

## بررسی ارتباط خشک‌سالی هیدرولوژیکی و میزان هدایت الکتریکی رودخانه در ایستگاه‌های پایین‌دست رودخانه کرخه

لیلا ولی‌پور<sup>۱</sup>، امیر ناصرین<sup>۲\*</sup>، سعید جلیلی<sup>۲</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۶/۲۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۷/۲۲؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۸/۲۳)

### چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر دوره‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی بر میزان هدایت الکتریکی آب، در ایستگاه‌های منتخب حوضه جنوبی رودخانه کرخه انجام شد. برای بررسی روند داده‌ها از آزمون من‌کندال و برای تعیین نقاط شکست در روند داده‌ها از آزمون پتیت استفاده شد. نتایج آزمون پتیت برای پارامتر هدایت الکتریکی بیانگر شکست در روند داده‌های طی سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۷۶ در ایستگاه‌های مختلف بود. بررسی داده‌ها نشان داد هدایت الکتریکی در رودخانه کرخه روند افزایشی داشته است. این افزایش با کاهش شدید دبی، ناشی از خشک‌سالی‌های متوالی در رودخانه کرخه همراه بوده است. همچنین، روند شاخص خشک‌سالی SDI همواره با روند افزایش EC در رودخانه کرخه همراه نبوده است. به علاوه، افزایش هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های پایین‌دست سد کرخه، احتمالاً بیشتر به دلیل کاهش دبی ناشی از تنظیم دبی توسط سد بوده است. با مشاهده نقطه شکست در سری زمانی دبی و هدایت الکتریکی در سال ۱۳۷۶، مشاهده شد که بروز خشک‌سالی و در نتیجه، افزایش شوری پیش از آبرگیری سد کرخه رخ داده است. همچنین، در سال‌های پس از بهره‌برداری از سد تغییرات هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های عبدالخان و پای پل فاقد روند قابل توجهی است. به نظر می‌رسد در سال‌های پس از بهره‌برداری، سد کرخه تنها عامل مؤثر بر بروز روند افزایش هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های واقع در پایاب نبوده و افزایش بروز خشک‌سالی و افزایش مصارف در مناطق بالادست هم بر کاهش دبی و در نتیجه، افزایش شوری کرخه جنوبی مؤثر بوده‌اند.

**کلمات کلیدی:** تغییر اقلیم، خوزستان، شوری، کیفیت آب، SDI.

## مقدمه

۷۰ و ۸۰ درصد، در بیشتر ایستگاه‌ها بعد از سال ۱۳۷۷ رخ داده است [۴]. مصباح‌زاده و سلیمانی (۱۳۹۷) سری زمانی شاخص (SDI) با سری‌های زمانی شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در بازه‌های زمانی مختلف را به روش همبستگی پیرسون در کل حوضه مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد رابطه زمانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با یکدیگر در سطح ۹۹ درصد معنادار است. وقوع خشک‌سالی در منطقه، اثر خود را با تأخیر دو یا یک ماهه روی منابع آب سطحی نشان داد. از نظر آن‌ها، احتمالاً یکی از دلایل این امر، کارستیک بودن منطقه بوده است [۵]. هیز و همکاران (۱۹۹۹) بیان کردند که شاخص SPI قادر به تشخیص زمان شروع خشک‌سالی است [۶]. این موضوع در تحقیقات هانگ و همکاران (۲۰۰۱) و پاشیاردیس و میکالییدیس (۲۰۰۸) نیز نشان داده شده است [۷ و ۸].

خلیقی سیگارودی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از داده‌های ۲۶ ساله بروز خشک‌سالی در استان مازندران را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد خشک‌سالی علاوه بر محدودیت در منابع آب، کیفیت آب را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۹]. فراستی و معاضد (۱۳۸۶) با بررسی تغییرات فصلی شوری آب رودخانه کرخه در دو ایستگاه آب‌سنجی جلوگیر و پای پل با استفاده از دیاگرام ویلکوکس و به صورت مکانی و زمانی، به این نتیجه رسیدند که در ایستگاه جلوگیر تغییرات میزان شوری تنها تحت تأثیر بارندگی است و در ایستگاه پای پل قبل از آنگیری کیفیت آب نامناسب بوده و محدوده تغییرات شوری در فصول مختلف زیاد بوده و در سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۹ به دلیل خشک‌سالی هر دو ایستگاه دارای شوری بالایی بوده‌اند [۱۱]. امیریان و همکاران (۱۳۸۸) به ارزیابی اثرات خشک‌سالی بر کیفیت آب رودخانه مارون در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۸۷ پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد در سال ۱۳۸۷ یک خشک‌سالی هیدرولوژیکی در حوضه مارون رخ داده و کیفیت آب رودخانه مارون در دوره خشک‌سالی کاهش یافته است [۱۱]. همچنین، طی مطالعه‌ای قیصوری و همکاران (۱۳۹۷) در رودخانه گدارخوش در ایلام، نتیجه گرفتند که خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بر کیفیت آب تأثیرگذار است [۱۲]. طالبی و همکاران (۱۳۹۷) دریافتند که طی دوره ۳۴ ساله آماری در رودخانه زاینده‌رود

خشک‌سالی به شرایطی گفته می‌شود که بر اثر کاهش منابع آبی به میزانی کمتر از حد معمول، شرایط نامناسب اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی رخ می‌دهد. این پدیده پیچیدگی‌های زیادی دارد و تعیین زمان شروع و پایان آن دشوار است. خشک‌سالی علاوه بر ایجاد خسارت‌های ناشی از کمبود آب بر بخش کشاورزی، بر سایر جنبه‌های زندگی بشری از جمله اقتصاد و محیط زیست نیز اثرات گسترده‌ای دارد. همچنین، گسترش اقلیم‌های خشک در مناطق واقع بر کمر بند بیابانی و نیز درون حوضه‌های آبخیز و در نتیجه، خطرات بالقوه این موضوع، مطالعه و برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب را امری اجتناب‌ناپذیر کرده است [۱]. به طور کلی، با توجه به حیطة مورد مطالعه، خشک‌سالی به چهار دسته تقسیم می‌شود که شامل خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی، اقتصادی-اجتماعی و هیدرولوژیکی است. خشک‌سالی هیدرولوژیکی بر اثر کمبود جریان‌های آب سطحی، با توجه به مصارف مشخصی از یک سامانه منابع آب رخ می‌دهد [۲].

مطالعات مختلفی در خصوص خشک‌سالی هیدرولوژیکی در رودخانه‌های ایران، نشان از وقوع آن در برخی سال‌ها دارد. طی سال‌های گذشته، شاخص‌های مختلفی برای پیش‌بینی این پدیده معرفی شده و تکامل یافته است. بارش، مهم‌ترین پارامتری است که در تعریف این شاخص‌ها استفاده شده است. دو شاخص رایج در برآورد میزان خشک‌سالی، شاخص بارش استاندارد (SPI<sup>۱</sup>) و شاخص خشک‌سالی جریان سطحی (SDI<sup>۲</sup>) هستند. شاخص اول مربوط به خشک‌سالی هواشناسی بوده و شاخص دوم با خشک‌سالی هیدرولوژیکی مرتبط است. بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در شمال غرب ایران طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۹ بر اساس شاخص SDI برای دوره‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماه در ۱۴ ایستگاه هیدرومتری نشان داد اغلب ایستگاه‌ها با خشک‌سالی شدید طی دوره مطالعه شده مواجه بودند [۳]. کریمی و همکاران (۲۰۱۵) با روش حد آستانه ثابت، به بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوضه آبریز کرخه پرداختند و دریافتند که حجم کمبود و بیشترین تداوم خشک‌سالی در حد آستانه

1. Standard Precipitation Index  
2. Streamflow Drought Index

بلوچستان را بررسی و تأثیر آن را بر کیفیت منابع آب سطحی این استان مطالعه کردند [۲۰].

درک روند و کیفیت آب در کنترل آلودگی آب، بسیار مهم است. این امر به‌ویژه برای مناطقی که انتظار می‌رود جریان رودخانه در بیشتر سامانه‌های رودخانه‌ای نیمه‌خشک، تحت شرایط تغییر اقلیم، کاهش یابد حائز اهمیت است [۲۱ و ۲۲]. در تحقیق پنا-گوئرو و همکاران (۲۰۲۰) در زمینه ارتباط خشک‌سالی و کیفیت آب رودخانه، شوری و نیز غلظت یون‌های اصلی (کلر، سدیم، سولفات، منیزیم، کلسیم و پتاسیم) همبستگی منفی معناداری با دبی داشت و تقریباً در تمام ایستگاه‌های مورد تجزیه و تحلیل در شرایط خشک‌سالی، افزایش نشان می‌داد [۲۳]. نتایج مشابهی در تحقیقات مومبلانچ و همکاران (۲۰۱۵) [۲۴]، فلورس و همکاران (۲۰۱۷) [۲۵] و هی و همکاران (۲۰۲۲) [۲۶] مشاهده شده است.

در مطالعه هی و همکاران (۲۰۲۲) از الگوریتم تجزیه مجموعه بی‌زی در تجزیه و تحلیل داده‌های کیفیت آب استفاده شده است. در مقایسه با رویکردهای بررسی روند مرسوم (مانند Mann-Kendall)، استخراج روندها و تغییر نقاط با استفاده از استنتاج از رویکرد چندمدلی استفاده شد که امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل را فراهم می‌کرد. آن‌ها روندهای مثبت سیستماتیک در هدایت الکتریکی در منطقه مطالعه شده خود و در دوره خشک‌سالی (۱۹۹۶-۲۰۰۹) در استرالیا یافتند. همچنین، یک مدل رگرسیونی که مبین رابطه بین دبی و EC بود، معرفی کردند و تغییرات روند منطقه‌ای در EC را نتیجه کاهش جریان طی خشک‌سالی دانستند [۲۶]. البته، در برخی مناطق روند افزایشی شوری آب بر اثر کاهش جریان رودخانه نبوده؛ بلکه علت آن ماهیت منبع آب رودخانه یا تخلیه زه‌آب‌های برگشتی به رودخانه بوده است [۲۳].

