

بررسی تأثیر خشک‌سالی بر منحنی تداوم جریان در آبخیزهای کارستی (مطالعه موردی: آبخیز کاکارضا)

رحیم کاظمی و باقر قرمزچشمه

دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحات ۴۳۳ - ۴۴۳

Vol. 7(3), Autumn 2021, 433-443

DOI: 10.22034/JEWE.2021.265822.1499

**Investigating the Impact of Drought on Flow
Duration Curve in Karst Catchments (Case Study:
Kaka-Reza Catchment)**

Kazemi, R. and Ghermez-Cheshme, B.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

کاظمی، ر. و قرمزچشمه، ب. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر خشک‌سالی بر منحنی تداوم جریان در آبخیزهای کارستی (مطالعه موردی: آبخیز کاکارضا). محیط-زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۳، صفحات: ۴۳۳-۴۴۳.

Citing this paper: Kazemi, R. and Ghermez-Cheshme, B. (2021). Investigating the Impact of drought on flow duration curve in Karst catchments (Case study: Kaka-Reza catchment). Environ. Water Eng., 7(3), 433-443. DOI: 10.22034/JEWE.2021.265822.1499

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر خشک‌سالی بر منحنی تداوم جریان در آبخیزهای کاردستی (مطالعه موردی: آبخیز کاکارضا) رحیم کاظمی^{۱*} و باقر قرمزچشمه^۲

^۱استادیار، گروه پژوهشی حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۲استادیار، گروه پژوهشی هیدرولوژی و توسعه منابع آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: kazemi@itc.nl

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۱/۲۸]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۱۲/۰۲]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۱۰/۱۵]

چکیده

منحنی تداوم جریان، یکی از معیارهای مناسب شناخت پاسخ هیدرولوژیک آبخیزها است. شناخت برهمکنش پدیده خشک‌سالی با شاخص‌های منحنی تداوم جریان (FDC)، ابزاری مناسب برای مدیریت بهینه منابع آب آبخیز است. هدف پژوهش حاضر، بررسی رابطه زمانی خشک‌سالی و شاخص‌های FDC در آبخیز کاردستی کاکارضا است. در این پژوهش ابتدا دوره مشترک (۱۳۶۱-۱۳۹۶) برای ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی متناظر در نظر گرفته شد. سپس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص دبی استاندارد شده (SDI) در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ Mon محاسبه شد. FDC و تداوم جریان ترسیم و شاخص‌های منحنی محاسبه و استاندارد شد. روابط شاخص خشک‌سالی با شاخص‌های FDC با استفاده از روش همبستگی، بررسی و تحلیل شد. نتایج نشان داد که روند کلی تغییرات دو شاخص SPI و SDI در پایه‌های زمانی متناظر، از هم تبعیت می‌کند. ولی بیش‌ترین تطابق روندها مربوط به گام زمانی سه ماه است. میزان تغییرات نسبی در بخش شاخص کم‌آبی (Q₉₀/Q₅₀)، بسیار کم و در حد ۰/۰۶٪ و در بخش پرآبی (Q₂₅/Q₅₀) در حد ۴/۴۱٪ بود. همبستگی بین شاخص‌های استاندارد شده منحنی تداوم جریان و منحنی تداوم بارش، ضریب تبیین ۰/۹۰۴ را نشان داد. تغییرات شاخص شکل FDC در محدوده ۰/۵ تا ۰/۵٪ و روند تغییرات آن در طول دوره پژوهش با شیب ملایم، افزایشی است. میزان کم تغییرات شاخص‌های FDC و شاخص شکل منحنی، نقش پدیده کارست در تعیین شکل FDC و همچنین کنترل نوسانات جریان و تأمین جریان‌های پایدار در دوره خشک‌سالی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بارش استاندارد شده؛ پاسخ هیدرولوژیک؛ منابع آب کارست؛ منحنی تداوم بارش

۱- مقدمه

منحنی تداوم جریان، یکی از مناسب‌ترین معیارهای نمایش پاسخ هیدرولوژیک حوضه است و کاربردهای مختلفی در مدیریت منابع آب حوزه آبخیز دارد. این منحنی، درصد جریان روزانه، ماهانه یا دیگر گام‌های زمانی مربوط به یک دوره تاریخی رودخانه معینی را بیان می‌کند و از رسم تجمعی دبی رودخانه نسبت به زمان و یا برحسب احتمال وقوع به دست می‌آید (Alizadeh 2007). شکل و تفسیر عمومی هر منحنی تداوم جریان، بستگی به مشخصات هیدرولوژیکی، دوره آماری و مشخصه‌های آبخیز دارد. شکل منحنی، شاخصی از شرایط هیدرولوژیک آبخیز است و شیب منحنی در هر لحظه، مقدار دبی را در همان لحظه نشان می‌دهد (Zheng et al. 2007). نتایج شناخت برهم‌کنش مشخصه‌های آب و هوایی بر شکل منحنی تداوم جریان، منجر به دستیابی به اطلاعاتی برای پیش‌بینی و برآورد شرایط آبی هیدرولوژیکی حاکم بر آبخیز خواهد شد که در موضوعات مرتبط با مدیریت منابع آب آبخیز قابل‌استفاده است (Kazemi and Porhemmat 2018). مطالعات متعددی، پیرامون بررسی اثرات متقابل پدیده خشک‌سالی و مؤلفه‌های جریان در رودخانه‌های مناطق مختلف ایران و جهان، انجام شده است که نتایج این تحقیقات، شواهدی مبنی بر وقوع خشک‌سالی در رودخانه را نشان می‌دهند (Eghedari et al. 2016). نتایج Agawala et al. (2001) نشان داد که در ایران و کشورهای جنوب شرق آسیا از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱، به مدت سه سال خشک‌سالی شدیدی رخ داده است؛ و باعث افت ذخایر آبی ایران به مقدار ۴۵٪ شده است. شاخص منحنی تداوم جریان (FDCI¹) و شاخص بارش استاندارد شده (SPI²) برای تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیکی در رودخانه فریزی خراسان، توسط Islami and Shokouhi (2013) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص FDCI از حساسیت بیشتری نسبت به شاخص SPI در آشکارسازی خشک‌سالی هیدرولوژیکی، برخوردار است. نتایج پژوهش Sheikh and Moghaddam-Nia (2019) که به منظور بررسی تغییرات زمانی-مکانی شاخص‌های فصلی منحنی تداوم جریان در آبخیز دریاچه نمک انجام شد؛ نشان داد که روند کاهشی شدید معنی‌دار در ۵۰٪ از ایستگاه‌های

