

## بررسی تاثیر خشک‌سالی بر جریان پایه با شاخص جریان پایه استاندارد شده، مطالعه موردی: حوضه کاکارضا

رحیم کاظمی<sup>۱\*</sup>، جهانگیر پرهمت<sup>۲</sup> و باقر قرمزچشمه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران و <sup>۲</sup> استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸

### چکیده

شناخت برهم‌کنش پدیده خشک‌سالی و پاسخ هیدرولوژیک حوضه‌ها، می‌تواند منجر به دستیابی به اطلاعاتی برای مدیریت بهینه منابع آب حوضه شود. هدف پژوهش حاضر، بررسی رابطه زمانی خشک‌سالی و میزان مشارکت جریان‌های زیرسطحی در جریان رودخانه‌ها در زیرحوضه کاکارضا است. در این پژوهش، دوره مشترک ۱۳۹۶-۱۳۶۱ برای ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی متناظر در نظر گرفته شد. سپس، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس‌های زمانی سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه، محاسبه شد. جریان پایه و شاخص مربوطه به روش فیلتر رقومی برگشتی بی‌فلو-لینه و هالیک در پایه‌های زمانی ماهانه، سالانه و کل دوره، محاسبه شد. در مرحله بعدی، شاخص جریان پایه استاندارد شده (SBFI) محاسبه و منحنی تداوم جریان پایه (BFDC) ترسیم و شاخص شکل منحنی تداوم جریان پایه (SBFDC) محاسبه شد. تغییرات منحنی تداوم جریان پایه و شاخص شکل مربوطه و روابط شاخص خشک‌سالی و شاخص جریان پایه استاندارد شده با استفاده از روش همبستگی بررسی و تحلیل شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص جریان پایه در طول دوره پژوهش برابر با ۰/۵۲ و کمینه و بیشینه آن نیز به ترتیب برابر با ۰/۴۶ و ۰/۵۷ بوده و همچنین، روند تغییرات جریان پایه، یک روند کاهشی با شیب ملایم است. روند تغییرات شیب منحنی تداوم جریان پایه، در طول دوره با یک شیب ملایم کاهشی است. میزان تغییرات شیب نیز از یک تا سه درصد و نزدیک به خط راست است که تمایل به پایداری جریان پایه در درازمدت را نشان می‌دهد. بیشترین تاثیر پدیده خشک‌سالی بر جریان پایه رودخانه‌ها در گام زمانی نه و ۱۲ ماه بوده که همبستگی با ضریب تبیین ۰/۸۷ و احتمال ۹۵ درصد، بین شاخص خشک‌سالی و شاخص جریان پایه استاندارد شده، موید افزایش سهم مشارکت آب‌های زیرسطحی در جریان پایه، با تاخیر نه تا ۱۲ ماه است.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌های زیرزمینی، پاسخ هیدرولوژیک، شاخص بارش استاندارد شده، کارست، منحنی تداوم جریان پایه

### مقدمه

جامع حوزه آبخیز است. در این میان، پدیده خشک‌سالی و ارتباط آن با پاسخ هیدرولوژیک حوضه از اهمیت ویژه‌ای در تدوین برنامه‌های مرتبط با مدیریت جامع حوضه برخوردار است.

شناخت و تحلیل وضعیت هیدرولوژیکی، هواشناسی و ظرفیت‌های منابع آب حوضه‌ها و آگاهی از برهم‌کنش مؤلفه‌های مختلف آن، یکی از ضرورت‌های کلیدی مدیریت

دادند و نتایج پژوهش آن‌ها، رابطه زمانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک را در گام زمانی سه ماهه با بیشترین همبستگی و با احتمال ۹۹ درصد نشان داد. همچنین، Babaei و همکاران (۲۰۱۱) فاصله زمانی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک در حوضه زاینده‌رود را مورد بررسی قرار دادند و فاصله سه تا ۱۱ ماهه بین دو نوع خشک‌سالی را گزارش کردند. نتایج پژوهشی که به‌وسیله Azareh و همکاران (۲۰۱۴) در خصوص رابطه خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک در حوضه سد کرج انجام شد، نشان داد که وقوع خشک‌سالی، بدون تاخیر بر آب‌های سطحی اثر می‌گذارد.

بررسی ارتباط زمانی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک با استفاده از دو شاخص SDI و SPI در حوضه هلیل‌رود و همچنین، در دشت مشهد، وقوع همزمان دو خشک‌سالی در حوضه‌های کوچک را نشان داد (Soleimani Sardoo و Bahramand، ۲۰۱۴). رابطه زمانی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک به‌وسیله Koushki و همکاران (۲۰۱۷) در حوضه کرخه با استفاده از دو شاخص SPI و SDI در پایه‌های زمانی مختلف بررسی شد و نتایج نشان داد که همبستگی بین دو شاخص در تمام پایه‌های زمانی مورد استفاده در سطح یک درصد معنی‌دار بوده ولی این همبستگی در حالت بدون تاخیر دارای بیشترین همبستگی است.

روند زمانی خشک‌سالی هیدرولوژیک و هواشناسی در حوزه آبخیز کرخه به‌وسیله Soleimani Sardoo و Mesbahzadeh (۲۰۱۸) نیز مورد بررسی قرار گرفته، نتایج حاکی از این است که رابطه زمانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک در بازه ۴۸ ماهه بیشینه است. استفاده از دو شاخص RDI<sup>۳</sup> و SDI به‌منظور بررسی تاثیر خشک‌سالی هواشناسی بر خشک‌سالی هیدرولوژیک در چندین حوضه کوچک به‌وسیله Tigkas و همکاران (۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفت، نتایج ایشان، بیشترین همبستگی شاخص RDI با گام زمانی ۱۲ ماهه و شاخص SDI با گام زمانی نه‌ماهه را نشان داد.

Mohammed و Scholz (۲۰۱۶) تاثیر تغییرات اقلیمی

خشک‌سالی هواشناسی از منظر تقدم و تاخر وقوع، اولین نوع خشک‌سالی است که به وقوع می‌پیوندد و رابطه علت و معلولی با سایر انواع خشک‌سالی‌ها مانند خشک‌سالی هیدرولوژیک، کشاورزی و اقتصادی و اجتماعی دارد (Mosaedi و Eivazi، ۲۰۱۱). خشک‌سالی هیدرولوژیک در صورت تداوم خشک‌سالی هواشناسی پدیدار شده، از رابطه علت و معلولی آن با خشک‌سالی هواشناسی، قابل پیش‌بینی و ردیابی است. این رابطه از بعد مکانی، به مؤلفه‌های مختلفی مانند ویژگی‌های حوضه و نوع استفاده انسان از کاربری‌ها مرتبط است (Eskandari Damaneh و همکاران، ۲۰۱۶). خشک‌سالی هواشناسی و اثرات آن بر منابع آب‌های زیرزمینی منجر به پدیده‌های مختلف، اعم از افت آب‌های زیرزمینی، تغییر کیفیت آب و خاک و فرسایش آبی و خاکی شده که از منظر لزوم کاهش آثار این پدیده و مدیریت آثار آن، شناخت رفتار و برهم‌کنش خشک‌سالی و آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت است (Mozafari، ۲۰۰۶؛ Nohegar و همکاران، ۲۰۱۶).

