



تأثیر سدسازی بر تداوم و بزرگی خشکسالی (نمونه موردی: رود کرخه)

دکتر محمود داودی^{۱*}
سیروس نبیونی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۱

چکیده:

امروزه خشکسالی و کم آبی به یکی از معضلات بزرگ کشور تبدیل شده است و به عنوان یک راهکار، برای مبارزه با آن سدهای مختلفی در مناطق مختلف ایران احداث شده‌اند. خشکسالی هیدرولوژیک از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی تأثیر می‌پذیرند که در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی مطالعات خوبی انجام گرفته اما در مورد فعالیت‌های انسانی مطالعات کم بوده است. در این پژوهش سعی شده تا تأثیر سد کرخه بر خشکسالی‌های هیدرولوژیک بررسی شود. برای نیل به هدف تحقیق از داده‌های آماری ۱۴ ایستگاه آبرسنجی و ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی با طول دوره آماری ۳۰ ساله بهره برده شد. خشکسالی هیدرولوژیک با شاخص SDI و خشکسالی هواشناسی با شاخص SPI محاسبه شد. در ادامه از روابط وایازی و همچنین تحلیل نمودار باکس پلات در محیط نرم‌افزار SPSS و تحلیل آماره‌های توصیفی خشکسالی‌ها به تفکیک دو دوره آماری قبل و بعد از احداث سد، استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد در حالی که قبل از احداث سد بزرگی و تداوم خشکسالی‌های هیدرولوژیک در مناطق بالادست حوضه آبریز بیشتر بوده است ولی با احداث سد، بزرگی و تداوم خشکسالی‌ها در پایین دست سد بیشتر شده که نشان‌دهنده تأثیر منفی سد بر رود کرخه می‌باشد. از این رو می‌توان گفت سد کرخه نه تنها نتوانسته است خشکسالی‌های هیدرولوژیک منطقه را کاهش دهد بلکه باعث افزایش آن‌ها نیز شده است.

واژگان کلیدی: سد کرخه، خشکسالی، آزمون من کندال، شاخص SDI، شاخص SPI.

* m.davudi62@gmail.com

۱. استادیار گروه جغرافیای دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲. دکتری آب و هواشناسی (تغییرات آب و هوایی)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

مقدمه

در منابع مختلف تعریف‌های متفاوتی از خشکسالی می‌شود ولی به طور معمول خشکسالی را کمبود آب کمتر از نرمال تعریف می‌کنند اما روی آن توافق عمومی وجود ندارد (Hayes et al., 2010: 485). خشکسالی به چهار دسته مختلف هواشناسی، آبشناختی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی (قحطی) تقسیم می‌شود (van loon and Mishra and singh, 2010: 203; Dracup et al., 1980: 291; laaha, 2015: 5; Hao and singh, 2015: 669). بارش، جریان‌های سطحی و زیرزمینی، میزان آب در خاک (خشکسالی آبشناختی) مربوط است؛ زیرا اکوسیستم و جامعه به آب موجود در خاک، رودها، دریاچه‌ها و آبخوان‌ها وابسته‌اند تا به آب بارش (van loon and laaha, 2015: 4). کمبود طولانی مدت در بارش‌های جوی (خشکسالی هواشناختی) منجر به کاهش آب رودها و آب‌های زیرزمینی یا کاهش سطح آب دریاچه‌ها می‌شود که خشکسالی هیدرولوژیکی نامیده می‌شود. خشکسالی هیدرولوژیکی برای مدتی پس از پایان خشکسالی هواشناسی نیز همچنان ادامه خواهد داشت (Wilhite and glantz, 1985: 111; Oloruntade et al., 2017). خشکسالی هیدرولوژیکی به کمبود آب در دسترس در تمامی فرم‌های آن گفته می‌شود (Ma et al., 2015, 20). این نوع خشکسالی از این جهت مهم است که اکثر فعالیت‌های روزانه انسان‌ها به آب‌های زیرزمینی یا سطحی وابسته است (Pathak and Dodamani, 2016: 627).

شواهد نشان داده که در چند دهه اخیر هم فراوانی و هم شدت خشکسالی‌ها به طرز چشمگیری افزایش یافته است (Tigkas et al., 2012: 33). به دلیل رشد جمعیت و گسترش کشاورزی و بخش‌های انرژی و صنعتی، تقاضا برای آب افزایش یافته است و کمبود آب هر ساله در خیلی از مناطق دنیا رخ می‌دهد؛ از طرف دیگر عواملی همچون تغییر اقلیم و آلودگی آب‌های موجود نیز کمبود آب را تشدید کرده‌اند (Mishra and Singh, 2010: 203) که اهمیت مطالعات خشکسالی را دوچندان می‌کند. تأثیر مخرب خشکسالی و پتانسیل افزایش فراوانی و شدت آن در نتیجه تغییر اقلیم باعث شده تا مطالعات بیشتری برای درک، پایش و پیش بینی این پدیده انجام شود (Hao et al., 2016: 241). از این رو امروزه خشکسالی نه تنها مورد توجه سیاست‌گذاران و عموم مردم قرار گرفته بلکه تبدیل به یک موضوع پرطرفدار در بین تحقیقات علمی بین‌المللی شده است (Carlton et al., 2016: 212).

خشکسالی بزرگ‌ترین تهدید جامعه انسانی در قرن ۲۱ است (Yeh et al., 2015: 10789). این پدیده یکی از زیان‌بارترین پدیده‌های حدی اقلیمی است (Modaresi rad et al., 2017, van vliet et al., 2012: 677, Hao et al., 2017: 200)؛ گزارش اخیر مرکز علوم آبخیزداری دیویس^۱ بیان کرده که خشکسالی سال ۲۰۱۵ در آمریکا، باعث خسارت ۱/۸۴ میلیارد دلاری در بخش کشاورزی شده و ۱۰۱۰۰ شغل فصلی را از بین برده است (Modaresi rad et al., 2017). در ایالات متحده آمریکا

1. Davis Centre for Watershed sciences

خشکسالی با خسارت سالانه ۶-۸ میلیارد دلار، زیانبارترین بلای طبیعی محسوب شده و بیشتر از سایر بلاهای طبیعی مردم را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Hao and Singh, 2015: 165; Rajsekhar et al., 2015: 669)؛ میزان خسارت این پدیده در اروپا، طی سه دهه اخیر حدود ۱۰۰ میلیارد یورو برآورد شده است (ComEC, 2007).

سدها با اهداف مختلفی همچون تولید برق، کنترل سیلاب، تأمین آب شرب، تأمین آب کشاورزی و ... تأسیس می‌شوند. در ایران یکی از اهداف مهم تأسیس سدها کاهش اثرات خشکسالی است، زیرا سال آبی در اکثر مناطق ایران به دو دوره سرد و بارانی (مرطوب) و گرم و خشک (کم‌آب) تقسیم می‌شود. از این رو سدها با هدف ذخیره آب در نیمه سرد سال و استفاده از آن‌ها در تابستان تأسیس می‌شوند تا تنش آبی را کاهش دهند. بررسی مطالعات انجام شده در مناطق خشک و همچنین مناطق دارای اقلیم مدیترانه‌ای نشان می‌دهد که هرچند سدها در این مناطق در تأمین اهداف محلی مانند تولید برق و تأمین آب شهری مؤثر هستند ولی نمی‌توانند در کاهش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی مؤثر باشند. از این رو در این پژوهش سعی شده تا تأثیر سد کرخه بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی رود کرخه بررسی شود.

پیشینه تحقیق

به‌طور معمول خشکسالی آشناختی متأثر از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است (Gan et al., 2016: 668) که در مورد تغییرات اقلیمی و ارتباط آن با خشکسالی مطالعات زیادی انجام شده ولی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر خشکسالی‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Lin et al., 2015: 513). از این رو در این پژوهش سعی شده تا اثر سدسازی، به عنوان یکی از فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار بر خشکسالی، در وقوع خشکسالی‌های آشناختی رود کرخه بررسی شود.

