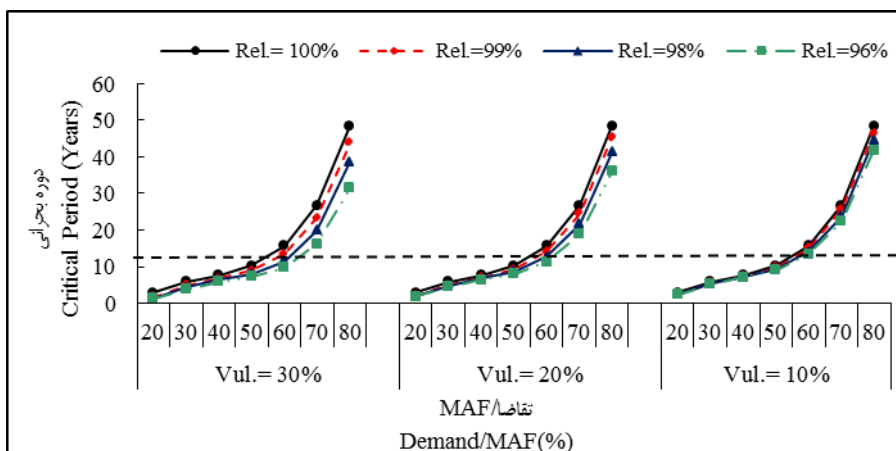
شکل ۲- نمودار تغییرات حجم مخزن مورد نیاز و تقاضا برای ضرایب اعتماد زمانی‌ها و آسیب‌پذیری‌های مختلف  
 Figure 2- The variation plot of storage capacity against demand for different time-based reliabilities and vulnerabilities-

ذخیره مورد مطالعه تا تقاضای ۵۰ درصد MAF و تقاضای بالاتر از ۶۰ درصد به ترتیب کاملاً رفتار درون‌سالی و برون‌سالی داشته و همچنین در محدوده تقاضاهای ۵۰-۶۰ درصد MAF، رفتار سیستم ذخیره در شرایط انتقالی بوده، یعنی؛ براساس شرایط هیدرولوژیک و جریان‌ات ورودی به سیستم ذخیره در هر سال، رفتار مخزن مابین رفتار درون‌سالی و برون‌سالی در نوسان خواهد بود.

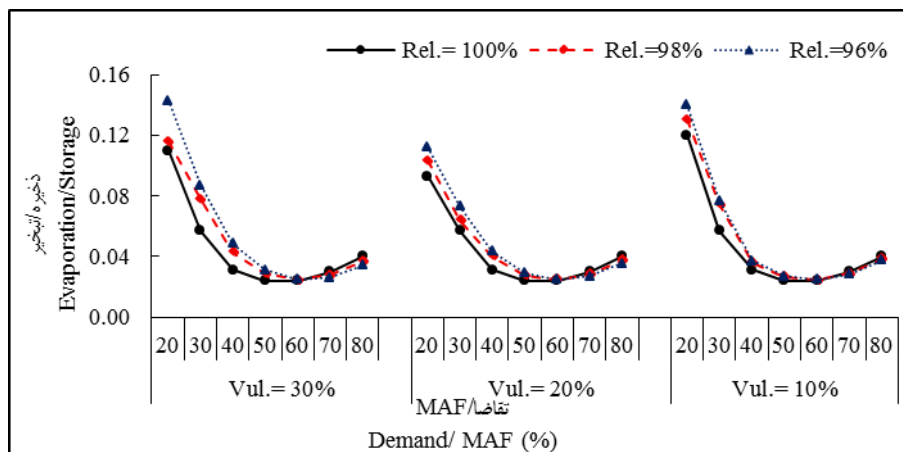
#### تلفات ناشی از تبخیر

تلفات ناشی از تبخیر یکی از عوامل مؤثر در تحلیل سیستم مخازن ذخیره سطحی (مرحله طراحی و بهره‌برداری) خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. به‌طوری‌که نزدیک ۳۰ درصد حجم ذخیره آب سیستم مخازن ذخیره در مناطق خشک به‌وسیله تبخیر تلف می‌گردد (۸).