پژوهشگران برای پایش خشک‌سالی و بررسی اثرات آن بر منابع آب و خاک از روش‌های مختلفی استفاده می‌کنند. در این میان، شاخص بارش استاندارد شده (SPI<sup>۱</sup>) یکی از شاخص‌های مرسوم بوده که موارد استفاده متعددی از آن در کشورهای مختلف به‌ویژه در ایران مشاهده شده است (Soleimani Sardoo و Mesbahzadeh، ۲۰۱۸). در زمینه روابط متقابل خشک‌سالی و شرایط هیدرولوژیک منابع آب سطحی و زیرزمینی، پژوهش‌های متعددی به انجام رسیده است، به‌نحوی که Doostan (۲۰۲۰) در پژوهشی مروری و تحلیلی نشان داد که بیشترین پژوهش‌های انجام شده در خصوص خشک‌سالی مربوط به حوزه علوم کشاورزی با ۴۱/۲ درصد و سپس، مرتبط با علوم جغرافیایی با ۲۹/۳ درصد است. لذا، نظر به اهمیت این پژوهش‌ها در ادامه به تعدادی از آن‌ها که مرتبط با موضوع پژوهش حاضر بوده، اشاره شده است.

Mofidipoor و همکاران (۲۰۱۱) روابط بین شاخص‌های SPI و SDI<sup>۲</sup> در سطح حوضه اترک را مورد بررسی قرار

<sup>۱</sup> Standardized Precipitation Index (SPI)

<sup>۲</sup> Standardized Discharge Index (SDI)

<sup>۳</sup> Reconnaissance Drought Index (RDI)

می‌گیرد. یکی از مهمترین مشخصه‌های هیدروژئولوژیکی که در پژوهش‌های مختلف بر آن تأکید شده، شاخص جریان پایه<sup>۱</sup> است. بر اساس تعریف McMahon و Nathan (۱۹۹۰) شاخص جریان پایه، یک نسبت بدون بعد است که از نسبت دبی پایه به کل رواناب برای هر مقطع زمانی یا کل دوره آماری به دست می‌آید. جریان پایه به‌طور معمول از سری زمانی داده‌های جریان روزانه رودخانه‌ها و با استفاده از تکنیک‌های تفکیک جریان استخراج می‌شود. این فنون به‌طور کلی عبارتند از روش‌های ترسیمی یا گرافیکی<sup>۲</sup> (Namara و همکاران، ۱۹۹۷)، روش‌های منحنی افت<sup>۳</sup> (Rorabaugh، ۱۹۶۴)، روش‌های تجزیه‌ای<sup>۴</sup> (White و Line، ۲۰۰۷)، جرم مضاعف<sup>۵</sup> (Hoeg و همکاران، ۲۰۰۰) و روش‌های فیلتر رقومی جریان پایه<sup>۶</sup> (Nathan و McMahon، ۱۹۹۰).

به دلیل پیچیدگی و نامشخص بودن میزان واقعی مشارکت دبی پایه در رواناب و همچنین، هزینه‌بر بودن روش‌های مبتنی بر ردیاب‌ها، پژوهشگران بسیاری نسبت به ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف تفکیک هیدروگراف جریان، اقدام کرده‌اند و الگوریتم‌های مختلفی را پیشنهاد داده‌اند. در این پژوهش، از روش فیلتر رقومی برگشتی بی‌فلو-لین و هالیک<sup>۷</sup> برای تفکیک جریان پایه استفاده شد. منحنی تداوم جریان، یکی از مناسب‌ترین روش‌های نمایش پاسخ هیدروژئولوژیک حوضه است و درصد جریان روزانه، ماهانه یا دیگر گام‌های زمانی مربوط به یک دوره تاریخی رودخانه معینی را بیان می‌کند (Alizadeh، ۲۰۰۷).

شکل و تفسیر عمومی هر منحنی تداوم جریان، بستگی به مشخصات هیدروژئولوژیکی، دوره آماری و مشخصه‌های حوضه دارد (Zheng و همکاران، ۲۰۰۷). پژوهش‌های متعددی به منظور بررسی تاثیر پارامترهای ثابت (هندسی) و متغیر (هیدروژئولوژیکی و اقلیمی) حوضه بر شکل منحنی

را بر روی مشارکت آب‌های زیرزمینی در جریان پایه رودخانه با استفاده از تفکیک و تحلیل جریان پایه به سه روش تفکیک رقومی Eckhart، Chapman و منحنی تداوم جریان انجام دادند و افزایش قابل توجه مشارکت آب‌های زیرزمینی در پاسخ به کاهش واضح میانگین بارش را گزارش کردند. ارزیابی روند تغییرات در خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی و جریان پایه به روش ارزیابی پاسخ حوضه در ۳۳۸ مورد در کشور آلمان به وسیله Hellwig و Stahl (۲۰۱۸) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ایشان نشان داد که محدوده زمانی پاسخ جریان پایه به خشک‌سالی از چند ماه تا چند سال در نوسان است و دلیل این را پراکندگی و ناهمگونی حوضه‌ها از منظر ساختاری، هیدروژئولوژیکی و اقلیمی عنوان کردند.

بررسی ارتباط خشک‌سالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی در اسپانیا به وسیله Vicente و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از شاخص‌های SDI و SPI نشان داد که خشک‌سالی‌های هواشناسی با تاخیر یک تا سه ماهه بر آب‌های سطحی نمایان می‌شود، ولی اثر آن بر آب‌های زیرزمینی با تاخیر هفت تا ۱۰ ماهه نشان داده شده است.

تاثیر خشک‌سالی بر کاهش دبی چشمه به وسیله Porhemmat و همکاران (۲۰۲۰) در چشمه سراب نیلوفر واقع در غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش ایشان نشان داد، کاهش دبی با وقوع خشک‌سالی‌ها منطبق ولی در ترسالی‌ها روند کاهشی آن همچنان ادامه یافته و شیب کاهش دبی نسبت به بارندگی بیشتر است.

شاخص جریان پایه استاندارد شده، به عنوان شاخص شناسایی خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی در حوضه Red River به وسیله Chu و Bazrkar (۲۰۲۰) استفاده و توسعه داده شده است. نتایج ایشان نشان داد که این شاخص بسیار کم از وقایع کوتاه مدت تاثیر می‌گیرد و در گذر از دوره‌های ترسالی به خشک‌سالی نیز تغییرات فاحشی ندارد.