در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، برای داشتن چشم‌اندازی از وضعیت منابع آب آینده و دوره‌های خشک و تر و اثر احتمالی آن بر شوری آب رودخانه‌ها، اندازه‌گیری بارش و دبی رودخانه‌ها در ایستگاه‌های مختلف یک رودخانه و همچنین، بررسی روند تغییرات شوری آب نسبت به زمان و ارتباط آن با خشک‌سالی، مورد نیاز است [۲۷]. با توجه به اهمیت رود کرخه و وجود ذی‌نفعان مختلف در این حوضه، این تحقیق با هدف بررسی تأثیر

با افزایش شرایط خشک‌سالی، کیفیت آب کاهش یافته است. همچنین، آن‌ها دریافتند خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها باعث شده است که مقادیر یون‌های مختلف در آب تغییر کند و این تغییرات از روند خاصی پیروی می‌کند [۱۳]. شطی و آخوندعلی (۱۳۹۷) تأثیرات دوره خشک‌سالی هیدرولوژیک بر میزان شوری رودخانه کارون را بررسی کردند. در این تحقیق از داده‌های EC و TDS چهار ایستگاه آب‌سنجی گنوند، بامدژ، ملاثنانی و اهواز استفاده شد. همچنین، برای برآورد خشک‌سالی شاخص‌های SDI و SPI مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد هم‌زمان با بروز خشک‌سالی، متوسط هدایت الکتریکی در دو ایستگاه گنوند و اهواز به ترتیب ۳۷ و ۵۶ درصد افزایش داشته است [۱۴]. آزیس و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از شاخص SPI به بررسی تأثیر شاخص خشک‌سالی بر کیفیت جریان رودخانه دز پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد در سال‌های خشک‌سالی، شوری آب دز به طور متوسط ۱۵/۲۴ درصد افزایش یافته است [۱۵].

تراویس (۲۰۰۹) در تحقیقی با بررسی تأثیر خشک‌سالی روی کیفیت آب، نتیجه گرفتند که کیفیت آب رودخانه مزو هنگام خشک‌سالی در کل وخیم بوده و با توجه به دمای آب، انباشتگی برخی از فلزات سنگین و شبه‌فلزات روی داده است [۱۶]. نصرتی (۲۰۱۱) به بررسی اثر خشک‌سالی هیدرولوژیک بر کیفیت آب استان مازندران طی ۲۵ سال آماری (۱۹۸۲-۲۰۰۶) پرداخت و بیان کرد که همبستگی خشک‌سالی هیدرولوژیک از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد رابطه معناداری با کیفیت آب دارد و خشک‌سالی باعث افزایش درصد عناصر آب شده است [۱۷]. ملکوتیان و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفیت شیمیایی رودخانه زیارت با استفاده از یک شاخص خشک‌سالی دریافتند که به جز سولفات در بقیه موارد همبستگی معناداری بین خشک‌سالی و کیفیت شیمیایی آب رودخانه وجود دارد [۱۸]. مازلی (۲۰۱۵) با بررسی اثر خشک‌سالی بر کیفیت آب رودخانه‌ها در برخی کشورها بیان کرد که خشک‌سالی سبب افزایش شوری آب، جلبک‌ها و یون‌های محلول در آب شده و کیفیت آب شیرین را به شدت پایین آورده است [۱۹]. محمودی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از شاخص نمره استاندارد، خشک‌سالی هواشناسی در استان سیستان و

کرخه در ایران و زیرحوضه‌های آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین، مختصات ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی مورد استفاده در تحقیق، به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. ابتدا، نواقص داده‌ها مشخص و بازسازی شد. برای تعیین شدت و دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی از شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI) و دبی جریان‌های رودخانه‌ای (SDI) استفاده شد.

دوره‌های خشک‌سالی هیدرولوژیک بر میزان هدایت الکتریکی آب در ایستگاه‌های منتخب حوضه جنوبی رودخانه کرخه طی دوره ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۶ انجام شد.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه داده‌های بارش ماهانه و دبی در ایستگاه‌های منتخب حوضه رودخانه کرخه مربوط به دوره ۵۲ ساله (۱۳۴۵-۱۳۹۶) مورد استفاده قرار گرفت. موقعیت حوضه

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد مطالعه

ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
۳۲	۳۹-۵۱-۳۱	۲۶-۲۱-۴۸	عبدالخان
۹۲	۴۵-۲۴-۳۲	۵۷-۰۸-۴۸	پای پل
۳۷۰	۰۰-۵۶-۳۲	۰۰-۵۰-۴۷	جلوگیر
۳۲۶	۰۰-۰۴-۴۸	۰۰-۴۸-۳۲	پل زال
۱۱	۰۶-۲۹-۳۱	۵۱-۲۵-۴۸	حمیدیه

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $P_i$  بارش در ماه  $\bar{P}$  میانگین بارش و  $\sigma$  انحراف معیار هستند. دامنه طبقات شدت مورد استفاده برای تعیین ترسالی و خشک‌سالی بر اساس این نمایه در جدول ۳ ارائه شده است.

### شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

برای تعیین و پایش خشک‌سالی و ترسالی شاخص بارش استاندارد شده اولین بار توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شد [۲۸]. این شاخص قابلیت استفاده در مقیاس‌های زمانی مختلف را دارد. شاخص SPI از اختلاف میان مقادیر بارش و بارش میانگین برای یک بازه زمانی مشخص و تقسیم این مقدار بر انحراف معیار بارش به دست می‌آید (رابطه ۱):

جدول ۲. مختصات ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد مطالعه

ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
۶۰	۴۰-۴۹-۳۱	۱۱-۲۳-۴۸	عبدالخان
۹۰	۵۹-۲۳-۳۲	۵۹-۰۷-۴۸	پای پل
۴۵۰	۵۹-۵۵-۳۲	۰۰-۵۰-۴۷	جلوگیر
۵۳	۵۹-۲۸-۳۱	۵۹-۲۵-۴۸	حمیدیه
۱۷۷۳	۱۷-۱۶-۳۴	۱۴-۴۹-۴۸	نامیله
۱۵۰	۴۲-۲۴-۳۲	۵۱-۴۸-۴۷	دشت عباس
۸۰۰	۳۶-۱۸-۳۳	۰۵-۵۲-۴۷	افرینه-کشکان
۱۸۰۰	۰۰-۵۲-۳۳	۰۰-۱۶-۴۸	سراب صید علی
۱۵۵۰	۳۶-۴۲-۳۳	۰۰-۱۵-۴۸	کاکارضا
۷۱۰	۵۹-۸-۳۳	۵۹-۲۲-۴۷	گل زرد
۷۰۳	۱۲-۴۳-۳۳	۴۲-۱۴-۴۷	هلیلان
۱۲۶۸	۵۳-۱۳-۳۴	۴۰-۱۴-۴۷	قورباغستان
۱۳۱۰	۱۳-۳۳-۳۴	۲۴-۴۷-۴۶	دوآب مرک
۱۴۳۷	۴۰-۲۴-۳۴	۳۴-۵۵-۴۷	آران غرب
۱۸۰۲	۴۴-۵۰-۳۴	۱۶-۳-۴۸	آغاجانبلای
۱۵۶۶	۲۵-۱۹-۳۴	۲۳-۱۳-۴۸	وسج

جدول ۳. مقیاس طبقه‌بندی دوره‌های مرطوب، نرمال و خشک بر اساس روش SPI

طبقه	بی‌نهایت مرطوب	مرطوب شدید	مرطوب متوسط	بارش نرمال	خشک‌سالی ملایم	خشک‌سالی شدید	خشک‌سالی حاد
مقدار SPI	بیشتر از ۲	۱/۹۹ تا ۱/۵	۱/۴۹ تا ۱	۰/۹۹ تا -۰/۹۹	-۱/۴۹ تا -۱	-۱/۹۹ تا -۱/۵	کمتر از -۲
کد طبقه	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱

مربوط به I سال هیدرولوژیکی به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{ik} - \bar{V}_k}{S_k} \quad (2)$$

که در آن  $V_k$  و  $S_k$  به ترتیب، میانگین مجموع حجم و انحراف معیار حجم جریان‌های تجمعی برای دوره مبنای (k) در یک مدت طولانی هستند. جدول ۴ حالت‌های مختلف خشک‌سالی را در این روش نشان می‌دهد [۳۱].

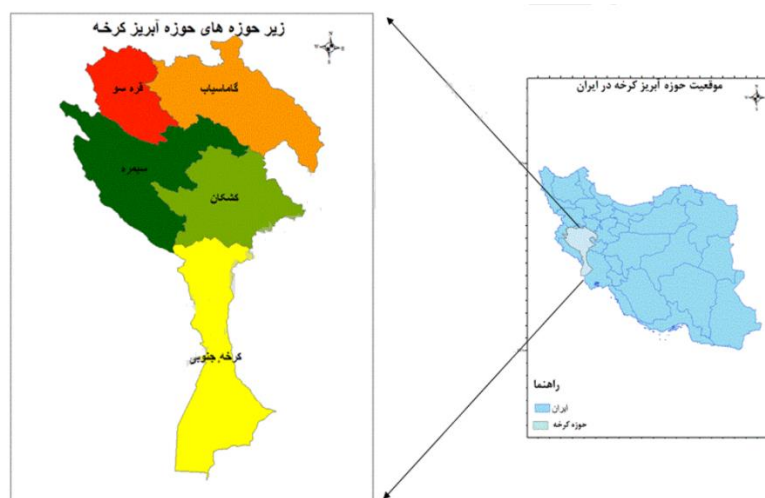
شاخص دبی جریان‌های رودخانه‌ای SDI شبیه شاخص بارش استاندارد است که بر اساس متوسط جریان ماهانه رودخانه‌ها در یک حوضه آبریز است. این شاخص اولین بار توسط بن زوای (۱۹۸۷) پیشنهاد شد [۲۹]. اصول محاسباتی شاخص SDI مشابه شاخص SPI، به این صورت است که مقادیر دبی ماهانه هر ایستگاه هیدرومتری بر توزیع آماری مناسبی برازش داده می‌شود [۳۰]. شاخص خشک‌سالی جریان‌های رودخانه‌ای (SDI) بر اساس حجم تجمعی جریان‌های رودخانه‌ای ( $V_{i,k}$ ) برای دوره مبنای (k)