موردپژوهش وجود دارد. (Ghorbani et al. 2019) خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه‌ی ارمند را با استفاده از تجزیه و تحلیل شاخص‌های Q₇₀, Q₉₀, Q₉₅ مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که دوره‌های خشک در ۵۷ سال گذشته با شدت‌های متفاوت به وقوع پیوسته و شدت آن در سال‌های اخیر افزایش داشته است. نتایج بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز کرخه به روش حد آستانه ثابت توسط Karimi et al. (2019) نشان داد که حجم کمبود و بیش‌ترین تداوم خشک‌سالی در حد آستانه ۷۰ و ۸۰٪ در بیش‌تر ایستگاه‌ها، بعد از سال ۱۳۳۷ رخ داده است. نتایج بررسی روابط بین شاخص‌های SPI و SDI³ توسط Mofidipoor et al. (2011) در حوزه آبخیز اترک، رابطه زمانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک را در گام زمانی سه‌ماهه با بیش‌ترین همبستگی و در سطح ۹۹٪ نشان داد. فاصله زمانی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در آبخیز زاینده‌رود توسط Babaei et al. (2011) سه تا یازده-ماهه گزارش شده است. نتایج پژوهش Azareh et al. (2014) در آبخیز سد کرج، نشان داد؛ وقوع خشک‌سالی، بدون تأخیر بر آب‌های سطحی اثر می‌گذارد. Vardipour et al. (2014) نیز، همبستگی خشک‌سالی هیدرولوژیک و هواشناسی در دشت مشهد و وقوع هم‌زمان هر دو خشک-سالی را گزارش کردند. ایشان وقوع هم‌زمان دو خشک‌سالی را به کوچک بودن حوزه آبخیز مورد مطالعه مربوط دانستند. رابطه زمانی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز کرخه با استفاده از دو شاخص SPI و SDI در پایه‌های زمانی مختلف توسط Koushki et al. (2017) مورد پژوهش قرار گرفت. آن‌ها نتیجه گرفتند که همبستگی بین دو شاخص در تمام پایه‌های زمانی مورد استفاده دارای معنی داری در سطح ۹۹٪ است ولی این همبستگی در حالت بدون تأخیر دارای بیش‌ترین همبستگی است. روند زمانی خشک-سالی هیدرولوژیک و هواشناسی در حوزه آبخیز کرخه، توسط MesbahZadeh and SoleimaniSardoo (2018) مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد رابطه زمانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی در سطح ۹۹٪ معنی‌دار است و این همبستگی در بازه ۴۸ ماهه حداکثر است که اثر خود را با تأخیر یک یا دو ماهه در منابع آب سطحی، نشان داد. نتایج تحلیل و پایش خشک‌سالی هیدرولوژیکی در استان لرستان، با

¹ Flow Duration Curve index (FDCI)² Standardized Precipitation Index (SPI)³ Standardized Discharge Index (SDI)

مطالعات متعددی درخصوص شناخت برهم کنش شاخص-های خشک‌سالی با پاسخ هیدرولوژیک حوزه آبخیز، به‌منظور برآورد و پیش‌بینی شرایط آبی آب‌های سطحی و زیرزمینی به انجام رسیده است. ولی پژوهش‌های اندکی برای آگاهی از تأثیر خشک‌سالی بر تغییر شکل منحنی تداوم جریان در آبخیزهای کاردستی کشور، انجام شده است. از این‌رو هدف از این پژوهش، شناخت رفتار شاخص خشک‌سالی بر منحنی تداوم جریان، در یک آبخیز کاردستی کشور می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه پژوهش

حوزه آبخیز کاکارضا با مساحتی برابر با 1148 km^2 در محل خروجی ایستگاه هیدرومتری با کد ۱۶۹-۲۱ یکی از زیر-حوضه‌های کشکان در منطقه الشتر استان لرستان می‌باشد. منطقه مورد پژوهش یک آبخیز کاردستی با پوشش وسیع سازندهای کربناته است. از نظر توزیع سازندهای زمین-شناسی، حدود ۵۰٪ سطح آبخیز از سازندهای آهکی، آهک دولومیتی و آهک مارنی و حدود ۱۹٪ سازندهای آبرفتی و مابقی سازندهای نفوذناپذیر هستند. رودخانه اصلی این آبخیز، رودخانه هرو است و براساس روش آمبرژه، در محدوده اقلیم نیمه‌مرطوب سرد قرار می‌گیرد. طول آبراهه 83 km و شیب متوسط رودخانه ۳۴٪. طول کل شبکه آبراهه 2027 m با تراکم زهکشی ۰/۴۵ ارتفاع متوسط آبخیز 2027 m ، شیب متوسط آبخیز، برابر با ۲۴/۱٪ و دبی متوسط درازمدت $12/7 \text{ m}^3/\text{s}$ و بارندگی سالانه 534 mm است که در محدوده مختصات طول جغرافیایی $33^\circ 43'$ و عرض جغرافیایی $48^\circ 16'$ قرار دارد (Kazemi 2018). شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش را در استان و کشور نشان می‌دهد.

۲-۲- روش پژوهش

دوره مشترک (۱۳۹۶-۱۳۶۱) برای ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی متناظر، در نظر گرفته شد. سپس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص دبی استاندارد شده (SDI) در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ Mon، محاسبه شد. منحنی تداوم جریان (FDC) ترسیم و شاخص‌های Q_2 تا Q_{95} محاسبه و استاندارد شد. شاخص‌های منحنی تداوم جریان با اقتباس از روش شاخص بارش استاندارد شده در پایه‌های زمانی متناظر با شاخص خشک‌سالی محاسبه شد. شیب منحنی تداوم جریان در حدفاصل Q_{33} تا Q_{66} به‌عنوان