جریان پایه، حسب تعریف Smakhtin (۲۰۰۱) عبارت است از بخشی از جریان رودخانه که از منابع آب زیرزمینی و زیرسطحی تاخیری، مانند مخازن ساحلی رودها، دریاچه‌ها، تالاب‌ها و ذوب برف و یخ، زهکشی خاک کف دره‌ها و زون‌های ساحلی در طی یا بعد از وقایع بارش سرچشمه

<sup>1</sup> Base Flow Index

<sup>2</sup> Graphical methods

<sup>3</sup> Recession-curve methods

<sup>4</sup> Analytical methods

<sup>5</sup> Mass-balance methods

<sup>6</sup> Digital baseflow filter methods

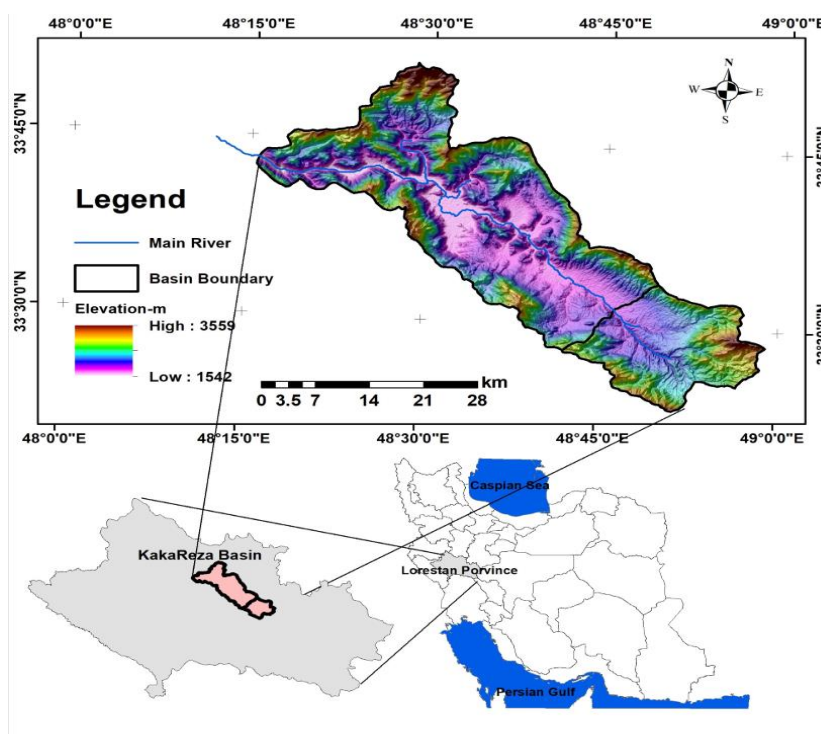
<sup>7</sup> B-Flow-Lynie and Holick

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** حوضه کاکارضا یک حوضه کارستی و یکی از زیرحوضه‌های کشکان است (شکل ۱). حدود ۵۰ درصد سطح حوضه، سازندهای آهکی، آهک دولومیتی و آهک مارنی و حدود ۱۹ درصد سازندهای آبرفتی و مابقی سازندهای نفوذناپذیر هستند. مساحت حوضه در محل خروجی ایستگاه هیدرومتری با کد ۱۶۹-۲۱ برابر با ۱۱۴۸ کیلومتر مربع است. ایستگاه باران‌سنجی در این حوضه با کد مشابه برای تحلیل شاخص خشک‌سالی در نظر گرفته شد. رودخانه اصلی این حوضه، رودخانه هرو است و بر اساس روش آمبرژه، حوضه رودخانه کشکان در محدوده اقلیم نیمه‌مرطوب سرد قرار می‌گیرد. طول آبراهه ۸۳ کیلومتر، شیب متوسط رودخانه ۰/۳۴ درصد، طول کل شبکه آبراهه ۵۲۱ کیلومتر با تراکم زهکشی ۰/۴۵، ارتفاع متوسط حوضه ۲۰۲۷ متر از سطح دریا، شیب متوسط حوضه برابر با ۲۴/۱ درصد و دبی متوسط درازمدت ۱۲/۷ مترمکعب بر ثانیه است. همچنین، بارندگی سالانه ۵۳۴ میلی‌متر است که در محدوده مختصات طول جغرافیایی ۴۳° ۳۳' و عرض جغرافیایی ۱۶° ۴۸' قرار دارد (Kazemi, ۲۰۱۸).

تداوم جریان، انجام شده است که در این میان، شناخت برهم‌کنش مشخصه‌های متغیر آب و هوایی بر شکل منحنی تداوم جریان، منجر به دستیابی به اطلاعاتی برای پیش‌بینی و برآورد شرایط آبی هیدرولوژیکی حاکم بر حوضه خواهد شد که در موضوعات مرتبط با مدیریت منابع آب حوضه قابل استفاده است (Kazemi و Porhemmat, ۲۰۱۸).

جمع‌بندی مرور منابع نشان می‌دهد که در دو دهه گذشته، مطالعات متعددی در خصوص شناخت برهم‌کنش شاخص‌های خشک‌سالی با پاسخ هیدرولوژیک حوضه، به‌منظور برآورد و پیش‌بینی شرایط آبی آب‌های سطحی و زیرزمینی به انجام رسیده است. ولی پژوهش‌های اندکی برای آگاهی از تاثیر خشک‌سالی بر مشارکت جریان‌های زیرسطحی در جریان رودخانه‌ها به انجام رسیده است. با توجه به این‌که جریان پایه، به‌عنوان انعکاسی از مشارکت آب‌های زیرزمینی و زیرسطحی در جریان رودخانه معرفی شده است، لذا، در این پژوهش سعی بر شناخت رفتار شاخص خشک‌سالی بر مشارکت آب‌های زیرزمینی در جریان رودخانه، از طریق تحلیل تغییرات شکل منحنی تداوم جریان پایه و شاخص جریان پایه استاندارد شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

فیلتر رقومی برگشتی بی‌فلو-لینه و هالیک: الگوریتم معرفی شده به وسیله Lyne و Hollick (۱۹۷۹) با رابطه (۱) معرفی شده و قابلیت عبور سه باره از داده‌های جریان را دارد و چند بار عبور از داده‌های جریان باعث پایین آوردن جریان پایه می‌شود و به استفاده‌کننده، قابلیت انعطاف‌پذیری در جدایش دقیق‌تر دبی پایه را می‌دهد.

$$q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + (q_i - q_{(i-1)}) \frac{1+\alpha}{2} \quad q_{f(i)} \geq 0 \quad (1)$$

که در آن،  $q_{f(i)}$  رواناب مستقیم فیلتر شده در مرحله زمانی  $i$ ،  $q_{f(i-1)}$  رواناب مستقیم فیلتر شده در مرحله زمانی  $i-1$  پارامتر فیلتر مرتبط با حوضه،  $q_{(i)}$  جریان کل در مرحله زمانی  $i$  و  $q_{(i-1)}$  جریان کل در مرحله زمانی  $i-1$  است.

**شاخص بارش استاندارد شده:** چنانچه سری‌های زمانی بارندگی ماهانه ایستگاه‌های منطقه به صورت  $P_i$  معرفی شوند که در آن اندیس  $i$  سال آبی و اندیس  $j$  ماه مربوط به سال آبی را مشخص کند ( $i=1$  برای مهر و  $j=12$  برای شهریور) سری‌های زمانی بارندگی با مدت‌های مختلف را می‌توان با استفاده از رابطه (۲) به دست آورد.

$$R_{ik} = \sum_{j=1}^k P_{ij} \quad i=1,2,3, \dots \quad J=1,2,3, \dots, 12 \quad K=1,2,3,4,5,6 \quad (2)$$

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بر اساس ارتفاع بارش تجمعی ( $R_k$ ) برای دوره مبنای  $K$  مربوط به  $i$  سال آبی به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$SPI_{ik} = \frac{R_k - \bar{R}_k}{S_k} \quad i=1, 2, 3, \dots \quad J=1, 2, 3, \dots, 12 \quad K=1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (3)$$

که در آن،  $\bar{R}_k$  و  $S_k$  به ترتیب میانگین ارتفاع بارش تجمعی و انحراف معیار ارتفاع بارش تجمعی برای دوره مبنای ( $k$ ) است. جدول ۱ طبقه‌بندی حالات مختلف خشک‌سالی به روش SPI را نشان می‌دهد.

