

## Evaluation of Hydrological and Meteorological Drought Relationship and Reservoir Impacts (Case Study: Zayandeh Rood River Basin)

ZAHRA SAEDI<sup>1</sup>, MAHNOOSH MOGHADDASI<sup>\*1</sup>, SHAHLA PAIMOZD<sup>1</sup>, AMIR HOSEIN KHALATBARI FARAHANI<sup>2</sup>

1. Water Sciences Department, Faculty of Agriculture, Arak University, Arak, Iran

2. Animal Science Department, Faculty of Agriculture, Arak University, Arak, Iran

(Received: Apr. 9, 2019- Revised: June. 17, 2019- Accepted: June. 19, 2019)

### ABSTRACT

Regarding the occurrence of hydrological drought after the meteorological drought, determining the relationship between these two droughts is necessary. In this study, the Zayandehrood Basin in the central part of Iran was selected as the study area. Selected stations in this basin; Damane Fereydan station, Ghaleh Shahrokh station (upstream of dam) and Zamankhan bridge station (downstream of dam) were considered according to their location and trend of precipitation data. Initially, on the basis of monthly rainfall and flow data from 1360 to 1389, the standard precipitation index (SPI) and the standard flow index (SSI) (Meteorological droughts and hydrological drought, respectively), each with a three-month period were calculated. Then using the Run theory, the meteorological and hydrological drought characteristics, including the duration and magnitude of drought were identified. In the following, using R software and programming in it, the best model was sought to investigate the relationship between meteorological and hydrological drought. According to the number of samples, the model was also validated. The relationship in which a hydrological drought reacts to the meteorological drought is created using a nonlinear function model in Qaleh Shahrokh and Zaman Khan Bridge stations, which show the condition without the reservoir and the condition affected by the reservoir, respectively. The results showed that there is a nonlinear relationship between hydrological drought and meteorological drought and the threshold at which a hydrological drought begins to react to meteorological drought is achieved with respect to the nonlinear function model. The exponential function model with the appropriate validation indexes as well as high  $R^2$  coefficients in both stations was selected as the best model. The duration and magnitude of hydrological drought at Qaleh Shahrokh station is 1.7 and 1.9, respectively. Also, the duration and magnitude of this drought at the Zaman Khan Bridge (under the influence of the dam reservoir) is 0.55 and 1.45. Originally, the time of occurrence of hydrological drought in the downstream of the dam will be occurred faster. These findings indicated that the operational activities of Zayandeh Rud reservoir significantly reduced the duration and amount of hydrological drought as compared to non-reservoir conditions.

**Keywords:** Hydrological and meteorological drought, Reservoir, Early warning, Drought index thresholds.

## بررسی رابطه‌ی خشکسالی هیدرولوژیکی در واکنش به خشکسالی هواشناسی و اثرات مخزن (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)

زهرا ساعدی<sup>۱</sup>، مه‌نوش مقدسی<sup>۱\*</sup>، شهلا پایمزد<sup>۱</sup>، امیرحسین خلت آبادی فراهانی<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲. گروه مهندسی علوم دامی دانشکده کشاورزی دانشگاه اراک، اراک، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۳/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۲۹)

### چکیده

با توجه به وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی بعد از خشکسالی هواشناسی، تعیین رابطه زمانی بین این دو خشکسالی امری ضروری است. در این مطالعه، حوضه‌ی آبریز زاینده‌رود در قسمت مرکزی ایران به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب گردید. ایستگاه‌های منتخب در این حوضه با توجه به موقعیت و روند داده‌های بارش آنها، ایستگاه دامنه فریدن، ایستگاه قلعه شاهرخ (بالادست سد) و ایستگاه پل زمان‌خان (پایین‌دست سد) در نظر گرفته شده است. در ابتدا بر اساس داده‌های ماهانه‌ی بارش و جریان طی سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۹، سری‌های شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص جریان استاندارد (SSI) (به ترتیب نشان‌دهنده خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی)، هر یک با دوره زمانی ۳ ماهه محاسبه شدند. سپس با استفاده از تئوری ران‌ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، از جمله مدت زمان و مقدار خشکسالی شناسایی گردید. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار R و برنامه‌نویسی در آن، بهترین مدل برای بررسی رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی مورد پردازش قرار گرفت. با توجه به تعداد نمونه‌ها، مدل اعتبارسنجی هم شد. رابطه‌ای که خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی واکنش نشان می‌دهد با استفاده از یک مدل تابع غیرخطی در ایستگاه قلعه شاهرخ و ایستگاه پل زمان‌خان که به ترتیب شرایط بدون مخزن و شرایط تحت تأثیر مخزن را نشان می‌دهد، ایجاد می‌گردد. نتایج نشان داد که یک رابطه غیرخطی بین خشکسالی هیدرولوژیکی و خشکسالی هواشناسی وجود دارد و آستانه‌ای که در آن خشکسالی هیدرولوژیکی شروع به واکنش به خشکسالی هواشناسی می‌کند با توجه به مدل تابع غیرخطی بدست می‌آید. مدل تابع نمایی با داشتن شاخص‌های اعتبارسنجی مناسب و همچنین ضریب  $R^2$  بالا در هر دو ایستگاه، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه قلعه شاهرخ به ترتیب برابر ۱/۷ و ۱/۹ است و همچنین مدت و مقدار این خشکسالی در ایستگاه پل زمان‌خان (تحت تأثیر مخزن سد) برابر ۰/۵۵ و ۱/۴۵ است. در اصل زمان وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در پایین‌دست سریع‌تر اتفاق خواهد افتاد. این مطالب نشان داد که فعالیت‌های عملیاتی مخزن سد زاینده‌رود به‌طور قابل‌توجهی مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی را نسبت به شرایط بدون مخزن، کاهش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی، مخزن، اعلام زودهنگام، آستانه‌های شاخص خشکسالی

### مقدمه

دومین نوع خشکسالی، خشکسالی هیدرولوژیکی است که در ادامه‌ی تداوم خشکسالی هواشناسی پدیدار می‌گردد. با استفاده از داده‌ها و اطلاعات خشکسالی هواشناسی می‌توان تا حدود زیادی وقوع آن را پیش‌بینی کرد و نسبت به بهبود شرایط و مدیریت واقعه‌ی پیش‌رو برنامه‌ریزی جامع و کاملی داشت (Alavi Nia *et al.*, 2011). خشکسالی هیدرولوژیکی عمدتاً تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد (Van Loon and Laaha, 2016). رابطه زمانی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بستگی به ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه آبریز، نوع کاربری اراضی، تراکم زهکشی، نفوذ آب و نوع سازندها دارد. در

خشکسالی یکی از ویژگی‌های طبیعی و تکرارشونده اقلیمی است که احتمال رخداد آن در همه جا وجود داشته و حتی می‌تواند ویژگی‌ها و تأثیر آن از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر متفاوت باشد. این پدیده در مقایسه با سایر پدیده‌ها هم از نظر شدت و فراوانی وقوع و هم از نظر وسعت فضایی و میزان خسارتی که به بار می‌آورد، اهمیت دارد (Buttafuoco *et al.*, 2015). کمبود بارش و افزایش دما نسبت به میانگین بلندمدت علت اصلی خشکسالی‌ها است. خشکسالی هواشناسی اولین نوع از خشکسالی است که رخ می‌دهد و در صورت تداوم به وقوع دیگر خشکسالی‌ها منجر می‌شود.

هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. رابطه‌ای که خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی واکنش نشان می‌دهد با استفاده از یک مدل تابع غیرخطی در ایستگاه Anxi و ایستگاه Shilong ایجاد می‌شود که به ترتیب شرایط دوره‌ای بدون مخزن و شرایط تحت تأثیر مخزن را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که یک رابطه غیرخطی بین خشکسالی هیدرولوژیکی و خشکسالی هواشناسی وجود دارد و آستانه که در آن خشکسالی هیدرولوژیکی شروع به واکنش به خشکسالی هواشناسی می‌کند با توجه به مدل تابع غیرخطی بدست می‌آید. روند انتشار از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی به دلیل تغییر رابطه، کوتاه شد. در تحقیقی دیگر (Kooshki et al., 2016) رابطه-ی زمانی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه‌ی آبریز کرخه را مورد مطالعه قرار دادند. برای رسیدن به این هدف از آمار ۲۶ ایستگاه باران سنجی و هشت ایستگاه هیدرومتری استفاده شد. در بخشی از تحقیق برای آگاهی از تأخیر جریان‌ها نسبت به بارش‌ها در حالت واقعی، ضریب همبستگی پیرسون بین بارش و دبی جریان با تأخیرهای زمانی مختلف محاسبه شد. سپس دو شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص خشکسالی جریان رودخانه (SDI) به ترتیب برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی انتخاب شدند. مقادیر شاخص‌ها در گام زمانی کوتاه-مدت (یک ماه و سه ماهه)، میان‌مدت (شش ماهه) و بلندمدت (۱۲ ماهه) در نرم‌افزار Drinc محاسبه شد. نتایج نشان داد بین ضریب همبستگی بارش-دبی جریان و دو شاخص SDI-SPI در چهار گام زمانی رابطه‌ی مستقیم و معناداری در سطح ۹۹٪ وجود دارد.

