

تحلیل و بررسی شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی استان کردستان

قاسم مرتضایی فریزه‌ندی^{۱*}، جعفر لطفی مغانجوقی^۲، شهرام خلیقی سیگارودی^۳، محسن محسنی ساروی^۴ و علی اکبر نظری سامانی^۵

^۱استاد، پژوهشکده مطالعات توسعه سازمان جهاد دانشگاهی تهران، مامور در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ^۲دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران ^۳دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران و ^۴استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۰۵

چکیده

استان کردستان در سال‌های اخیر با افت چشم‌گیر سطح آب زیرزمینی مواجه شده است. در این پژوهش، فاصله زمانی بین وقوع خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی، در جهت تمهیدات لازم برای مقابله با خشکسالی ناشی از کمبود منابع آبی سطحی و زیرزمینی تعیین شد. به همین دلیل، وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی استان کردستان با استفاده از شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) و شاخص خشکسالی جریان‌ات رودخانه‌ای (SDI) ارزیابی و با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی مقایسه شد. مطابق نتایج، شاخص GRI طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۳-۱۳۹۳) در مقایسه با شاخص SDI در مقیاس زمانی و دوره آماری یکسان از مقادیر بالاتر بیشینه شدت خشکسالی و بیشینه تداوم خشکسالی برخوردار است. نتایج حاصل از شاخص GRI در دوره آماری مورد مطالعه نشان داد که خشکسالی نرمال دارای بیشترین درصد فراوانی است. بر اساس نتایج آزمون من-کندال، در تمام مقیاس‌های زمانی شاخص SDI دارای تغییرپذیری بالاتری نسبت به شاخص‌های خشکسالی هواشناسی است. همچنین، از مدل زنجیره مارکف برای پیش‌بینی حالت فعلی یک سیستم به حالت‌های قبلی استفاده شد و با توجه به دوره آماری، این مدل دقت و صحت خوبی نشان داد. طبق نتایج مورد مطالعه، به‌طور میانگین، احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های منطقه به ترتیب ۳۱، ۲۹ و ۴۰ درصد است که این بدین معنی است که در بیشتر مواقع منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد، در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک و مرطوب خیلی به هم نزدیک است. همچنین، شاخص بارندگی و تبخیر تعرق استاندارد شده (SPEI) در مقیاس ۱۲ و ۲۴ ماهه با سه ماه تاخیر با شاخص GRI بیشترین همبستگی را دارد که حاکی از تاثیرگذاری خشکسالی هواشناسی پس از گذشت دو سال و بیشتر بر سطح آب زیرزمینی است که با اطلاع از آن مدیران اجرایی می‌توانند از ایجاد بحران‌های ناشی از اثرات خشکسالی هیدرولوژیکی جلوگیری کنند.

واژه‌های کلیدی: آزمون من-کندال، زنجیره مارکف، GRI، SDI، SPEI

مقدمه

یک بوم‌سازگان می‌گذارد. گرچه امکان جلوگیری از وقوع آن وجود ندارد، اما می‌توان با اقداماتی اثرات منفی آن را کاهش داد.

خشکسالی به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی دسته‌بندی می‌شود که تاثیرات عمده‌ای بر بخش‌های

در محدوده دشت یزد-اردکان در دوره آماری ۳۰ ساله مورد بررسی قرار دادند. برای تحلیل خشکسالی‌ها از دو شاخص SPI و GRI در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه استفاده کردند. نتایج بررسی رابطه بین دو شاخص فوق نشان داد، با افزایش پایه زمانی ضریب همبستگی بین این دو شاخص نیز افزایش می‌یابد. تاخیر زمانی بین دو خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی را یک تا دو سال برآورد کردند. همچنین، نتایج بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی حاکی از روند نزولی آن بوده و متوسط افت سطح سفره در طول دوره آماری ۰/۵ متر در سال گزارش شده است.

Tabari و همکاران (۲۰۱۳) اقدام به ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI در شمال غرب ایران کردند و نشان دادند، بر اساس نتایج، تقریباً تمام ایستگاه‌ها تحت تاثیر خشکسالی شدید هستند.