لذا در این مطالعه مقادیر دوره بحرانی سیستم‌های ذخیره مورد مطالعه با لحاظ نمودن شرایط واقعی حاکم بر سیستم مخزن ذخیره با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام یافته است. شکل ۳ نمودار تغییرات دوره بحرانی سیستم ذخیره به‌ازای تقاضا را برای مقادیر مختلف شاخص‌های عملکرد مخزن یعنی؛ اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در سد لار نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که دوره بحرانی در سیستم مخازن ذخیره تابعی از تقاضا، ضریب اعتماد زمانی و آسیب‌پذیری است و پارامترهای مذکور به‌طور مستقیم در طول دوره بحرانی مؤثر هستند. به‌طوری‌که با کاهش/افزایش اعتماد زمانی/آسیب‌پذیری مقدار دوره بحرانی کاهش پیدا می‌کند. همچنین شکل ۳ بیانگر وجود یک رابطه نمایی مابین دوره بحرانی و تقاضا بوده و روند افزایش طول دوره بحرانی به‌ازای تقاضا در شرایط درون‌سالی (دوره بحرانی کمتر یا مساوی ۱۲ ماه) ملایم بوده و برای شرایط برون‌سالی (دوره بحرانی بیشتر از ۱۲ ماه) به‌طور قابل ملاحظه‌ای تشدید می‌گردد. ضمناً نتایج نشان می‌دهد که سیستم



شکل ۳- نمودار تغییرات دوره بحرانی به‌ازای تقاضا برای اعتماد زمانی‌ها و آسیب‌پذیری‌های مختلف- سد لار  
 Figure 3- The variation diagram of critical period with demand for different vulnerabilities and reliabilities- Lar dam



شکل ۴- نمودار تغییرات تلفات ناشی از تبخیر به ازای تقاضا، برای اعتماد زمانی‌ها و آسیب‌پذیری‌های مختلف- سد لار

Figure 4- The variation diagram of evaporation losses with demand for different vulnerabilities and reliabilities- Lar dam

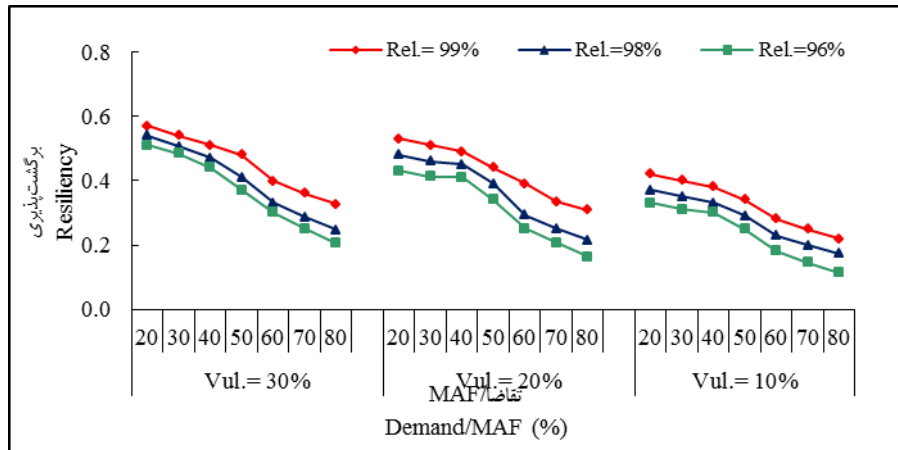
مذکور، نمودار تغییرات مقادیر احتمال برگشت‌پذیری از یک خط شکسته با سه بخش با شیب‌های نسبتاً متفاوت تبعیت می‌کند. بخش اول نمودار تقریباً بدون شیب یا با شیب بسیار کم بوده که برای رفتار درون‌سالی سیستم ذخیره حاصل شده است. بخش دوم نمودار بیشترین شیب خود را داشته که منطبق بر شرایط انتقالی سیستم ذخیره (یعنی؛ انتقال از درون‌سالی به برون‌سالی) بوده و در قسمت انتهایی نمودار، شیب نمودار نسبت به بخش میانی تعدیل گردیده و در این بخش سیستم ذخیره کاملاً یک رفتار برون‌سالی دارد. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که مقدار ضریب برگشت‌پذیری با کاهش میزان اعتماد زمانی و آسیب‌پذیری، روند کاهشی داشته و این روند با افزایش تقاضا کمتر می‌شود.