در مورد تأثیر سدها بر کمیت و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی مطالعاتی صورت گرفته که سعی شده بطور مختصر اشاره گردد. ولایتی و کامکار یزدنژاد (۱۳۸۷) تأثیر سد طرق مشهد بر کیفیت و کمیت آب زیرزمینی مخروط‌افکنه طرق را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که از سال ۱۳۶۳، پس از احداث سد، سطح آب زیرزمینی به شدت افت داشته و با کاهش کیفیت آبهای زیرزمینی همراه بوده است. بررسی تأثیر سد حنا بر کیفیت آب رودخانه حنا در شهرستان سمیرم نشان‌دهنده‌ی کاهش میزان قلیائیت، سختی و شوری آب رودخانه حنا می‌باشد (استکی، ۱۳۸۲).

Moreno و همکارانش (۲۰۰۹) رودخانه تاگوس^۱ در مرز اسپانیا و پرتغال را برای مطالعه تأثیر سد بر خشکسالی انتخاب کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ویژگی خشکسالی‌ها بعد از احداث سد به شدت تغییر کرده است. در واقع قبل از احداث سد، مناطق بالا دست خشکسالی‌های بیشتری را متحمل

1. Tagus river

شده‌اند اما از زمان احداث سد روند خشکسالی‌ها برعکس شده و پایین دست سد دارای خشکسالی‌های با شدت و تداوم بیشتری نسبت به بالادست سد شده است. میخس و همکاران ۲۰۱۶ نیز پژوهش مشابهی را بر روی حوضه رودخانه کلرادو در تگزاس انجام داده‌اند. آنها تاثیر احداث چندین سد در بالادست سد بزرگ بوچانان^۱ را بررسی کرده و دریافتند که هرچند آب مصرفی محلی در اثر احداث این سدها تامین شده است اما شدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی نیز افزایش یافته است. Yamini و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس خشکسالی رخ داده در سال ۲۰۰۹ و اثرات آن بر سد خاداکواسلا^۲ (هندوستان)، روابط سد و خشکسالی را واکاوی کردند. نتایج آنها نشان داد که در طول خشکسالی، آب در بخش کوچکی از مخزن سد جمع شده؛ که باعث از بین رفتن آب از طریق تبخیر و نفوذ شده است. بنابراین در عرضه آب به بخش‌های مورد نیاز اختلال ایجاد می‌شود. Rangecroft و همکارانش (۲۰۱۶) نیز تأثیرات سد بر خشکسالی هیدرولوژیکی را در شیلی بررسی کردند.

نتایج آنها نشان داد که سد سانتاجوانا^۳ باعث کاهش در فراوانی، تداوم و شدت خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در پایین دست حوضه آبریز هوآسکو^۴ شده است، اما در کم کردن خشکسالی‌های عمده چندساله (تداوم بالا) مؤثر نبوده است. این سد همچنین باعث ایجاد یک تأخیر زمانی در وقوع خشکسالی آشناختی در پایین دست سد شده و به نظر می‌رسد که باعث تغییر رژیم رودخانه نیز شده است، بدین صورت که خشکسالی‌های رخ داده در بهار/ تابستان به خشکسالی‌های زمستانه تبدیل شده‌اند که می‌تواند تأثیرات منفی زیادی را در اکوسیستم منطقه داشته باشد.

احداث سد در مناطق با بارش موسمی، می‌تواند تأثیرات بهتری در رژیم آبشناسی رودخانه‌ها داشته باشد؛ زیرا این مناطق دارای بارش بسیار سنگین در فصل گرم هستند که سیل‌های سهمگین نتیجه آن است. در این زمینه Navarathinam و همکارانش (۲۰۱۵) نقش یک سد چندمنظوره را در رودخانه ماواتویا^۵ سریلانکا، مدل‌سازی کرده و مشخص کردند که سد یادشده باعث کاهش ۸۰۰ مترمکعبی دبی اوج سیلاب شده است. همچنین مخزن سد در دوره مرطوب پر شده و می‌تواند آب مورد نیاز محصول برنج را در زمین‌های پایین دست سد تامین کند. موضوعی تقریباً مشابه در شبه جزیره فیجی بر روی رودخانه با^۶ نیز انجام شد. در این جزیره نیز بارش‌های سنگین باعث ایجاد سیلاب‌های عظیم می‌شوند. نتایج پژوهش نشان داد که دو سد فعلی تاسیس شده بر روی رودخانه فقط قادر به کاهش دبی اوج سیلاب‌های کوچک با دوره بازگشت دو ساله هستند و برای کنترل سیلاب رودخانه‌ی با، به دو سد چندمنظوره دیگر با ظرفیت ۲۰۰ میلیون متر مکعب نیاز است (Nawai et al., 2015).

1. Buchanan
2. Khadakwasla
3. Santa Juana
4. Huasco
5. Malwathoya
6. Ba

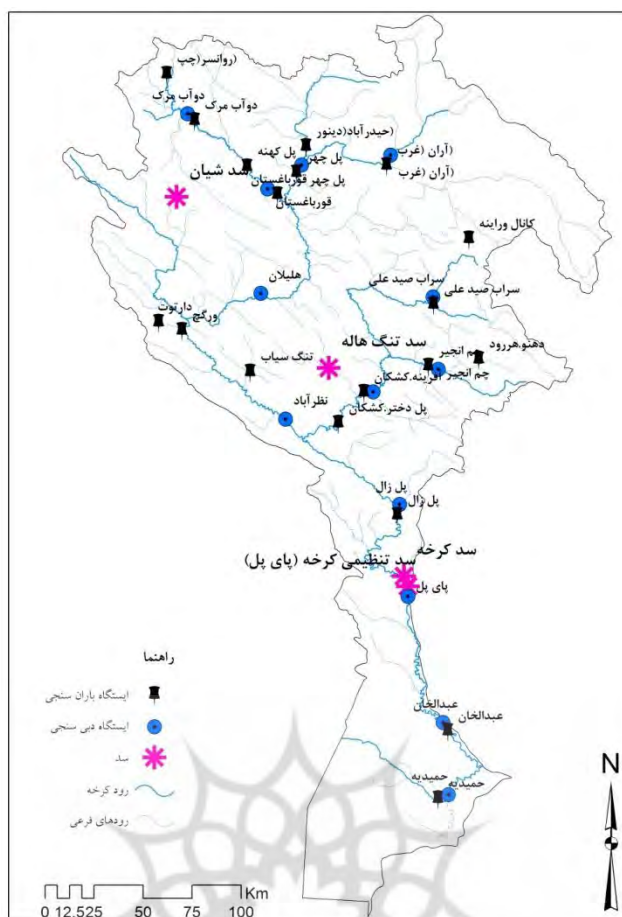
هدف انجام این پژوهش بررسی تأثیر سد، به عنوان یک عامل انسانی، بر تداوم و شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز رود کرخه است.

روش پژوهش

به منظور بررسی تأثیر سد کرخه بر خشکسالی هیدرولوژیکی رود کرخه، آمار مربوط به دبی و بارش ماهانه ایستگاه‌های آبریز و باران سنجی حوضه آبریز کرخه از شرکت مدیریت منابع آب (تماب) دریافت شد. تعداد ۸۴ ایستگاه آبریز و ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی در حوضه آبریز کرخه وجود داشتند که به دلیل کوتاه مدت بودن دوره آماری از همه آنها نمی‌توان استفاده کرد. برخی از ایستگاه‌ها نیز دارای گپ آماری طولانی مدت بوده که حذف شدند ولی داده‌های ایستگاه‌های دارای حداکثر گپ آماری ۵٪ (Lopez-moreno, 2009: 3) بازسازی شد. بازسازی داده‌های مفقود با استفاده از روش انتساب نزدیکترین همسایگی متوالی K (Kim and Yi, 2008) انجام شده و آزمون‌های همگنی مذکور برای هر سری زمانی، قبل و بعد از بازسازی آنها به کار گرفته شد.