Karimi و همکاران (۲۰۱۳) خشکسالی هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز کرخه به وسیله شاخص حد آستانه و با استفاده از داده‌های دبی روزانه ۱۳ ایستگاه هیدرومتری را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج بررسی‌ها در این مطالعه نشان داد، بیشترین حجم کمبود و تداوم خشکسالی در ۷۷ درصد از ایستگاه‌ها از سال ۱۳۷۷ به بعد رخ داده است. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل فراوانی مشخصه‌های خشکسالی توزیع جانسون برای متغیر حجم کمبود و توزیع نمایی دو متغیره و جانسون برای متغیر تداوم تشخیص داده شد. در نهایت، با استفاده از توزیع‌های آماری تعیین شده دوره بازگشت خشکسالی محاسبه شد و بدین صورت امکان پیش‌بینی خشکسالی فراهم می‌شود.

Nosrati (۲۰۱۳) با هدف تعیین مقادیر شاخص جریان پایه و بررسی کارایی آن در تعیین نوع رژیم جریان و تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز سفیدرود ابتدا سه منطقه همگن خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس سطح آستانه و تحلیل خوشه‌ای تعیین کرد. سپس، شاخص جریان پایه در مقیاس روزانه با استفاده از داده‌های روزانه دبی در ۲۸ ایستگاه هیدرومتری مناطق همگن محاسبه شد. نتایج نشان داد که میانگین منطقه‌ای شاخص

خشکسالی هیدرولوژیکی با کمبود جریان در جنبه‌های مختلفی از جمله جریان سطحی رودخانه‌ها، سطح مخازن و افت سطح ایستابی در سفره‌های آب زیرزمینی بروز می‌کند. به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر سیکل هیدرولوژیکی، شناخت و تفسیر این نوع خشکسالی نیازمند داده‌های مختلف با طول دوره آماری بلندمدت و دخالت متغیرهای متنوعی است.

Abhishek و همکاران (۲۰۱۶) دو شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI^۱ و GRI^۲ را در مقیاس‌های زمانی مختلف برای ارزیابی خشکسالی در حوضه رودخانه کریشنا^۳ در یک دوره آماری ۳۶ ساله (۲۰۰۷-۱۹۷۲) مقایسه کردند. نتایج این مقایسه نشان داد، همبستگی خوبی بین دو شاخص در مقایسه نه ماهه وجود دارد که با افزایش مقیاس زمانی به ۱۲ ماهه این ارتباط بیشتر می‌شود.

Soleymani و Hughiezadeh (۲۰۱۶) از شاخص بارش استاندارد شده SPI^۴ و SDI برای تحلیل زمانی وقوع خشکسالی‌ها و تاثیر آن بر کاهش آبدهی دریاچه کیو خرم‌آباد استفاده کردند. در این پژوهش، ارتباط بین دو شاخص را بر اساس داده‌های بارندگی و دبی جریان تعیین کردند. نتایج حاصل نشان داد، رابطه زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار است و در بازه زمانی شش ماهه بیشینه مقدار را دارا می‌باشد. همچنین، خشکسالی سبب کاهش آب دریاچه شده که این تاثیر در همان ماه و یا با یک ماه تاخیر بر آبدهی دریاچه تاثیرگذار بوده است.

Aghabeygi (۲۰۱۵) به مطالعه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در استان گیلان با استفاده از SPI و SDI پرداخت. نتایج این پژوهش، نشان داد که رابطه زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در بازه زمانی ۱۲ ماهه بیشینه است و مقدار این همبستگی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود. Ekrami و همکاران (۲۰۱۴) تاثیر خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی را بر روی منابع آب زیرزمینی

^۱ Stream flow Drought Index

^۲ Groundwater Resource Index

^۳ Kerishna

^۴ Standardized Precipitation Index

آذربایجان غربی و زنجان، از شرق به همدان و زنجان، و از جنوب به استان کرمانشاه و از غرب به کشور عراق محدود است. استان کردستان بین 34° تا $30'$ 30° عرض شمالی و 45° $31'$ تا 48° $16'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است (شکل ۲).