استفاده از دو شاخص SPI و SDI توسط Jahangir and Yarahmadi (2020) در گام‌های زمانی مختلف، نشان داد که تمام ایستگاه‌های آب‌سنجی حداقل یک خشک‌سالی شدید را تجربه کرده‌اند. استفاده از دو شاخص RDI^۱ و SDI در چندین آبخیز کوچک در یونان توسط Tigkas et al. (2012) بیشترین همبستگی شاخص RDI با گام زمانی دوازده‌ماهه و شاخص SDI با گام زمانی نه‌ماهه را نشان داد. نتایج پژوهش Vicente and Moreno (2005) در خصوص ارتباط خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در اسپانیا، نشان داد که تأثیر خشک‌سالی‌های هواشناسی با تأخیر یک تا سه‌ماهه بر آب‌های سطحی نمایان می‌شود. حال آنکه اثر آن بر آب‌های زیرزمینی با تأخیر ۷ تا ۱۰ ماهه نشان داده شده است. در خصوص تأثیر خشک‌سالی بر منابع آب آبخیزهای کاردستی، پژوهش‌های متعددی به انجام رسیده است که از جمله؛ می‌توان به پژوهش Frilliio and Guadagho (2010) اشاره کرد. ایشان رابطه دبی چشمه‌های کاردستی منطقه کاردستی جنوب ایتالیا با شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد شده را مطالعه کردند، نتایج نشان داد که روند تغییرات شاخص بارش استاندارد شده با گام زمانی ۱۲ Mon و دبی خروجی چشمه‌ها، مشابه می‌باشد. اثر خشک‌سالی بر ایجاد فروچاله‌ها^۲ در کارست‌های تبخیری شمال شرقی اسپانیا توسط Linares et al. (2017) به روش تحلیل فراوانی فروچاله‌ها با دوره‌های خشک‌سالی و با بهره‌گیری از داده‌های دبی جریان رودخانه، بارش و داده‌های پیژومتریکی، مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج نشان داد که فروچاله‌های موجود، ارتباط زمانی خوبی با دوره‌های خشک‌سالی دارند. نتایج بررسی Nerantzaki and Nikolaidis (2020) در خصوص پاسخ چشمه‌های کاردستی به خشک‌سالی به روش کمی‌سازی و تحت سناریوهای مختلف، نشان داد که در دوره‌های خشک‌سالی، دبی چشمه‌های کاردستی به میزان $14/2$ تا $25/1$ ٪ کاهش پیدا می‌کند. نتایج پژوهش‌های Fiorillo et al. (2020) در خصوص بررسی روند تغییرات دراز مدت دبی چشمه کاردستی در دو آبخوان کاردستی در جنوب ایتالیا، اثبات کرد که کاهش عمومی دبی چشمه در چند دهه گذشته در نتیجه تأثیر عوامل اقلیمی رخ داده است. جمع‌بندی مرور منابع نشان می‌دهد که در دو دهه گذشته،

¹Reconnaissance Drought Index (RDI)

²Sinkhole

که، S_k و \bar{R}_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.

جدول ۱ - طبقه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس شاخص (Amini et al. 2019) SPI

Table 1 Classification of drought based on SPI index (Amini et al. 2019)

Drought situation	Range
Very severe wet year	$SPI \geq 2.0$
severe wet year	$1.5 \leq SPI < 2.0$
Fair wet year	$1.0 \leq SPI < 1.5$
Poor Drought	$-1.0 \leq SPI < 1.0$
Fair drought	$-1.5 \leq SPI < -1.0$
Severe drought	$-2.0 \leq SPI < -1.5$
Very severe drought	$SPI < -2.0$

۲-۲-۲- شاخص‌های منحنی تداوم جریان استاندارد شده شاخص‌های منحنی تداوم جریان استاندارد شده^۳ (SFDCI) با اقتباس از روش رابطه (SPI) محاسبه شد، با این تفاوت که در آن به جای داده‌های بارش، مقادیر شاخص‌های منحنی تداوم جریان قرار داده می‌شود.

۲-۲-۳- شاخص شکل منحنی تداوم جریان منحنی تداوم جریان با استفاده از داده‌های روزانه جریان، ترسیم و شیب حدفاصل Q_{33} تا Q_{66} با استفاده از رابطه (۳) به عنوان شاخص شکل منحنی محاسبه شد. این قسمت از منحنی در مقیاس نیمه‌لگاریتمی به صورت خطی نمایان می‌شود و توسط پژوهشگران مختلفی به عنوان 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 (Yoshida and Troch 2016).

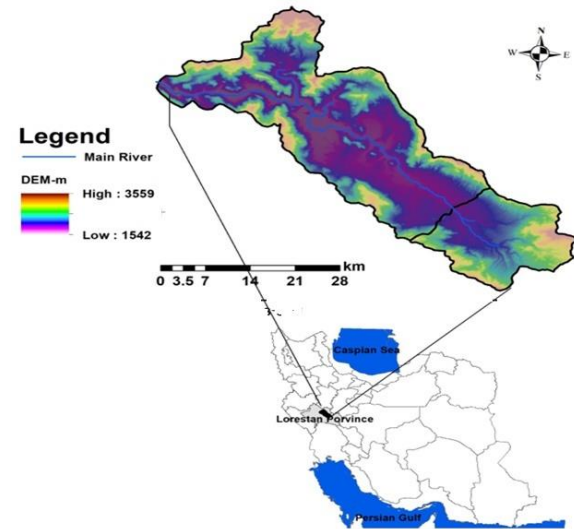
$$S_{BFDC} = \frac{LNQ_{33} - LNQ_{66}}{Q_{66} - Q_{33}} \quad (3)$$

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

۳- یافته‌ها و بحث

نتایج محاسبه شاخص SPI و روند تغییرات آن در طول دوره مورد پژوهش، در پایه‌های زمانی سه، شش، نه دوازده ماهه در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۲) قابل

شاخص شکل منحنی تداوم جریان^۱ (S_{FDC}) محاسبه شد. منحنی تداوم بارش (PDC^2) با استفاده از داده‌های بارش ماهانه ترسیم شد. روابط منحنی تداوم جریان با منحنی تداوم بارش بررسی شد. سپس، تغییرات شاخص منحنی تداوم جریان و رابطه آن‌ها با شاخص خشک‌سالی با استفاده از روش همبستگی بررسی و تحلیل شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش

Fig.1 Study area

۲-۲-۱- شاخص بارش استاندارد شده

این شاخص توسط (McKee 1993) ارائه شده است. در الگوریتم مربوطه، 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) سری-های زمانی بارندگی با مدت‌های مختلف را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به دست آورد.

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

$$k=1,2,3,4,5,6$$

شاخص بارش استاندارد (SPI) بر اساس ارتفاع بارش تجمعی (R_k) برای دوره مبنای K مربوط به (i) سال آبی به صورت رابطه (۲) به دست می‌آید.