لاکس و همکاران (۲۰) به دلیل رفتار trade-off یا عدم تعامل سه شاخص عملکرد اصلی (یعنی؛ اعتماد زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری)، شاخص پایداری (Sustainability) را جهت مقایسه سیستم مخازن ذخیره و انتخاب گزینه شایسته با عملکرد بهینه معرفی و فرمول‌بندی نمودند (رابطه ۶)، ضمناً فرمول اولیه شاخص پایداری در راستای ارتقاء کارکرد و دقت آن توسط ساندوال (۳۶) اصلاح گردید (رابطه ۷). در شکل ۶ تغییرات مقادیر شاخص پایداری برای تقاضا و شاخص‌های اعتماد زمانی و آسیب‌پذیری مختلف در سد لار با استفاده از رابطه ۶ و ۷ پایداری ارائه شده است. شکل مذکور بیان می‌کند که پایداری سیستم ذخیره لار به‌ازای افزایش تقاضا و کاهش اعتماد زمانی دارای روند نزولی است. ضمناً از آنجایی که میزان شاخص اعتماد زمانی در این مطالعه مقادیر نزدیک به واحد یا در محدوده بالایی بوده، لذا میزان پایداری سیستم ذخیره مذکور به‌طور عمده تحت تأثیر دو شاخص دیگر (برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) قرار گرفته است. همچنین میزان این شاخص با توجه به معادله ۷ دارای مقدار بیشتری نسبت به معادله ۶ می‌باشد.

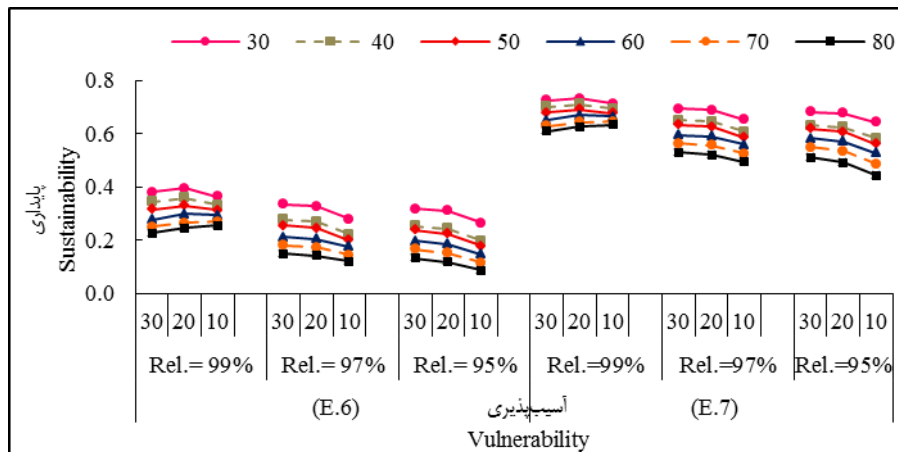
بررسی و ارزیابی جامعی از تلفات ناشی از تبخیر برای طیف گسترده‌ای از تقاضا و ضرایب اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در مخازن ذخیره سطحی می‌تواند یک الگو یا راهنمای بسیار مناسبی در مرحله طراحی و انتخاب سیستم مخازن ذخیره بهینه باشد (۸). تغییرات تلفات ناشی از تبخیر به‌ازای تقاضای یک سیستم ذخیره، یعنی؛ سد لار، برای ضرایب اعتمادپذیری زمانی و آسیب‌پذیری مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس نتایج شکل ۴، رابطه حجم نسبی تلفات ناشی از تبخیر (نسبت حجم تبخیر به حجم ذخیره) و تقاضا، از یک شکل هذلولی تبعیت کرده و مقدار حجم نسبی تلفات با افزایش تقاضا یا حجم ذخیره در شرایط درون‌سالی کاهش پیدا کرده و در حداکثر تقاضا یا حجم ذخیره محدوده رفتار درون‌سالی به حداقل مقدار خود می‌رسد و سپس با گذار رفتار سیستم به حالت انتقالی و برون‌سالی، میزان حجم نسبی تلفات ناشی از تبخیر با افزایش تقاضا یا حجم ذخیره افزایش پیدا می‌کند.