با توجه به تحقیقات فوق، هدف از این تحقیق بررسی رابطه زمانی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در شرایط با مخزن و بدون مخزن در حوضه آبریز زاینده‌رود است. تاکنون تحقیقات انجام شده در ایران شاخص‌های خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف را برآورد کرده‌اند و به‌منظور بررسی روابط بین ویژگی‌های هیدرولیکی و هواشناسی خشکسالی از مدل خطی استفاده کرده‌اند که مدل خطی ساده، تأثیرات محیطی در رابطه را به‌خوبی نشان نمی‌دهد. علاوه بر این در مطالعات قبلی، روش آستانه‌ای که در آن خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی پاسخ دهد، پیشنهاد نشده است. بنابراین در این تحقیق، هدف توسعه مدل غیرخطی بین این دو خشکسالی و بررسی اثرات مخزن بر خشکسالی هیدرولوژیکی می‌باشد که در نتیجه منجر به اعلام زود هنگام خشکسالی هیدرولوژیکی خواهد شد و راه‌کارهای مدیریتی بهتری را می‌توان اتخاذ نمود.

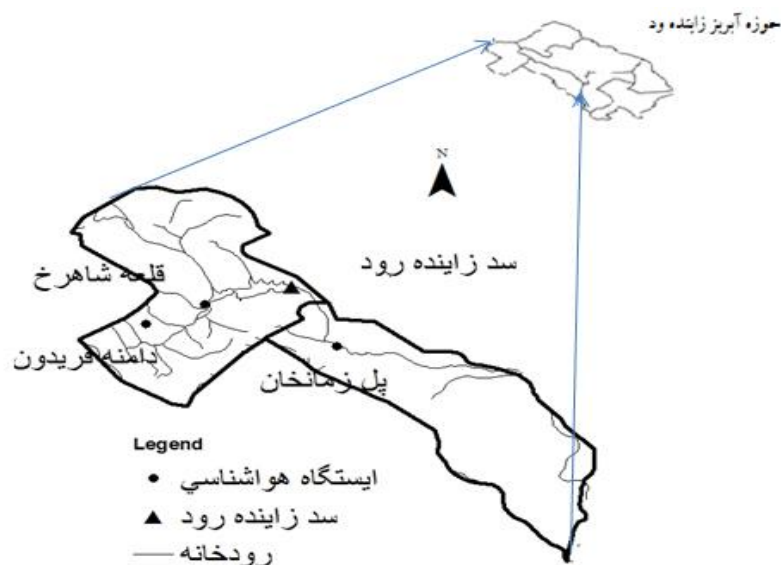
این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده است که در قسمت ذیل به جدیدترین آنها اشاره خواهد شد. در تحقیقی دیگر (Zhu et al., 2016) استفاده ترکیبی از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در چندین مقیاس زمانی برای بهبود تشخیص خشکسالی هیدرولوژیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق، دو شاخص خشکسالی هواشناسی، از جمله شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد (SPEI) در مقیاس‌های زمانی مختلف (۱ تا ۱۲ ماه)، برای تشخیص خشکسالی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مهارت‌های پیش‌بینی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی از طریق تجزیه و تحلیل همبستگی و دو امتیاز مهارت، احتمال تشخیص (POD) و نرخ هشدار خطا (FAR) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که احتمال تشخیص هنگامی که بیش از دو مقیاس زمانی مورد استفاده قرار گرفته است، افزایش قابل توجهی داشته و بهترین عملکرد، زمانی اتفاق می‌افتد که ترکیب ۸ مقیاس زمانی SPI و ۹ مقیاس زمانی برای SPEI، متناظر با مقادیر ۰/۸۲ و ۰/۸۵ برای POD، ۰/۲۰۵ و ۰/۲۱ برای FAR در دوره طبقه‌بندی باشد و حتی عملکرد بهتری در دوره اعتبارسنجی دارد. در همین رابطه (Wu et al., 2016) به بررسی واکنش خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی تحت تأثیر مخزن پرداخته‌اند. بر اساس داده‌های جریان و بارش ماهانه از سال ۱۹۶۰ تا سال ۲۰۱۰ در حوضه رودخانه Jinjiang در چین، شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص جریان استاندارد (SSI) به ترتیب برای نشان دادن خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. واکنش خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی تحت تأثیر مخزن شامیه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که SPI و SSI در چند دهه اخیر روند کاهشی داشته‌اند. مقیاس سری ماهانه SSI از ماه نوامبر تا فوریه بعد از یک روند قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و روند مهمی از ماه مه تا ژوئیه در ایستگاه هیدرولوژیکی شیلونگ می‌باشد. (Wu et al., 2017) به بررسی ارتباط بین خشکسالی هیدرولوژیکی و خشکسالی هواشناسی تحت تأثیر مخازن بزرگ در حوضه‌ی رودخانه Jinjiang در منطقه ساحلی جنوب شرقی چین پرداختند، که در آن ایستگاه هیدرومتری Shilong تحت تأثیر مخزن بزرگ Shanmei قرار دارد و ایستگاه هیدرولوژیکی Anxi تحت تأثیر مخزن قرار ندارد. بر اساس داده‌های ماهانه‌ی جریان با بارش و خشکسالی‌های تاریخی ثبت شده از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰، سری‌های شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص جریان استاندارد (SSI) هر یک با یک دوره زمانی ۳ ماهه محاسبه شد. تئوری ران برای شناسایی ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی

رودخانه زاینده‌رود، بزرگترین رودخانه فلات مرکزی ایران است که از کوه‌های زاگرس مرکزی به ویژه زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و در کویر مرکزی ایران به سمت شرق حدود ۲۰۰ کیلومتر پیش می‌رود و در نهایت به باتلاق گاوخونی می‌ریزد. حوزه رودخانه زاینده‌رود ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع است. برآورد می‌شود دبی جریان آب این رودخانه در مطلوب‌ترین شرایط ۳۸ مترمکعب در ثانیه است. بر روی این رودخانه سد مخزنی زاینده‌رود با حجم

۱۴۶۰ میلیون مترمکعب احداث شده است. طی سال‌های اخیر خشکسالی در منطقه با افزایش شدت و فراوانی همراه بوده و سیستم آب این منطقه را تحت تأثیر خود قرار داده است. حوزه آبریز زاینده‌رود در محدوده طول جغرافیایی  $50^{\circ}24'$  تا  $53^{\circ}24'$  و عرض جغرافیایی  $31^{\circ}11'$  تا  $33^{\circ}42'$  واقع شده است. این حوزه از هفت زیرحوضه تشکیل شده است که عبارتند از: پلاسجان، شوردهقان، خشک‌رود، مرغاب، زرچشمه، رحیمی و گاوخونی. با توجه به موقعیت سد، دو حوضه پلاسجان و شوردهقان به عنوان منطقه مطالعاتی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی در حوزه آبریز زاینده‌رود و ایستگاه‌های مورد مطالعه

### داده‌های مورد استفاده

با توجه به اینکه منطقه مطالعاتی قسمتی از حوزه آبریز رودخانه زاینده‌رود است و شامل دو زیرحوضه پلاسجان و شوردهقان است، لذا با لحاظ مساحت حوزه‌های منتخب، پراکنش ایستگاه‌ها و روند داده‌های بارش، سه ایستگاه هواشناسی قلعه شاهرخ، پل زمان‌خان و دامنه فریدن انتخاب گردید. همچنین با توجه به موقعیت ایستگاه‌ها هیدرومتری در بالادست و پایین‌دست سد، دو ایستگاه قلعه شاهرخ و پل زمان‌خان در نظر گرفته شد. داده‌های مشاهداتی بارش و دبی ماهانه از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۹ برای ایستگاه‌های

هیدرومتری و هواشناسی جمع‌آوری شده است (جدول ۱).