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

$$k=1,2,3,4,5,6$$

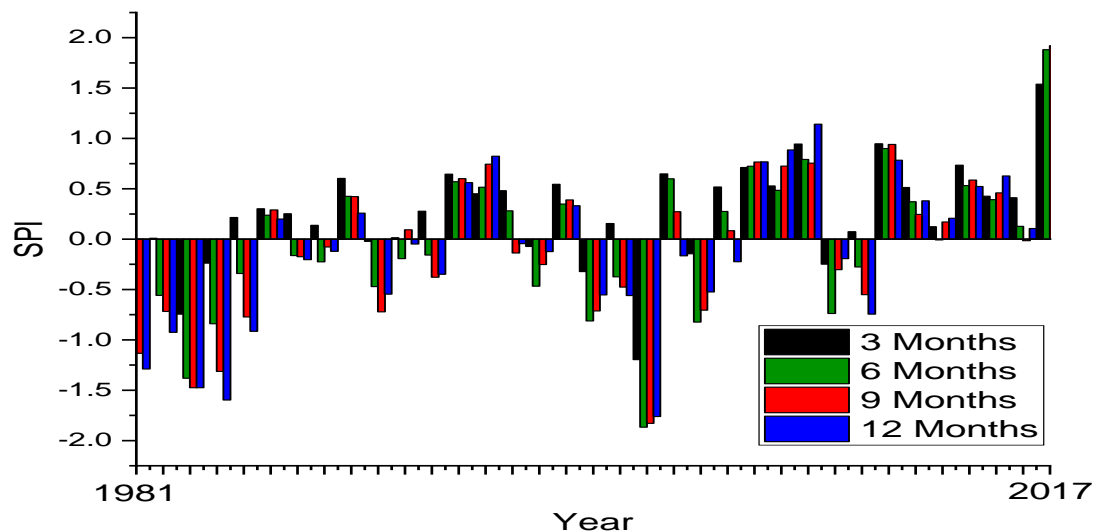
¹Slope of Flow Duration Curve (S_{FDC})

²Precipitation Duration Curve (PDC)



سالی‌ها را دارد، به نحوی که در نمودار مربوط به پایه زمانی سه‌ماهه مشخص است، این پایه زمانی، خشک‌سالی را به‌طور واضح، نمایان نکرده است.

مشاهده است، روندها و فراز و فرودهای این شاخص‌ها مشابه و از هم تبعیت می‌کند ولی میزان آن با اندکی تغییرات مواجه شده است. روند تغییرات شاخص بارش استاندارد شده، متناسب با پایه زمانی مربوطه، قابلیت آشکارسازی خشک-

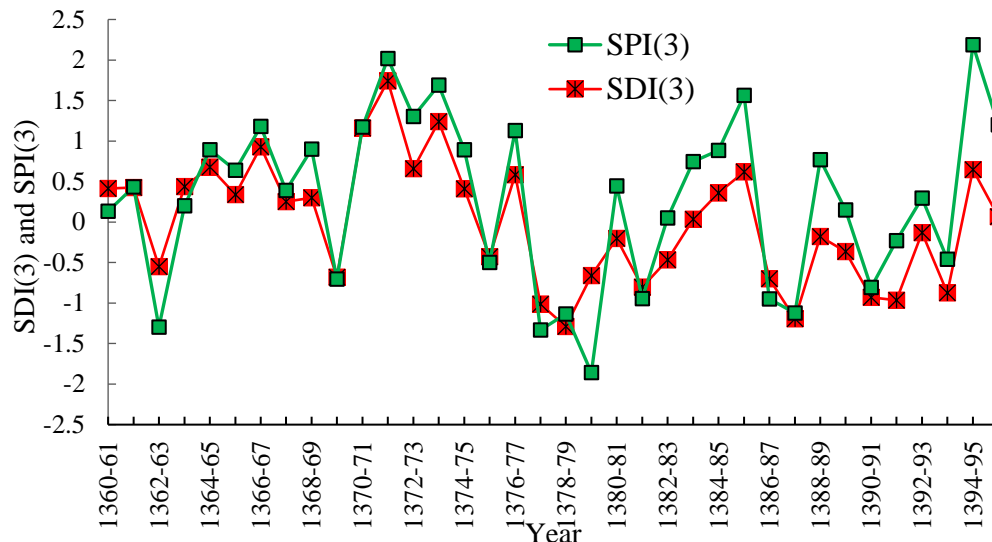


شکل ۲- روند تغییرات شاخص بارش استاندارد شده در پایه‌های زمانی مختلف

Fig. 2 Trend of standardized precipitation index changes in different time steps

(2010) است. با این تفاوت که در این پژوهش، بیش‌ترین تطابق در گام زمانی ۳ ماهه ثبت شده، ولی در پژوهش‌های مورد اشاره در گام زمانی ۱۲ ماهه ذکر شده است. همچنین نتیجه پژوهش Mofidipoor et al. (2011) مبنی بر حداکثر همبستگی در وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در گام زمانی سه‌ماهه، نیز با نتیجه پژوهش حاضر، مطابقت دارد. ولی با نتایج پژوهش et al. (2011)؛ Vardipour et al. (2014) و Babaei et al. (2014) مبنی بر وقوع هم‌زمان دو نوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، مغایرت دارد. البته این مغایرت با توجه به کارستی نبودن و همچنین، کوچک بودن آبخیزهای مورد پژوهش نیز قابل توجیه است؛ در حالی که آبخیز مورد نظر در این پژوهش به تناسب بسیار بزرگ‌تر از آن‌ها است و همچنین به دلیل کارستی بودن آبخیز مورد پژوهش و پوشش بیش از ۵۰٪ سازندهای کربناته و احتمال وجود منابع آب کارست، قابل توجیه است. همچنین نتیجه این پژوهش مبنی بر تطابق کلی روند شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در کلیه پایه‌های زمانی، با نتایج پژوهش et al. (2017) Koshki مبنی بر معنی‌داری همبستگی بین دو شاخص در تمام پایه‌های زمانی در تطابق است.