مهمترین متغیر تأثیرگذار بر خشکسالی در هر منطقه میزان نزولات جوی است. دامنه بارش سالانه در استان کردستان به‌طور متوسط بالغ بر 300 تا 950 میلی‌متر در سال می‌باشد. بیشترین میزان بارندگی مربوط به شهرهای مریوان و بانه به‌ترتیب با حدود 900 و 700 میلی‌متر در سال و کمترین میزان بارندگی در ناحیه شرق، حدود 340 میلی‌متر و در قسمت مرکزی استان یعنی سنندج نزدیک به 400 میلی‌متر در سال است. همچنین، دومین متغیر از نظر نمایه خشکسالی دما است. میانگین دما در این استان از $7/8$ تا $13/9$ تغییر می‌کند (Tabari و همکاران، 2013).

روش پژوهش: در این پژوهش، در مجموع از 15 ایستگاه آب‌سنجی، باران‌سنجی و سینوپتیک به‌صورت روزانه، ماهانه و سالانه در استان کردستان استفاده شده است. برای بررسی خشکسالی هواشناسی از داده‌های روزانه، ماهانه و سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک (هشت ایستگاه باران‌سنجی و دو ایستگاه سینوپتیک) و برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی از داده‌های روزانه، ماهانه، سالانه ایستگاه‌های هیدرولوژی (پنج ایستگاه) با دوره آماری 30 ساله (به‌صورت سال آبی)، از سال $64-1363$ تا سال $93-1392$ استفاده شده است.

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) نخستین بار به‌وسیله McKee و همکاران (1993)، برای پیش خشکسالی در ایالت کلرادو ارائه شد. تنها ورودی مورد نیاز SPI داده‌های بارش ماهانه یا هفتگی است.

شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI)، به‌وسیله Vicente-serrano و همکاران (2010)، ارائه شد و به‌عنوان یک شاخص خشکسالی اقلیمی معرفی شد. این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. معادله ترازمندی

جریان پایه سالانه با میزان $0/65$ با مقدار انحراف معیار $0/19$ در دوره آماری بلندمدت ثابت می‌باشد. محدوده شاخص جریان پایه $0/17-0/86$ است و بر اساس صدک‌های 25 ، 50 و 75 رژیم جریان رودخانه‌ها به چهار طبقه تقسیم‌بندی شد که بیش از 50 درصد حوزه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه دارای رژیم کم پایدار و ناپایدار است.

Lucas و Vasiliades (2005) به بررسی ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌وسیله شاخص‌های SPI و شاخص رواناب استاندارد شده SRI¹ پرداختند. نتایج نشان داد، SPI در مقیاس‌های کوچک‌تر یک شاخص مناسبی برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه‌های کوچک است و SRI با مقیاس بزرگ در حوضه‌های بزرگ‌تر مناسب است.

به‌طور کلی، هدف از این مطالعه، در ابتدا تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های SDI و GRI و در آخر، با بررسی ارتباط بین شاخص بارندگی SPI و شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده SPEI² و خشکسالی هیدرولوژیکی فاصله زمانی و یا تاخیری بین زمان وقوع خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی تعیین شده است. اطلاع از این فاصله زمانی به مدیران و برنامه‌ریزان برای مقابله با اثرات منفی ناشی از وقوع خشکسالی هواشناسی کمک خواهد کرد و از اثرات احتمالی ناشی از خشکسالی هیدرولوژیکی در آینده جلوگیری می‌کند. همچنین، نتایج پژوهش حاضر به تبیین استراتژی‌های لازم در قالب مدیریت ریسک خشکسالی در سامانه‌های منابع آب کمک خواهد کرد. در شکل ۱، ارتباط بین انواع خشکسالی‌ها تشریح شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: استان کردستان با وسعتی معادل 28203 کیلومتر مربع در غرب ایران و در مجاورت بخش شرقی کشور عراق است. این استان که در دامنه‌ها و دشت‌های پراکنده سلسله جبال زاگرس میانی قرار گرفته است، از شمال به استان‌های