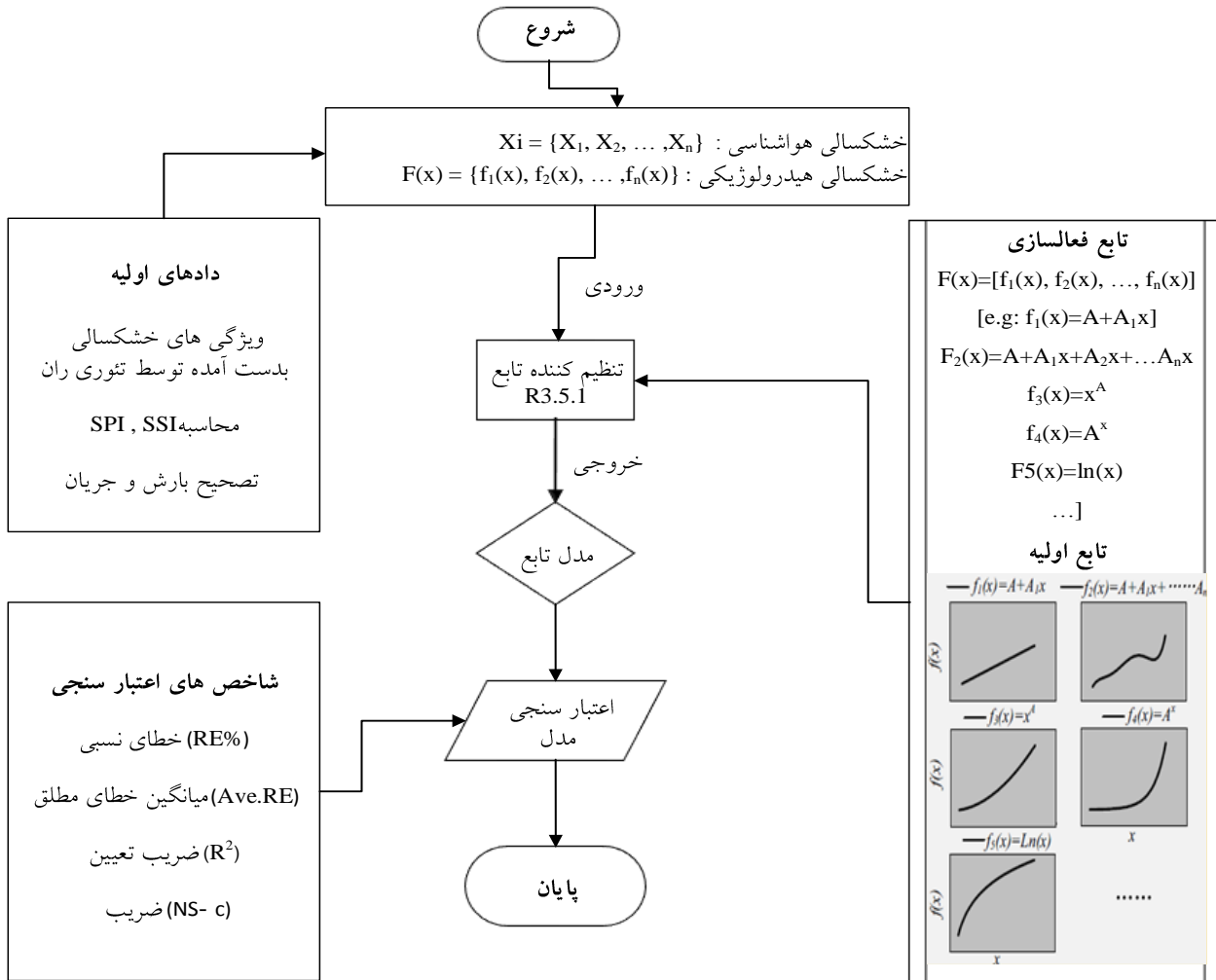
قابل ذکر است ایستگاه قلعه شاهرخ در بالادست سد واقع شده و تحت تأثیر هیچ مخزنی قرار نگرفته است اما ایستگاه پل زمان‌خان واقع در پایین‌دست سد زاینده‌رود و تحت تأثیر عملیات مخزن است که به طور کل تحت تأثیر مخزن نامیده می‌شود.

### روش تحقیق

روند انجام تحقیق حاضر در فلوچارت ذیل آمده است که در ادامه مراحل آن به‌طور جداگانه توضیح داده می‌شود (شکل ۲).

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی

نوع ایستگاه	نام ایستگاه	دوره زمانی	ارتفاع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
	قلعه شاهرخ	۱۳۶۰-۱۳۸۹	۲۱۰۹	۵۰-۲۷-۱۱	۳۲-۳۹-۴۶
هواشناسی	پل زمان‌خان	۱۳۶۰-۱۳۸۹	۱۸۸۰	۵۰-۵۳-۴۱	۳۲-۲۹-۵۴
	دامنه فریدن	۱۳۶۰-۱۳۸۹	۲۳۸۸	۵۰-۲۹-۵۵	۳۳-۰۰-۵۳
	قلعه شاهرخ	۱۳۶۰-۱۳۸۹	۲۱۰۳	۵۰-۴۵-۸۰	۳۲-۶۵-۸۰
هیدرومتری	پل زمان‌خان	۱۳۶۰-۱۳۸۹	۱۸۸۰	۵۰-۸۹-۴۷	۳۲-۴۹-۸۳



شکل ۲- فلوجارت تحقیق

شاخص SSI برای نشان دادن خشکسالی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمایه SSI کاملاً مشابه نمایه SPI محاسبه می‌شود با این تفاوت که در نمایه SSI دبی ماهانه، سری زمانی‌ای می‌باشد که مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص از همان قاعده SPI استفاده می‌کند و داده‌های جریان تجمعی را در طول دوره‌های تجمعی داده‌شده مورد استفاده قرار می‌دهد. از جمله مزایای استفاده از این شاخص این است که مقایسه میان رژیم‌ها و حوضه‌ها بدون در نظر گرفتن مقدار جریان را آسان می‌سازد و همچنین به مقایسه زمانی و مکانی شرایط هیدرولوژیکی جریان می‌پردازد. طبقه‌بندی تراز خشکسالی هیدرولوژیکی در جدول (۲) نشان داده شده است.

#### تئوری دنباله

یکی از روش‌های مرسوم و بسیار متداول تحلیل و بررسی خشکسالی، روش Run Theory است (Yevjevich, 1967). بر

#### شاخص بارش استاندارد<sup>۱</sup> (SPI)

برای محاسبه‌ی شاخص SPI که از شناخته‌شده‌ترین شاخص‌ها است، ابتدا با برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی ماهیانه یا مجموع بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن محاسبه شده سپس با انتقال احتمال تجمعی به‌دست‌آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر SPI از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد (Mckee et al., 1993).

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $X_i$  بارندگی در هر ماه،  $\bar{X}$  میانگین بارندگی در مقیاس زمانی،  $S_x$  انحراف معیار بارندگی در مقیاس زمانی است. مقیاس‌های زمانی مختلف SPI از یک تا ده‌ها ماه تعیین شده است و بر اساس نیازهای تحقیق می‌تواند محاسبه شود. در جدول (۲) طبقه‌بندی آن قابل مشاهده است.

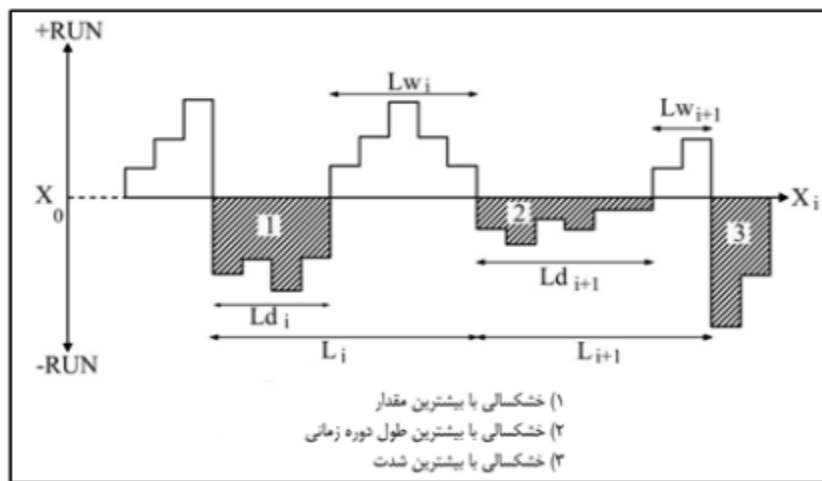
#### شاخص جریان استاندارد<sup>۲</sup> (SSI)

دوره خشکسالی پیوسته ( $L_i$ ): فاصله زمانی بین دو شروع خشکسالی پیوسته می‌باشد.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص بارش استاندارد شده/ جریان استاندارد شده سطح خشکسالی (McKee et al., 1993).

طبقه‌بندی	SPI/SSI	تراز
بدون خشکسالی	$SPI/SSI > 0$	1
خشکسالی کم	$-0.99 < SPI < 0.99$	2
خشکسالی متوسط	$1.49 < SPI < -1$	3
خشکسالی زیاد	$1.99 < SPI < -1.5$	4
خشکسالی بسیار زیاد	$2 - SPI <$	5

اساس تئوری دنباله، اگر وقایع خشکسالی در طی یک دوره معین یک مقدار شاخص خشکسالی داشته باشند که زیر سطح یقین (تسطیح) باشد، منجر به دنباله منفی می‌شود. پنج پارامتر اصلی خشکسالی عبارتند از (شکل ۳): مدت خشکسالی ( $L_{di}$ ): مدت زمان بین شروع و پایان پدیده خشکسالی، بزرگی خشکسالی ( $S_{di}$ ): برابر با مجموع مقدار یا طبقه خشکسالی است که در یک دوره پیوسته زیر سطح بحرانی قرار دارند، شدت خشکسالی ( $I_{di}$ ): متوسط مقدار یا طبقه خشکسالی است که در یک دوره پیوسته زیر سطح بحرانی قرار دارند. شدت از تقسیم بزرگی خشکسالی بر مدت زمان آن برست می‌آید، فاصله بین دو



شکل ۳- نمودار شماتیک خصوصیات خشکسالی با استفاده از تئوری ران با سطح آستانه  $x_0$

(Ave.RE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب Nash-Sutcliffe (NSc) برای برآورد کارایی مدل‌های مختلف استفاده می‌گردد.