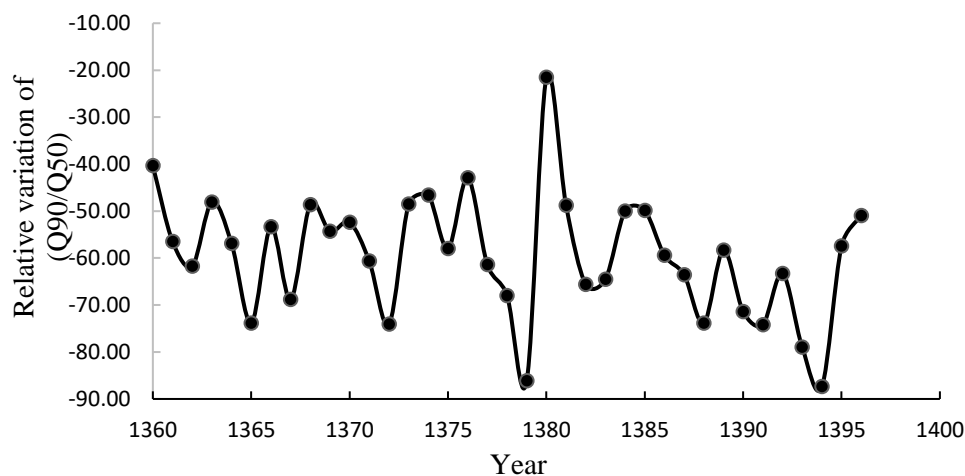
ولی از پایه زمانی شش‌ماهه به بالا، خشک‌سالی در محدوده زمانی سال ۶۴-۶۵ و ۸۰-۸۱ به نحو مناسبی، آشکار شده و حد پایین شاخص خشک‌سالی تا محدوده منفی دو، مؤید این مطلب است. مطابق با جدول (۱) دو طبقه خشک‌سالی متوسط و شدید، قابل شناسایی است. این نتیجه با نتایج پژوهش Agawala et al. (2001) مبنی بر وقوع پدیده خشک‌سالی در گستره ۱۰ استان کشور و در محدوده زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ و افت شدید ذخایر آبی در سال ۱۳۸۰ مطابقت دارد. ولی از منظر درجه و شدت خشک‌سالی، میزان شدت خشک‌سالی به دست آمده در منطقه مورد پژوهش، کم‌تر از میزان گزارش شده در پژوهش‌های فوق است. نتایج تهیه شاخص SDI و مقایسه آن با شاخص SPI که در شکل (۳) آورده شده است نشان داد که در پایه‌های زمانی متناظر، روند کلی تغییرات دو شاخص از هم تبعیت می‌کند، ولی بیش‌ترین تطابق روندها، مربوط به گام زمانی ۳ Mon است که حداکثر تطابق روند را نشان می‌دهد. تطابق روند در این پایه، نشان‌دهنده تأثیرپذیری مستقیم دبی جریان سطحی از بارش در گام زمانی سه ماه در این منطقه کارستی است. تشابه روند کلی تغییرات دو شاخص SPI و SDI در گام‌های زمانی مختلف، هم‌راستا با نتایج پژوهش Frilliio and Guadagho



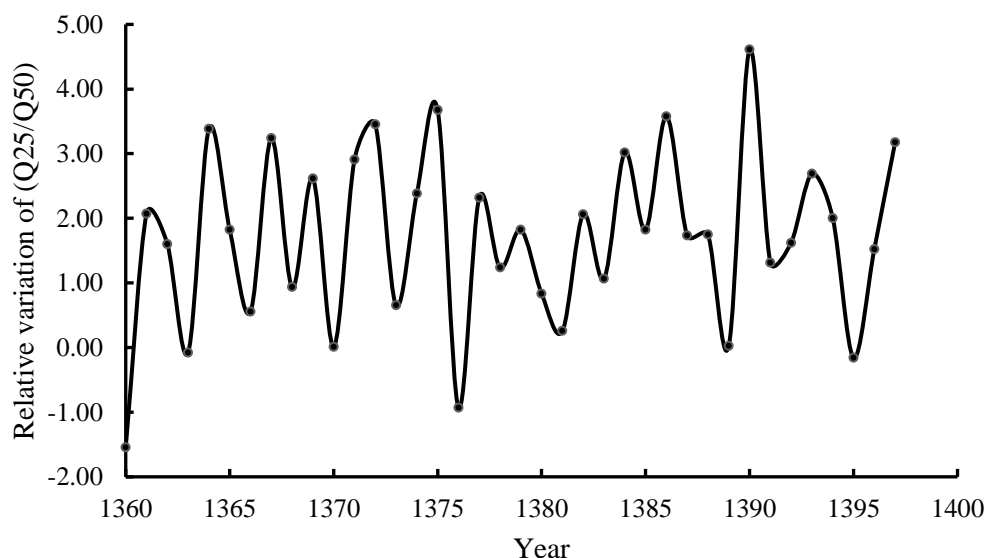
شکل ۳- تطابق روند شاخص‌های SPI و SDI در دوره زمانی مورد پژوهش
Fig. 3 Matching the trend of SPI and SDI indices in the study period

از پدیده خشکسالی و نوسانات آن است. میزان تغییرات نسبی در بخش شاخص‌های کم‌آبی، بسیار کم و در حد ۰/۶٪ است که نقش منابع آبی کارست در کنترل نوسانات جریان و تداوم جریان را نمایان می‌کند. ولی در بخش پرآبی، این دامنه بسیار گسترده و در حد ۴/۴۱ می‌باشد. میزان تغییرات شاخص‌های Q_{90}/Q_{50} و Q_{25}/Q_{50} در نتایج پژوهش Zheng et al. (2007) که در آبخیز رود زرد و در دوره ۳۴ ساله بررسی شده، به میزان ۲۸٪ برای شاخص پرآبی (Q_{90}/Q_{50}) و ۱۰۰٪ برای شاخص کم‌آبی (Q_{25}/Q_{50}) گزارش شده است؛ که تفاوت را در نوع منابع آبی کارست و نقش کارست در کنترل نوسانات جریان‌های سطحی می‌توان دانست.