به منظور ارزیابی صحت و همگنی داده‌های مشاهداتی، از بسته نرم افزاری آر اچ تست وی (wang and fang, 2010) بر اساس روش آزمون‌های ماکسیمال پنالایزد T&F (wang et al., 2007: 370:918) استفاده شد که در یک الگوریتم آزمون نمایی برگشتی^۴ نهادینه شده است (اوجی، ۱۳۹۲). بدین ترتیب از ۸۴ ایستگاه هیدرومتریک ۶۹ ایستگاه یا دارای آمار کوتاه مدت و یا دارای گپ آماری بیش از ۵٪ بودند که حذف شدند. از ۱۵ ایستگاه باقیمانده ایستگاه شاوور نیز در ارزیابی صحت و همگنی داده دارای نقاط شکستگی^۵ بسیاری بود و در این مرحله رد شد. در نهایت تعداد ۱۴ ایستگاه آبریز و ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی که دارای حداقل ۳۰ سال دوره آماری بوده و آزمون‌های اعتبار سنجی آنها مورد تایید قرار گرفت، انتخاب شدند (شکل ۱).

1. Sequential k-nearest neighbor imputation method
2. RHtestsV3
3. Penalized maximal t and F tests
4. Recursive testing algorithm
5. Change point



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتریک، باران‌سنجی و سد‌های حوزه آبریز کرخه

برای انجام این پژوهش ایستگاه‌های باران‌سنجی و دبی‌سنجی زیادی وجود داشت که در سطح حوزه آبریز کرخه پراکنده هستند؛ بنابراین نیاز بود تا «میانگین منطقه‌ای» سری زمانی داده‌های بارش و دبی برای ایستگاه‌های قبل و بعد از سد کرخه محاسبه شوند. برای محاسبه میانگین منطقه‌ای از روش پلیگون‌های تیسن^۱ استفاده شد. در صورت عدم توزیع یکنواخت ایستگاه‌های سنجش در منطقه و وجود پستی و بلندی زیاد، برای محاسبه میانگین منطقه‌ای روش پلیگون‌های تیسن کاربرد زیادی دارد (حافظ‌پرست و همکاران، ۱۳۹۳). در روش پلیگون‌های تیسن مقادیر معیار در وزن مساحت هر ایستگاه

1. Thiessen polygons method

که توسط روش تیسسن محاسبه شده، ضرب شده و میانگین منطقه‌ای به دست می‌آید (Jones and Hulme, 1996: 363).

در ادامه برای بررسی تأثیر سد بر روی خشکسالی‌ها ابتدا روابط و ایازی (رگرسیون) بین بارش و دبی قبل و بعد از احداث سد محاسبه شد و سپس خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI و خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI به دست آمد (Ken et al., 2016: 331) و با تفکیک آن به دو دوره آماری قبل و بعد از احداث سد با یکدیگر مقایسه شدند؛ این مقایسه‌ها با تحلیل نمودار باکس پلات در محیط نرم‌افزار SPSS و تحلیل آماره‌های توصیفی خشکسالی‌ها انجام شد. نمایه SDI شاخصی قابل اعتماد و موثر برای واکاوی خشکسالی آبشناختی است (Soleimani Sardou and Bahremand, 2014: 48). نمایه یادشده بسیار کارآمد بوده و سادگی کار با آن باعث شده که در بسیاری از مناطق دنیا از طریق آن خشکسالی آبشناسی مطالعه شود (Haug et al., 2015: 13598; Niu et al., 2015: 69; Pathak and Dodamani, 2016: 627).

محاسبه خشکسالی هواشناسی با شاخص SPI در نرم‌افزار تحت DOS مرکز ملی کاهش خشکسالی دانشگاه نبراسکا ایالات متحده انجام شد (<http://drought.unl.edu>). برخی خشکسالی و ترسالی‌های جرئی (خشکسالی با تداوم و شدت بسیار کم) در واکاوی و بازکاوی خشکسالی‌ها اختلال ایجاد می‌کنند که جهت رفع این مشکل از میانگین متحرک ۵ ماهه سود برده شد (Fleiget et al., 2006: 534) و در نهایت دو ویژگی تداوم^۱ و بزرگی^۲ خشکسالی‌های رخ داده در دوره آماری نیز محاسبه و واکاوی شد.

در انتها نیز جهت بررسی روند خشکسالی‌های حوضه آبریز کرخه و تأثیر سد بر آن از آزمون من کندال و شیب سن استفاده شد. من کندال آزمون غیرپارامتری رتبه ای است که توسط من و کندال ارائه شده است و برای تعیین معناداری روندهای خطی و غیر خطی مناسب است (Li et al., 2008).

روابط مربوط جهت تعیین مقادیر آماره من کندال به صورت زیر است (سبزی پرور و شادمانی، ۱۳۹۰):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1, & (X_j - X_i) > 0 \\ 0, & (X_j - X_i) = 0 \\ -1, & (X_j - X_i) < 0 \end{cases}$$

$$\text{VAR}(s) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

1. Duration
2. Magnitude

$$Z_M = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{VAR}(\bar{s})}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{VAR}(\bar{s})}}, & S < 0 \end{cases}$$

که در روابط فوق n تعداد داده مشاهده‌ای (طول دوره آماری)، X_i و X_j به ترتیب i امین و j امین داده مشاهده‌ای و q تعداد گروه‌های ایجاد شده (با داده‌های برابر و بیشتر از دو عضو)، T_p تعداد داده‌های برابر در q امین گروه و Z_m مقدار آماره من کندال است. مقدار Z_m منفی بیانگر روند کاهشی و مقدار مثبت آن نشان دهنده‌ی روند افزایشی در سری داده‌ها می‌باشد. با توجه به سطح معنی داری ۹۵ درصد اگر قدر مطلق Z_m بیش از ۱.۹۶ باشد، فرض صفر رد شده و سری زمانی پارامتر مورد مطالعه دارای روند معنی دار و در غیراینصورت فاقد روند ارزیابی می‌شود (سبزی پرور و شادمانی، ۱۳۹۰). اگر معنی داری در سطح اطمینان ۹۹٪ آزمون شود فرض صفر در صورتی رد می‌شود که قدر مطلق Z_m بیش از ۲.۵۷ باشد (محمدی، ۱۳۹۰). در این پژوهش برای محاسبه آماره من کندال از نرم افزار Excel استفاده شد.

در ادامه با توجه به غیرپارامتری بودن آزمون من کندال از روش سن^۱ جهت تعیین مقدار شیب روندها استفاده گردید. در این روش مقادیر پرت موجود در سری زمانی، اثر کمی در تعیین شیب دارند که مزیت و برتری اصلی آن نسبت به روش رگرسیون خطی است (سبزی پرور و شادمانی، ۱۳۹۰؛ احمدی و رادمنش، ۱۳۹۳).