**شاخص جریان پایه استاندارد شده:** پس از تفکیک جریان پایه به روش فیلتر رقومی برگشتی بی‌فلو-لینه و هالیک و تهیه سری زمانی داده‌های جریان پایه و با اقتباس از روش فرمول (SPI) محاسبه شد، با این تفاوت که در آن به جای داده‌های بارش، داده‌های جریان پایه قرار داده می‌شود.

**روش پژوهش:** پس از بررسی داده‌ها، دوره مشترک (۱۳۹۶-۱۳۶۱) برای ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی در نظر گرفته شد. سپس، شاخص بارش استاندارد شده در مقیاس‌های زمانی سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه محاسبه شد. جریان پایه و شاخص مربوطه به روش فیلتر رقومی برگشتی بی‌فلو-لینه و هالیک<sup>۱</sup> در پایه‌های زمانی ماهانه، سالانه و کل دوره محاسبه شد. شاخص جریان پایه استاندارد شده<sup>۲</sup> (SBFI) با اقتباس از روش شاخص بارش استاندارد شده محاسبه شد. منحنی تداوم جریان پایه<sup>۳</sup> (BFDC) با استفاده از سری زمانی داده‌های استخراج شده جریان پایه، ترسیم و شیب منحنی در حدفاصل  $Q_{33}$  تا  $Q_{66}$  به عنوان شاخص شکل منحنی تداوم جریان پایه<sup>۴</sup> ( $S_{BFDC}$ ) محاسبه شد. تغییرات منحنی تداوم جریان پایه و شاخص شکل مربوطه و روابط شاخص خشک‌سالی و شاخص جریان پایه استاندارد شده با استفاده از روش همبستگی بررسی و تحلیل شد.

**جداسازی جریان آب پایه:** جداسازی جریان پایه، طی فرایند تفکیک هیدروگراف جریان و با شناسایی نقطه شروع و خاتمه رواناب مستقیم قابل انجام است. نقطه شروع، نقطه‌ای است که جریان، روند صعودی پیدا می‌کند و نقطه خاتمه، زمانی است که لگاریتم شاخه نزولی در برابر زمان به خط راست تبدیل می‌شود. در این پژوهش، تفکیک هیدروگراف جریان و محاسبه شاخص جریان پایه با استفاده از الگوریتم فیلتر رقومی برگشتی بی‌فلو-لینه و هالیک، به وسیله نرم‌افزار HydroOffice (۲۰۱۵) و پس از بررسی و آماده‌سازی داده‌های روزانه جریان به روش توصیه شده به وسیله Kazemi و Porhemmat (۲۰۲۰) انجام شد. مطابق با این روش با استفاده از قابلیت نمایش گرافیکی نرم‌افزار و به کار بردن مقادیر مختلف پارامتر و کالیبراسیون آن با مقادیر دبی مشاهده شده فصل خشک، مقدار پارامتر بهینه الگوریتم تعیین و میزان آب پایه و شاخص مربوطه استخراج شد.

<sup>1</sup> B-Flow Lyne and Hollick recursive digital filter

<sup>2</sup> Standardized Base Flow Index (SBFI)

<sup>3</sup> Base Flow Duration Curve (BFDC)

<sup>4</sup> Slope of base flow duration curve ( $S_{BFDC}$ )

جدول ۱- طبقه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس SPI (McKee و همکاران، ۱۹۹۳)

| وضعیت خشک‌سالی     | محدوده                 | حالت |
|--------------------|------------------------|------|
| تر سالی خیلی شدید  | $SPI \geq 2.0$         | ۱    |
| تر سالی شدید       | $1.5 \leq SPI < 2.0$   | ۲    |
| تر سالی متوسط      | $1.0 \leq SPI < 1.5$   | ۳    |
| تقریبا نرمال       | $-1.0 \leq SPI < 1.0$  | ۴    |
| خشک‌سالی متوسط     | $-1.5 \leq SPI < -1.0$ | ۵    |
| خشک‌سالی شدید      | $-2.0 \leq SPI < -1.5$ | ۶    |
| خشک‌سالی خیلی شدید | $SPI < -2.0$           | ۷    |

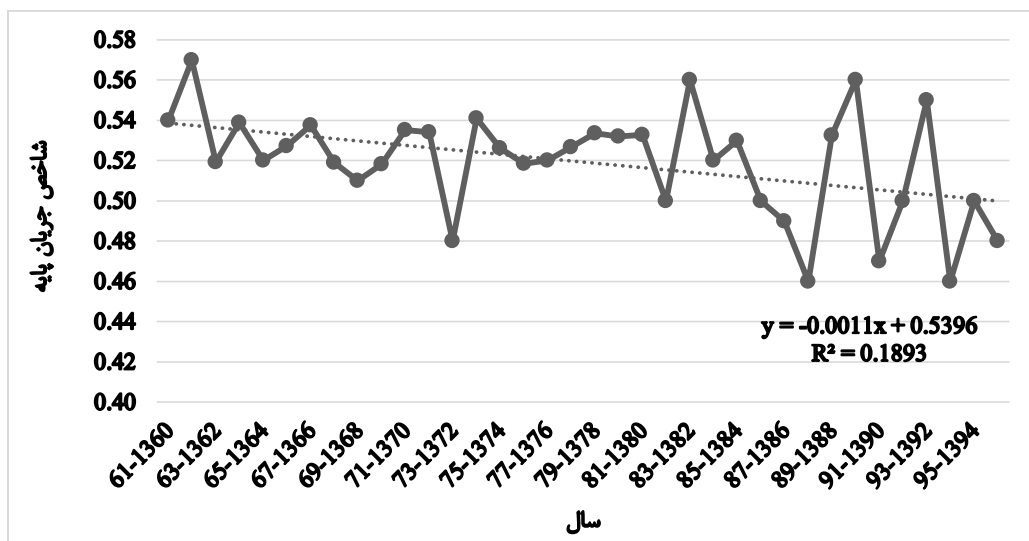
### نتایج و بحث

نتایج تفکیک جریان پایه و محاسبه شاخص مربوطه و روند تغییرات آن در طول دوره پژوهش، در شکل ۲ ارائه شده است. میانگین شاخص جریان پایه در طول دوره پژوهش برابر با ۰/۵۲ و کمینه و بیشینه آن نیز به ترتیب برابر با ۰/۴۶ و ۰/۵۷ است. این امر نشان‌دهنده این است که میزان مشارکت جریان‌های زیرسطحی در تامین جریان‌های سطحی رودخانه، بیش از ۵۰ درصد است. البته این میزان مشارکت، متناسب با تغییرات اقلیمی، نوساناتی را تجربه کرده، همچنین، از ابتدای سال آماری مورد نظر تا انتها، یک روند کاهشی با شیب ملایم را نشان داد. میزان فراز و فرود جریان پایه با شاخص مربوطه، به‌علت دخالت عامل بارش در تأمین جریان کلی رودخانه و فراز و فرود ناشی از شرایط اقلیمی و میزان بارش است.