#### میانگین خطای نسبی (Ave.RE%)

باید توجه داشت که مقدار واقعی هیچ کمیتی به طور دقیق معلوم نمی‌باشد. منظور از مقدار واقعی یک کمیت، مقداری است که از دقیق‌ترین آزمایش انجام شده برای اندازه‌گیری آن کمیت و یا با استفاده از محاسبات به دست می‌آید. منظور از خطای مطلق، قدر مطلق اختلاف میان مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش و یا مقدار به دست آمده ناشی از محاسبه با مقدار واقعی آن کمیت است که دارای بُعد است. منظور از خطای نسبی حاصل تقسیم خطای مطلق بر مقدار واقعی کمیت است که معمولاً بر حسب درصد نیز می‌توان بیان کرد و بدون بُعد است.

$$Ave.RE = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n (|S_i - O_i|)}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

در رابطه فوق:

$O_i$  = مقادیر مشاهده شده

$S_i$  = مقادیر شبیه سازی شده

#### بررسی مدل‌های مختلف

بدین منظور از نرم‌افزار R برای برازش مدل‌های مختلف استفاده شد که در این مدل‌ها رابطه بین شاخص‌های مستقل و وابسته بررسی شده و میزان توان پیش‌بینی کننده هر یک از مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به رابطه نزدیک بین خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی، رابطه خشکسالی هیدرولوژیکی با ویژگی‌های هواشناسی، از جمله مدت زمان و میزان خشکسالی، به دست می‌آید.

#### اعتبارسنجی مدل

روش اعتبارسنجی متقابل برای بررسی پتانسیل مدل‌های بررسی شده در قسمت قبل استفاده شد که ایده اصلی اعتبارسنجی متقابل، تقسیم آمار نمونه به دو مجموعه می‌باشد که در آن بیشتر نمونه‌ها برای ساخت مدل (به عنوان مجموعه آموزشی) مورد استفاده قرار گرفته و از دیگر نمونه‌ها برای اعتبارسنجی مدل و برآورد خطای سقوط استفاده می‌شود (به عنوان مجموعه آزمون) (Shao et al., 2011). مقایسه‌ی مقادیر، میانگین خطای نسبی

هیدرولوژیکی از جمله مدت و مقدار خشکسالی استخراج شده است. سپس به بررسی رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دو شرایط بدون مخزن و با مخزن پرداخته شده است.

#### محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

##### شاخص خشکسالی هواشناسی SPI

همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد ابتدا روند تغییرات بارش در سه ایستگاه هواشناسی منتخب بررسی گردید (شکل ۴). در این شکل می‌توان مشاهده نمود که این سه ایستگاه دارای روند بارش یکنواختی هستند. سپس با استفاده از روش تیسن، متوسط بارندگی منطقه طی سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۹ در این سه ایستگاه برآورد و در نهایت شاخص SPI بر اساس آن برای کل حوضه محاسبه گردید (شکل ۵). همان‌طور که در شکل مذکور قابل مشاهده است شدیدترین خشکسالی‌های هواشناسی موجود در سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۷۷ بوده و همچنین ۵ دوره خشکسالی در سال‌های (۱۳۶۱-۱۳۶۳)، (۱۳۶۸-۱۳۶۹)، (۱۳۷۳-۱۳۷۵)، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۶ رخ داده است.

##### شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SSI

در این مطالعه، شاخص SSI به عنوان شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این شاخص، خشکسالی هیدرولوژیکی در دو ایستگاه هیدرومتری پل زمان‌خان و قلعه شاهرخ طی سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۹ برآورد شده است (شکل ۶). در ایستگاه قلعه شاهرخ ۵ دوره خشکسالی در سال‌های ۱۳۶۲، ۱۳۷۵، (۱۳۷۷-۱۳۷۹)، (۱۳۸۶-۱۳۸۷) و ۱۳۸۹ اتفاق افتاده است. قابل‌ذکر است این موارد با سوابق مشاهداتی خشکسالی مطابقت دارد. همچنین در ایستگاه پل زمان‌خان ۵ دوره خشکسالی طی سال‌های ۱۳۶۴، (۱۳۷۰-۱۳۶۹)، (۱۳۷۴-۱۳۷۷)، (۱۳۷۹-۱۳۷۷) و (۱۳۸۷-۱۳۸۹) قابل مشاهده است.

##### -ضریب کارایی نش- ساتکلیف NSc

این ضریب برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده می‌گردد (Nash and Sutcliffe, 1970). این ضریب از منفی بی‌نهایت الی یک متغیر است. اگر مقدار آن برابر یک باشد تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد و اگر مقدار آن بزرگتر از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شود و چنانچه مقدار این ضریب بین ۰/۳۶-۰/۷۵ باشد نتایج مدل خوب تا متوسط به شمار می‌رود. در واقع هر چه مقدار ضریب نش- ساتکلیف به عدد یک نزدیکتر شود، مدل از عملکرد بهتری برخوردار است (Littlewood et al., 2007).

$$N-Sc = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}}$$

در رابطه فوق:

$O_i$  = مقادیر مشاهده شده

$S_i$  = مقادیر شبیه‌سازی شده

$O^-$  = میانگین مقادیر مشاهده شده

$S^-$  = میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده

##### -ضریب $R^2$

ضریب  $R^2$  اندازه‌گیری آماری نزدیک داده‌ها به خط رگرسیون برازش شده می‌باشد. به  $R^2$ ، ضریب تعیین یا ضریب تشخیص نیز گفته می‌شود و روش محاسبه آن در رابطه ذیل ذکر گردیده است.

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = \frac{TSS - RSS}{TSS} = 1 - \left( \frac{RSS}{TSS} \right)$$

در رابطه فوق:

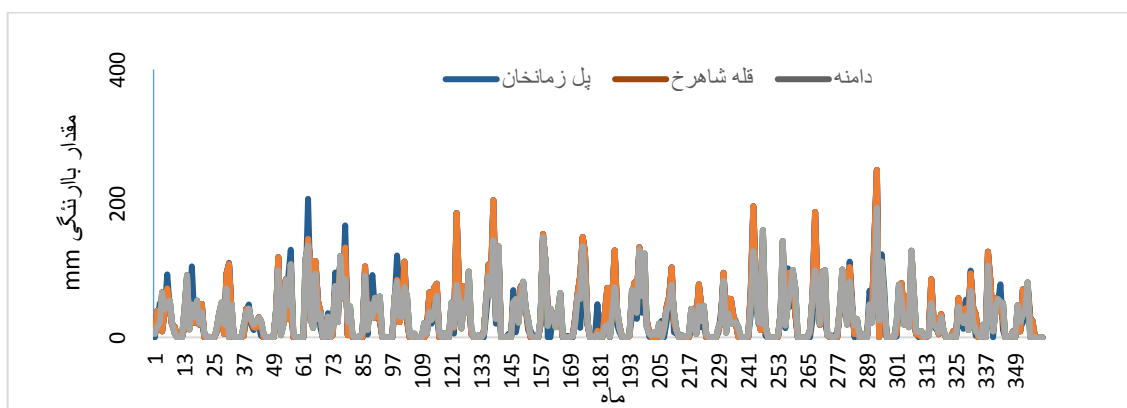
ESS: تغییرات توضیح داده شده

TSS: تغییرات کل

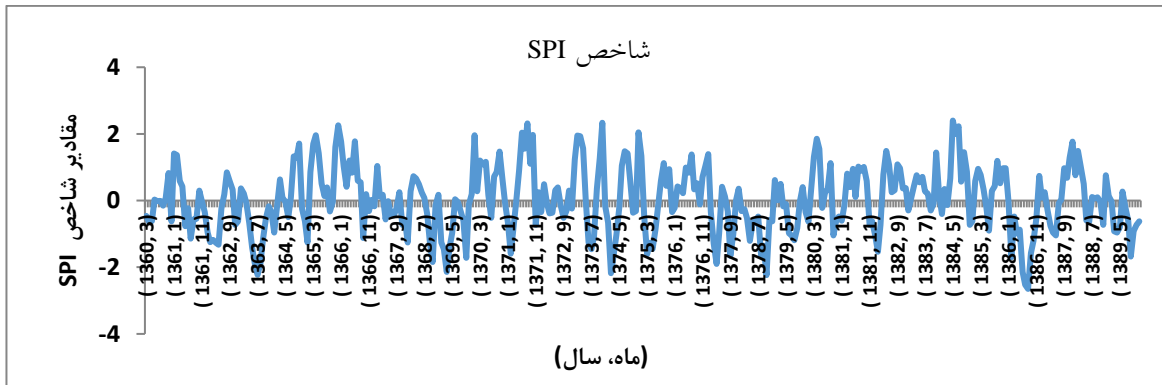
RSS: تغییرات باقیمانده (جملات خطا)