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{X_j - X_i}{j - i} \right] \quad j > i$$

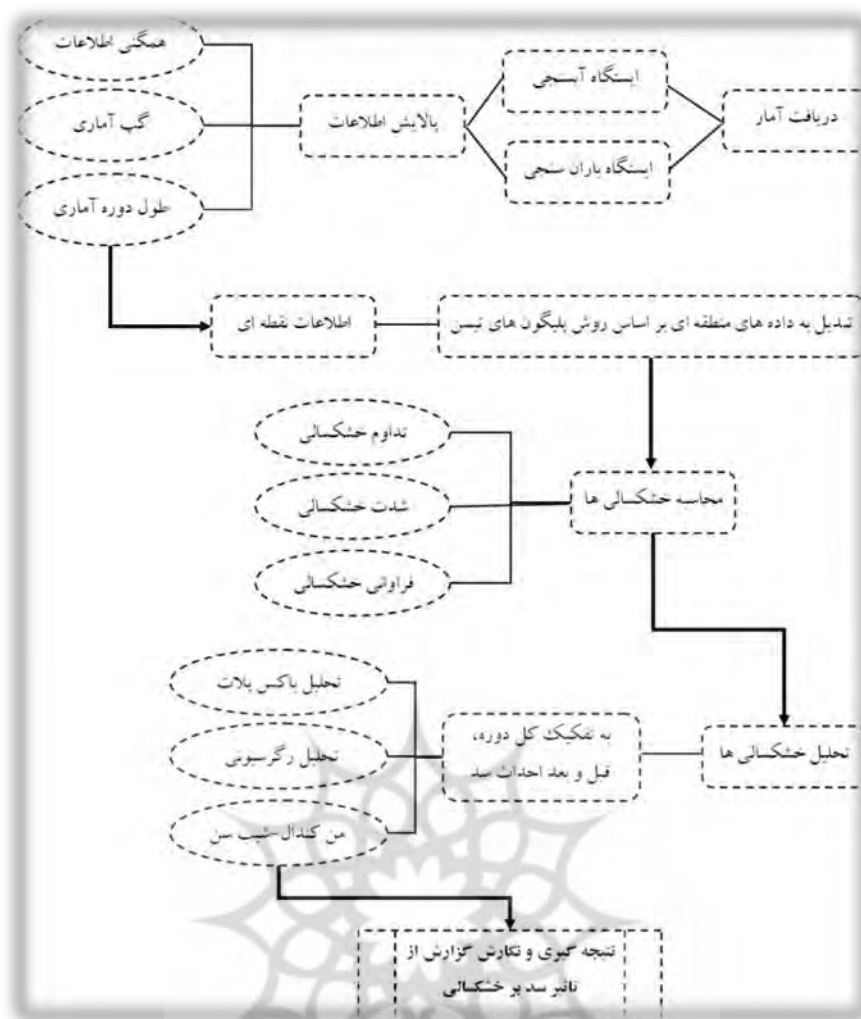
در این رابطه X_i و X_j به ترتیب i امین و j امین داده مشاهده‌ای و β مقدار شیب می‌باشد که مقدار آن به عنوان میانه دنباله مقادیر داخل گروه معرفی شده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی خشکسالی‌های هواشناسی و آبشناختی

(پیرمردیان و همکاران، ۱۳۸۷؛ سلطانی و سعادت، ۱۳۸۶؛ نالبانیتیس، ۲۰۰۸)

| مقادیر SDI | مقادیر SPI | طبقه خشکسالی |
|---------------|---------------|--------------------|
| ۰ تا ۰/۹۹ | ۰ تا ۰/۹۹ | خشکسالی ملایم |
| -۱ تا -۱/۴۹ | -۱ تا -۱/۴۹ | خشکسالی متوسط |
| -۱/۵ تا -۱/۹۹ | -۱/۵ تا -۱/۹۹ | خشکسالی شدید |
| -۲ و کمتر | -۲ و کمتر | خشکسالی بسیار شدید |

1. Sen



شکل ۲- فلوجارت روش تحقیق

یافته‌های پژوهش

جهت مقایسه خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی ضریب همبستگی بین بارش و مقدار دبی سنجیده شده و در ادامه نمودار باکس پلات و آماره‌های توصیفی خشکسالی‌های رخ داده در حوضه آبریز کرخه به تفکیک دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۶۰ (قبل از زمان احداث سد) و ۱۳۹۱-۱۳۸۱ (بعد از احداث سد) مورد سنجش قرار گرفت. با توجه به اینکه رخداد خشکسالی تنها ناشی از احداث سد

نبوده و عواملی همچون افزایش دما، کاهش بارش و ... نیز آن را دستخوش تغییر می‌کند، بنابراین خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاه‌های قبل از سد و بعد از سد با یکدیگر در ۲ دوره زمانی قبل و بعد از احداث سد مقایسه شده تا بتوان تأثیر سد را آشکار سازی کرد.

در کل دوره آماری ارتباط مثبت و معنادار (در سطح ۹۵ درصد) وجود دارد، یعنی با افزایش بارش، دبی نیز افزایش یافته است؛ اما با در نظر گرفتن زمان احداث سد و تفکیک داده‌ها به دو گروه قبل و بعد از احداث سد کرخه، در میزان همبستگی بارش و دبی تغییر اساسی ایجاد شده است. اولین نکته در تقویت میزان همبستگی بین بارش- دبی در دوره آماری قبل از احداث سد (۱۳۶۰-۱۳۸۰) است؛ به صورتی که بیشترین همبستگی بین دبی و بارش به این دوره آماری برمی‌گردد. در دوره آماری بعد از احداث سد (۱۳۹۱-۱۳۸۱) میزان همبستگی بین بارش- دبی ایستگاه‌های قبل از سد همچنان بالاست (همبستگی $+0/54$) و در سطح ۹۹ درصد معنادار است، اما این رابطه برای ایستگاههای پایین دست سد به $+0/12$ کاهش یافته که معنادار نیست؛ در واقع بارش همچنان وجود داشته ولی وجود سد، دبی رود را در ایستگاه‌های بعد از سد کاهش داده و همبستگی بین بارش و دبی را نیز دچار کاهش کرده است (جدول ۲).

جدول ۲- همبستگی بین بارش و دبی در حوضه آبریز کرخه

| ردیف | دوره آماری | بارش-دبی قبل سد | بارش-دبی بعد سد |
|------|------------------|--------------------|--------------------|
| ۱ | کل دوره آماری | $**0/58$ | $**0/50$ |
| ۲ | تا زمان احداث سد | $**0/61$ | $**0/63$ |
| ۳ | بعد از احداث سد | $**0/54$ | $0/12$ |

(** معناداری در سطح ۹۹ درصد)

بررسی «تداوم خشکسالی» در کنار فراوانی، بزرگی و شدت خشکسالی کمک شایانی به درک این پدیده می‌کند. تداوم خشکسالی‌ها در محیط SPSS با استفاده از نمودار جعبه‌ای (باکس پلات) ترسیم و سپس تحلیل شد، نتایج نمودار کل دوره آماری نشان می‌دهد که تداوم خشکسالی‌های هیدرولوژی حوضه کرخه ۱۱ ماهه^۱ است؛ یعنی خشکسالی‌های ۱۱ ماهه در این حوضه آبریز غالب هستند. در دوره آماری قبل از احداث سد صدک ۲۵ ام طول بیشتری داشت، ولی صدک ۷۵ ام برای دوره آماری بعد از سد بیشتر است که نشان می‌دهد خشکسالی‌های هیدرولوژی در

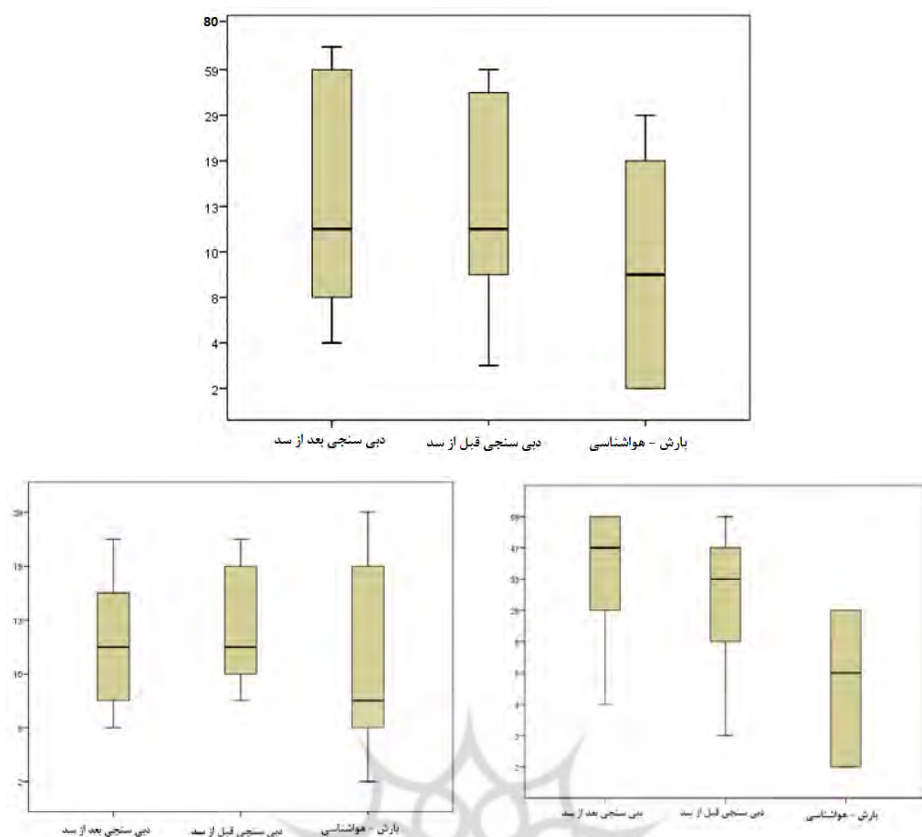
۱. در نمودار جعبه ای (باکس پلات) خط وسط جعبه نشان‌دهنده «میان» است و با «میانگین» که در جدول ۴ محاسبه شده کمی متفاوت است.