جدول ۴. حالت‌های مختلف خشک‌سالی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص SDI

وضعیت خشک‌سالی	محدوده SDI
فاقد خشک‌سالی	$SDI \leq 0$
خشک‌سالی خفیف	$-1 \leq SDI \leq 0$
خشک‌سالی متوسط	$-1.5 \leq SDI \leq -1$
خشک‌سالی شدید	$-2 \leq SDI \leq -1.5$
خشک‌سالی خیلی شدید	$SDI < -2$

هیدرولوژیکی بر اساس شاخص دبی جریان (SDI) و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای سال‌های آماری مشخص شد. در نهایت، تغییرات شاخص‌های خشک‌سالی در برابر شوری آب ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی روند سری زمانی دبی و بارش و هدایت الکتریکی مربوط به رودخانه کرخه در بازه زمانی ۱۳۴۵-۱۳۹۶ از آزمون ناپارامتریک من‌کنندال و به منظور تعیین نقطه شکست از آزمون پتیت در نرم‌افزار XLSTAT استفاده شد و نتایج مربوط به پایش و تحلیل خشک‌سالی



شکل ۱. موقعیت حوضه و زیرحوضه‌های کرخه در ایران [۳۲]

## نتایج و بحث

در این تحقیق، روند تغییرات بارش، دبی و شوری آب رودخانه (میزان هدایت الکتریکی) در ایستگاه‌های پای پل، عبدالخان و حمیدیه در بازه زمانی ۵۲ ساله (۱۳۴۵-۱۳۹۶) مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا کل سری زمانی ۵۲ ساله (۱۳۴۵-۱۳۹۶) و با فرض نبود نقطه شکست تعیین روند شد. با توجه به اینکه مثبت بودن شاخص tau نشان‌دهنده صعودی بودن روند و منفی بودن آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند است، در همه ایستگاه‌ها دبی روندی نزولی و هدایت هیدرولیکی در همه ایستگاه‌ها روند

صعودی داشت. این روندها در سطح ۵ درصد معنادار بودند (جدول ۵). شوری که به دلیل وجود یون‌های مختلف در آب و بر اساس هدایت الکتریکی بیان می‌شود، با دبی رودخانه همبستگی منفی داشته و تقریباً در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه روندی صعودی داشته است. فلورس و همکاران (۲۰۱۷)، پنا-گوئررو و همکاران (۲۰۲۰)، شطی و آخوند علی (۱۳۹۷) و رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) به نتایج مشابهی در مورد تغییرات روند دبی و شوری در رودخانه کارون دست‌یافتند [۱۴، ۲۳، ۲۵ و ۳۳].

جدول ۵. نتایج آزمون من کندانل بر سری زمانی هدایت الکتریکی و دبی

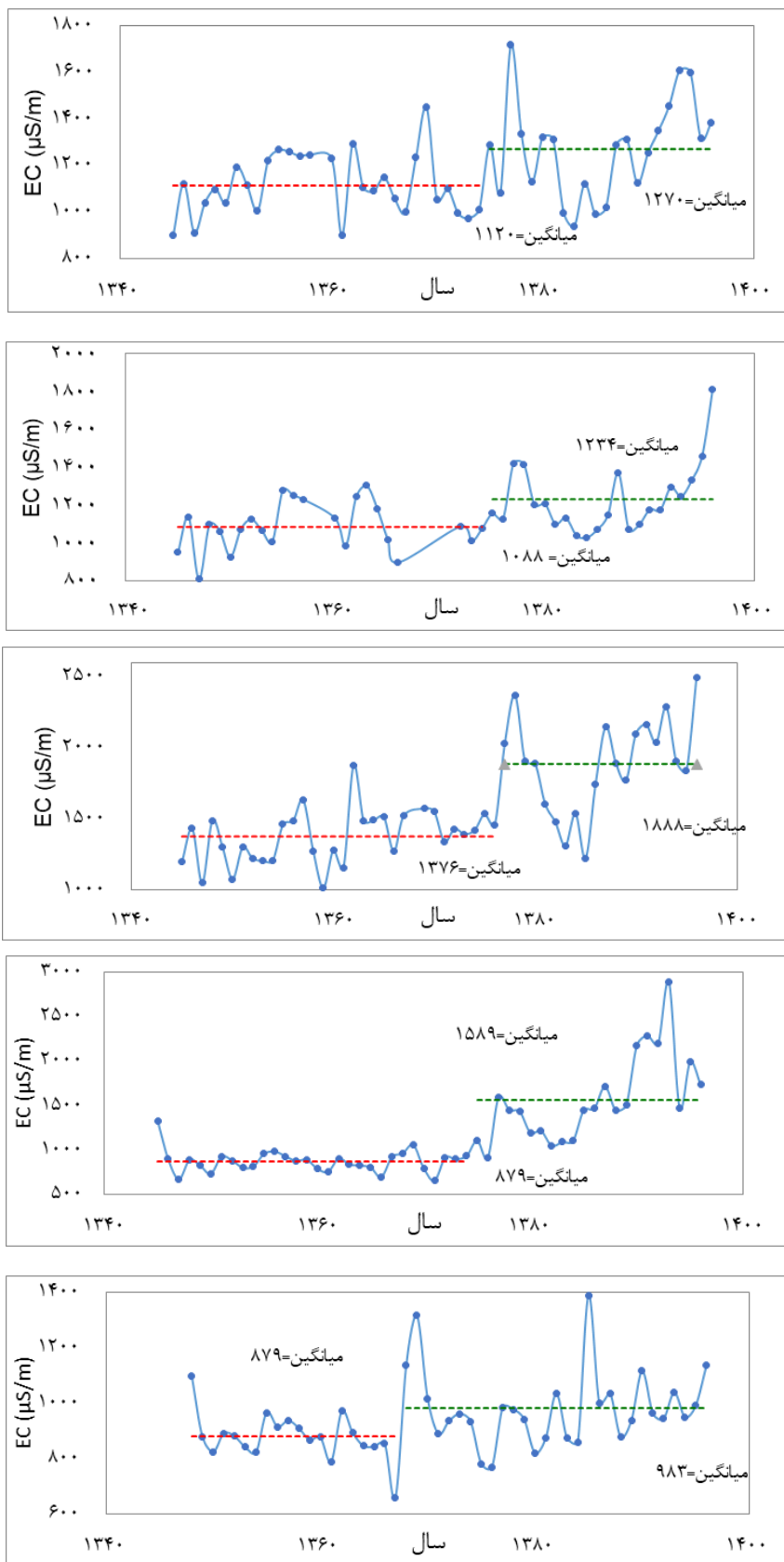
هدایت الکتریکی		دبی		نام ایستگاه
p-value	Kendall's tau	p-value	Kendall's tau	
۰/۰۰۲*	-۰/۴۱۲	<۰/۰۰۰۱*	-۰/۴۱۲	عبدالخان
<۰/۰۰۰۱*	-۰/۴۴۲	<۰/۰۰۰۱*	-۰/۴۴۲	حمیدیه
<۰/۰۰۰۱*	-۰/۳۵۲	۰/۰۰۰*	-۰/۳۵۲	جلوگیر
۰/۰۰۳*	-۰/۴۰۱	<۰/۰۰۰۱*	-۰/۴۰۱	پای پل
۰/۰۰۸*	-۰/۲۱۱	۰/۰۲۸**	-۰/۲۱۱	پل زال

آماره‌های معنادار در سطح ۱ و ۵ درصد به ترتیب با \*\* و \* نشان داده شده‌اند.

به شکل مشابه جونز و وان ولیت (۲۰۱۸) افزایش ۲۱ درصدی شوری را در بروز خشک‌سالی در بررسی ۶۶ ایستگاه در جنوب آمریکا گزارش کردند. طبق نتایج این مطالعه، خشک‌سالی نه تنها با کمبود آب، بلکه با افزایش شوری آب همراه بود [۳۴]. برخی تحقیقات مانند ولف و وان لیت (۲۰۲۱) افزایش شوری ۱۱ درصد در رود راین را علاوه بر کاهش دبی ناشی از افزایش دمای ناشی از کاهش رطوبت حاصل از خشک‌سالی می‌دانند [۳۵].

اگرچه وجود روند معنادار در تغییرات یک متغیر موجب اثبات قطعی دخالت یک پدیده خاص در بروز آن نیست، اما وجود این روند احتمال مؤثر بودن آن را افزایش می‌دهد. تغییرات کمی و کیفی رودخانه‌ها بیشتر از عواملی مانند تغییر کاربری اراضی، تغییرات اقلیمی و نیز ساخت سد تأثیرپذیری دارد [۳۶]. بر اثر این عوامل ممکن است دبی و یا پارامترهای کیفی آب دچار تغییرات ناگهانی یا به بیانی، نقطه شکست در سری زمانی شود. از آنجا که رودخانه کرخه به شکل دائم و گسترده تحت تأثیر این عوامل قرار دارد و برای بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر، آزمون پتیت برای شناسایی نقاط تغییر احتمالی در سری‌های زمانی دبی و

شوری رودخانه انجام شد. این آزمون ناپارامتریک در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه با سطح معناداری ۵ درصد انجام شد. نتایج آزمون نشان داد در هر سه ایستگاه یادشده نقطه تغییر در دبی و هدایت الکتریکی مشاهده شد. بنا به بررسی انجام‌شده مشخص شد سال ۱۳۷۶ برای ایستگاه‌های پای پل، عبدالخان و حمیدیه دارای نقطه شکست در دبی است. این نقطه برای هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های پای پل و عبدالخان در سال ۱۳۷۶ و در ایستگاه حمیدیه در سال ۱۳۷۵ مشاهده شد. با وجود نقطه شکست سری زمانی دو پارامتر مورد بررسی به دو سری در دوره‌های قبل و بعد از شکست تقسیم شدند. این دو سری زمانی دارای روند خاص خود بودند و بررسی جداگانه آن‌ها ضروری است. به طور کلی، نتایج آزمون پتیت نشان‌دهنده افزایش شوری و کاهش دبی از سال ۱۳۷۵ و ۱۳۷۶ است. به رغم اینکه احداث سد کرخه به عنوان عامل اصلی بروز نقطه شکست تلقی می‌شد، نتایج این آزمون نشان داد شکست در سال‌های پیش از آگیری این سد رخ داده است. شکل ۲ نشان‌دهنده سری زمانی شوری و میانگین شوری در بازه‌های زمانی قبل و بعد از آن است.