تغییرات نسبی شاخص‌های منحنی تداوم جریان، در طول دوره پژوهش محاسبه شد و نمونه‌ای از روند تغییرات نسبی این شاخص‌ها در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. البته میزان این شاخص‌ها، متناسب با تغییرات اقلیمی، نوساناتی را تجربه کرده است و همچنین از ابتدای سال آماری موردنظر تا انتها، یک‌روند کاهشی با شیب ملایم را شاهد می‌باشیم. میزان فراز و فرود این شاخص‌ها، به علت دخالت عامل بارش در تأمین جریان کلی رودخانه و فراز و فرود ناشی از شرایط اقلیمی و میزان بارش است. تغییرات نسبی شاخص‌های بخش پرآبی منحنی تداوم جریان، عموماً روند افزایشی دارد و شاخص‌های بخش انتهایی منحنی تداوم جریان، روند کاهشی دارد. روند افزایشی تغییرات نسبی شاخص‌های بخش پرآبی منحنی، نشان‌دهنده این است که این بخش از منحنی، متأثر



شکل ۴- روند تغییرات نسبی شاخص Q_{90}/Q_{50} در طول دوره مورد پژوهش
Fig. 4 Trend of relative variation of (Q_{90}/Q_{50}) during the research period

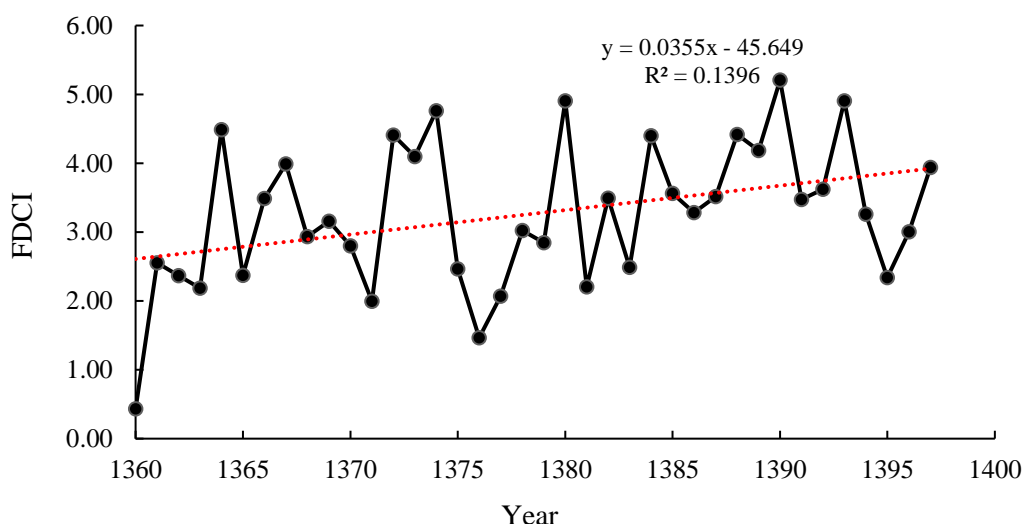


شکل ۵- روند تغییرات نسبی شاخص Q_{25}/Q_{50} در طول دوره مورد پژوهش

Fig. 5 Trend of Relative variation of (Q_{25}/Q_{50}) during the research period

ملازم افزایش شیب منحنی تداوم جریان (شکل ۶) مشابه است. محدوده شیب منحنی ۰/۵ تا ۰/۵٪ است. نقش پدیده کارست در کنترل شکل منحنی تداوم جریان و نوسانات کم در شیب منحنی، در دوره خشک‌سالی در منطقه پژوهش آشکار است.

به منظور بررسی تأثیر نوسانات شاخص اقلیمی بر شکل منحنی تداوم جریان، شیب منحنی در حدفاصل Q_{33} تا Q_{66} که به عنوان شاخص شکل منحنی تداوم جریان محاسبه شد که شکل (۶) روند تغییرات شاخص شکل منحنی را در طول دوره پژوهش نشان می‌دهد. روند افزایش ملازم تغییرات شاخص‌های پربابی منحنی تداوم جریان (شکل ۴)، با روند

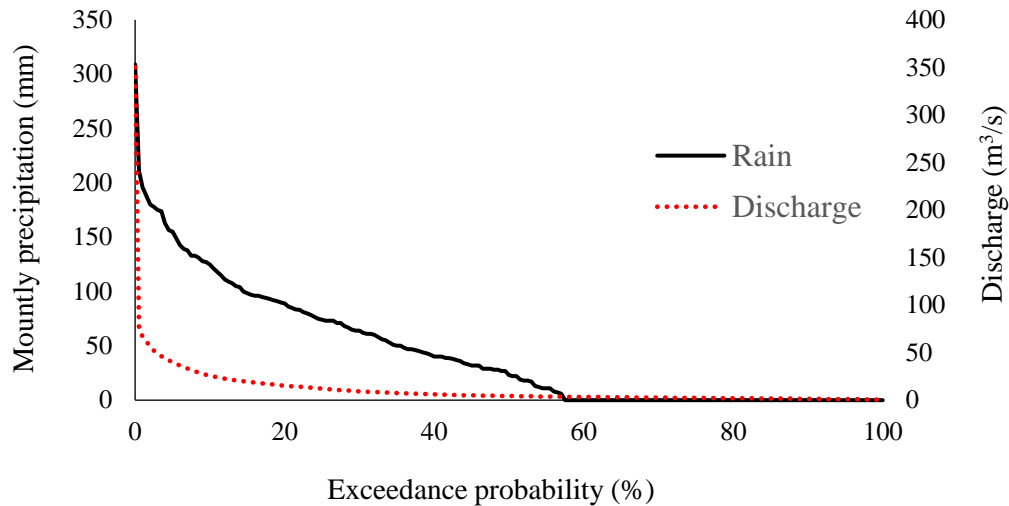


شکل ۶- تغییرات شیب منحنی تداوم جریان در طول دوره مورد پژوهش

Fig. 6 Changes in the slope of the flow duration curve during the study period

بسیار ملازم است. این تفاوت نشان‌دهنده، نقش کارست در تأثیر تدریجی بارش بر شاخص تداوم جریان است و منطبق با نتیجه حاصل از بخش اول، مبنی بر تطابق روند کلی شاخص‌های SPI و SDI ارائه شده در شکل (۳) است.

نتایج ترسیم منحنی تداوم جریان (FDC) و منحنی تداوم بارش (PDC) که با استفاده از سری زمانی بارش ماهانه و سری زمانی جریان رودخانه استخراج شد در شکل (۷) ارائه شده است. در مقام مقایسه، شیب منحنی تداوم بارش (PDC) بسیار تند و شیب منحنی تداوم جریان (SFDC)