ایستگاه‌های بعد از سد دارای تداوم بیشتری هستند. خشکسالی هواشناسی نیز بطور متوسط تداوم ۸ ماهه دارد و حداکثر تداوم آن ۲۹ ماهه است در حالی که خشکسالی هیدرولوژی ۷۱ ماهه نیز در حوضه کرخه اتفاق می‌افتد (شکل ۳)، که خود دلیلی بر این است که خشکسالی‌های هیدرولوژیکی مدتی پس از خشکسالی‌های هواشناسی نیز تداوم می‌یابند و همچنین با بازگشت بارش به حالت نرمال، به دلیل ویژگی‌های محیطی منطقه خشکسالی‌های هیدرولوژیکی همزمان به پایان نمی‌رسند. دلیل بعدی تاثیر عوامل انسانی در وقوع خشکسالی‌ها است و وجود موانعی همچون سدها باعث تداوم بیشتر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی‌های هواشناسی می‌شوند که تاثیر سد را در نگهداشت بیشتر آب برای ایستگاه‌های پایین‌دست نشان می‌دهد.

بررسی نمودار جعبه‌ای تداوم خشکسالی‌های حوضه آبریز کرخه در دوره آماری ۱۳۶۰-۱۳۸۰ نشان می‌دهد که اکثر خشکسالی‌های هیدرولوژی رخ داده در قبل و بعد از سد تداومی ۱۱ ماهه و خشکسالی هواشناسی تداومی ۸ ماهه دارند که مشابه کل دوره آماری است. در این دوره خشکسالی هیدرولوژی بسیار طولانی‌مدت وجود ندارد و حداکثر تداوم آنها ۲۵ ماهه است. در همین دوره، بیشتر خشکسالی‌های هواشناسی تداومی ۹ ماهه دارند.

حدود ۷۵ درصد خشکسالی‌های رخ داده در ایستگاه‌های قبل از سد تداوم ۱۰ تا ۱۹ ماهه داشته‌اند ولی در بعد از سد تداومی ۹ تا ۱۵ ماهه دارند (شکل ۳)؛ در واقع قبل از احداث سد تداوم خشکسالی‌ها در بالادست سد بیشتر از پایین دست بوده است.

نمودار تداوم خشکسالی برای دوره زمانی بعد از احداث سد تغییر مشخصی در میزان تداوم خشکسالی حوضه آبریز کرخه نشان می‌دهد. تداوم خشکسالی‌های آبخاکی در ایستگاه‌های بعد از سد، از ۱۱ ماهه به حدود ۴۷ ماهه افزایش یافته و این مقدار برای ایستگاه‌های قبل از سد از ۱۱ به ۳۳ ماهه تغییر یافته است (شکل ۳). اولین نکته مهم این است که خشکسالی‌های هواشناسی گسترده در این دوره باعث افزایش تداوم خشکسالی‌های آبخاکی قبل و بعد از سد شده‌اند، اما تاثیر آن در هر دو منطقه متفاوت است؛ به صورتی که در ایستگاه‌های بعد از سد، خشکسالی‌های آبخاکی ۱۴ ماه بیشتر از ایستگاه‌های قبل از سد تداوم دارد که این ناشی از نگهداشت آب در پشت سد است و تنش رطوبتی بیشتری به این منطقه وارد کرده است. این در حالی است که در دوره آماری ۱۳۶۰-۱۳۸۰ ایستگاه‌های بالادست حوضه کرخه دارای تداوم خشکسالی بیشتری بوده‌اند که ناشی از روند طبیعی تغییر اقلیم بوده ولی با احداث سد بواسطه تاثیر در شرایط رطوبتی پایین دست آن، این حالت وارون شده است. در واقع احداث سد باعث افزایش شدید تداوم خشکسالی هیدرولوژیکی در مناطق پایین‌دست نسبت به مناطق بالادست شده است.



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای تداوم خشکسالی‌های حوضه آبریز کرخه (بالا: کل دوره آماری، پایین - راست: بعد از احداث سد، پایین- چپ: قبل از احداث سد)

در واکاوی خشکسالی علاوه بر تداوم، شدت و بزرگی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است، به گونه‌ای که خشکسالی‌های ضعیف در برخی منابع جزو حالت نرمال در نظر گرفته می‌شود. در واقع خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید بیشترین تأثیر منفی را بر جامعه می‌گذارند. در جدول (۳) به تفکیک شدت‌های مختلف، تداوم خشکسالی‌ها محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود قبل از زمان احداث سد در قسمت‌های پایین دست سد کرخه خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید رخ نداده است، تعداد ماه‌های با خشکسالی ضعیف در این منطقه با مناطق بالادست سد تقریباً برابر است و خشکسالی‌های متوسط بیشتری از آن دارد. ولی در بالادست سد خشکسالی شدید در ۸ ماه از دوره آماری ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۰ رخ داده است (جدول ۳).

ولی انجام واکاوی در بالادست و پایین دست سد برای دوره آماری ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۱ نشانگر نتایج متفاوتی است. نکته مهم در این دوره اخیر رخداد خشکسالی ۵۹ ماهه در بالادست سد است که ۶ ماه از آن (اردیبهشت تا مهر ۱۳۸۸) خشکسالی بسیار شدید بوده است. تداوم ۵۹ ماهه خشکسالی در پایین دست سد نیز رخ داده ولی خشکسالی بسیار شدید در آن دیده نمی شود. متوسط شدت در این خشکسالی وسیع در هر دو منطقه قبل و بعد از سد ۱/۳۱- بوده و شدت حداکثر خشکسالی در بالادست سد ۲/۱- ولی در پایین دست سد ۱/۹۱- بوده است (ر.ک به ردیف ۹ از جدول ۴) که با اندکی اغماض با توجه به تداوم و شدت برابر، می توان خشکسالی ۵۹ ماهه را در بالادست و پایین دست سد مشابه دانست.

جدول (۳) نشان می دهد که مناطق بعد از سد کرخه تا زمان احداث سد، هرگز شاهد رخداد خشکسالی های شدید و بسیار شدید نبوده اند ولی بعد از احداث سد خشکسالی هیدرولوژیکی شدید با تداوم ۲۵ ماهه در این منطقه رخ داده است که افزایش ۶۷ درصدی را نسبت به مناطق بالادست سد نشان می دهد؛ خشکسالی متوسط نیز با افزایش ۷۳ درصدی بیشتر از مناطق بالادست سد رخ داده است. این نتایج به وضوح نشان دهنده ی تاثیر منفی سد بر دبی رود کرخه است که نتایج آن باعث وقوع خشکسالی با تداوم و شدت بیشتری در مناطق بعد از احداث سد نسبت به مناطق بالادست سد شده است.