#### عملکرد سیستم مخازن

عملکرد سیستم مخازن ذخیره بر اساس رفتار سیستم ذخیره در تأمین تقاضای طرح یا هدف در دوره‌های پرتنش یا شکست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۲۰). بدین منظور سه شاخص اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری به‌ترتیب جهت کمی کردن احتمال میزان شکست، برگشت‌پذیری از شکست و شدت شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۰). کنترل دو شاخص اعتماد زمانی و آسیب‌پذیری در تحلیل سیستم مخازن ذخیره با روش SPA-II، امکان شبیه‌سازی سیستم مخازن را برای ترکیب‌های گوناگون دلخواه جهت بررسی و ارزیابی جامع از رفتار و عملکرد سیستم مخازن ذخیره فراهم می‌کند (۱۹). در شکل ۵، نمودار تغییرات احتمال برگشت‌پذیری سیستم ذخیره در مقابل تقاضا برای اعتماد زمانی‌ها و آسیب‌پذیری‌های مختلف در سد لار ارائه شده است. بر اساس شکل



شکل ۵- سرعت برگشت پذیری برای ضرایب آسیب پذیری و اعتمادپذیری مختلف؛ سد لار  
Figure 5- Resiliency for different vulnerabilities and reliabilities; Lar dam



شکل ۶- پایداری برای ضرایب آسیب پذیری و اعتمادپذیری مختلف- سد لار  
Figure 6- Sustainability for different vulnerabilities and reliabilities- Lar dam

ذخیره علاوه بر تقاضا، تابعی از تلفات ناشی از تبخیر و ضرایب اعتماد زمانی و آسیب پذیری بوده و از یک رابطه نمایی به ازای تقاضا تبعیت می‌کند.

دوره بحرانی به‌عنوان دقیق‌ترین شاخص تعیین رفتار درون/برون سالی سیستم مخازن ذخیره مطرح بوده و این شاخص در مدیریت و بهره‌برداری چنین سیستم‌هایی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. نتایج مطالعه (بخش دوم: دوره بحرانی) نشان می‌دهد که رفتار سیستم مخازن یا دوره بحرانی علاوه بر تقاضا، به شاخص‌های عملکرد سیستم وابسته بوده و با کاهش ضریب اعتماد زمانی یا افزایش ضریب آسیب‌پذیری مقدار دوره بحرانی کاهش پیدا می‌کند. همچنین نتایج بیانگر تغییرات غیرخطی (نمایی) دوره بحرانی و تقاضا در سطح مشخص از شاخص‌های عملکرد بوده است.

تعیین رابطه تلفات تبخیر برای دامنه تغییرات گسترده‌ای از تقاضا و شاخص‌های عملکرد مخازن در سیستم مخازن ذخیره سطحی می‌تواند یک راهنمای بسیار مناسب در انتخاب بهینه مشخصات سیستم ذخیره در مرحله طراحی باشد بر اساس نتایج نوآورانه این

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک روش مونت کارلو گسترده جهت تعیین رابطه ذخیره-آبدهی-عملکرد سیستم مخازن ذخیره منفرد با استفاده از اطلاعات سد مخزنی لار انجام پذیرفته است. هدف اصلی این مطالعه برخلاف اکثر مطالعات انتشار یافته که برای حالت خاص و ساده شده از سیستم مخازن ذخیره (مانند استفاده از داده‌های سالانه، صرف‌نظر از تلفات تبخیر، فرض تقاضای ثابت ماهیانه، کنترل یک شاخص عملکرد و ...)، برای شرایط واقعی حاکم بر سیستم مخازن ذخیره انجام پذیرفته است.

نتایج بخش اول نشان می‌دهد که ترکیب دو مدل استوکاستیک AR(1) و والنسیا-شاکای دارای عملکرد بسیار مطلوبی در حفظ یا دوباره تولید مشخصات آماری داده‌های تاریخی در دو سطح ماهیانه و سالانه بوده که این امر مزیت و ضرورت استفاده از مدل‌های استوکاستیک توزیعی نسبت به سایر مدل‌های استوکاستیک مانند توماس-فایرینگ و ARMA در تحلیل سیستم مخازن ذخیره را نشان می‌دهد. براساس نتایج بخش دوم (حجم ذخیره مورد نیاز)، حجم

و درصد قابل توجهی از حجم ذخیره مخزن را به خود اختصاص می‌دهد. ضمناً نتایج بخش سوم نشان می‌دهد که سرعت برگشت‌پذیری سیستم مخازن ذخیره از شکست به‌ازای افزایش تقاضا با شیب‌های متفاوت برای سیستم مخازن ذخیره درون‌سالی، انتقالی و برون‌سالی کاهش پیدا می‌کند.