شاخص شکل منحنی تداوم جریان پایه: منحنی تداوم جریان پایه با استفاده از داده‌های روزانه جریان پایه مستخرج از روش تفکیک جریان، ترسیم و شیب حد فاصل  $Q_{33}$  تا  $Q_{66}$  با استفاده از معادله (۴) به‌عنوان نماینده شکل منحنی محاسبه شد (Troch و Yoshida، ۲۰۱۶). این قسمت از منحنی در مقیاس نیمه‌لگاریتمی به‌صورت خطی نمایان شده، به‌وسیله پژوهشگران مختلفی به‌عنوان شاخص شکل منحنی مورد استفاده قرار گرفته است. شیب بالا معرف رژیم جریان متغیر و شیب‌های پایین، معرف مشارکت جریان‌های زیرسطحی در جریان سطحی رودخانه است (Kazemi و همکاران، ۲۰۱۸).

$$S_{BFDC} = \frac{LNQ_{33} - LNQ_{66}}{Q_{66} - Q_{33}} \quad (۴)$$

که در آن،  $Q_{66}$  و  $Q_{33}$  دبی پایه معادل درصد عدم تجاوز ۳۳ و ۶۶ درصد و  $S_{BFDC}$  شیب منحنی است.

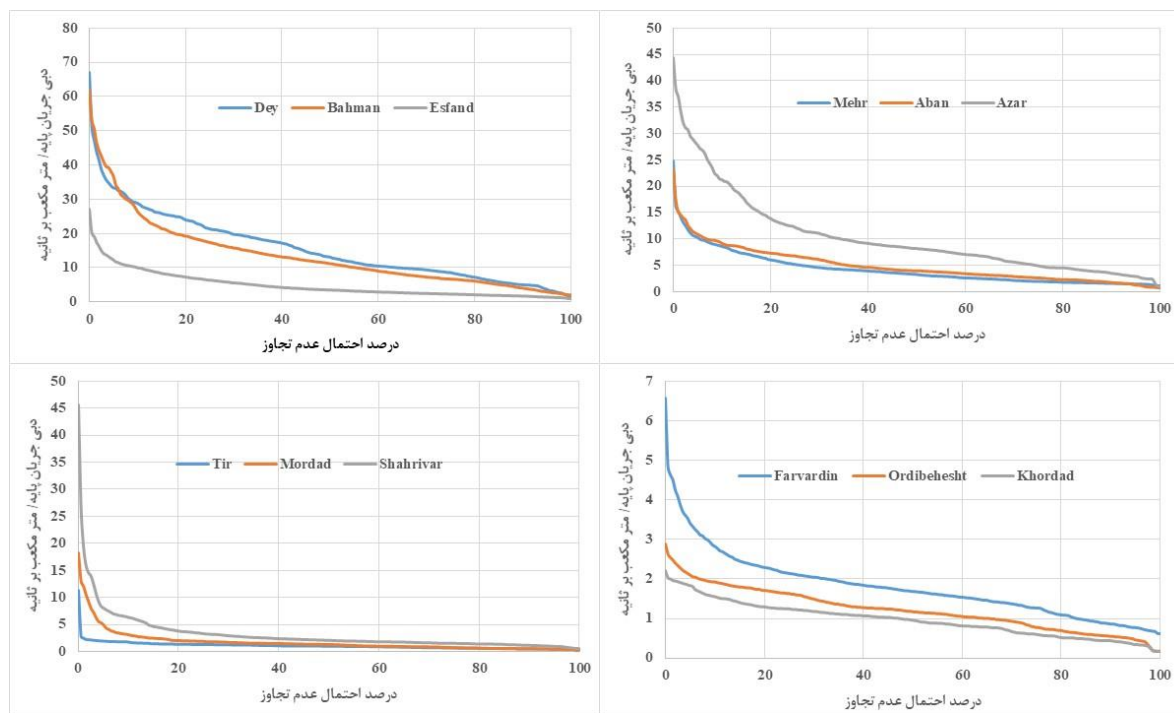


شکل ۲- تغییرات شاخص جریان پایه در طول دوره مورد پژوهش ایستگاه آب‌سنجی کاکارضا

جریان پایه رودخانه‌ها است.

در منحنی تداوم جریان پایه فصل بهار در فروردین ماه، تغییرات شکل منحنی در طول بازه احتمالاتی تا  $Q_{99}$  مشاهده شد که این امر به دلیل دخالت بارش‌های این ماه در عدم پایداری جریان پایه و تغییرات متناسب با بارش‌ها است. ولی در اردیبهشت و خرداد، از بازه احتمال عدم تجاوز  $Q_{20}$  تا انتهای منحنی ( $Q_{99}$ ) ثبات شکل منحنی و پایداری در میزان مشارکت آب‌های زیرسطحی در جریان سطحی مشاهده شد. در منحنی مربوط به فصل تابستان در تیرماه بعد از اولین نقطه شکست منحنی در  $Q_2$  کمینه مشارکت جریان زیرسطحی در جریان پایه مشاهده شد، ولی در مرداد و شهریور از بازه احتمالاتی  $Q_{33}$  به بعد، ثبات و تداوم میزان جریان پایه، در انتهای سال آبی را نشان داد. در نگاه درازمدت بر منحنی تداوم جریان پایه (شکل ۴) قابل توجه، میزان کمینه شیب منحنی در حد فاصل  $Q_{33}$  تا  $Q_{66}$  بوده که بیانگر پایداری کلی جریان پایه در درازمدت است. همچنین، آخرین نقطه عطف منحنی در  $Q_{33}$  بوده، نشان‌دهنده بازه طولانی ثبات در جریان پایه تا  $Q_{99}$  است.

پس از تفکیک جریان پایه، منحنی تداوم جریان پایه (BFDC) با استفاده از سری زمانی جریان پایه استخراج شده، به تفکیک سالانه، ماهانه و درازمدت سالانه تهیه شد که نتایج آن در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین، شاخص شکل منحنی تداوم جریان پایه محاسبه و تغییرات آن در طول دوره پژوهش در شکل ۵ آمده است. بر اساس شکل ۳ اولین نقطه شکست منحنی تداوم جریان پایه در ابتدای سال آبی در مهر و آبان در احتمال عدم تجاوز  $Q_5$  و در منحنی آذر ماه در  $Q_{10}$  بوده که نمایانگر تاثیر بارش‌های ابتدای سال آبی بر روی شکل منحنی است. در هر سه ماه این فصل، آخرین نقطه شکست منحنی تقریباً برابر بوده، یعنی محلی که شیب منحنی متمایل به صفر می‌شود، بیانگر مشارکت بیشینه جریان‌های زیرسطحی و آب‌های زیرزمینی در جریان سطحی است. در نمودارهای فصل زمستان آخرین نقطه عطف منحنی در دی، بهمن و اسفند به ترتیب برابر با احتمال عدم تجاوز  $Q_{90}$ ،  $Q_{50}$  و  $Q_{18}$  است که تغییر بازه احتمالاتی از دی تا اسفند، نمایانگر تاثیر ذوب برف در پایان فصل سرد و مشارکت جریانات زیرسطحی حاصل از آن در



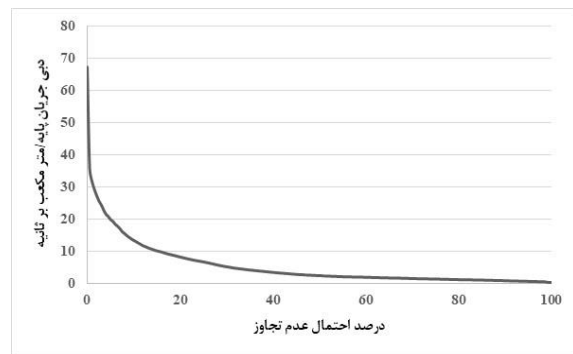
شکل ۳- منحنی تداوم جریان پایه به تفکیک ماه و فصل ایستگاه آب‌سنجی کاکارضا

با پایه زمانی مربوطه، قابلیت آشکارسازی خشک‌سالی‌ها را دارد، به‌نحوی که در نمودار مربوط به پایه زمانی سه‌ماهه مشخص است، این پایه زمانی، خشک‌سالی را به‌طور واضح، نمایان نکرده است. ولی از پایه زمانی شش‌ماهه تا ۲۴‌ماهه، خشک‌سالی در محدوده زمانی سال ۶۴-۶۵ و ۸۰-۸۱ به نحو مناسبی، آشکار شده که حد پایین شاخص خشک‌سالی تا محدوده ۲-، موید این مطلب است.