جدول ۳- تعداد ماه های با وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در شدت های مختلف و میزان تغییرات آنها به درصد در دوره آماری قبل و بعد از احداث سد

| شدت خشکسالی | قبل از احداث سد (۱۳۶۰-۱۳۸۰) | | بعد از احداث سد (۱۳۸۰-۱۳۹۱) | | تغییرات به % |
|--------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|-----------|--------------|
| | قبل از سد | تغییرات به % | قبل از سد | بعد از سد | |
| خشکسالی ضعیف | ۱۰ | ۹ | ۲۷ | ۱۳ | -۵۲ |
| خشکسالی متوسط | ۹ | ۲۲ | ۲۶ | ۴۵ | ۷۳ |
| خشکسالی شدید | ۸ | ۰ | ۱۵ | ۲۵ | ۶۷ |
| خشکسالی بسیار شدید | ۰ | ۰ | ۶ | ۰ | --- |

در ادامه شدت و تداوم ۹ خشکسالی رخ داده، به تفکیک دوره زمانی قبل و بعد از احداث سد محاسبه شده تا بتوان تأثیر احداث سد را بر خشکسالی ها بهتر درک کرد. در دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۶۰، در بالادست سد خشکسالی های آبشناختی بطور میانگین تداوم ۱۴ ماهه داشته ولی در پایین دست سد ۱۳/۳ ماهه بوده اند. همچنین بزرگی خشکسالی ها بطور میانگین ۹/۸ در بالادست و

در پایین دست سد ۷ بوده است. این ارقام نشان می‌دهد که قبل از زمان احداث سد، خشکسالی‌های آبشناختی در مناطق بالادست سد با بزرگی و تداوم بیشتری نسبت به مناطق پایین دست سد رخ داده‌اند (جدول ۴). بررسی شدت و تداوم خشکسالی برای دوره آماری ۱۳۹۱-۱۳۸۱ نشان داد که تداوم خشکسالی‌های آبشناختی در پایین دست سد بطور میانگین ۳۶/۷ ماهه ولی در بالادست سد ۳۱/۷ ماهه بوده‌اند، که نشان از افزایش تداوم خشکسالی آبشناختی بعد از احداث سد است. همینطور بزرگی خشکسالی‌ها نیز در پایین دست سد ۳۹ و در بالادست سد ۳۵ بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که احداث سد کرخه روند وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیکی را در مناطق بالادست و پایین دست سد وارون کرده و تاثیر منفی بر مناطق بعد از سد داشته است (جدول ۴).

جدول ۴- آماره های بزرگی، شدت و تداوم خشکسالی های به وقوع پیوسته حوضه آبریز کرخه به تفکیک

زمان احداث سد

| خشکسالی هیدرولوژیکی | مناطق قبل از سد | | | مناطق بعد از سد | | | حداک تداوم (ماه) | حداک تداوم (ماه) |
|------------------------|-----------------|----------------|------------------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | بزرگی | میانگین شدت | حداک تداوم (ماه) | بزرگی | میانگین شدت | حداک تداوم (ماه) | | |
| ۱ قبل | ۴/۹۴ | ۰/۴۹ | ۰/۶۷ | ۲/۵۸ | ۰/۳۲ | ۰/۴۵ | ۸ | ۱۰ |
| ۲ ازاحداث | - | - | - | ۱/۶۸ | ۰/۱۷ | ۰/۲۱ | ۱۰ | - |
| ۳ سد | ۵/۱۷ | ۰/۳۲ | ۰/۵۱ | ۲/۷۵ | ۰/۲۵ | ۰/۳۵ | ۱۱ | ۱۳ |
| ۴ (۱۳۸۰-) | ۰/۹ | ۰/۱ | ۰/۱۶ | - | - | - | - | ۹ |
| ۵ (۱۳۶۰) | ۲۸/۱۸ | ۱/۲ | ۱/۷ | ۲۱/۱ | ۰/۸۶ | ۱/۴ | ۲۴ | ۲۴ |
| میانگین | ۹/۸ | ۰/۵۳ | ۰/۷۶ | ۱۳/۳ | ۰/۴ | ۰/۶ | ۷ | ۱۴ |
| ۶ بعد از | ۲۶/۴ | ۰/۷۷ | ۱/۴۶ | ۳۹/۳ | ۰/۸ | ۱/۴۸ | ۴۷ | ۳۳ |
| ۷ حادث | ۰/۷ | ۰/۲۳ | ۰/۴۴ | - | - | - | - | ۳ |
| ۸ سد | - | - | - | ۰/۱۵ | ۰/۰۳ | ۰/۱۲ | ۴ | - |
| ۹ (۱۳۹۱- ۱۳۸۰) | ۷۸ | ۱/۳۱ | ۲/۱ | ۷۷.۸۲ | ۱/۳۱ | ۱/۹۱ | ۵۹ | ۵۹ |
| میانگین | ۳۵ | ۰/۸ | ۱/۳ | ۳۹/۱ | ۰/۷ | ۱/۲ | ۳۶/۷ | ۳۱/۷ |

نتایج آزمون من کندال نشان داد که بارش در طول دوره آماری (به جز فصل تابستان) روند کاهشی داشته است؛ بیشترین مقدار روند کاهشی بارش متعلق به اسفند ماه است که سالانه ۲.۱ میلی متر کاهش بارش در این ماه رخ داده است. سری زمانی دبی ایستگاه های قبل از سد نشان

می دهد که دبی رود علاوه بر بارش از سایر عوامل نیز تأثیر پذیرفته است، زیرا روند دبی رود در این ایستگاهها (در مقایسه با بارش) در تمامی ماهها روند کاهشی معنادار در سطح ۹۹٪ داشته است و به طور میانگین سالانه حدود ۹ مترمکعب در ثانیه از آبدهی رودهای قبل از سد کاسته شده است.

تأثیر سد کرخه را به ۲ دلیل می توان در ایستگاههای بعد از سد به وضوح مشاهده کرد: نخست اینکه مقادیر آماره من کندال برای ماه های بهار، پاییز و زمستان روند منفی شدیدتری نسبت به ایستگاه های قبل از سد دارند و دوم اینکه رها کردن آب سد در ۴ ماه تیر، مرداد، شهریور و مهر باعث شده تا روند دبی این ماهها، هرچند منفی ولی معنادار نباشد.

به هر حال رها کردن آب سد در ۴ ماه سال نیز باعث نشده است که روند آبدهی آنها مثبت شود و همچنان روند منفی در آنها مشاهده می شود. مقدار آماره من کندال در دبی سالانه برای ایستگاه های بعد از سد ۴- (ایستگاه های قبل از سد ۳.۶-) است و میزان شیب سن نشان می دهد که آبدهی سالانه ایستگاههای بعد از سد، در هر سال، حدود ۶۸ متر مکعب در ثانیه کاهش یافته است ولی در ایستگاه های قبل از سد حدود ۹ متر مکعب در ثانیه بوده است که بازگو کننده تأثیر منفی سد در آبدهی رودهای بعد از سد می باشد (جدول ۵).