شکل ۲. سری زمانی هدایت الکتریکی به همراه میانگین‌های قبل و بعد از نقطه شکست و سری زمانی دبی سالانه ایستگاه‌های پای پل، عبدالخان و حمیدیه، جلوگیر و پل زال (به ترتیب از بالا به پایین)

این جز اهمیت بیشتری داشته باشد. نتایج آزمون من کندال در مورد هر یک از دو جزء یادشده نشان داد در سری دوم دبی روند کاهشی داشته، اگرچه این روند تنها در ایستگاه پای پل معنادار بوده است. عدم معناداری تغییرات در بیشتر ایستگاهها نشان می‌دهد جریان آب تنها عامل اثرگذار بر تغییرات شوری نبوده، بلکه سایر عوامل همچون شرایط زمین‌شناختی منطقه هم می‌تواند بر این موضوع مؤثر باشد [۲۳]. به رغم این، در سری اول داده‌ها، در همه ایستگاهها، روند افزایشی، اما فاقد معناداری بوده است. آزمون من کندال بر کل سری روند نزولی را در همه ایستگاهها نشان داده است. این امر نشان می‌دهد در نظر گرفتن روند منفی برای کل سری، بدون توجه به نقطه تغییر، نشان‌دهنده شرایط واقعی موجود در رودخانه نبوده و دبی رودخانه را باید در دو جزء سری ایجادشده و با دو روند مثبت و منفی مد نظر داشت. همچنین، نتایج اعمال آزمون من کندال بر هر جزء سری زمانی هدایت‌الکتریکی نشان می‌دهد روند صعودی در جزء اول و دوم سری حاکم نبوده است. در حالی که در آزمون من کندال بر کل سری، روند صعودی را در همه ایستگاهها نشان داده است. این امر بیانگر عدم سازگاری تحلیل نتایج آماری با همپوشانی واقعیات موضوع مورد بررسی بوده و تکیه بر نتیجه تحلیل آماری ممکن است به رخ دادن اشتباه در نتایج منجر شود.

همچنین، درصد افزایش و یا کاهش دبی و هدایت الکتریکی سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۹۶ نسبت به بازه زمانی قبل از نقطه شکست در جدول ۶ ارائه شده است. بر این اساس، به طور متوسط، دبی نسبت به قبل از نقطه شکست کاهش یافته است. نتایج نشان داد هدایت الکتریکی نسبت به نقطه قبل از شکست ۳۱ درصد افزایش و دبی نسبت به نقطه قبل از شکست ۵۵/۵ درصد کاهش یافته است. بیشترین مقدار کاهش دبی مربوط به میزان ۷۰ درصد مربوطه به ایستگاه حمیدیه و کمترین آن به میزان ۳۷ درصد مربوط به ایستگاه پل زال است. همچنین، بیشترین درصد افزایش شوری در ایستگاه جلوگیر به میزان ۸۰ درصد و کمترین افزایش شوری به میزان ۱۲ درصد در ایستگاه پل زال مشاهده شد. این میزان در محدوده افزایش شوری بر اثر کاهش دبی در تحقیقات گذشته مثل جونز و وان ولایت (۲۰۱۸) [۳۴]، رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) [۳۳] و شطی و آخوندعلی (۱۳۹۷) [۱۴] گزارش شده بود.

با توجه به نتایج آزمون پتیت، داده‌ها به دو سری سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۷۶ و ۱۳۷۶-۱۳۹۷ تقسیم شدند. نتایج آزمون من کندال بر دبی و هدایت الکتریکی در هر یک از دو سری به ترتیب در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. به نظر می‌رسد با توجه به اینکه آگیری سد کرخه در جزء دوم اتفاق افتاده است، بررسی روند تغییرات در

جدول ۶. تغییرات دبی (متر مکعب بر ثانیه) و هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) نسبت به قبل از نقطه شکست

نام ایستگاه	میانگین EC قبل	میانگین EC بعد	درصد افزایش EC	میانگین دبی قبل	میانگین دبی بعد	درصد کاهش دبی
حمیدیه	۱۳۷۵/۸۲	۱۸۸۷/۸۷	۳۷	۲۴۲۴	۶۵۹/۳۶	-۷۰/۳۶
عبدالخان	۱۰۸۸/۱۱	۱۲۳۴/۷	۱۳	۲۲۲۵	۹۸۲/۳۶	-۵۹/۴۶
جلوگیر	۸۷۹/۰۶	۱۵۸۹/۰۲	۸۰	۲۱۱۲	۹۷۶/۰۴	-۵۳/۷۷
پای پل	۱۱۲۰/۱۸	۱۲۶۹/۹۲	۱۳	۲۴۷۶/۴۹	۱۰۶۶/۲۴	-۵۷
پل زال	۸۷۹/۶۸	۹۸۳/۴۵	۱۲	۱۲۰/۶۴	۷۶/۲۱	-۳۷

جدول ۷. نتایج اعمال آزمون من کندال بر هر جزء سری زمانی دبی

نام ایستگاه	نقطه شکست	جزء سری دوم		جزء سری اول	
		p-value	Kendall's tau	p-value	Kendall's tau
عبدالخان	۱۳۷۶	-۰/۲	۰/۲۲۰ ns	۰/۱۰۹	۰/۳۹۴ ns
حمیدیه	۱۳۷۶	-۰/۱۵۸	۰/۳۵۱ ns	۰/۰۸۱	۰/۵۳۰ ns
جلوگیر	۱۳۷۶	-۰/۱۴۷	۰/۳۸۶ ns	۰/۱۴۷	۰/۲۴۳ ns
پای پل	۱۳۷۶	-۰/۳۸۹	۰/۰۱۶*	۰/۱۳۷	۰/۲۸۰ ns
پل زال	۱۳۷۶	-۰/۲۱۱	۰/۲۰۹ ns	۰/۲۵۴	۰/۰۴۲**

\*\*معناداری در سطح ۰/۰۵، \*معناداری در سطح ۰/۰۹۹ و ns فاقد معناداری



جدول ۸. نتایج اعمال آزمون من کندال بر هر جزء سری زمانی هدایت الکتریکی

جزء سری اول		جزء سری دوم		نقطه شکست	نام ایستگاه
p-value	Kendall's tau	p-value	Kendall's tau		
۰/۰۱۷**	۰/۳۰۳	ns۰/۲۰۶	۰/۲۱۱	۱۳۷۶	حمیدیه
ns۰/۳۸۵	۰/۱۳	ns۰/۱۷۴	۰/۲۱۹	۱۳۷۵	عبدالخان
ns۰/۶۱۰	۰/۰۶۷	*۰/۰۰۱	۰/۵۲۴	۱۳۷۵	جلوگیر
ns۰/۶۸۲	۰/۰۵۵	ns۰/۱۱۰	۰/۲۵۷	۱۳۷۵	پای پل
ns۰/۱۶۵	-۰/۲۳۲	ns۰/۳۲۴	۰/۱۳۳	۱۳۶۷	پل زال

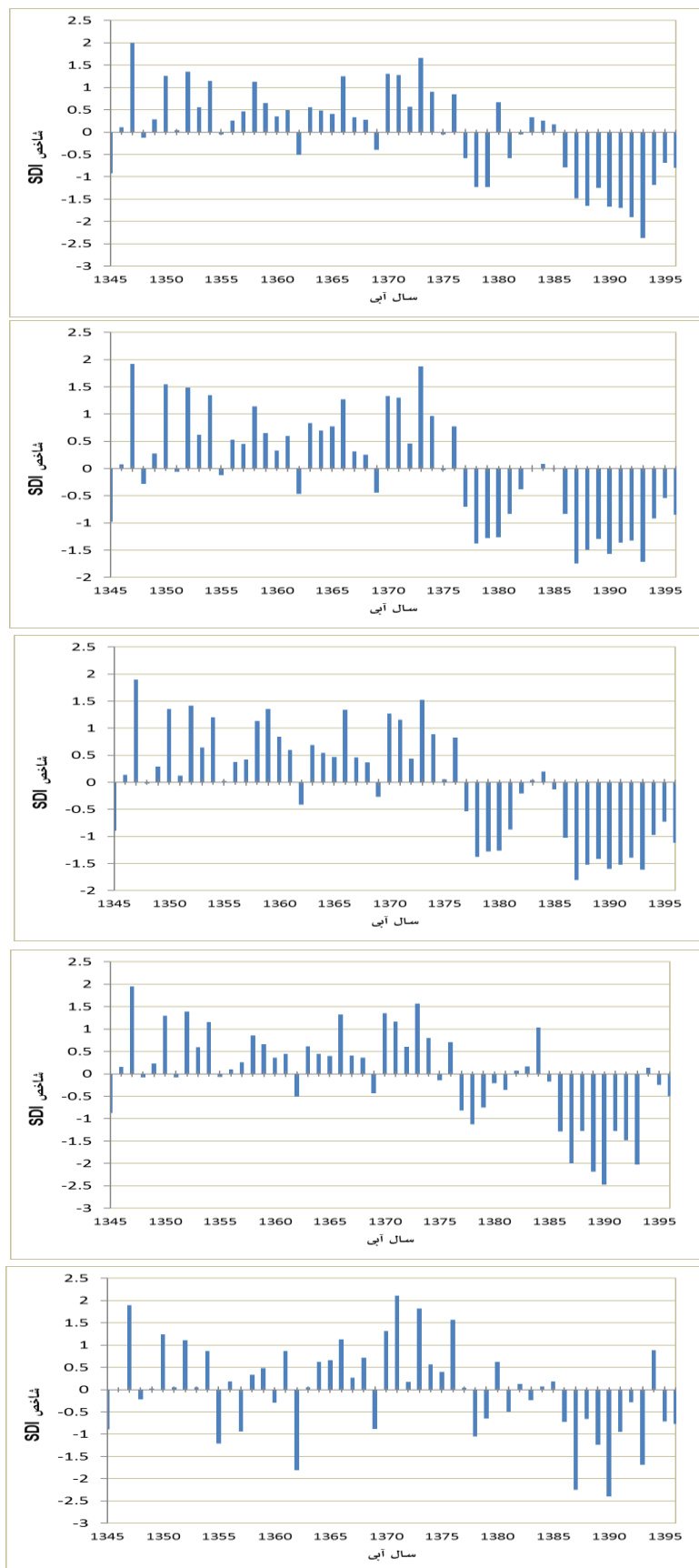
\*\*معناداری در سطح ۰/۰۵، \*معناداری در سطح ۰/۰۱ و ns فاقد معناداری