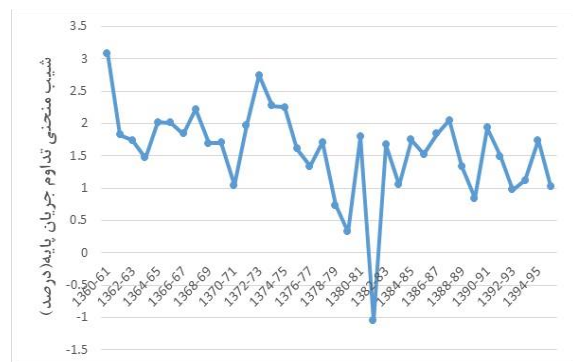
برای بررسی همبستگی‌های زمانی بین بارش و جریان پایه و تحلیل تاثیر خشک‌سالی‌ها بر میزان مشارکت آب‌های زیرزمینی در آب‌های سطحی، سری‌های زمانی جریان پایه استخراج شده از فرایند تفکیک جریان، استانداردسازی شده و روابط همبستگی شاخص بارش استاندارد شده و شاخص جریان پایه استاندارد شده در پایه‌های زمانی سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه محاسبه شده، نتایج تغییرات همبستگی بین شاخص بارش استاندارد شده و شاخص جریان پایه استاندارد شده در شکل ۷ ارائه شده است. میزان همبستگی با ضریب تبیین ۰/۴۸ در گام زمانی سه‌ماهه، حاکی از وجود رابطه کمینه در این پایه زمانی است، ولی با افزایش گام زمانی، رابطه همبستگی بین شاخص خشک‌سالی و جریان پایه افزایش نشان داد. این روند تا گام زمانی ۱۲‌ماهه، افزایشی است. این نمودار نشان‌دهنده این است که بیشترین تاثیر پدیده خشک‌سالی بر جریان پایه رودخانه‌ها و به‌تبع آن بر میزان مشارکت جریانات زیرسطحی در جریان رودخانه، در گام زمانی نه و ۱۲ ماه است که همبستگی با ضریب تبیین ۰/۸۷ و سطح اطمینان ۹۵ درصد، موید افزایش مشارکت آب‌های زیرسطحی در جریان پایه، با تاخیر نه تا ۱۲ ماه است. تاثیرپذیری جریان پایه از خشک‌سالی‌ها با تاخیر نه تا ۱۲ ماه با توجه به این‌که حوضه مورد پژوهش بیش از ۵۰ درصد از کربنات‌ها پوشیده شده و یک حوضه کارستی محسوب می‌شود، قابل تفسیر و تحلیل است.

با توجه به ساختار منابع آبی موجود در سازندهای کارستیک، بخش قابل ملاحظه‌ای از بارندگی‌ها در این سازندها ذخیره و منجر به کاهش ضریب رواناب حوضه‌ها می‌شود. با توجه به این ویژگی منابع آب کارستیک، تاثیر وقوع خشک‌سالی هواشناسی بر جریان پایه رودخانه‌ها، تدریجی بوده، با تاخیر چند ماهه نسبت به خشک‌سالی

شاخص شکل منحنی، در حد فاصل  $Q_{33}$  تا  $Q_{66}$  برای هر سال آبی، جداگانه محاسبه و روند تغییرات سالانه آن در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس این شکل، شیب منحنی تداوم جریان پایه، در طول دوره با یک روند ملایم، کاهش می‌یابد. به استثناء سال ۱۳۸۱ که متاثر از شرایط خشک‌سالی (شکل ۶)، شیب منفی می‌شود، در سایر سال‌ها، شیب منحنی در حد فاصل  $Q_{33}$  تا  $Q_{66}$  که شاخصی از شکل منحنی بوده، مثبت است. میزان آن نیز، در محدوده یک تا سه درصد و متمایل و نزدیک به خط راست است که تمایل به پایداری جریان پایه در درازمدت را نشان می‌دهد.



شکل ۴- منحنی تداوم جریان پایه درازمدت



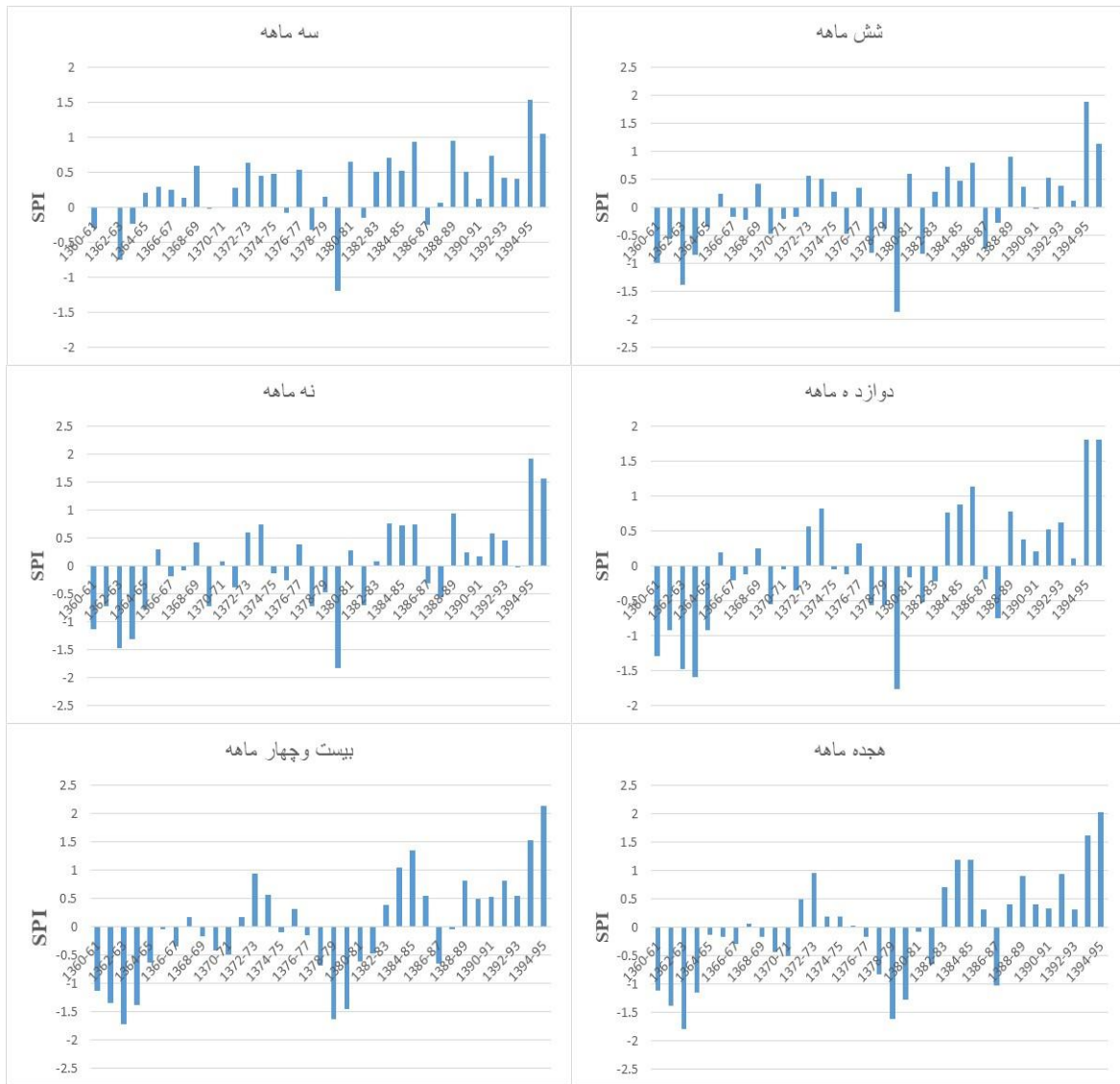
شکل ۵- تغییرات شیب منحنی تداوم جریان پایه سالانه