تحقیق (بخش دوم: تلفات ناشی از تبخیر)، تغییرات تلفات تبخیر به‌ازای تقاضا و سطح مشخصی از شاخص‌های عملکرد، دارای یک شکل عدسی مقعر بوده که نقطه عطف (کمینه) آن منطبق بر بزرگترین سیستم ذخیره درون‌سالی بوده است و با کاهش/افزایش تقاضا و حجم ذخیره، مقدار تلفات تبخیر به‌صورت نمایی افزایش یافته

## منابع

- 1- Adeloje A.J., and Montaseri M. 2001. Quantifying the water resources benefits of integrated reservoir planning. *Journal of Integrated Water Resources Management* 272: 229-235.
- 2- Adeloje A.J., and Montaseri M. 2002. Preliminary streamflow data analyses prior to water resources planning study. *Journal of Hydrological Science* 47(5): 679-692.
- 3- Adeloje A.J., and Pal S. 2010. Generalized storage-yield-reliability modelling: Independent validation of the Vogel Stedinger (V-S) model using a Monte Carlo simulation approach. *Journal of Hydrology* 388: 234-240.
- 4- Ahmad S., and Simonovic S.P. 2000. System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. *Journal of Computing in Civil Engineering* 14(3): 190-198.
- 5- Becker L., and Yeh W.W.G. 1974. Optimization of real time operation of multiple- reservoir system. *Journal of Water Resource Research* 10(6): 1107- 1112.
- 6- Burges S.J., and Linsley R.K. 1971. Some factors influencing required reservoir storage. *Journal of Hydraulic Division, ASCE* 97(7): 977-991.
- 7- Chen L., McPhee J., and Yeh W.W.G. 2007a. A diversified multi-objective GA for optimizing reservoir rule curves. *Journal of Advances in Water Resources* 30(5): 1082-1093.
- 8- Compos J.N.B. 2010. Modeling the yield-evaporation-spill in the reservoir storage process: The regulation triangle diagram. *Journal of Water Resources Management* 24: 3487-3511.
- 9- Fiering M.B. 1982. Estimates of resilience indices by simulation. *Journal of Water Resources Research* 18(1): 41-50.
- 10- Guo S.L., Zhang H.G., and Chen H. 2004. A reservoir flood forecasting and control System for China. *Journal of Hydrological Sciences* 49(6): 959-972.
- 11- Hashimoto T., Stedinger J.R., and Loucks D.P. 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Journal of Water Resources Research* 18(1): 14-20.
- 12- Hosseinpour Tehrani M., Davari R., and Ghahreman B. 2008. Operation of reservoir systems using fuzzy logic. 4<sup>th</sup> National Congress of Civil Eng., 6-8May. 2008. Tehran University, Tehran. (In Persian)
- 13- Houck M.H., Cohon J.L., and Revelle C. 1980. Linear decision rule in reservoir design and management, 6: incorporation of economic efficiency benefits and hydroelectric energy generation. *Journal of Water Resource Research* 16(1): 196-200.
- 14- Ismail N.A., Harun S., and Yusop Z. 2004. Synthetic simulation of streamflow and rainfall data using disaggregation models. *Journal of Kejuruteraan Awam* 16(2): 56-65.
- 15- kaharkaboudi R., and KhayatKholghi M., Jahromi M., and Arab D. 2008. Operation of multi-reservoir system using fuzzy approach. 4<sup>th</sup> National Congress of Civil Eng., 6-8May. 2008. Tehran University, Tehran. (In Persian)
- 16- Karamouz M., and Karachian R. 2003. Water quality management. Amirkabir University Press. Tehran.
- 17- Kottegoda N.T., and Horder M.A. 1980. Daily flow model based on rainfall occurrences using pulses and a transfer function. *Journal of Hydrology* 47: 215-234.
- 18- Lars S.H., and Vogel R. 2008. The probability distribution of daily rainfall in the United States. ASCE, World Environmental and Water Resources Congress. 12-16 May. 2008. Honolulu, Hawaii.
- 19- Lele S.M. 1987. Improved algorithms for reservoir capacity calculation incorporating storage-dependent losses and reliability norm. *Journal of Water Resource Research* 23(10): 1819-1823.
- 20- Loucks D.P., Beek E.V., Stedinger J.R., Dijkaman J.P.M., and Villars M.T. 2005. Water resources system planning and management: An introduction to methods, models and applications (1<sup>th</sup> Ed., UNESKO). France, Paris.
- 21- Loucks D.P. 1997. Quantifying trends in system sustainability. *Journal of Hydrological Sciences* 42(4): 513-530.
- 22- Loucks D.P., Stedinger J.R., and Haith D.A. 1981. Water resources system planning and analysis. Prentice-Hill, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- 23- McMahon T.A., and Mein R.G. 1986. River and reservoir yield. *Journal of Water Resources Publications*, Littleton, Colorado.
- 24- McMahon T.A., and Adeloje A.J. 2005. Water Resources Yield. Water Resources Publications. LLC, USA.
- 25- McMahon T.A., Adeloje A.J., and Sen-Lin Z. 2006. Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology* 324: 359-382.
- 26- McMahon T.A., Pegram G.G.S., Vogel R.M., and Peel M.C. 2007. Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database. *Journal of Advanced Water Resources* 30: 1858-1872.
- 27- Montaseri M. 1999. Stochastic investigation of the planning characteristics of within-year and over-year reservoir