### بررسی شاخص‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی

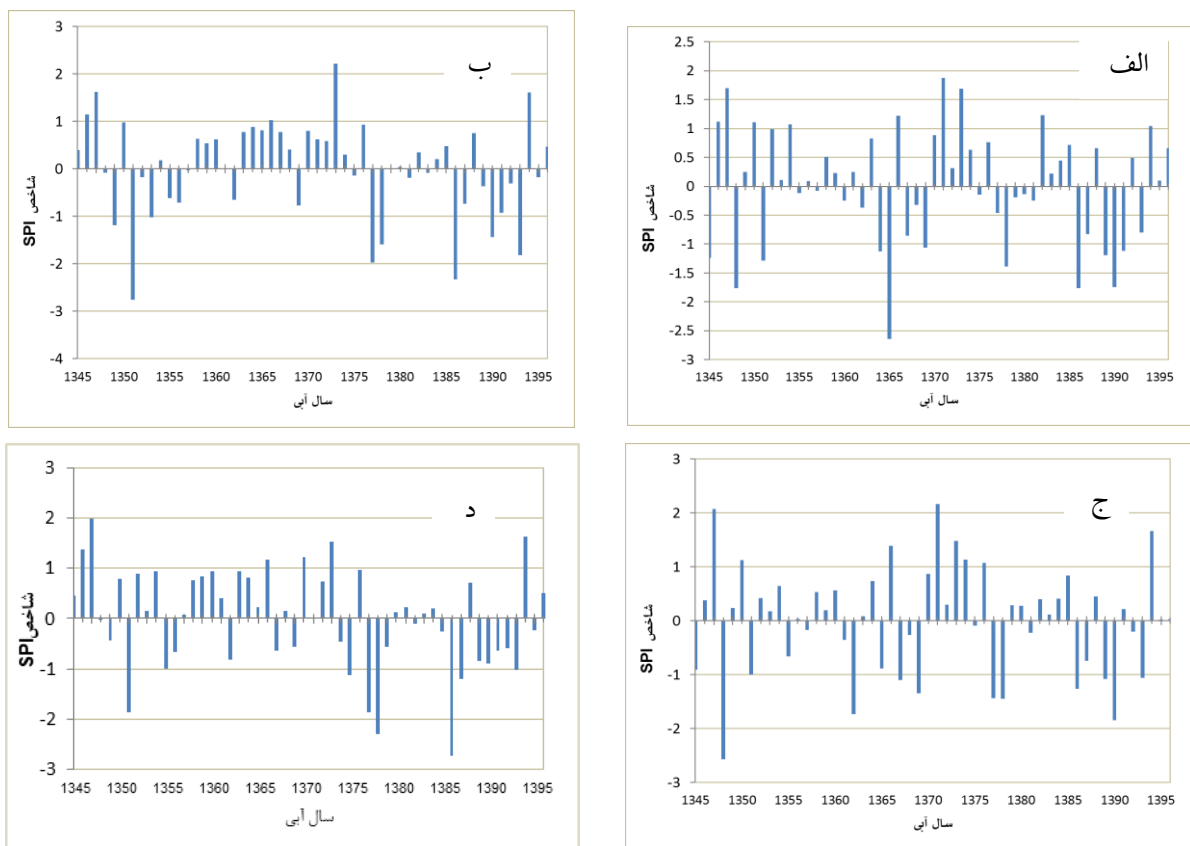
با توجه به اینکه نقطه شکست حاصل از آزمون پتیت با زمان آگیری سد کرخه (سال ۱۳۸۱) دارای اختلاف زمانی بود، بروز خشک‌سالی به عنوان عامل تأثیرگذار بر جابه‌جایی نقطه شکست مورد توجه قرار گرفت. برای بررسی این موضوع دو شاخص هیدرولوژیکی SDI و هواشناسی SPI انتخاب شدند. پس از بررسی شاخص SDI در ایستگاه‌های پایین‌دست مشخص شد که همه ایستگاه‌ها قبل و بعد از نقطه شکست خشک‌سالی رخ داده است (شکل ۳). در ایستگاه عبدالخان از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶ مقدار شاخص SDI به صورت متمادی منفی بوده و خشک‌سالی پی‌درپی با درجات مختلف رخ داده است. با مقایسه دوره آماری ۱۰ ساله پایانی نسبت به ۱۰ سال گذشته آن مشخص شد که خشک‌سالی‌ها افزایش یافته است. در ایستگاه حمیدیه در سال‌های مورد بحث شرایط مشابه بوده است. در سایر ایستگاه‌ها هم به صورت کمابیش شرایط مشابهی مشاهده شد.

بر اساس مقادیر SDI به‌دست‌آمده، در سال‌های پس از نقطه شکست، در همه ایستگاه‌های پایین‌دست بروز خشک‌سالی مشهود بود، اگرچه این نقطه با سال شروع آگیری سد کرخه مطابقت نداشت. بنابراین، برای بررسی بیشتر، بارش در ایستگاه‌های بالادست به عنوان شاهدی بر کاهش دبی به وسیله شاخص خشک‌سالی هواشناسی بررسی شد. به این منظور، شاخص بارش استاندارد، SPI، انتخاب و مقادیر آن با استفاده از داده‌های بارش در ۱۲ ایستگاه از ایستگاه‌های باران‌سنجی بالادست کرخه تعیین شد. برای انجام این امر، از هر یک از چهار زیرحوضه

بالادست کرخه (سیمره، قره‌سو، کشکان و گاماسیاب) سه ایستگاه باران‌سنجی انتخاب و داده‌های آن‌ها جهت تعیین شاخص SPI در سال‌های مختلف استفاده شد. بررسی تغییرات شاخص SPI نشان داد در بسیاری از ایستگاه‌های بالادست در مدت زمانی جزء سری دوم (سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۹۷) خشک‌سالی رخ داده است. این موضوع در هر یک از چهار زیرحوضه بالادست کرخه به‌وضوح قابل مشاهده بود. در شکل ۴ روند خشک‌سالی در ۴ ایستگاه هلیلان، قورباغستان، آفرینه و دوآب مرک به‌ترتیب به عنوان نماینده از چهار زیرحوضه سیمره، قره‌سو، کشکان و گاماسیاب ارائه شده است. در واقع، این موضوع نشان‌دهنده تطابق زمانی بروز خشک‌سالی هواشناسی با خشک‌سالی هیدرولوژیکی است. نتایج مطالعات مشابه (شطی و آخوندعلی، ۱۳۹۷) نشان می‌دهد عوامل مختلفی مثل انتقال بین حوضه‌ای و افزایش برداشت‌ها در بالادست می‌تواند بر بروز خشک‌سالی هیدرولوژیکی در پایین‌دست رودخانه تأثیرگذار باشد [۱۴]. تعیین سهم و میزان تأثیر هر یک از عوامل نیازمند بررسی دقیق و جامع است، اما با وجود مشخص نبودن دقیق مقادیر برداشت در بالادست، خشک‌سالی هواشناسی در بالادست را می‌توان به عنوان عامل اصلی بروز خشک‌سالی هیدرولوژیکی در پایین‌دست در سال‌های پس از نقطه شکست تا زمان آگیری در نظر گرفت. برخی دیگر از محققان مثل ون ولیت و زولسمن (۲۰۰۸) افزایش شوری در این دوره را ناشی از کاهش ظرفیت رقیق‌سازی منابع آلاینده نقطه‌ای در شرایط خشک‌سالی می‌دانند [۳۷].