جدول ۵- مقادیر آماره من کندال برای سری زمانی بارش و دبی ماهانه و میزان شیب سن

| معیار | ماه شمسی | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | سالانه |
|---------------|-------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| بارش | من کندال | ۰.۷ | -۱.۱ | -۰.۹ | ۱.۹* | ۱.۷ | ۰.۶ | -۱.۳ | ۰.۸ | -۱.۳ | -۱.۴ | ۰.۳ | -۲.۸ | -۱.۹* |
| | شیب (mm) | ۰.۳ | -۰.۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | -۰.۱ | ۰.۷ | ۱.۱ | -۰.۹ | ۰.۲ | -۲.۱ | -۲.۷ |
| دبی قبل از سد | من کندال | -۳.۴ | -۲.۷ | -۳.۴ | -۳.۴ | -۳.۲ | -۳ | -۳.۵ | -۲.۷ | -۳.۸ | -۴ | -۲.۴ | -۲.۵ | -۳.۶ |
| | شیب (m ³ /s) | -۲.۵ | -۱.۳ | -۰.۵ | -۰.۳ | -۰.۲ | -۰.۲ | -۰.۲ | -۰.۳ | -۰.۷ | -۰.۷ | -۰.۶ | -۱.۶ | -۸.۸ |
| دبی بعد از سد | من کندال | -۴.۲ | -۴.۲ | ۲.۶ | -۱ | -۰.۲ | ۰ | -۰.۷ | -۳.۱ | ۳.۶ | -۴.۵ | -۳.۶ | -۳.۶ | -۴ |
| | شیب (m ³ /s) | -۱۶.۳ | ۱۰.۸ | -۳ | -۰.۸ | -۰.۱ | ۰ | -۰.۳ | ۲.۴ | ۴.۲ | -۵ | -۵.۷ | -۱۱.۷ | -۶۸.۲ |

در سطح ۹۵٪ معنادار و ** در سطح ۹۹ درصد معنادار است

نتیجه‌گیری

یکی از اهداف مهم تأسیس سدها در ایران کاهش اثرات خشکسالی‌ها است، زیرا سال آبی در اکثر مناطق ایران به ۲ دوره سرد- بارانی و گرم - کمبارش (خشک) تقسیم می‌شود؛ از این رو یکی از اهداف احداث سدها در ایران کاهش تنش آبی در نیمه گرم سال است. از این رو هدف این پژوهش بررسی تاثیر عامل انسانی سدسازی بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی رود کرخه است.

جهت درک تأثیر سد بر خشکسالی‌های آبشناختی رود کرخه واکاوی‌های مختلفی از شدت و تداوم خشکسالی‌ها انجام شد. بررسی همبستگی بین بارش و دبی نشان داد که تا قبل از احداث سد رابطه مثبت و معناداری بین این دو متغیر وجود دارد، اما بعد از احداث آن، رابطه معنی‌دار یادشده برای ایستگاه‌های بعد از سد به شدت کاهش یافته، بطوری که دیگر معنادار نیست. این در حالی است که در دوره آماری بعد از احداث سد همچنان رابطه بارش و دبی برای ایستگاه‌های قبل از سد همچنان قوی و معنادار است. در این دوره میزان همبستگی بین بارش- دبی ایستگاه‌های قبل از سد $0.54+$ و در سطح ۹۵ درصد معنادار است اما این رابطه برای ایستگاه‌های بعد از سد به $0.12+$ کاهش یافته است. در واقع بارش همچنان وجود دارد ولی وجود سد اجازه جریان طبیعی آب در بستر رود را نداده و دبی رود در ایستگاه‌های بعد از سد به شدت کاهش یافته است.

نتایج پژوهش Moreno و همکارانش (۲۰۰۹) بر روی رودخانه تاگوس در مرز اسپانیا و پرتغال نشان داد که قبل از احداث سد، مناطق بالا دست خشکسالی‌های بیشتری را متحمل شده‌اند اما از زمان احداث سد روند خشکسالی‌ها برعکس شده و پایین دست سد دارای خشکسالی‌های با شدت و تداوم بیشتری نسبت به بالادست سد شده است. در این پژوهش نیز رفتار مشابهی وجود دارد به گونه‌ای که با احداث سد کرخه باعث افزایش تداوم خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در مناطق پایین دست نسبت به مناطق بالادست سد شده است. قبل از زمان احداث سد کرخه، تداوم خشکسالی ایستگاه‌های قبل و بعد از سد تقریباً برابر و حدود ۱۱ ماهه بودند، اما با احداث سد تداوم خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های بعد از سد، از ۱۱ ماهه به ۴۷ ماهه افزایش یافته و این مقدار برای ایستگاه‌های قبل از سد، از ۱۱ به ۳۳ ماهه تغییر یافته است که نشان می‌دهد خشکسالی‌های ایستگاه‌های بعد از سد ۱۴ ماه تداوم بیشتری یافته‌اند که این مقدار نشانگر تاثیر خالص سد کرخه بر رخداد خشکسالی‌ها است.

مطالعه میکس و همکاران ۲۰۱۶ بر روی حوضه رودخانه کلرادو در تگزاس نشان داد که بعد از احداث سد شدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در این حوضه افزایش یافته است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که تا قبل از احداث سد کرخه در

پایین دست سد خشکسالی‌های شدید وجود نداشته اما با احداث سد در ۲۵ ماه از دوره آماری، خشکسالی شدید رخ داده است.

بررسی ۹ خشکسالی آبشناختی رخ داده در طول دوره آماری نشان می‌دهد که در دوره زمانی ۱۳۸۰-۱۳۶۰، خشکسالی‌ها در بالادست سد بطور میانگین تداوم ۱۴ ماهه داشته ولی در پایین دست ۱۳/۳ ماهه بوده‌اند. این مقدار برای بزرگی خشکسالی به ترتیب ۹/۸ به ۷ بوده است که نشانگر بزرگی و تداوم بیشتر خشکسالی‌ها در مناطق قبل از سد بوده است اما با احداث سد این حالت وارون می‌شود. تداوم خشکسالی‌ها بعد از زمان احداث سد در پایین دست سد بطور میانگین ۳۶/۷ ماهه ولی در بالادست سد ۳۱/۷ ماهه شده و بزرگی خشکسالی‌ها نیز در پایین دست سد ۳۹ و در بالا دست سد ۳۵ بوده است. بنابراین در حالی که قبل از احداث سد شدت و تداوم خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در مناطق بالادست حوضه آبریز بیشتر بوده است ولی با احداث سد شدت و تداوم خشکسالی‌ها در پایین دست سد بیشتر شده که نشان‌دهنده‌ی تاثیر منفی سد بر جریان طبیعی رود کرخه است. بررسی روند دبی رودهای این حوضه آبریز نیز نشان داد که میزان آبدهی رودهای بعد از سد در طول دوره آماری حدود ۶۸ متر مکعب در ثانیه در هر سال کاهش داشته است که این مقدار برای رودهای قبل از سد حدود ۹ متر مکعب در ثانیه بوده است. از این رو می‌توان گفت سد کرخه نه تنها نتوانسته است خشکسالی‌های هیدرولوژیکی منطقه را کاهش دهد بلکه باعث افزایش آن‌ها نیز شده است.

منابع

- احمدی، فرشاد، رادمنش، فریدون (۱۳۹۳). بررسی روند تغییرات متوسط دمای ماهانه و سالانه نیمه شمالی کشور در نیم قرن اخیر، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۴: ص ۸۶۵-۸۵۵.
- استکی، عباسعلی (۱۳۸۲). تاثیر احداث سد بر تغییرات دما، PH، شوری، قلیائیت و سختی آب در رودخانه حنا (سمیرم)، مجله علمی شیلات/ایران، سال ۱۲، شماره ۱: ص ۲۰-۱.
- اوجی، روح اله (۱۳۹۲). تحلیل عدم قطعیت روش‌های تک ایستگاهی و چند ایستگاهی در ریزگردانی مقادیر حدی دما و بارش غرب میانی ایران، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- پیرمردیان، نادر، شمس نیا، سید امیر، بوستانی، فردین، شاهرخ نیا، محمد علی (۱۳۸۷). ارزیابی دوره بازگشت خشکسالی با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش SPI، مجله دانش نوین کشاورزی، سال چهارم، شماره ۱۳: ص ۲۱-۷.