#### نتایج و بحث

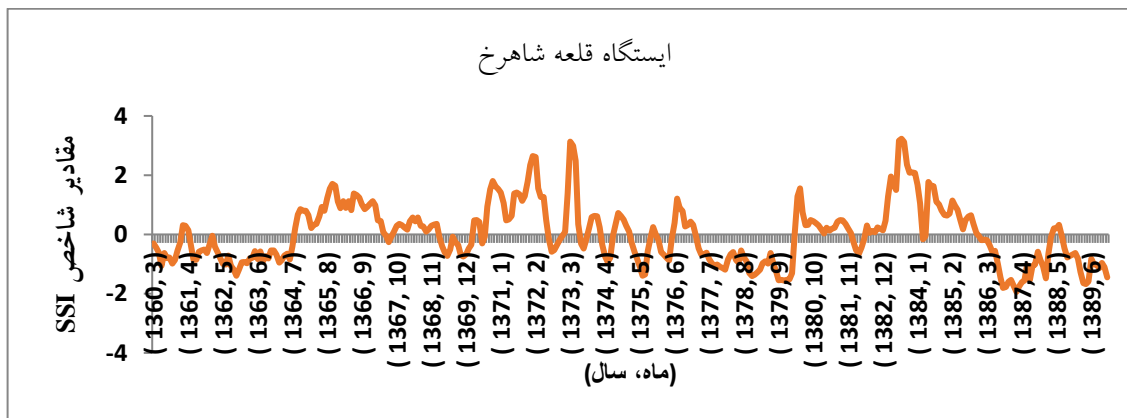
در این تحقیق پس از محاسبه شاخص‌های SPI و SSI، با استفاده از تئوری ران ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و



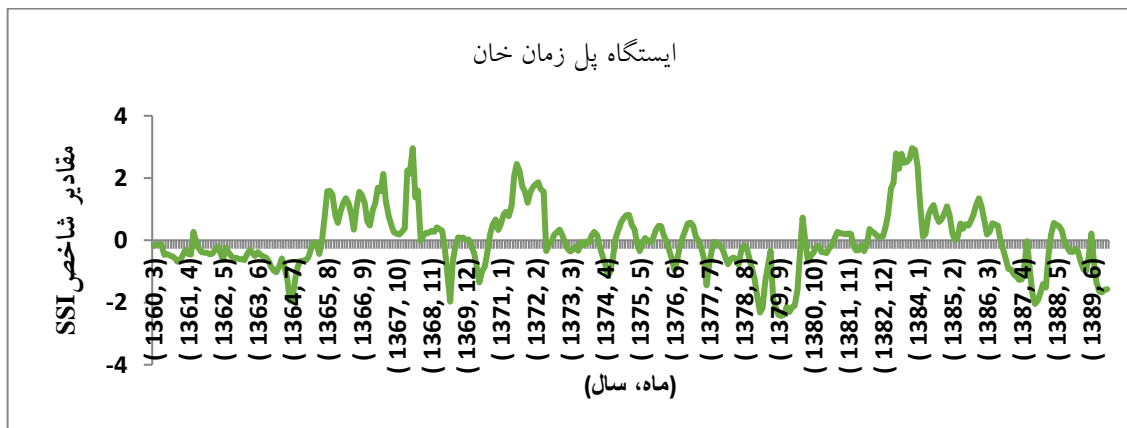
شکل ۴- روند تغییرات بارش در ایستگاه‌های هواشناسی معرف حوضه طی سال‌های ۱۳۶۰-۱۳۸۹



شکل ۵- تغییرات شاخص SPI حوضه طی سال‌های ۱۳۶۰-۱۳۸۹



(الف)



(ب)

شکل ۶- شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی طی سالهای ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۹؛ (الف) ایستگاه قلعه شاهرخ، (ب) ایستگاه پل زمان خان

زمان خان محاسبه گردید. در ایستگاه هیدرولوژیکی قلعه شاهرخ مدت خشکسالی هیدرولوژیکی بین ۱ تا ۲۳ ماه، و مقدار آن ۰/۹۶ تا ۲۸/۲۲ می‌باشد. شدیدترین خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه قلعه شاهرخ از آذر ۱۳۸۵ تا فروردین ۱۳۸۷ اتفاق افتاده و طول دوره خشکسالی ۲۳ ماه و مقدار آن ۲۸/۲۲ بوده است. به طور مشابه در ایستگاه پل زمان خان، مدت خشکسالی هیدرولوژیکی بین ۱ تا ۳۴ ماه و مقدار خشکسالی بین ۰/۷۲ تا ۲۰/۳۵ می‌باشد. شدیدترین خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه پل زمان خان از دی ماه ۱۳۷۷ تا فروردین ۱۳۸۰ رخ داده است و

شناسایی ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی پس از محاسبه شاخص‌های SPI و SSI، ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه (از جمله مدت و مقدار خشکسالی) با استفاده از تئوری ران استخراج گردید (جدول ۳). همانطور که در این جدول قابل مشاهده است مدت خشکسالی هواشناسی در کل حوضه مینیمم ۲ ماه و ماکسیمم ۲۹ ماه می‌باشد و خشکسالی هواشناسی در حوضه مورد مطالعه دارای مقدار مینیمم ۱/۸۵ و ماکسیمم ۱۷/۱۸ می‌باشد. علاوه بر این، مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های قلعه شاهرخ و پل



شماره ۱ تا ۱۴ بعنوان نمونه برای ساخت مدل و خشکسالی‌های موارد ۱۵ تا ۱۹ برای اعتبارسنجی مدل انتخاب گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار R، مدل‌های خطی و مدل‌های غیرخطی (چندجمله‌ای، توانی، نمایی، لگاریتمی) برای تعیین رابطه بین مدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و مقدار آنها بطور جداگانه ایجاد و بررسی گردید (جدول ۴).

طول دوره خشکسالی ۳۴ ماه و مقدار آن ۲۰/۳۵ می‌باشد. قابل ذکر است براساس سوابق خشکسالی در حوضه، شدیدترین خشکسالی طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۸۰ بوده است که نتایج بدست آمده در جدول (۳) نیز درستی این امر را اثبات می‌کند.

۳-۴- شناسایی مدل خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (ایستگاه قلعه شاهرخ - بالادست سد)

با توجه به ویژگی‌های خشکسالی در جدول (۳)، خشکسالی‌های

جدول ۴- معادلات خطی و غیرخطی بین مدت و مقدار خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (ایستگاه قلعه شاهرخ - بالادست سد)

مدت خشکسالی	$R^2$	مقدار خشکسالی	$R^2$
(۱) $f_1(x) = 1.004 + 0.9334x$	۰/۸۵۸۳	(۲) $f_1(x) = -1.5967 + 1.3163x$	۰/۹۰۷۸
(۳) $f_2(x) = -2.79081 + 1.95451x - 0.03297x^2$	۰/۹۱۱۶	(۴) $f_2(x) = -2.57819 + 1.66332x - 0.01963x^2$	۰/۹۰۳۰
(۵) $f_3(x) = -7.3354 + 5.8701x^{0.5224}$	۰/۹۰۷۱	(۶) $f_3(x) = -1.9229 + 1.4802x^{0.9620}$	۰/۹۱۵۰
(۷) $f_4(x) = e^{3.6929 + \frac{12.5922}{x+1.5441}}$	۰/۹۳۳۱	(۸) $f_4(x) = e^{3.8088 + \frac{15.2706}{x+1.8624}}$	۰/۹۳۲۳
(۹) $f_5(x) = -7.022 + 8.915 \ln x$	۰/۸۲۰۵	(۱۰) $f_5(x) = -6.637 + 8.315 \ln x$	۰/۸۲۰۴

\*  $x$  و  $f(x)$  ترتیب نشان‌دهنده مدت یا مقدار خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی است.