شکل ۳. نتایج بررسی خشکسالی سالانه ایستگاه‌های پای پل، عبدالخان، حمیدیه، جولوگیر و پل زال (به ترتیب از بالا)



شکل ۴. نتایج بررسی خشک‌سالی هواشناسی براساس شاخص SPI در ایستگاه‌های باران‌سنجی بالادست: الف. هلیلان (سیمره) - ب. قورباغستان (قره‌سو) - ج. آفرینه (کشکان) - د. دوآب مرک (گاماسیاب)

کیفیت آب رودخانه کرخه در بازه مورد بررسی براساس استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست [۳۹] در خصوص کیفیت آب شرب و صنعتی و دستورالعمل فائو [۴۰] و نشریه ۳۵۳ سازمان برنامه و بودجه در خصوص کیفیت آب کشاورزی بررسی شد. در ایستگاه عبدالخان در سال ۱۳۴۵-۱۳۴۶ با وجود خشک‌سالی ملایم هدایت الکتریکی حدود ۹۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده که از نظر شرب، صنعت و کشاورزی دارای کیفیت مناسبی بوده است. از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۷۶ (به‌جز در سال‌های ۱۳۴۷ و ۱۳۶۱ و ۱۳۶۶ که هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود) هدایت الکتریکی بیشتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده که با توجه به جدول‌های استاندارد کیفی جهت مصارف گروه ۲ شرب، گروه ب صنعت و گیاهان کم‌شور قابل استفاده بوده است. از سال ۱۳۷۷-۱۳۷۸ شاهد خشک‌سالی‌های پی‌درپی بوده که باعث بالا رفتن EC شده و مناسب مصارف گروه یک شرب، گروه ب صنعت و گیاهان با تحمل

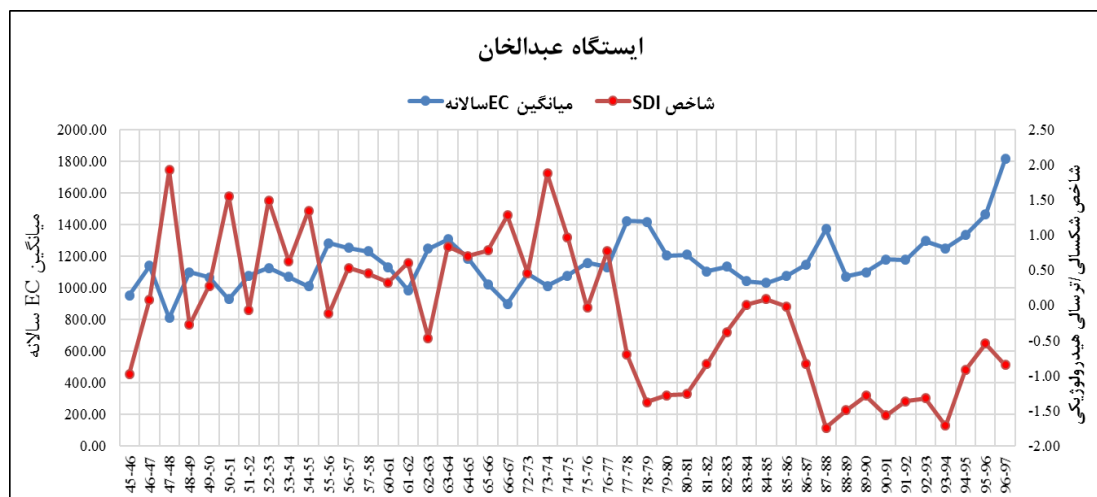
روند تغییرات شوری در ایستگاه‌های پایین دست کرخه کیفیت آب رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مثل ورود آلاینده‌ها تغییرات زیادی دارد. این تغییرات هم در طول رودخانه و هم در برهه‌های زمانی مختلف به‌وضوح قابل مشاهده است. از جمله پارامترهای کیفی آب رودخانه که تغییرات زمانی و مکانی قابل توجهی دارد، میزان مواد محلول یا به بیانی شوری است. در رودخانه کرخه، فارغ از سایر عوامل مؤثر، بروز خشک‌سالی و تغییرات دبی ناشی از وجود سد تأثیر زیادی بر شوری آب در نقاط مختلف آن داشته است. خشک‌سالی باعث افزایش قابل توجهی در شوری می‌شود و رابطه مستقیمی بین دوره‌های با دبی کم رودخانه و شوری بالای آب آن گزارش شده است. در این شرایط تغییر در جریان‌های تخلیه‌ای به رودخانه می‌تواند به مقدار قابل توجهی رسانایی غلظت مواد محلول موجود را افزایش دهد [۳۸].

بدیهی است قابلیت استفاده از آب رودخانه برای مصارف گوناگون با توجه به شوری آن ارزیابی می‌شود.

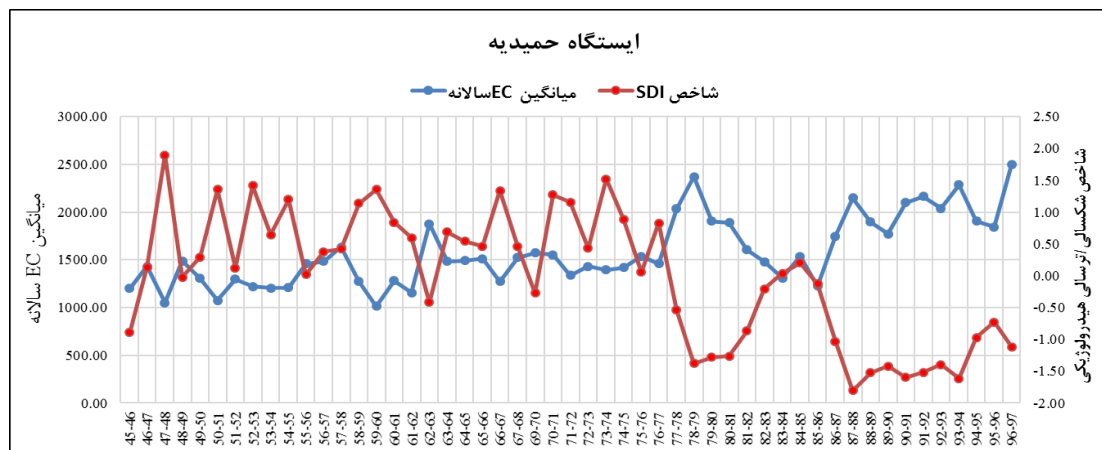
در ایستگاه جلوگیر در سال ۱۳۴۵-۱۳۴۶ که خشک‌سالی ملایم بروز یافت با وجود EC ۱۳۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، آب برای مصارف گروه دو شرب و گروه ب صنعت قابل استفاده و نیز آبیاری گیاهان با تحمل کم شوری قابل استفاده بوده است. از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۷۶ هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده که مناسب گروه‌های الف شرب، الف صنعت و گیاهان با تحمل کم شوری بوده است. از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ خشک‌سالی‌های پی‌درپی در ایستگاه جلوگیر رخ داده است. بنابراین، از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ برای مصارف گروه‌های دو شرب، ب صنعت قابل استفاده و برای آبیاری گیاهان غیرشور، غیرقابل استفاده بود. از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ EC بالاتر از ۲۱۷۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. در نتیجه، آب برای مصارف شرب، غیرقابل استفاده و جهت مصارف گروه ج صنعت و گیاهان کم شور و لب شور قابل استفاده بوده است. در این ایستگاه در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ حداکثر EC با بروز خشک‌سالی بسیار شدید همراه بود. از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ با وجود اینکه وضعیت نرمال هیدرولوژیکی، همچنان EC در سطح بالای ۱۴۷۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر گزارش شده که این نشان می‌دهد شوری احتمالاً تحت تأثیر خشک‌سالی‌های سال‌های ماقبل و برداشت‌های بی‌رویه و ورود زه‌آب از منابع مختلف بوده است (شکل ۷).

کم شوری نبوده است. درخور یادآوری است از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵، با وجود نرمال بودن وضعیت هیدرولوژیکی، هدایت هیدرولیکی بیش از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده که با این شرایط فقط قابل استفاده برای مصارف گروه ۲ آب شرب و گروه ب صنعت بوده، برای آبیاری گیاهان غیرشور غیرقابل استفاده بوده است. این امر نشان می‌دهد EC تحت تأثیر خشک‌سالی‌های سال‌های قبل و برداشت‌های بی‌رویه بوده است (شکل ۵).

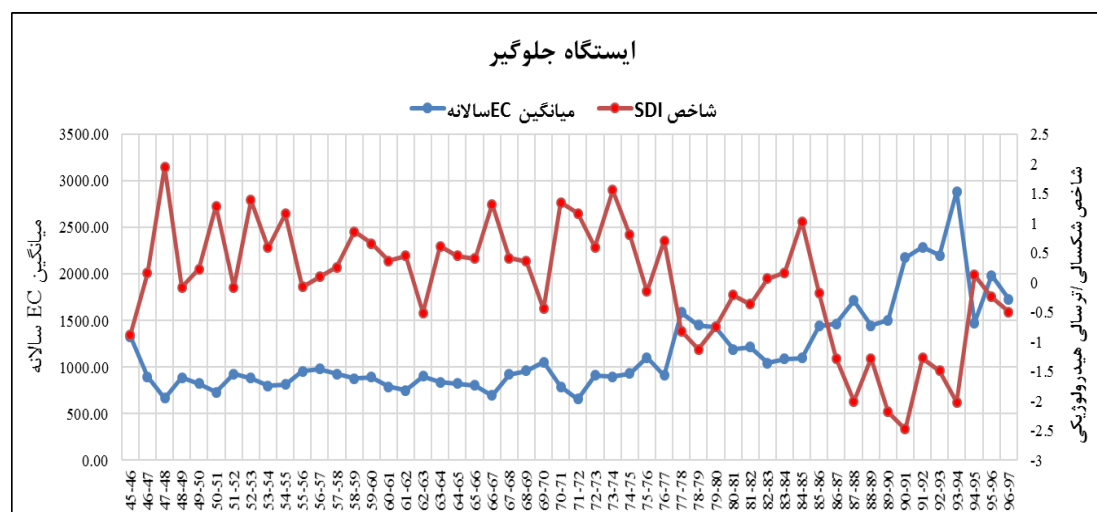
در ایستگاه حمیدیه در سال ۱۳۴۵ با وجود خشک‌سالی ملایم هدایت الکتریکی حدود ۱۲۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر گزارش شده که مناسب برای مصارف گروه دو آب شرب، گروه ب صنعت بوده و برای گیاهان کم‌شور قابل استفاده بوده است. از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۷۶ هدایت الکتریکی بیشتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود که برای مصارف گروه دو شرب، گروه ب صنعت و گیاهان با تحمل کم شوری قابل استفاده بوده است. از سال ۱۳۷۷ شاهد خشک‌سالی‌های پی‌درپی بوده که باعث بالا رفتن EC شده در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸ EC برای آب شرب، مناسب نبوده از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ با وجود وضعیت هیدرولوژیکی طبیعی در این ایستگاه، همچنان EC بالای ۱۲۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده است. در نتیجه، آب برای گروه دو آب شرب، گروه ب صنعت، قابل استفاده بوده و به منظور آبیاری گیاهان غیرشور غیرقابل استفاده بوده است (شکل ۶).