نتایج محاسبه شاخص SPI و روند تغییرات آن در طول دوره مورد پژوهش، در پایه‌های زمانی سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس این شکل، روندها و فراز و فرودهای این شاخص‌ها تقریباً مشابه و از هم تبعیت می‌کند، ولی میزان آن با اندکی تغییرات مواجه شده است. روند تغییرات شاخص بارش استاندارد شده، متناسب



شده در شکل ۷ و تاخیر زمانی یکساله در تاثیر خشکسالی بر جریان پایه بوده، مفهوم آن این است که تاثیرپذیری جریان پایه در این حوضه با تاخیر یکساله، منطبق با روند تغییرات بارش است.

هواشناسی اتفاق می‌افتد. این عدم تطابق زمانی و تاخیر زمانی در شکل ۸ نیز نشان داده شده است. این شکل، روند تغییرات شاخص بارش و شاخص جریان پایه استاندارد شده را نشان می‌دهد که با گام زمانی تاخیر یکساله، یک تطابق روند را نشان داد. این مطلب موید رفتار همبستگی اشاره



شکل ۶- روند تغییرات شاخص بارش استاندارد شده در پایه‌های زمانی مختلف ایستگاه آکاکارضا

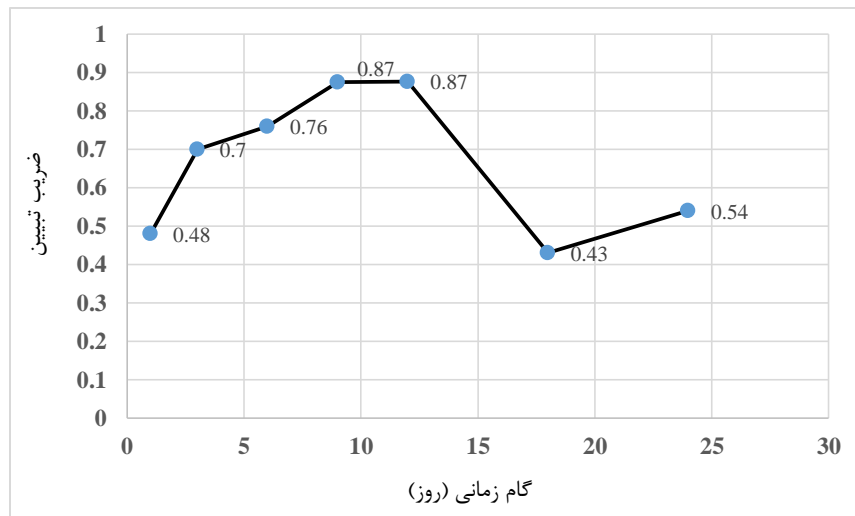
وسیله Babaei و همکاران (۲۰۱۱) در حوضه زاینده‌رود، Azareh و همکاران (۲۰۱۴) در حوضه سد کرج، Koushki و همکاران (۲۰۱۷) و MesbahZadeh و SoleimaniSardoo (۲۰۱۸) در حوضه کرخه گزارش شده است. نتایج

### نتیجه‌گیری

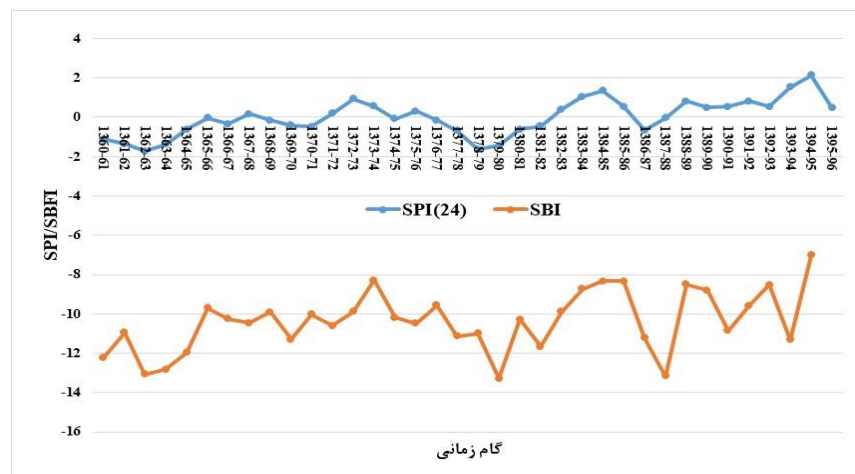
بررسی نتایج پژوهش‌های متعدد در سطح ایران و جهان نشان‌دهنده تاثیر بدون تاخیر و متمایز خشکسالی بر جریان‌های سطحی تا تاثیر با تاخیر ۱۱ ماه است که به-

بر جریان پایه دارد. این تفاوت نتایج به دلیل تفاوت در ماهیت رفتار جریان‌های سطحی و جریان‌های پایه منشاء گرفته از آب‌های زیرسطحی در منطقه مورد پژوهش که یک منطقه کارستی با پوشش بیش از ۵۰ درصدی سازندهای کربناته می‌باشد، قابل توجیه است.

پژوهش‌های فوق با نتایج تحلیل منحنی تداوم جریان پایه در منطقه مورد پژوهش، متفاوت است و نتیجه تحلیل منحنی تداوم جریان پایه، میزان کمینه شیب منحنی در حد فاصل  $Q_{33}$  تا  $Q_{66}$  و پایداری کلی جریان پایه در درازمدت را نشان می‌دهد. شیب ملایم منحنی تغییرات شاخص جریان پایه، حکایت از تاثیر ملایم، با تاخیر و تدریجی خشک‌سالی



شکل ۷- ضریب تبیین بین شاخص بارش استاندارد شده و شاخص جریان پایه استاندارد شده ایستگاه آب‌سنجی کاکارضا



شکل ۸- روند تغییرات و تطابق زمانی شاخص‌های بارش استاندارد شده و شاخص جریان پایه استاندارد شده

هفت تا ۱۰ ماهه و مطالعات Hellwig و Stahl (۲۰۱۸)، بازه چند ماه تا چند سال را گزارش کرده‌اند. تاثیر خشک-سالی بر منابع آب پایه با تاخیر نه تا ۱۲ ماهه در حوضه مورد پژوهش، در تطابق با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های

در خصوص تاثیر خشک‌سالی بر آب‌های زیرزمینی و مشارکت آن‌ها در جریان‌های سطحی، بازه چند ماهه تا چند ساله، برای این اثرگذاری گزارش شده است. از جمله بررسی‌های Vicente و همکاران (۲۰۰۵) در اسپانیا بازه

نقشه مربوطه برای استفاده در مدیریت منابع آب حوضه تهیه و مورد استفاده قرار گیرد.