¹ Standardized Runoff Index

² Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

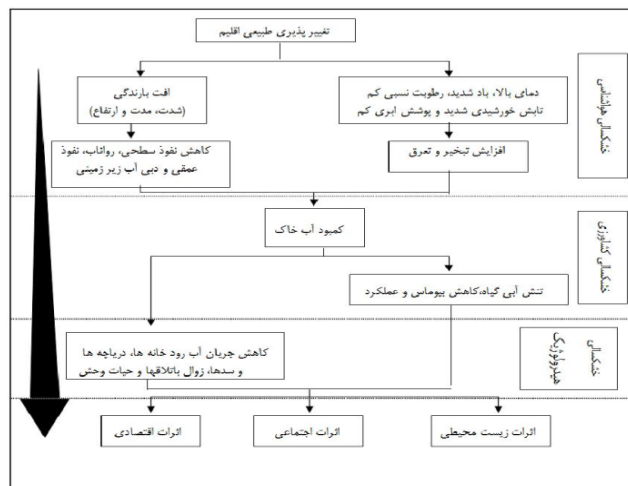
آب اقلیمی به صورت زیر تعریف شده است.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

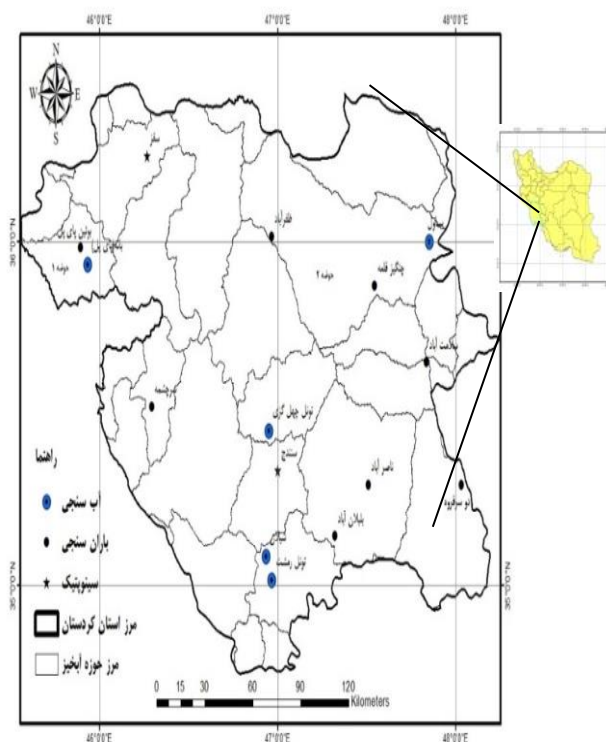
که در آن، P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل، D اختلاف آن‌ها و i شماره ماه مورد نظر است.

برای محاسبه خشکسالی هیدرولوژیکی به وسیله

شاخص SDI نیاز به داده‌های دبی جریان می‌باشد. مقادیر شاخص SDI همانند SPI محاسبه شد، با این تفاوت که تابع توزیع لوگ پیرسون به داده‌های دبی جریان بر اساس آزمون‌های آماری اندرسون-دارلینگ، کلموگراف-اسمیرنوف برازش داده شد (Joshi, ۲۰۱۶).



شکل ۱- رابطه میان خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی (Van Loon, ۲۰۱۵)



شکل ۲- نقشه موقعیت منطقه و ایستگاه‌های استان کردستان

شاخص GRI با استاندارد کردن سطح آب سفره زیرزمینی به دست می‌آید. بدین صورت که از اختلاف

میان سطح آب سفره و میانگین بلندمدت آن با تقسیم بر انحراف معیار سطح ۹۹ درصد شاخص سطح آب

ارزیابی، همبستگی میان مقادیر درون‌یابی شده حاصل از روش معکوس فاصله با مقادیر هر ایستگاه محاسبه شد.

زنجیره مارکف^۳ شکل خاصی از مدل‌هایی است که در آن‌ها حالت فعلی یک سامانه به حالت‌های قبلی آن بستگی دارد و نیز فرایندی تصادفی است، با این ویژگی که حالت فعلی سامانه تنها به آخرین حالت قبلی سامانه وابسته است. اگر مجموعه حالات ممکن در یک زنجیره مارکف محدود باشد، می‌توان ماتریس مربع P را تشکیل داد که عناصر آن P_{ij} عموماً معرف ماتریس احتمال گذار است (Vicente-serrano و همکاران، ۲۰۱۰).