شکل ۵. سری زمانی شاخص SDI و میانگین EC سالانه ایستگاه عبدالخان



شکل ۶. سری زمانی شاخص SDI و میانگین EC سالانه ایستگاه حمیدیه



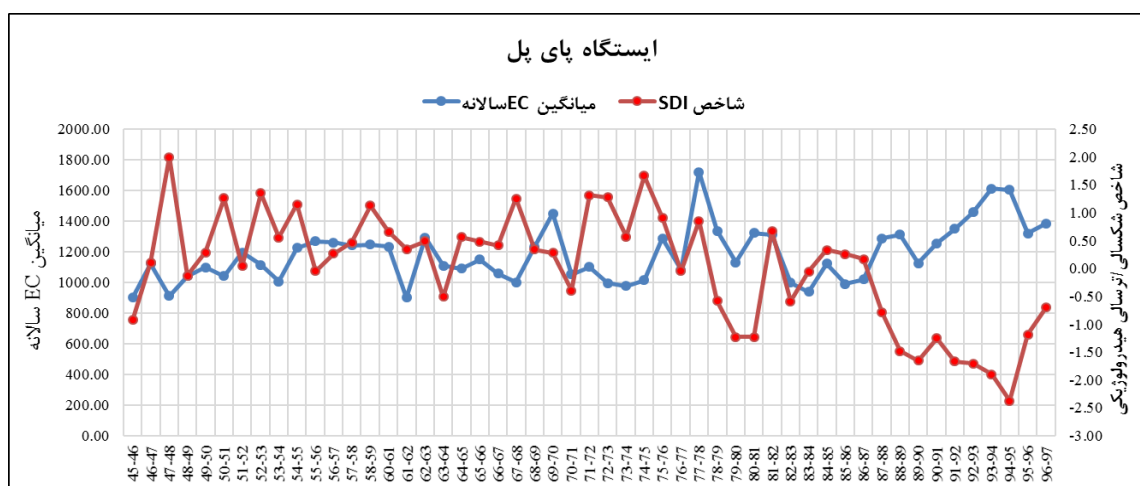
شکل ۷. سری زمانی شاخص SDI و میانگین EC سالانه ایستگاه جلوگیر

مشاهده شد. این مقدار مناسب گروه یک آب شرب و گروه الف صنعت و گیاهان غیرشور نبوده است. حداکثر EC در ایستگاه پای پل در سال ۱۳۷۷-۱۳۷۸ با بروز خشک‌سالی ملایم ثبت شده، که مناسب گروه دو شرب و گروه ب صنعت و گیاهان با تحمل کم شوری بوده است (شکل ۸). در ایستگاه پل زال هدایت الکتریکی در سال ۱۳۴۸ حدود ۱۱۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده که مناسب گروه دو شرب، گروه ب صنعت و گیاهان با تحمل کم شوری بوده است. از سال ۱۳۴۹ تا سال ۱۳۷۷ (به جز سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۰ که هدایت الکتریکی بالای ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده و مناسب گروه دو شرب، ب صنعت و گیاهان با تحمل کم شوری بوده است) هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده و قابل استفاده برای گروه یک شرب، الف

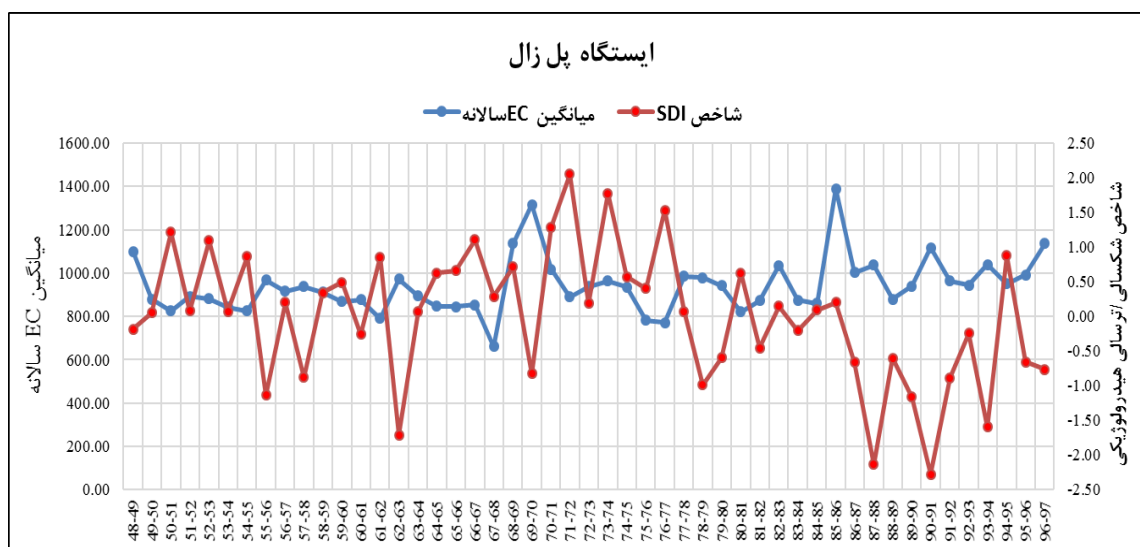
در ایستگاه پای پل در سال ۱۳۴۵ با وجود خشک‌سالی ملایم EC حدود ۹۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر که مناسب برای مصارف گروه یک شرب، گروه الف صنعت و گیاهان با تحمل کم شوری بوده است. از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۷۶ (به جز در سال‌های ۱۳۴۷، ۱۳۶۱، ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده که مناسب گروه یک شرب، الف صنعت و گیاهان با تحمل کم شوری بوده است) هدایت الکتریکی بالاتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر ثبت شده که قابل استفاده برای گروه دو شرب، گروه ب صنعت و گیاهان کم شور بوده است. از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۶ خشک‌سالی‌های پایی (به جز سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ که وضعیت هیدرولوژیکی نرمال بود و EC در این بازه زمانی تغییرات چندانی نداشته است) EC بالاتر

۱۳۸۶ که از لحاظ هیدرولوژیکی در وضعیت نرمال بوده حداکثر EC در ایستگاه پل زال ثبت شده است. این بیانگر تأثیر مواردی غیر از میزان دبی رودخانه بر هدایت الکتریکی است. در سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۸۶ (هیدرولوژیک نرمال) ۱۳۹۰-۱۳۹۱ (خشک‌سالی بسیار شدید) و ۱۳۹۶-۱۳۹۷ (خشک‌سالی ملایم) ECهای بالا ثبت شده است که برای گروه دو شرب، گروه ب صنعت قابل استفاده و برای گیاهان غیرشور غیرقابل استفاده بوده است (شکل ۹).

صنعت و گیاهان حساس و با تحمل کم شوری بوده است. از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۶ خشک‌سالی‌های پیاپی رخ داده (به استثنای سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۸۵ و سال ۱۳۹۲ که از لحاظ هیدرولوژیکی در وضعیت نرمال بوده و EC به همان نسبت به سال‌های قبل و بعد تغییر چندانی نداشته است) که برای مصارف گروه یک شرب، گروه الف و ب صنعت، قابل استفاده ولی برای گیاهان غیرشور، غیر قابل استفاده بوده است. نکته جالب توجه این است که در سال ۱۳۸۵-



شکل ۸. سری زمانی شاخص SDI و میانگین EC سالانه ایستگاه پای پل



شکل ۹. سری زمانی شاخص SDI و میانگین EC سالانه ایستگاه پل زال

مشخص شد، اگرچه در برخی دوره‌ها قدری تفاوت در مدت و شدت بروز این دو پدیده واضح بود. از آنجا که در شرایط خشک‌سالی تأثیر آب زیرزمینی و منابع گسترده در افزایش شوری معنادار نیست [۴۱]. افزایش شوری تنها به دلیل بروز

با مقایسه نتایج حاصل از محاسبه شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI) در ایستگاه‌های مورد مطالعه، تطابق موجود در دوره‌های خشک‌سالی و تر سالی هیدرولوژیک و هواشناسی

می‌رسد سد کرخه در سال‌های پس از بهره‌برداری تأثیر قابل توجهی بر بروز روند افزایش هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های واقع در پایاب به همراه نداشته است. به طور کلی، کاهش دبی و در نتیجه، افزایش شوری را می‌توان ناشی از افزایش بروز خشک‌سالی و افزایش مصارف در مناطق بالادست دانست. نتایج این تحقیق نشان داد کاهش دبی تنها ناشی از احداث سد کرخه و آبیگری آن نیست، بلکه تحت تأثیر خشک‌سالی‌های زیرحوضه‌های بالادست هم بوده است. همچنین، تحلیل کل سری زمانی نشان می‌دهد خشک‌سالی همواره با روند افزایش EC در رودخانه کرخه همراه نبوده است. برای حل مشکل خشک‌سالی تنها نباید بر افزایش تأمین آب و کاهش مصرف، به عنوان شاخص‌های کمی توجه کرد، بلکه شاخص‌های کیفی از جمله شوری هم باید مورد توجه قرار گیرد و از پیامدهای آن برای توسعه اقدامات کاهش عوارض خشک‌سالی و سازگاری با آن استفاده کرد.

#### قدردانی

این تحقیق مستخرج از پایان‌نامه دانشجویی بوده و به این وسیله از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌شود.

#### منابع

- [1].Zahrayee B. Determining the effects of climate change on precipitation and surface runoff in the Karkheh watershed. 2016.
- [2].Wilhite DA, Glantz MH. Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water Int.* 1985;10(3):111-20.
- [3].Tabari H, Nikbakht J, Hosseinzadeh Talaei P. Hydrological Drought Assessment in Northwestern Iran Based on Streamflow Drought Index (SDI). *Water Resour Manag.* 2013;27(1):137-51.
- [4].Karimi M, Shahedi K BM. Analysis of hydrological drought using constant threshold level method (Case study: Karkheh River Basin, Iran). *J Water Manag Res [Internet].* 2015;6(11):59-72.
- [5].MesbahZadeh T, SoleimaniSardoo F. Temporal trend study of hydrological and meteorological drought in Karkheh watershed. *Iran J Watershed Manag Sci Eng.* 2018;12(40):105-14.

خشک‌سالی و یا ترسالی فقط تابع مقدار بارش و جریان رودخانه‌ای نبوده، بلکه به عوامل انسانی دیگری همچون احداث سد و آبیگری در بالادست و برداشت آب و انتقال بین حوضه‌ای و برداشت برای مصارف کشاورزی و صنایع و ورود پساب وابسته است. به طور کلی، بروز خشک‌سالی تنها با کاهش دسترسی همراه نبوده، بلکه از تبعات آن افزایش شوری آب است. در نتیجه، هنگام کمی‌سازی اثرات خشک‌سالی، باید بر هر دو مورد توجه شود. به علاوه، مدیریت جامع منابع آب در دوره‌های خشک‌سالی باید با در نظر گرفتن تغییرات شوری انجام شود.

#### نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق بررسی وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوضه کرخه جنوبی و تأثیر آن بر تغییرات زمانی و مکانی شوری در آن در بازه زمانی ۱۳۴۷-۱۳۹۶ و اثر و سهم سد کرخه در بروز این تغییرات بود. با توجه به وجود تفاوت در سال بروز نقطه شکست داده‌های دبی و هدایت الکتریکی با سال آبیگری سد کرخه و تأثیر احتمالی خشک‌سالی در بالادست سد کرخه، وضعیت خشک‌سالی هواشناسی در زیرحوضه‌های بالادست سد کرخه با استفاده از شاخص SPI بررسی شد. در نهایت، با مقایسه مقادیر شوری و خشک‌سالی به تحلیل نتایج پرداخته شد. بررسی‌ها با استفاده از شاخص SDI نشان داد در ایستگاه‌های عبدالخان، حمیدیه، پای پل و پل زال از سال ۱۳۸۶-۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۷ خشک‌سالی‌های پی‌درپی با شدت‌های مختلف رخ داده است.

نتایج نشان داد هدایت الکتریکی در رودخانه کرخه روند افزایشی داشته است. این افزایش با کاهش شدید دبی، ناشی خشک‌سالی‌های متوالی، در رودخانه کرخه همراه بوده است. به علاوه، افزایش هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های پایین‌دست سد کرخه، احتمالاً به دلیل کاهش دبی ناشی از تنظیم دبی توسط سد، بیشتر بوده است. با مشاهده نقطه شکست در سری زمانی دبی و هدایت الکتریکی در سال ۱۳۷۶، مشخص شد بروز خشک‌سالی و در نتیجه، افزایش شوری پیش از آبیگری سد کرخه رخ داده است. به علاوه، در سال‌های پس از بهره‌برداری از سد تغییرات هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های عبدالخان و پای پل فاقد روند قابل توجهی است. به بیان دیگر، به نظر

- [6]. Hayes MJ, Svoboda MD, Wilhite DA, Vanyarkho O V. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *Bull Am Meteorol Soc.* 1999;80(3):429–38.
- [7]. Hong Wu, Michael J. Hayes, Albert Weiss, Qi Hu. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *Int J Climatol.* 2001;21(6(2001)).
- [8]. Pashiardis S, Michaelides S. Implementation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Reconnaissance Drought Index (RDI) for Regional Drought Assessment: A case study for Cyprus. *Eur Water.* 2008;23(1993):57–65.
- [9]. Khalighi Sigaroudi S, Sadeghi sangdehi S., Awsati K, Ghavidel Rahimi Y. The Study of Drought and Wet Year Assessment models for Stations in Mazandaran province. *Iran J Range Desert Reseach.* 2009;16(1):44-54 (In Persian).
- [10]. Farasati M MH. Investigating the effect of Karkheh Reservoir Dam on changes in the salinity of water entering the reservoir. In: 9th National Seminar on Irrigation and Evaporation Reduction. Kerman; 2017.
- [11]. Amirian A, Tabari, H, Kashkouli, HA, Hassounizadeh H S. Assessing the effects of drought on the water quality of the Maroon River. In: 8th International River Engineering Conference. Ahvaz; 2009.
- [12]. Gheisouri M, Soltani-Gerdefaramarzi S GM. Assessment of Meteorological and Hydrological Drought and its Effect on Water Quality: (Case Study: Godarkhosh River). *J Irrig Sci Eng.* 2018;41(4):91–101.
- [13]. Talebi A, Elmi MR, Rajabi-Mohammadi F PS. Trend Investigation of Water Quality Variations in Zayande-Roud River During Dry and Wet Years. *Environ Water Eng.* 2018;4(4):310–20.
- [14]. Shatti S, Akhoond-Ali AM. Analysis the Effects of Recent Hydrological Drought on Karun River Salinity. *Iran J Irrig Drain [Internet].* 2018;12(5):1189-1202 (In Persian).
- [15]. Azish S, Asareh A, Khodadadi Dehkordi D. Effect of Drought on the Water Quality and Quantity of Dez River. *Iran-Water Resour Res.* 2019;15(2):306–18.
- [16]. Elsdon TS, De Bruin MBNA, Diepen NJ, Gillanders BM. Extensive drought negates human influence on nutrients and water quality in estuaries. *Sci Total Environ.* 2009;407(8):3033–43.
- [17]. Nosrati K. The effects of hydrological drought on water quality. *IAHS-AISH Publ.* 2011;348:51–6.
- [18]. Malakootian M, Ahmadian M, Ahrampoush M HA. Investigation of water quality index based on NSFQI index in Bardsir city. In: 14th National Conference on Environmental Health. Yazd; 2011.
- [19]. Mosley LM. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Rev.* 2015;140:203–14.
- [20]. Mahmoudi P, Tavousi T SA. Drought and Its Effects on Groundwater Resources Quality in Sistan and Baluchestan Province. *J Water Res Agric.* 2015;29(1):21–35.
- [21]. Hipsey MR, Mosley LM, Zammit B, Leyden E, Heneker TM, Skinner D, et al. The Impact of Extreme Low Flows on the Water Quality of the Lower Murray River and Lakes (South Australia). *Water Resour Manag.* 2012;26:3923–46.
- [22]. Saft M, Western AW, Zhang L, Peel MC, Potter NJ. The influence of multiyear drought on the annual rainfall-runoff relationship: An Australian perspective. *Water Resour Res.* 2015;51(4):2444–63.
- [23]. Peña-Guerrero MD, Nauditt A, Muñoz-Robles C, Ribbe L, Meza F. Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. *Hydrol Sci J.* 2020;65(6):1005–21.
- [24]. Momblanch A, Paredes-Arquiola J, Munné A, Manzano A, Arnau J, Andreu J. Managing water quality under drought conditions in the Llobregat River Basin. *Sci Total Environ.* 2015;503–504:300–18.
- [25]. Flores M, Núñez J, Oyarzún J, Freixas G, Maturana H, Oyarzún R. Surface water quality in a sulfide mineral-rich arid zone in North-Central Chile: Learning from a complex past, addressing an uncertain future. *Hydrol Process.* 2017;31(3):498–513.
- [26]. He Z, Yao J, Lu Y, Guo D. Detecting and explaining long-term changes in river water quality in south-eastern Australia. *Hydrol Process.* 2022;36(11).
- [27]. Hassanzadeh Y, Abdi-Kordani A F-FA. Drought Forecasting Using Genetic Algorithm and Conjoined Model of Neural Network-Wavelet. *J Water Wastewater.* 2012;23(3):48–59.



- [28]. McKee TB, Doesken NJ KJ. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA; 1993. p. 179–83.
- [29]. Ben-Zvi A. Indices of hydrological drought in Israel. *J Hydrol*. 1987;92(1–2):179–91.
- [30]. Shukla S, Wood AW. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophys Res Lett*. 2008;35(2).
- [31]. Nalbantis I, Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour Manag*. 2009;23(5):881–97.
- [32]. Koushki R, Rahimi M, Amiri M, Mohammadi M, Dastorani J. Investigation of relationship between meteorological and hydrological drought in Karkheh watershed. *Iran J Ecohydrol* [Internet]. 2017;4(3):687–98.
- [33]. Rahmati H, Boroomandnasab S, Izadpanah Z AM. Detecting abrupt and gradual changes in water quality parameters at the downstream stations of Gotvand-Olia Dam. *Iran J Irrig Drain*. 2018;12(2):458–71.
- [34]. Jones E, van Vliet MTH. Drought impacts on river salinity in the southern US: Implications for water scarcity. *Sci Total Environ*. 2018;644:844–53.
- [35]. Wolff E, van Vliet MTH. Impact of the 2018 drought on pharmaceutical concentrations and general water quality of the Rhine and Meuse rivers. *Sci Total Environ*. 2021;778.
- [36]. Golzari S, Abyaneh HZ, Dinan NM, Delavar M, Wagner PD. Modeling the effects of human influences on water quality and quantity in the Zarrineh River Basin, Iran. *J Hydro-Environment Res*. 2022;40:51–63.
- [37]. van Vliet MTH, Zwolsman JGG. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *J Hydrol*. 2008;353(1–2):1–17.
- [38]. Prathumratana L, Sthiannopkao S, Kim KW. The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River. *Environ Int*. 2008;34(6):860–6.
- [39]. Anonymous. The standards of Iranian waters. Tehran; 2016.
- [40]. Ayers, RS; Westcot D. Water quality for agriculture. Rome, Italy.: Food and Agriculture Organization of the United Nations.; 1985.
- [41]. Wilbers GJ, Zwolsman G, Klaver G, Hendriks AJ. Effects of a drought period on physico-chemical surface water quality in a regional catchment area. *J Environ Monit*. 2009;11(6):1298–302.