جدول ۳- ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مدت - مقدار) با استفاده از تئوری ران

خشکسالی هواشناسی				خشکسالی هیدرولوژیکی					
				ایستگاه پل زمان خان			ایستگاه قلعه شاهرخ		
شماره	شروع - پایان	مدت (ماه)	مقدار	شروع - پایان	مدت (ماه)	مقدار	شروع - پایان	مدت (ماه)	مقدار
۱	۱۳۶۰/۱۳۶۰-۰۲/۰۷	۶	۴/۸۴	۱۳۶۰/۱۳۶۰-۰۴/۰۷	۴	۲/۴۲	۱۳۶۰/۱۳۶۰-۰۸/۱۲	۵	۳/۲
۲	۱۳۶۱/۱۳۶۲-۱۱/۰۲	۴	۳/۶۲	۱۳۶۱/۱۳۶۱-۰۹/۱۱	۳	۳/۳۵	۱۳۶۱/۱۳۶۲-۱۲/۰۲	۳	۲/۰۵
۳	۱۳۶۲/۱۳۶۲-۱۱/۱۲	۲	۴/۵۱	۱۳۶۲/۱۳۶۲-۰۸/۱۲	۵	۳/۲۹	۱۳۶۲/۱۳۶۲-۱۰/۱۲	۳	۲/۹۶
۴	۱۳۶۴/۱۳۶۵-۰۵/۰۱	۹	۱۱/۷	۱۳۶۴/۱۳۶۵-۰۶/۰۴	۱۱	۱۷/۳	۱۳۶۴/۱۳۶۵-۰۴/۰۵	۱۴	۱۸/۳۳
۵	۱۳۶۵/۱۳۶۵-۰۵/۰۷	۳	۱/۱۸۸	۱۳۶۵/۱۳۶۵-۱۱/۱۲	۲	۱/۶۲	۱۳۶۵/۱۳۶۵-۰۸/۱۲	۵	۲/۷۴
۶	۱۳۶۸/۱۳۶۸-۰۳/۰۹	۷	۱۲/۷۶	۱۳۶۸/۱۳۶۹-۰۷/۰۴	۱۰	۱۴/۱۹	۱۳۶۸/۱۳۶۸-۰۵/۱۱	۷	۱۵/۶۵
۷	۱۳۶۹/۱۳۶۹-۰۹/۱۲	۴	۲/۸۵	۱۳۶۹/۱۳۶۹-۰۷/۱۱	۵	۲/۱۵	۱۳۶۹/۱۳۶۹-۰۹/۱۲	۴	۳/۱
۸	۱۳۷۱/۱۳۷۱-۰۲/۰۵	۴	۴/۵۹	۱۳۷۱/۱۳۷۱-۰۸/۱۰	۳	۲/۳۴	۱۳۷۱/۱۳۷۱-۰۸/۱۰	۳	۵/۷۸
۹	۱۳۷۴/۱۳۷۴-۰۱/۰۹	۹	۶/۸۳	۱۳۷۴/۱۳۷۵-۰۴/۰۳	۱۲	۹/۶۱	۱۳۷۴/۱۳۷۵-۰۱/۰۳	۱۵	۵/۶
۱۰	۱۳۷۵/۱۳۷۵-۰۶/۰۸	۳	۳/۲۴	۱۳۷۵/۰۲	۱	۰/۷۲	۱۳۷۵/۱۳۷۵-۰۵/۰۶	۲	۱/۲۲
۱۱	۱۳۷۵/۱۳۷۶-۱۲/۰۵	۶	۴/۸	۱۳۷۵/۱۳۷۶-۰۵/۰۱	۹	۷/۵۶	۱۳۷۵/۱۳۷۶-۰۹/۰۴	۸	۵/۳۱
۱۲	۱۳۷۷/۱۳۷۹-۰۱/۰۵	۲۹	۱۶/۹۱	۱۳۷۷/۱۳۸۰-۰۴/۰۱	۳۴	۲۰/۳۵	۱۳۷۷/۱۳۷۹-۰۵/۰۶	۲۶	۱۸/۴
۱۳	۱۳۸۰/۱۳۸۰-۰۷/۰۸	۲	۱/۸۵	۱۳۸۰/۱۳۸۰-۰۹/۱۲	۴	۲/۳۲	۱۳۸۰/۱۳۸۰-۰۳/۰۵	۳	۱/۴۷
۱۴	۱۳۸۰/۱۳۸۱-۱۱/۰۱	۳	۲/۵۲	۱۳۸۱/۱۳۸۱-۰۲/۰۳	۲	۱/۲۸	۱۳۸۰/۰۷	۱	۰/۹۶
۱۵	۱۳۸۲/۱۳۸۳-۱۰/۰۲	۵	۴/۸۳	۱۳۸۳/۱۳۸۳-۰۲/۰۶	۵	۶/۷۷	۱۳۸۲/۱۳۸۳-۱۲/۰۶	۷	۶/۸۵
۱۶	۱۳۸۴/۱۳۸۴-۰۶/۰۸	۳	۳/۷۱	۱۳۸۴/۱۳۸۴-۰۸/۱۰	۳	۵/۴۲	۱۳۸۴/۱۳۸۴-۰۳/۰۷	۵	۴/۵۹
۱۷	۱۳۸۵/۱۳۸۶-۰۱/۰۳	۱۵	۱۷/۱۸	۱۳۸۵/۱۳۸۶-۰۷/۱۱	۱۶	۱۹/۳۳	۱۳۸۵/۱۳۸۷-۰۳/۰۱	۲۳	۲۸/۲۲
۱۸	۱۳۸۷/۱۳۸۷-۰۳/۱۲	۱۰	۱۰/۶۷	۱۳۸۷/۱۳۸۷-۰۱/۱۱	۱۱	۱۱/۷	۱۳۸۷/۱۳۸۸-۰۵/۰۸	۱۶	۱۷/۳
۱۹	۱۳۸۸/۱۳۸۸-۰۱/۰۸	۸	۶/۱۱	۱۳۸۸/۱۳۸۸-۰۳/۱۱	۹	۷/۴۷	۱۳۸۸/۱۳۸۹-۰۱/۰۹	۱۲	۸/۵۱

نتایج نشان داد که مدل تابع غیرخطی (تابع نمایی) بهتر از سایر مدل‌های، برای توصیف رابطه بین ویژگی‌های هواشناسی و

تجزیه و تحلیل مدل (ایستگاه قلعه شاهرخ - بالادست سد) مدل‌های ذکر شده در جدول (۴) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

از سایر توابع بوده است. لذا این مدل می‌تواند بعنوان بهترین معادله برای رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی انتخاب شود.

**شناسایی مدل خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (ایستگاه پل زمان خان - پایین دست سد)**

با توجه به ویژگی‌های خشکسالی در جدول (۳)، ۷۵٪ از داده‌های خشکسالی‌های بعنوان نمونه برای ساخت مدل و ۲۵٪ داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل انتخاب گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار R3.5.1، مدل‌های خطی و مدل‌های غیرخطی (چندجمله‌ای، توانی، نمایی، لگاریتمی) برای تعیین رابطه بین مدت و مقدار خشکسالی بطور جداگانه ایجاد و بررسی گردید (جدول ۶).

هیدرولوژیکی خشکسالی قابل استفاده است. محدوده  $R^2$  برای مدت زمان ۰/۸۲۰۵ تا ۰/۹۳۳۱ و برای مقدار ۰/۸۲۰۴ تا ۰/۹۳۲۳ می‌باشد، که برای این ضریب مناسب است (با گذشت ۰/۰۵ آزمون معنی‌دار). همچنین نتایج نشان داد با افزایش طول و مقدار خشکسالی هواشناسی، طول و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی نیز افزایش خواهد یافت.

**اعتبارسنجی مدل (ایستگاه قلعه شاهرخ - بالادست سد)**  
با استفاده از آمار نمونه‌های باقی‌مانده شماره ۱۵ تا ۱۹ در جدول (۳)، اعتبار معادلات مذکور با استفاده از شاخص‌های اعتبارسنجی ( $R^2$ ، Ave.RE و N-Sc) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت (جدول ۵). نتایج نشان داد که میزان انطباق  $f_4(x)$  (مدل تابع نمایی) بهتر

جدول ۵- شاخص‌های اعتبارسنجی برای معادلات خطی و غیرخطی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (ایستگاه قلعه شاهرخ - بالادست سد)

	مدت			مقدار		
	$R^2$	Ave.RE	N-Sc	$R^2$	Ave.RE	N-Sc
$(x)f_1$	۰/۹۹	۱/۸۸	۰/۶۸	۰/۹۸	۱/۷۰	۰/۹۱
$(x)f_2$	۰/۹۸	۱/۶۲	۰/۶۶	۰/۹۹	۱/۶۸	۰/۹۱
$(x)f_3$	۰/۹۸	۱/۸۴	۰/۶۸	۰/۹۹	۱/۷۰	۰/۹۱
$(x)f_4$	۰/۹۹	۱/۵۲	۰/۶۵	۰/۹۹	۱/۵۴	۰/۹۳
$(x)f_5$	۰/۹۴	۲/۴۲	۰/۵۷	۰/۹۴	۲/۵۱	۰/۸۲
میانگین	۰/۹۸	۱/۸۵	۰/۶۴	۰/۹۸	۱/۸۳	۰/۸۹

جدول ۶- معادلات خطی و غیرخطی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (ایستگاه پل زمان خان پایین دست سد)

مدت خشکسالی	$R^2$	مقدار خشکسالی	$R^2$
$(۱) f_1(x) = -0.26726 + 1.19496x$	۰/۹۴۷۷	$(۲) f_1(x) = -1.7497 + 1.3630x$	۰/۹۱۵۱
$(۳) f_2(x) = -0.857422 + 1.353749x - 0.005126x^2$	۰/۹۱۱۶	$(۴) f_2(x) = -2.51082 + 1.63212x - 0.01523x^2$	۰/۹۰۳۰
$(۵) f_3(x) = -0.7588 + 1.3995x^{0.9560}$	۰/۹۵۱۵	$(۶) f_3(x) = -2.2224 + 1.6024x^{0.9477}$	۰/۹۲۱۸
$(۷) f_4(x) = e^{4.3260 + \frac{27.4967}{x+5.4971}}$	۰/۹۵۷۸	$(۸) f_4(x) = e^{3.7643 + \frac{13.7599}{x+1.4129}}$	۰/۹۳۳۷
$(۹) f_5(x) = -9.070 + 10.481 \ln x$	۰/۷۸۰۴	$(۱۰) f_5(x) = -7.027 + 8.648 \ln x$	۰/۸۳۳۸

\*\* $x$  و  $f(x)$  به ترتیب نشان‌دهنده مدت یا مقدار خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی است.