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{im} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mj} & \dots & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ماتریس احتمال گذار دارای خواص زیر است.

الف) برای تمام عناصر ماتریس احتمال گذار:

$$\forall i, j \quad 0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad (4)$$

ب) جمع احتمالات گذار از یک حالت به تمام حالت‌های ممکن دوره زمانی بعدی باید برابر یک باشد، یعنی:

$$\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

ج) اگر P ماتریس احتمال گذار یک زنجیره مارکف باشد، خواهیم داشت.

$$P^n = P^0 P^n \quad (6)$$

که در آن، P⁰ توزیع آغازین یا توزیع احتمالات اولیه و Pⁿ ماتریس احتمال گذار n مرحله‌ای است (Vicente-serrano، ۲۰۱۰).

د) در حالت ایستا ضرب بردار حالت در ماتریس گذار برابر بردار حالت خواهد که به آن بردار تثبیتی منحصر به فرد گویند.

$$\pi p = \pi \quad \pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) \quad (7)$$

برای بررسی و تعیین اثرات کمبود بارش به‌عنوان عامل اصلی دوره‌های خشکسالی، بر منابع آب سطحی رابطه بارندگی و دبی با استفاده از همبستگی پیرسون

استاندارد به‌دست می‌آید.

$$GRI = \frac{D_{ij} - m_{im}}{\sigma} \quad (2)$$

که در آن، D_{ij} سطح آب در ماه نام و چاه نام، m_{im} میانگین فصلی و σ انحراف معیار داده‌های سطح آب در ماه i می‌باشد. GRI یک شاخص کاهش سطح سفره و یک معیار غیرمستقیم از میزان تغذیه سفره و یک منبع غیرمستقیم از خشکسالی خواهد بود. از آن جایی که سطح سفره از سطح زمین در جهت پایین اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین، مقادیر مثبت نشانه وقوع خشکسالی و مقادیر منفی حاکی از عدم وقوع خشکسالی است (Joshi، ۲۰۱۶).

برای تجزیه و تحلیل خشکسالی‌ها در سطح حوضه و همچنین، مقایسه بهتر شاخص‌های خشکسالی نیاز به داشتن یک سری زمانی واحدی از شاخص‌ها در کل حوضه می‌باشد. بدین منظور، نیاز به تعیین مقادیر متوسط متغیرهای دما و بارندگی در سطح حوضه برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی در کل حوضه به‌صورت منطقه‌ای می‌باشد. روش‌های متعددی در منابع مختلف برای تعیین مقادیر منطقه‌ای متغیرهایی نظیر بارندگی وجود دارد که از پرکاربردترین روش‌ها، روش تیسسن^۱ و روش درون‌یابی زمین‌آمار^۲ است (Vicente-serrano و همکاران، ۲۰۱۰).

روش تیسسن، به‌دلیل وجود اختلاف ارتفاع در نقاط مختلف حوضه و عدم پوشش مثلث‌های حاصل از آن در سطح حوضه مناسب نیست.

از این‌رو، برای تخمین مقادیر متوسط بارش و دما در سطح کل حوضه از روش‌های زمین‌آمار استفاده شد. از بین روش‌های موجود، روش معکوس فاصله انتخاب شد. در این روش، از فاصله به‌عنوان وزن متغیر معلوم در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود (Vicente-serrano و همکاران، ۲۰۱۰).

با استفاده از روش معکوس فاصله اقدام به تعیین مقادیر متوسط بارش و دما به‌صورت ماهانه در سطح حوضه شد. مقدار متوسط حاصل از نقشه‌های درون‌یابی به‌عنوان متوسط ماهانه بارش و یا دما در کل دوره آماری در نظر گرفته شد. برای مقایسه و