### سپاس‌گزاری

این پژوهش مستخرج از نتایج پروژه تحقیقاتی "بررسی تأثیر خشکسالی بر آب‌های سطحی حوضه کشکان" است که در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به انجام رسیده است. بدین‌وسیله از همراهی و مساعدت مسئولین محترم پژوهشکده تشکر می‌شود.

مورد اشاره در فوق است. البته به‌دلیل ماهیت عوامل تأثیرگذار ثابت (مؤلفه‌های هندسی، زمین‌شناسی و خاک) و متغیر (مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی) موثر بر جریان‌های زیرسطحی، بازه زمانی تأثیرگذاری در هر حوضه، متناسب با شرایط فیزیکی و هیدرواقليمی حاکم بر آن متفاوت می‌باشد و باید به‌طور مجزا مورد پژوهش قرار گیرد، ولی اصل تأثیر با تأخیر در تمام پژوهش‌های قبلی نیز تایید شده است. در پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود که تأخیر زمانی تأثیر خشکسالی بر جریان پایه رودخانه‌ها، برای حوضه‌های مختلف، اعم از کارستی و غیرکارستی تعیین و

### منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2007. Principal of applied hydrology. 14th Edn, Mashhad, Emamreza University, 807 pages (in Persian).
2. Azareh, A., M.R. Rahdari, E.R. Sardoi and F.A. Moghadam. 2014. Investigate the relationship between hydrological and meteorological droughts in Karaj dam basin. *European Journal of Experimental Biology*, 4(3): 102-107.
3. Babaei, H., S.H. Araghinejad and A. Horfar. 2011. Time interval identification of the occurrences of meteorological and hydrological droughts in Zayandeh-Rud Basin. *Arid Biom Scientific and Research Journal*, 1(3): 1-12 (in Persian).
4. Bazrkar, M.H. and X. Chu. 2020. New standardized base flow index for identification of hydrologic drought in the Red River of the North Basin. *Natural Hazards Review*, 21(4): 1-8.
5. Doostan, R. 2020. Analysis of drought researches of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(4): 53-94 (in Persian).
6. Eivazi, M. and A. Mosaedi. 2011. Monitoring and spatial analysis of meteorological drought in Golestan Province using the geostatistical methods. *Journal of Range and Watershed Management*, 64: 65-78 (in Persian).
7. Eskandari-Damaneh, H., G.H. Zehabian, H. Khosravi and A. Azareh. 2016. Analysis of temporal and spatial relationship between meteorological and hydrological drought in Tehran Province. *Journal Management System*, 24(96): 113-120 (in Persian).
8. Hellwig, J. and K. Stahl. 2018. An assessment of trends and potential future changes in groundwater-baseflow drought based on catchment response times. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12): 6209-6224.
9. Hoeg, S., S. Uhlenbrook and C. Leibundgut. 2000. Hydrograph separation in a mountainous catchment-combining hydrochemical and isotopic tracers. *Hydrological Processes*, 14(7): 1199-1216.
10. HydroOffice. 2015. Software package on the field of hydrology, hydrogeology, meteorology and data science. [www.hydrooffice.org/](http://www.hydrooffice.org/).
11. Kazemi, R. and J. Porhemmat. 2018. Investigation and determination of factors affecting the shape of the flow duration curve in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1): 85-105 (in Persian).
12. Kazemi, R. 2018. Modeling of base flow using the geomorphologic parameters in Karkheh Basin. PhD Thesis, Kharazmi University, 182 pages (in Persian).
13. Kazemi, R. and J. Porhemmat. 2020. Calibration of recursive digital filters to separate the base flow, case study: Karkheh Basin. *Watershed Engineering and Management*, 12(1): 30-43 (in Persian).
14. Koushki, R., M. Rahimi, M. Amiri, M. Mohammadi and J. Dastorani. 2017. Investigation of relationship between meteorological and hydrological drought in Karkheh Watershed. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(3): 687-698.
15. Line, D.E. and N.M. White. 2007. Effects of development on runoff and pollutant export. *Water Environment Research*, 79(2): 185-190.
16. Lyne, V. and M. Hollick. 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In *Institute of Engineers Australia National Conference*, 89-93.

17. McNamara, J.P., D.L. Kane and L.D. Hinzman. 1997. Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques. *Water Resources Research*, 3: 1707-1719.
18. Mesbahzadeh, T. and F. Soleimani Sardoo. 2018. Temporal trend study of hydrological and meteorological drought in Karkheh Watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 12(40): 105-114.
19. Mofidipoor, N., V. Brady Sheikh, M. Ownegh and A. Sydaldyn. 2011. Investigating relationship between meteorological and hydrological droughts in Atrak Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 3(5): 16-26 (in Persian).
20. Mohammed, R. and M. Scholz. 2016. Impact of climate variability and streamflow alteration on groundwater contribution to the baseflow of the Lower Zab River (Iran and Iraq). *Environmental Earth Sciences*, 75(21): 1-11.
21. Mozafari, G.H. 2006. Unconformity in meteorological and hydrological drought in two neighboring basin at north mountain slope of Shirkoh Yazd. *Journal of Spatial Planning*, 10(2): 173-190 (in Persian).
22. Nathan, R.J. and T.A. McMahon. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7): 1465-1473.
23. Nohegar, A., N. Ghashghaeizadeh, M. Heydarzadeh and M. Pannahi. 2016. Assessment of drought and its impact on surface and groundwater resources, case study: River Basin Minab. *Journal of Researches in Earth Sciences*, 7(3): 28-43.
24. Porhemmat, M., J. Porhemmat and M. Mirzaee. 2020. Investigation on drought impact on the depletion of spring discharge in western parts of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 12(4): 1040-1054 (in Persian).
25. Rorabaugh, M.I. 1964. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. *International Association of Hydrological Sciences*, 63: 432-441.
26. Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3): 147-186.
27. Soleimani Sardou, F. and A. Bahramand. 2014. Hydrological drought analysis using SDI Index in Halilrud Basin of Iran. *Environmental Resources Research*, 2(1): 47-56 (in Persian).
28. Tigkas, D., H. Vangelis and G. Tsakiris. 2012. Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment*, 440: 33-41.
29. Vicente-Serrano, S.M. and J.I. Lopez-Moreno. 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9: 523-533.
30. Yoshida, T. and P.A. Troch. 2016. Convolution of volcanic catchments in Japan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20: 1133-1150.
31. Zheng, H., L. Zhang, C. Liu, Q. Shao and Y. Fukushima. 2007. Changes in stream flow regime in headwater catchments of the Yellow River Basin since the 1950s. *Journal of Hydrological Process*, 21(7): 886-893.