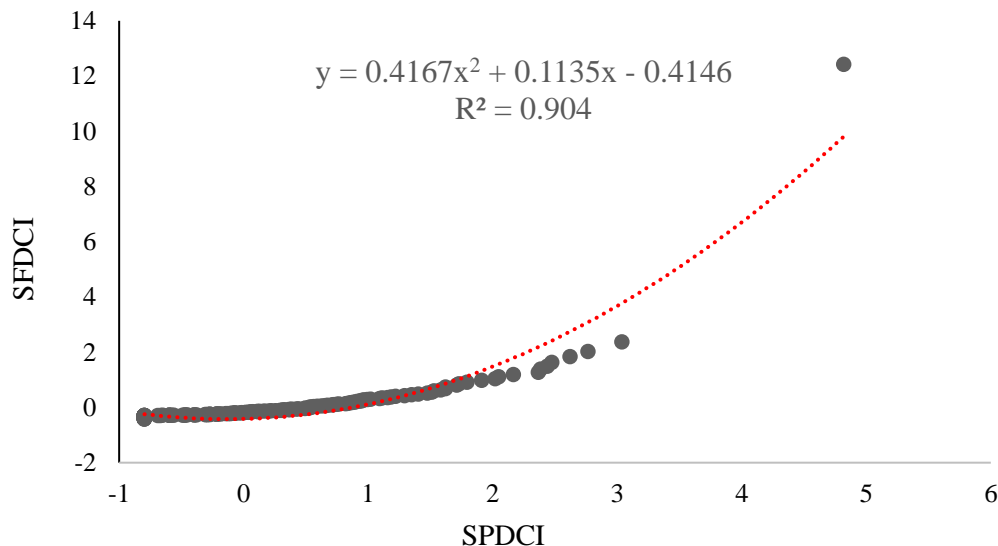


شکل ۷- منحنی تداوم جریان و منحنی تداوم بارش

Fig. 7 Flow duration curve and Precipitation duration curve

حالت بدون تأخیر، بین شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی است. همبستگی بالای شاخص‌های استاندارد شده (FDC) و (PDC)، منجر به تأثیر بر شکل منحنی تداوم جریان می‌شود که در نتایج پژوهش Kazemi and Porhemmat (2018) نیز تأثیر مؤلفه‌های اقلیمی بر شکل منحنی تداوم جریان، گزارش شده است.

شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان (FDC) و منحنی تداوم بارش (PDC) به روش اکتباس شده از روش (SPI) استاندارد شد که رابطه همبستگی آن‌ها در شکل (۸) ارائه شده است. همبستگی بالا با ضریب تبیین 0.904 بیانگر تأثیر بدون تأخیر خشک‌سالی هواشناسی بر شاخص‌های تداوم جریان است؛ که این نتیجه، هم‌راستا با نتایج تحقیقات Koushki et al. (2017) مبنی بر بیشترین همبستگی در



شکل ۸- رابطه شاخص‌های بارش استاندارد شده و شاخص منحنی تداوم جریان استاندارد شده

Fig. 8 Relationship between standardized precipitation and standardized flow duration curve indices

کاکا رضا در منطقه الشتر لرستان را مورد بررسی قرار داد. بر این اساس شاخص‌های SDI، FDCI، PDCI و SPI در دوره آماری ۱۳۶۱-۱۳۹۶ مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش تأثیر خشک‌سالی بارش بر منحنی تداوم جریان در آبخیز کارستی کوهستانی- دشتی با شکل کشیده بنام

۴- ارتباط شاخص استاندارد شده منحنی تداوم جریان و بارش، یک رابطه‌ی نمایی با همبستگی بسیار بالا را ارائه کرد که این شاخص می‌تواند در تحلیل منابع آب آبخیزهای کاردستی مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از بخشی از نتایج پروژه پژوهشی با عنوان "بررسی تأثیر خشک‌سالی بر آب‌های سطحی حوضه کشکان" با کد ۹۸۰۲۲۹-۹۸۰۰۸-۹۸۰۱-۹۸۰۱۲-۲۹-۲۹-۱۲۴۸ است که در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به انجام رسیده است. بدین‌وسیله از همراهی و مساعدت مسئولین محترم پژوهشکده تشکر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش متعلق به پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است و مستخرج از نتایج پروژه پژوهشی با عنوان "بررسی تأثیر خشک‌سالی بر آب‌های سطحی حوضه کشکان" با کد ۹۸۰۲۲۹-۹۸۰۰۸-۹۸۰۱-۹۸۰۱۲-۲۹-۲۹-۱۲۴۸ است. پس از دفاع و اخذ شماره فروست، از انتشارات سازمان متبوع قابل دریافت است.

References

- Agawala, S., Barlow, M., Gullen, H. and Lyon, B. (2001). The drought and humanitarian crisis Central Southwest Asia: A climate perspective. International research institute for climate prediction, Palisades (IRI) Special Report. 1(1), 11-24.
- Alizadeh, A. (2007). Principal of applied hydrology, 14th Ed. Mashhad. Emamreza University [In Persian].
- Amini, A., Abdeh Kolahchi, A., Al-Ansari, N., Karami Moghadam, M. and Mohammad, T. (2019). Application of TRMM precipitation data to evaluate drought and its effects on water resources instability. Appl. Sci., 9(24), 1-18.
- Azareh, A., Rahdari, M. R., Sardoi, E. R. and Moghadam, F. A. (2014). Investigate the relationship between hydrological and meteorological droughts in Karaj dam basin. Euro. J. Experim. Bio., 4(3), 102-107.
- Babaei, H., Araghinejad, S. H. and Horfar, A. (2011). Time interval identification of the occurrences of meteorological and

جمع‌بندی نتایج بررسی روابط بین شاخص خشک‌سالی، شاخص‌های منحنی تداوم جریان و منحنی تداوم بارش، نشان‌دهنده قابلیت این روابط در رفتارشناسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی و شناخت پاسخ هیدرولوژیک آبخیز در یک منطقه کاردستی است. در این خصوص نتایج ذیل شایان توجه است.

- ۱- بررسی خشک‌سالی در پایه‌های زمانی ۳ تا ۱۲ ماهه نشان داد که بازه خشک‌سالی آبخیز، بین ۲ تا ۲- (خشک‌سالی شدید تا ترسالی شدید) بوده ولی نوسانات خشک‌سالی‌های شدید، نسبت به ترسالی بیشتر مشاهده شد.
- ۲- میزان کم تغییرات نسبی شاخص‌های تداوم جریان و پایین بودن شاخص شکل منحنی تداوم جریان (شیب ۰.۵٪ تا ۵٪) نقش منابع آبی کارست در تعیین شکل منحنی تداوم جریان و همچنین کنترل نوسانات جریان و تأمین جریان‌های پایدار را نشان داد.
- ۳- مقایسه FDC و PDC نشان داد که شیب PDC نسبت به FDC بیشتر بوده و این موضوع بیانگر تأثیر تدریجی اثرات بارش بر رواناب و نقش پدیده کارست در ایجاد این تأخیر در آبخیز کاردستی است.

hydrological droughts in Zayandeh-Rud basin. Arid Biom. Sci. Res. J., 1(3), 1-12 [In Persian].