- systems. ph.D. Thesis, Heriot-Watt University, UK.
- 28- Montaseri M., and Adeloje, A.J. 1999. Critical period of reservoir systems for planning purposes. *Journal of Hydrology* (224): 115-136.
  - 29- Montaseri M., and Adeloje A.J. 2004. A graphical rule for volumetric evaporation loss correction in reservoir capacity-yield-performance planning in Urmia region, Iran. *Journal of Water Resource Management* (18): 55-74.
  - 30- Montaseri M., and Amirataee B. 2017. Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices. *International Journal of Climatology* 37(2): 998-1013.
  - 31- Montaseri M., Amirataee B., and Nawaz R. 2017. A Monte Carlo simulation-based approach to evaluate the performance of three meteorological drought indices in northwest of Iran. *Journal of Water Resources Management* 31(4): 1323–1342.
  - 32- Moy W.S, Cohon J.L, and Revelle C.S. 1986. A programming model for analysis of reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. *Journal of Water Resource Research* 22 (4): 489-498.
  - 33- Panu U.S., and Sharma T.C. 2002. Challenge in drought research: some perspectives and future directions. *Journal of Hydrological Science* 47: 19-30.
  - 34- Peters L.A., and Chang H. 2011. Urban water demand modeling: review of concepts, methods, and organizing principles. *Journal of Water Resources Research* 47(5) w05401.
  - 35- Salas J.D 1993. Analysis and modeling of hydrologic time series. Chapter 19 in D.R. Maidment *Handbook of Hydrology* (McGraw- Hill, Inc, New York).
  - 36- Sandoval-Soils S., Mckinney D.C., and Loucks D.P. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* (ASCE) 137(5): 381-389.
  - 37- Silva A.T., and Portela N.M. 2012. Stochastic assessment of reservoir storage-yield relationships in Portugal. *Journal of Hydrology* 18(5): 567-575.
  - 38- Simonovic S.P. 1998. Sustainability criteria for possible use in reservoir analysis. *International association of Hydrological Sciences, Wallingford, U.K., No. 251: 55–58.*
  - 39- Soundharajan B-S., Adeloje A.J., and Remesan R. 2016. Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. *Journal of Hydrology* 538: 625-639.
  - 40- Srikanthan R., and McMahon T.A. 1982. Stochastic generation of monthly streamflows. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 108: 419-441.
  - 41- Srinivasan K., Neelakantan T.R., Shyam Narayan P., and Nagarajukumar C. 1999. Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization. *Journal of Water Resource Planning and Management* 125(5): 298–301.
  - 42- Stedinger J.R., and Taylor M.R. 1982a. Synthetic stream flow generation, part 1. Model verification and validation. *Journal of Water Resource Research* 31(3): 645-654.
  - 43- Vogel R.M. 1986. The probability plot correlation coefficient test for the normal, lognormal, and gumbel distributional hypotheses. *Journal of Water Resource Research* 22(4): 587-590.
  - 44- Vogel R.M., and Kroll C.N. 1989. Low flow frequency analysis using probability plot correlation coefficients. *Journal of Water Resources Planning and Management* 115(3): 338-357.
  - 45- Vogel R.M., and Bolognese R.A. 1995. Storage-reliability-resilience-yield relations for over-year water supply systems. *Journal of Water Resource Research* 31(3): 645–654.
  - 46- Yeh W.G. 1985. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art Review. *Journal of Water Resources Research* 21(12): 1797- 1818.
  - 47- Zongxue X., Jinno K., Kawamura A., Takesaki S., and Ito K. 1996. Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Journal of Water Resources Management* 12: 13-30.