- حافظ پرست، مریم؛ امجد ملکی و ویدا عبدی پور (۱۳۹۳). روش تعیین بارش منطقه‌ای حوضه مرگ با استفاده از چند ضلعی تبیین در ArcGIS10 دومین کنفرانس ملی مخاطرات محیط زیست زاگرس، تهران: انجمن مهندسی محیط زیست زاگرس لرستان.
- سبزی پرور، علی اکبر، شادمانی، مجتبی (۱۳۹۰). تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آزمون من-کندال و اسپیرمن در مناطق خشک ایران، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۴: ص ۸۳۴-۸۲۳.
- سلطانی، سعید، سعادت، سیده سارا (۱۳۸۶). پهنه‌بندی خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از نمایه استاندارد بارش (SPI)، علوم مهندسی آب/خیزداری/ایران، سال اول-شماره ۲: ص ۶۷-۶۴.
- محمدی، بختیار (۱۳۹۰). تحلیل روند بارش سالانه ایران، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۲، پیاپی ۴۳، شماره ۳: ص ۱۰۶-۹۵.
- ولایتی، سعیده، کامکار یزد نژاد، مریم (۱۳۸۷). بررسی اثرات سدهای مخزنی بر کمیت و کیفیت آب زیرزمینی مخروط افکنه‌ی پایین دست (نمونه موردی: سد طوق مشهد)، مجله جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ی، شماره ۱۱: ص ۱۸۵-۱۶۷.
- Carlton, J.S., Mase, A.S., Knutson, C.L., Lemos, M.C., Haigh, T., Todey, D.P., Prokopy, L. S., (2016). The effects of extreme drought on climate change beliefs, risk perceptions, and adaptation attitudes. *Clim. Change* 135 (2), 211–226.
- ComEC (Commission of the European Communities), (2007). Communication from the commission to the European parliament and the council: addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union. Brussels: Commission of the European Communities; 2007.
- Dracup JA, Lee KS, (1980). Paulson Jr EG, On the statistical characteristics of drought events, *Water Resource Research*; 16, 289–296.
- Fleig, A. K., M. Tallaksen, H. Hisdal, and S. Demuth, (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics, *Hydrology and Earth System. Sciences.*, 10, 532– 552.
- Gan, T.Y., Ito, M., Hülsmann, S., Qin, X., Lu, X.X., Liong, S.Y., Rutschman, P., Disse, M., Koivusalo, H., (2016). Possible climate change/variability and human impacts, vulnerability of drought-prone regions, water resources and capacity building for Africa. *Hydrol. Sci. J.* 1–18.
- Hao, Zengchao , Vijay P. Singh, (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review, *Journal of Hydrology*, 527, 668–678.
- Hao, Zengchao ,Fanghua Hao, VijayP.Singh, YoulongXia, WeiOuyang, XinyiShen, (2016). A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices, *Advances in Water Resources*, 92, 240–247.
- Hao, Zengchao, Fanghua Hao, Vijay P. Singh, Wei Ouyang, Hongguang Cheng, (2017). An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment, *Environmental Modelling & Software*, 91, 199-209.

- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., Widhalm, M., (2010). The lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 92 (4), 485–488.
<http://drought.unl.edu>
- Jones, P.D. and Hulme, M., (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations, *International Journal of Climatology*, 16, 361–377.
- Ken Mix, Alan W. Groeger, Vicente L. Lopes, (2016). Impacts of dam construction on streamflows during drought periods in the Upper Colorado River Basin, Texas, *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 21: 329–337.
- Kim K-Y, Yi G-S, CSBio Lab., Information and Communications University (2008). Sequential KNN imputation method. R package version 1.0.1. <http://csbio.icu.ac.kr>
- Li, Z.L, Xu, Z.X, Li, J.Y and Li, Z.J, (2008). Shift trend and step changes for runoff time series in the shiyang river basin, northwest china, *Hydrological processes*, 22, 4639-4646.
- Lin, Qingxia, Zhiyong Wu, Vijay P. Singh, S.H.R. Sadeghi, Hai He, Guihua Lu, (2015). Correlation between hydrological drought, climatic factors, reservoir operation, and vegetation cover in the Xijiang Basin, South China, *Journal of Hydrology*, 549, 512–524.
- Lopez-moreno, J.I, S.M, Vicente-serrano, S, Beguria, J. M. Garcí'a-Ruiz, M. M. Portela, A. B. Almeida, (2009). Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 45, W02405, 1-13.
- Ma, M., Ren, L., Singh, V. P. , Yuan, F. , Chen, L., Yang, X., Liu, Y. , (2015). Hydrologic model-based Palmer indices for drought Characterization in the Yellow River basin, China. In: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.*, 20.
- Mishra, Ashok K, Vijay P. Singh, (2010). A review of drought concepts, *Journal of Hydrology*, 391, 202–216.
- Modaresi Rad, Arash, Bijan Ghahraman , Davar Khalili , Zahra Ghahremani , Samira Ahmadi Ardakani , (2017). Integrated meteorological and hydrological drought model: a management tool for proactive water resources planning of semi-arid regions, *Advances in Water Resources*, Accepted manuscript.
- Nalbantis, I (2008). Evaluation of a hydrological drought index, *European water*, 23/24, 67-77.
- Navarathinam K., M.A Gusyev, A. Hasegawa, J. Magome, K. Takeuchi, (2015). Agricultural flood and drought risk reduction by a proposed multi-purpose dam: A case study of the Malwathoya River Basin, Sri Lanka, 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia, 29 Nov to 4 Dec 2015, pp1600-1606. www.mssanz.org.au/modsim2015.
- Nawai J., M.A Gusyev, A. Hasegawa, K. Takeuchi, (2015). Flood and drought assessment with dam infrastructure: A case study of the Ba River basin, Fiji, 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia, 29 Nov to 4 Dec 2015, pp1607-1613. www.mssanz.org.au/modsim2015.
- Niu, J., Chen, J., Sun, L., (2015). Exploration of drought evolution using numerical simulations over the Xijiang (West River) basin in South China. *J. Hydrol.* 526, 68–77.

- Oloruntade, Ajayi J., Thamer A. Mohammad, Abdul H. Ghazali, Aimrun Wayayok, (2017). Analysis of meteorological and hydrological droughts in the Niger-South Basin, Nigeria, *Global and Planetary Change*, Accepted manuscript.
- Pathak, Abhishek A, Channaveerappa, B.M. Dodamani, (2016). Comparison of two hydrological drought indices, *Perspectives in Science*, 8, 626—628.
- Rajsekhar, Deepthi, Vijay. P. Singh, Ashok. K. Mishra, (2015). Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment, *Journal of Hydrology*, 526, 164–182.
- Rangecroft, Sally, Anne F. Van Loon, Héctor Maureira, Koen Verbist, David M. Hannah, (2016). Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region, *Earth System Dynamics Discussions*, doi:10.5194/esd-2016-57, in review.
- Soleimani Sardou, F., A. Bahremand, (2014). Hydrological Drought Analysis Using SDI Index in Halilrud Basin of Iran, *Environmental Resources Research*, Vol. 2, No. 1, 47-56.
- Tigkas, Dimitris, Harris Vangelis, George Tsakiris, (2012). Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds, *Science of the Total Environment*, 440, 33–41.
- Van Loon, A.F., G. Laaha, (2015). Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics, *Journal of Hydrology*, 526, 3–14.
- Van Vliet, M.T.H., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Vogeles, S., Lettenmaier, D.P., Kabat, P., (2012). Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Climate Change*, 2 (9), 676–681.
- Wang XL (2008). Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change. *J Atmos Oceanic Tech* 25:368–384.
- Wang XL, Feng Y (2010). RHtestsV3 user manual. Climate Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, Toronto, ON, Canada. [http:// ccma.seos. uvic. ca/ ETCCDMI/ RHtest/RHtestsV3_ UserManual.doc](http://ccma.seos.ubic.ca/ETCCDMI/RHtest/RHtestsV3_UserManual.doc)
- Wang XL, Wen QH, Wu Y (2007). Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *J App Meteorol Climatol* 46:916–931. doi:10.1175/JAM2504.1
- Wilhite, D., Glantz, M., (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* 10 (3), 111–120.
- Yamini Suryaji Jedhe, Dr.R.N.Sankhua, Dr.K.N.Dhumal, (2014). Drought Management Practices and Plans For Khadakwasla Reservoir, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 3, Issue 10, 16728-16735.
- Yeh, Chen-Feng, Jinge Wang, Hsin-Fu Yeh, Cheng-Haw Lee, (2015). SDI and Markov Chains for Regional Drought Characteristics, *Sustainability*, 7, 10789-10808.