(۳)، اعتبار معادلات مذکور با استفاده از شاخص‌های اعتبارسنجی ( $R^2$ ، Ave.RE و N-Sc) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت که در جدول (۷) قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که میزان انطباق  $f_4(x)$  (مدل تابع نمایی) بهتر از سایر توابع بوده است. لذا این مدل می‌تواند بعنوان بهترین معادله برای رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی انتخاب شود.

**توزیع ویژگی‌های خشکسالی تحت تأثیر مخزن**

به منظور بررسی و مقایسه توزیع ویژگی‌های خشکسالی از جمله مدت و مقدار، در ایستگاه قلعه شاهرخ (بالادست سد- عدم تأثیر مخزن) و ایستگاه پل زمان خان (پایین دست سد- تحت تأثیر

تجزیه و تحلیل مدل (ایستگاه پل زمان خان - پایین دست سد) پس از تجزیه و تحلیل مدل‌های ذکر شده در جدول (۶)، نتایج نشان داد که مدل تابع نمایی، بهتر از سایر مدل‌های تابع برای توصیف رابطه بین ویژگی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی خشکسالی قابل استفاده است. محدوده  $R^2$  برای مدت زمان ۰/۷۸۰۴ تا ۰/۹۵۷۸ و برای مقدار ۰/۸۳۳۸ تا ۰/۹۳۳۷ می‌باشد، که برای این ضریب مناسب است (با گذشت ۰/۰۵ آزمون معنی‌دار).

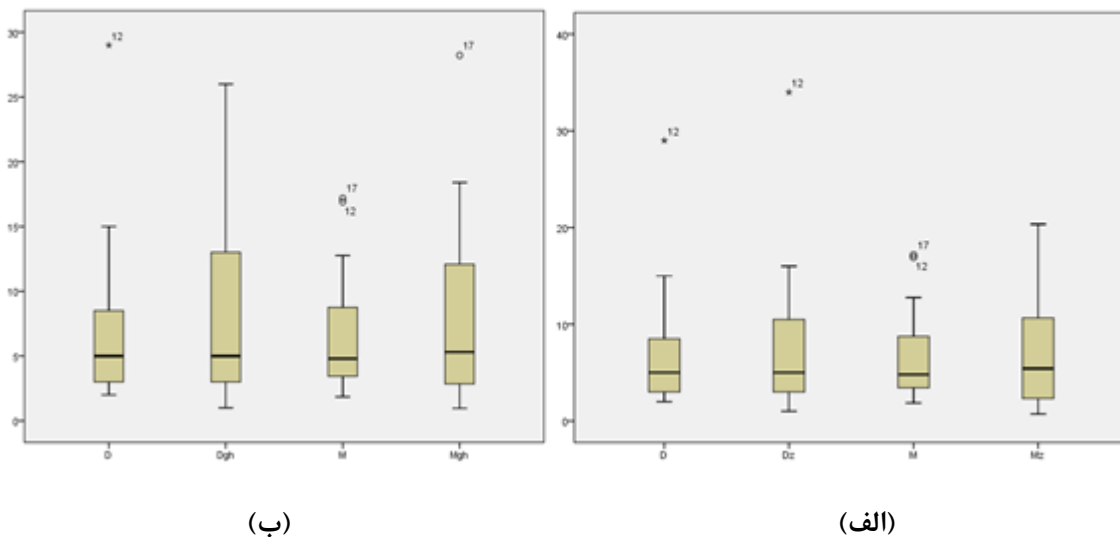
**اعتبارسنجی مدل (ایستگاه پل زمان خان - پایین دست سد)**  
با استفاده از آمار نمونه‌های باقی‌مانده شماره ۱۵ تا ۱۹ در جدول

در مقادیر خشکسالی پایین دست از بازه اطمینان مقادیر خشکسالی بالادست کمتر بوده است.

جدول ۷- شاخص های اعتبارسنجی برای معادلات خطی و غیرخطی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (ایستگاه پل زمان خان - پایین دست سد)

مدت			مقدار		
R <sup>2</sup>	Ave.RE	N-Sc	R <sup>2</sup>	Ave.RE	N-Sc
۰/۹۷	۱/۵۳	۰/۶۹	۰/۹۵	۱/۶۸	۰/۹۲
۰/۹۹	۱/۴۴	۰/۶۷	۰/۹۹	۱/۶۶	۰/۹۲
۰/۹۹	۱/۴۹	۰/۶۹	۰/۹۹	۱/۶۸	۰/۹۲
۰/۹۹	۱/۳۵	۰/۶۶	۰/۹۹	۱/۵۴	۰/۹۳
۰/۹۴	۲/۷۷	۰/۵۵	۰/۹۴	۲/۳۶	۰/۸۳
۰/۹۸	۱/۷۱	۰/۶۵	۰/۹۸	۱/۷۹	۰/۹

مخزن) از نمودارهای جعبه‌ای توزیع ویژگی‌های خشکسالی استفاده شد. با استفاده از داده‌های جدول (۳)، توزیع ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه قلعه شاهرخ و ایستگاه پل زمان خان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۷). D نشان‌دهنده مدت و M نشان‌دهنده مقدار خشکسالی هواشناسی، Dgh و Mgh به ترتیب معرف مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاه قلعه شاهرخ و Dz و Mz به ترتیب معرف مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاه پل زمان خان می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۷) قابل مشاهده است، مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی در پایین دست سد (ایستگاه پل زمان خان - تحت تأثیر مخزن) کمتر از بالادست سد (ایستگاه قلعه شاهرخ - عدم تأثیر مخزن) بوده است. بازه اطمینان



شکل ۷- نمودارهای جعبه‌ای ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مدت و مقدار) طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۶۰. (الف) ایستگاه قلعه شاهرخ (بالادست سد - عدم تأثیر مخزن)، (ب) ایستگاه پل زمان خان (پایین دست سد - تحت تأثیر مخزن).

کوتاه‌تر یا کوچکتر از دوره‌ی بدون مخزن می‌باشد.

### آستانه زمان وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی هواشناسی

پس از تجزیه و تحلیل بیشتر توابع مناسب مدت و مقدار برای ایستگاه قلعه شاهرخ، زمانی که دوره خشکسالی هیدرولوژیکی و مقدار آن برابر با ۰ بوده است، مدت زمان و مقدار خشکسالی هواشناسی به ترتیب برابر ۱/۷ و ۱/۹ می‌باشد. به عبارت دیگر زمانی که خشکسالی هواشناسی به مدت ۱ ماه و بیست و یک روز ادامه داشته است، خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه قلعه شاهرخ شروع می‌شود و مقدار خشکسالی هواشناسی حداقل ۱/۹ است. این دو مقدار (۱/۷ و ۱/۹) به عنوان آستانه‌ای که بالاتر از آن خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی توسعه

### رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (بدون مخزن و با مخزن)

در این قسمت روابط بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بالادست و پایین دست مخزن سد از نظر مدت و مقدار قابل مشاهده است (جدول ۸). همان‌طور که دیده می‌شود R<sup>2</sup> در ایستگاه قلعه شاهرخ برای مدت ۰/۹۳۳۱ و برای مقدار ۰/۹۳۲۳ و در ایستگاه پل زمان خان برای مدت ۰/۹۵۷۸ و برای مقدار ۰/۹۳۳۷ می‌باشد. این نتایج نشان داد که R<sup>2</sup> مناسب در منطقه طول دوره تحت تأثیر مخزن بهتر از دوره‌های بدون مخزن می‌باشد (۰/۹۵۷۸ < ۰/۹۳۳۱ یا ۰/۹۳۳۷ < ۰/۹۳۲۳). در واقع با استفاده از نتایج بدست آمده مشخص می‌گردد که مدت یا مقدار خشکسالی در دوره تحت تأثیر مخزن به طور قابل ملاحظه‌ای

شاهرخ از ۱/۷۷ ماه (دوره بدون مخزن) به ۰/۵۵ ماه در زمان خان (دوره تحت تأثیر مخزن) کاهش یافت (جدول ۹). در واقع نتایج نشان داد وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در پایین دست با توجه به وجود مخزن سد سریع تر اتفاق خواهد افتاد.