## Using Reservoir Performance Indices for Evaluating the Lar Storage Dam Behavior

M. Ahmadian<sup>1</sup>- M. Montaseri<sup>2\*</sup>

Received: 02-01-2019

Accepted: 27-11-2019

**Introduction:** In recent decades, with increasing the world population and demand for fresh water for various applications (drinking, agriculture and industry), planning, management and optimal utilization of surface water reservoirs, especially in arid and semi-arid regions, have become the most serious challenges faced by researchers and water industry professionals in many parts of the world. In surface water reservoirs, uncontrolled flow is stored in wet periods for use in low flow periods. Therefore, surface water storage dams are created to control and regulate the flow of rivers in order to meet demand for different uses at a certain level of performance indices. During the process of storing water in the reservoirs, the uncontrolled flows of the input into the reservoir are in three ways: yield or output adjusted to meet demand for various uses, infiltration loss and evaporation from the surface of the lake and spill of excess water in a reservoir that is part of an uncontrollable flow. The proposed methods of storage-yield-performance of the storage system are classified into two main groups, simulation and optimization methods, which are widely used to analyze the reservoirs system for storing surface water. Among two final methods of simulation i.e. the behavior analysis method and the modified Sequent Peak Algorithm (SPA) method, all the actual conditions governing the system of storage reservoirs, including control of indices of reliability and vulnerability in the storage-yield-performance, are required to apply SPA. The basic SPA simulation method has been proposed as a computational method for the mass curve, and major improvements have been made to increase its functionality and efficiency at the late 20<sup>th</sup> century. The first amendments to apply the effects of evaporation losses and performance indices; time-based reliability and vulnerability, were carried out by Lele (1987). Then, Montaseri (1999) developed the SPA method for the system of multiple storage reservoirs and used non-linear or real area-volume relationship for applying losses caused by evaporation.

**Materials and Methods:** Stochastic models provide the possibility of generating successive hydrological time series (such as rainfall and flow) that are likely to occur in the future. On the other hand, the analysis of long-term behavior of various water resources systems, especially the storage system, depends on the availability of expected river flow time series in the years to come. Therefore, the use of stochastic models and the production of artificial data are absolutely necessary for the accurate evaluation of the design, operation and optimal management of the storage system and the elaboration of their long-term behavior. For this purpose, using a single distributed stochastic model, 1000 series of annual and monthly flows of input into the storage reservoir were generated and then the series of monthly flows generated to simulate the storage reservoir system using the SPA-I method and the reservoir performance indices (time reliability, resiliency and vulnerability) were also used for single reservoir system.

**Results and Discussion:** The results show that combining two stochastic AR(1) and Valencia-Schaake models had very good performance in preserving statistical data of historical data at two monthly and annual levels. This is the advantage and necessity of using the stochastic distributions model relative to other stochastic models such as Thomas-Fiering and ARMA in analyzing the storage reservoirs systems. The behavior of the reservoir system or the critical period in addition to demand, depends on system performance indices and decreases the critical period by decreasing time-based reliability or increasing the vulnerability factor. The results also indicate nonlinear (exponential) changes in the critical period and demand at a certain level of performance indices. Moreover, evaporation loss changes for demand and a certain level of performance indices have a concave shape, with a reversing point consistent with the largest within-year storage system. With a decrease/ an increase demand and volume of storage, the amount of evaporation losses increased exponentially and accounted for a considerable percentage of the reservoir's storage capacity.

**Conclusion:** The results revealed that volume of storage in addition to demand is a function of evapotranspiration losses and time-based reliability and vulnerability indices and follows an exponential relation for demand. In addition, in all three variants of the modified SPAs (SPA-I, SPA-II, and SPA-III), two performance indices of the reservoir, namely time-based reliability and vulnerability, are controllable in analysis,

1 and 2- Graduated M.Sc. and Professor Department of Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: m.montaseri@Urmia.ac.ir)

and the storage system analysis is performed for specified values or mentioned indices. Also, in the SPA-II and SPA-III methods, it is possible to use a nonlinear or a real area-volume relationship to estimate the loss of evapotranspiration in the storage system. Control of two performance indices of the reservoir and the application of real or nonlinear area-volume relationship in the analysis of reservoir system reservoir are important advantages of the above methods to the behavior analysis method.

**Keywords:** Data generation, Lar reservoir dam, Reservoir simulation, SPA method, Stochastic model