- Eghtedari, M., Bazrafshan, J., Shafie, M., and Hejabi, S. (2016). Prediction of streamflow drought using SPI and Markov chain in Kharkheh Basin. J. Water Soil Cons., 23(2), 115-130 [In Persian].
- Fiorillo, F., and Guadagno, F. M. (2010). Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. Water Resour. Manage., 24(9), 1867-1884.
- Fiorillo, F., Leone, G., Pagnozzi, M. and Esposito, L. (2020). Long-term trends in karst spring discharge and relation to climate factors and changes. Hydrogeol. J., 29, 347-377.
- Ghorbani, M., Mozayyan, M. and Zarei, H. (2019). Hydrological drought investigation of Armand River using low flows analysis. J. Water Soil Conser., 26(3), 247-263 [In Persian].
- Islami, A. R. and Shokouhi, A. R. (2013). Analysis of river flow status using

- hydrological-environmental drought index. *J. Water Manage. Eng. Manage.*, 5(2), 125-133 [In Persian].
- Jahangir, M. H. and Yarahmadi, Y. (2020). Hydrological drought analyzing and monitoring by using streamflow drought index (SDI) (case study: Lorestan, Iran). *Arab. J. Geosci.*, 13(3), 1-12.
- Karimi, M., Shahedi, K. and Bayazidi, M. (2019). Analysis of hydrological drought using constant threshold level method (Case study: Karkheh River Basin, Iran). *J. Water. Manage. Res*, 6(11), 59-72 [In Persian].
- Kazemi, R. (2018). Modeling of base flow using geomorphologic parameters in Karkheh Basin, PhD Thesis, Khwarizmi University, Iran [In Persian].
- Kazemi, R. and Porhemmat, J. (2018). Investigation and determination of factors affecting the shape of the flow duration curve in different climates of Iran. *J. Water Soil Conser.*, 25(1), 85-105 [In Persian].
- Koushki, R., Rahimi, M., Amiri, M., Mohammadi, M. and Dastorani, J. (2017). Investigation of relationship between meteorological and hydrological drought in Karkheh watershed. *Iran. J. Ecohydrol.*, 4(3), 687-698.
- Linares, R., Roqué, C., Gutiérrez, F., Zarroca, M., Carbonel, D., Bach, J. and Fabregat, I. (2017). The impact of droughts and climate change on sinkhole occurrence. A case study from the evaporite karst of the Fluvia Valley, NE Spain. *Sci. Tot. Environ.*, 579, 345-358.
- McKee, T. B. and Doesken, N. J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales Eight Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA, American Meteorological Society. 179-18u PP.
- MesbahZadeh, T. and SoleimaniSardoo, F. (2018). Temporal trend study of hydrological and meteorological drought in Karkheh watershed. *Iran. J. Watershed Manage. Sci. Eng.*, 12(40), 105-114 [In Persian].
- Mofidipoor, N., Sheikh, V., Ownegh, M. and Sadodin, A. (2011). The analysis of relationship between meteorological and hydrological droughts in Atrak. *J. Watershed Manage. Res.*, 3(5), 16-26 [In Persian].
- Nerantzaki, S. D. and Nikolaidis, N. P. (2020). The response of three Mediterranean karst springs to drought and the impact of climate change. *J. Hydrol.*, 591, 125296. DOI.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125296.
- Sheikh, Z. and Moghaddam-Nia, A. (2019). Spatio-temporal changes evaluation of flow duration curve seasonal indexes (FDCSI) during four decades in Namak Lake Basin, Iran *Water Resour. Res.*, 15(2), 39-56 [In Persian].
- Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G. (2012). Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Sci. Tot. Environ.*, 440, 33-41.
- Vardipour, A., Azarakhsh, M., Mosaedi, A. and Farzadmehr, J. (2014). The relationship between meteorological and hydrological droughts Mashhad plain. The national conference of sciences and environment engineering, June. Ahvaz [In Persian].
- Vicente-Serrano, S. M. and Lopez-Moreno, J. I. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9(5), 523-533.
- Yoshida, T. and Troch, P. A. (2016). Convolution of volcanic catchments in Japan. *J. Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1133-1150.
- Zheng, H., Zhang, L., Liu, C., Shao, Q. and Fukushima, Y. (2007). Changes in stream flow regime in headwater catchments of the Yellow River basin since the 1950s. *J. Hydrol. Process*, 21(7), 886-893.

Research Paper

Investigating the Impact of Drought on Flow Duration Curve in Karst Catchments (Case study: Kaka-Reza Catchment)

Rahim Kazemi^{1*} and Bagher Ghermez-Cheshme²

¹Assist. Professor, Water and Soil Conservation Research Group, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

²Assist. Professor, Hydrology and Water Resources Development Research Group, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

*Corresponding author: Kazemi@itc.nl

Received: January 04, 2021

Revised: February 20, 2021

Accepted: April 17, 2021

Abstract

Flow duration curve (FDC) is one of the most appropriate criteria for recognizing the hydrological response of catchments. Understanding the interaction of drought phenomenon along with FDC indices is a suitable tool for optimal water resources management of catchment. The aim of this study was to investigate the temporal relationship between drought and FDC indices in the Kaka-Reza, karstic catchment. In this study, the common period (1982-2017) was considered for the corresponding hydrometric and rain gauge stations. The standardized precipitation index (SPI) and standardized discharge index (SDI) were then calculated at time scales of 3, 6, 9, and 12 months. Precipitation duration curve (PDC) and FDC were plotted and curve indices were calculated and standardized. The relationships between drought index and FDC indices were investigated and analyzed. The results showed the general trend of changes in SPI and SDI in the respective time scales follow each other. However, the most consistent trends are related to the time step of three months. The rate of relative changes in the section of low flow indices (Q_{90}/Q_{50}) were very small and around 0.6% and in the high flow (Q_{25}/Q_{50}) was around 4.41%. The correlation between FDC and PDC showed coefficient of determination of 0.904. The rate of slope change was from 0.5 to 5% and trend of its changes was a slight upward slope during the research period. The small amount changes of FDC indices and slope of FDC showed the role of karst phenomenon in determining the shape of FDC as well as controlling flow fluctuations and providing stable flow during the drought period.

Keyword: Hydrologic Response; Karst Water Resource; Precipitation Duration Curve; Standardized Precipitation Index