یافته است تعریف می‌شود. به طور مشابه در ایستگاه پل زمان خان هنگامی که خشکسالی هواشناسی حداقل ۰/۵۵ ماه (۱۶ روز و نیم) باشد و مقدار متناظر ۱/۴۵ داشته باشد، خشکسالی هیدرولوژیکی رخ خواهد داد. آستانه مدت خشکسالی در قلعه

جدول ۸- (روابط خشکسالی هیدرولوژیکی (SSI) و خشکسالی هواشناسی (SPI) در ایستگاه قلعه شاهرخ (بدون مخزن) و ایستگاه پل زمان خان (تحت تأثیر مخزن))

دوره بدون مخزن (قلعه شاهرخ)	دوره تحت تأثیر مخزن (پل زمان خان)
مدت (ماه) $(x) = e^{3.6929 + \frac{12.5922}{x+1.5441}} f_4$	$(x) = e^{4.3260 + \frac{27.4967}{x+5.4971}} f_4$
$R^2 = 0.9331$	$0.9578 R^2 =$
مقدار $(x) = e^{3.8088 + \frac{15.2706}{x+1.8624}} f_4$	$(x) = e^{3.7643 + \frac{13.7599}{x+1.4129}} f_4$
$R^2 = 0.9323$	$0.9337 R^2 =$

جدول ۹- زمان وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به هواشناسی در ایستگاه قلعه شاهرخ (بالادست سد) و ایستگاه پل زمان خان (پایین دست سد)

ایستگاه قلعه شاهرخ	ایستگاه پل زمان خان
مدت (ماه)	۰/۵۵
مقدار	۱/۴۵

\* زمان وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به هواشناسی در ایستگاه قلعه شاهرخ (بالادست سد) یک ماه و ۲۱ روز و در ایستگاه پل زمان خان ۱۶ روز و نیم می‌باشد.

### جمع بندی

(۰/۹۵۷۸ < ۰/۹۳۳۱ یا ۰/۹۳۳۷ < ۰/۹۳۲۳). در واقع با استفاده از نتایج بدست آمده مشخص می‌گردد که مدت یا مقدار خشکسالی در دوره تحت تأثیر مخزن به طور فراوان ای کوتاه‌تر یا کوچکتر از دوره‌ی بدون مخزن می‌باشد.

اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های مربوطه در ایستگاه قلعه شاهرخ و پل زمان خان صورت گرفته و نشان می‌دهد که مدل تابع نمایی، بهترین مدل رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌باشد.

آستانه وقوع خشکسالی برای ایستگاه قلعه شاهرخ نشان می‌دهد، زمانی که دوره خشکسالی هیدرولوژیکی و مقدار آن برابر با ۰ بوده است، مدت زمان و مقدار خشکسالی هواشناسی به ترتیب برابر ۱/۷ و ۱/۹ می‌باشد. به عبارت دیگر زمانی که خشکسالی هواشناسی به مدت ۱ ماه و بیست و یک روز ادامه داشته است، خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه قلعه شاهرخ شروع می‌شود و مقدار خشکسالی هواشناسی حداقل ۱/۹ است. در ایستگاه پل زمان خان، هنگامی که خشکسالی هواشناسی حداقل ۰/۵۵ ماه (۱۶ روز و نیم) باشد و مقدار متناظر ۱/۴۵ داشته باشد، خشکسالی هیدرولوژیکی رخ خواهد داد. با استناد به این

ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی بدست آمده در حوضه با استفاده از تئوری ران، شامل ۱۹ مورد دوره خشکسالی می‌باشد که مینیمم مدت خشکسالی دو ماه و ماکزیمم ۲۹ ماه و مقدار خشکسالی بین ۱۷/۱۸-۱/۸۵ می‌باشد.

ویژگی‌های خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از تئوری ران در ایستگاه قلعه شاهرخ دارای مدت خشکسالی بین ۱-۲۶ ماه و مقدار بین ۲۸/۲۲-۰/۹۶ می‌باشد. در ایستگاه پل زمان خان، مدت خشکسالی مینیمم یک ماه و ماکسیمم ۳۴ ماه و مقادیر خشکسالی بین ۲۰/۳۵-۰/۷۲ می‌باشد. نتایج نشان داد که مدت یا مقدار خشکسالی در دوره تحت تأثیر مخزن به طور قابل ملاحظه‌ای کوتاه‌تر یا کوچکتر از دوره‌ی بدون مخزن می‌باشد. بررسی روابط مدل‌های تابع بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی برای مقدار و مدت در ایستگاه قلعه شاهرخ بیانگر این است که  $R^2$  برای مدت ۰/۹۳۳۱ و برای مقدار ۰/۹۳۲۳ می‌باشد. در ایستگاه پل زمان خان  $R^2$  برای مدت ۰/۹۵۷۸ و برای مقدار ۰/۹۳۳۷ می‌باشد. این نتایج نشان داد که  $R^2$  در طول دوره تحت تأثیر مخزن بهتر از دوره‌های بدون مخزن می‌باشد

مخزن تغییر می‌کند همچنین آستانه‌ای را که خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی واکنش می‌دهد، تغییر می‌دهد که این مقوله اطلاعاتی را برای سیاست‌گذاران بمنظور مدیریت مناسب مخزن در دوره‌های خشکسالی ارائه خواهد داد. باتوجه به این مسأله، در این تحقیق رابطه‌ی بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی مشخص می‌گردد. در نتیجه زمانی که در بالادست خشکسالی اتفاق می‌افتد، می‌توان وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در پایین‌دست را پیش‌بینی نمود. و باعث می‌شود استراتژی‌های مدیریتی بهتری به کار گرفته شود و همچنین برنامه‌ریزی‌های بلندمدت ارائه می‌گردد که خود باعث کاهش خسارات در منطقه خواهد شد.

### سیاسگذاری

با تشکر از همه کسانی که در این مسیر همراه بوده‌اند، مقاله ارسالی حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد بوده است.

### REFERENCES

- Alavi Nia, H., Sadatinejad, j. and Abdullah, Kh. (2011). Provide a model for prediction of hydrological drought in Karoon-1 basin. *Environmental Erosion Research Journal*, 4(1), 45-56. (In Farsi)
- Buttafuoco, G., Caloiero, T. and Coscarelli, R. (2015). Analyses of Drought Events in Calabria (Southern Italy) Using Standardized Precipitation Index. *Water Resource Manage*, 29(2), 557-573.
- Kooshki, R., Rahimi, M., Amiri, M. and Dasturani, J. (2016). Investigation of the Relationship between Meteorological and Hydrological Drought Time in the Karkheh Basin. *Journal of Ecohydrology*, 4(3), 687-698. (In Farsi)
- Littlewood, L. G., Clarke, R. T., Collischonn, W. and Croke, B. F. W. (2007). Predicting daily streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modelling and Software*, 22(5), 1229-1239.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorology Society, Boston, pp. 179-184.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(2), 282-290.
- Shao, Y. N., Bao, Y. D., He, Y., (2011). Visible/near-infrared spectra for linear and nonlinear calibrations: a case to predict soluble solids contents and ph value in peach. *Food Bioprocess Technol*, 4(8), 1376-1383.
- Van Loon, A. and Laaha, G. (2016). Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 49(6), 3-14.
- Wu, J., Chen, X., Gao, L., Yao, H., Chen, Y. and Liu, M. (2016). Response of Hydrological Drought to Meteorological Drought under the Influence of Large Reservoir. *Journal of Meteorology*, 56(2), 1-11.
- Wu, J., Chen, X., Yao, H., Gao, L., Chen, Y. and Li, M. (2017). Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir. *Journal of Hydrology*, 551(4), 495-507.
- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Journal of Meteorology*, 36(5), 41-50.
- Zhu, Y., Wang, W., Singh, V. and Liu, Y. (2016). Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection. *Science of the Total Environment*, 571(4), 1058-1068.

موارد درمی‌یابیم وجود مخزن باعث می‌شود که وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی بعد از خشکسالی هواشناسی در ایستگاه پایین‌دست سد (پل زمان‌خان)، نسبت به ایستگاه بالادست سد (قلعه شاهرخ) سریع‌تر اتفاق بیفتد.

نتایج نشان داد که رابطه‌ای روشن و منظم بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی وجود دارد. این ارتباط با ایجاد رابطه غیرخطی بین ویژگی‌های خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی بهتر قابل‌درک می‌شود، که با استفاده از آن آستانه‌ای که خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی واکنش می‌دهد، به دست خواهد آمد. تنظیمات مخازن به طور قابل‌توجهی مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی را تغییر داده است که به نوبه خود ارتباط بین خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی و آستانه را تغییر داد. مدت و مقدار خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه پل زمان‌خان به علت مدیریت عملکرد مخزن زاینده رود، کاهش یافته است. این روابط در اثر عملکرد