¹ Tissen's method

² Land surveying method

³ Markov chain

بنابراین، نتایج تحلیل روند تغییرات بارش در ایستگاه‌های مورد بررسی منطقه نشان‌دهنده این است که روند تغییرات بارش هم از لحاظ زمانی و هم از لحاظ مکانی، تغییرات مشخصی طی چهار دهه گذشته نداشته است و تعیین الگوی دقیق تغییرات نسبت به پارامترهای دیگر در منطقه دشوار است. پژوهش‌های بررسی روند بارش در کشور در بیشتر موارد نشان داده است که روند تغییرات بارش از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند که مطابق نتایج این پژوهش است. بنابراین، با در نظر گرفتن نتایج روند تغییرات در چهار دهه گذشته می‌توان گفت که اکوسیستم‌های آبی استان کردستان بیشتر تحت تاثیر دما بوده است.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص SDI در جدول ۱ ارائه شده است. در مقایسه با شاخص خشکسالی هواشناسی، شاخص SDI نسبت به SPI از مقادیر شدت بالاتری برخوردار است. لذا، می‌توان انتظار داشت که رابطه شاخص‌های SDI و SPEI از مقدار مناسب‌تری نسبت به SPI برخوردار باشد. شاخص SDI از بیشینه تا دوام بالاتری در مقیاس‌های زمانی پایین نسبت به شاخص‌های SPI و SPEI برخوردار است (شکل ۳). همچنین، روند تغییرات شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی شد (جدول ۱).

بر این اساس دو طبقه خشکسالی نرمال و متوسط از فراوانی بالاتری نسبت به دیگر گروه‌ها برخوردار هستند که در مقایسه با شاخص‌های SPI و SPEI طبقه خشکسالی متوسط از فراوانی بالاتری برخوردار است، در حالی که طبقه خشکسالی نرمال در شاخص‌های SPI و SPEI فراوانی بیشتری دارا می‌باشد (شکل ۳). فراوانی گروه‌های خشکسالی بر اساس شاخص SDI در دوره آماری برای مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شد و صحت داده‌های مورد نظر با نمودار تیلور ارزیابی شد (شکل ۴ و جدول ۱).

Mofidipour و همکاران (۲۰۱۲) خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌وسیله شاخص‌های SPI و SDI در حوضه رودخانه اترک را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و به بررسی ارتباط این دو خشکسالی پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد، رابطه زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در

ارزیابی شد و برای همبستگی متقابل میزان تاثیر بارندگی بر دبی برآورد شد. با استفاده از این روش به جستجوی نظم زمانی کمبود آب و در واقع تاخیر زمانی در دبی جریان پرداخته می‌شود. بدین صورت که هر زمان که مقدار بارندگی کاهش یافته، چه مدت زمان طول خواهد کشید تا تاثیر خود را بر آب‌های سطحی بگذارد.

در این پژوهش، آزمون آماری گرافیکی من-کندال استفاده شده است. این آزمون برای بررسی تصادفی بودن و بررسی روند در سری‌های زمانی به‌کار می‌رود. در ابتدا، این آزمون برای مشخص کردن غیرپارامتریک بودن استفاده شد. به این ترتیب که سری‌های آماری به‌ترتیب صعودی مرتب و رتبه‌بندی می‌شوند. در این آزمون تصادفی بودن داده‌ها، با عدم وجود روند مشخص می‌شود (Vicente-serrano و همکاران، ۲۰۱۰).

سطح احتمال همبستگی بین مقادیر بارندگی و دبی به دو صورت پیوسته و گسسته بررسی شد. همبستگی بر اساس مقادیر ماهانه بارندگی و دبی در دو حوضه ۱ (بانه-بوئین) و حوضه ۲ (یساول-ظفرآباد و یساول-چنگیز قلعه) محاسبه شد.

به‌منظور ارزیابی صحت داده‌ها از نمودار تیلور نیز برای ایستگاه‌های مورد مطالعه استفاده شده است (Joshi، ۲۰۱۶).

$$RMSD^2 = \sigma_{est}^2 + \sigma_{obs}^2 - 2\sigma_{est}\sigma_{obs}R$$

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{est}^{(i)} - \overline{P_{est}^{(i)}})(P_{obs}^{(i)} - \overline{P_{obs}^{(i)}})}{\sigma_f \sigma_r}}$$

$$\sigma_{est}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{est}^{(i)} - \overline{P_{est}^{(i)}})^2$$

$$\sigma_{obs}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{obs}^{(i)} - \overline{P_{obs}^{(i)}})^2$$
(۸)

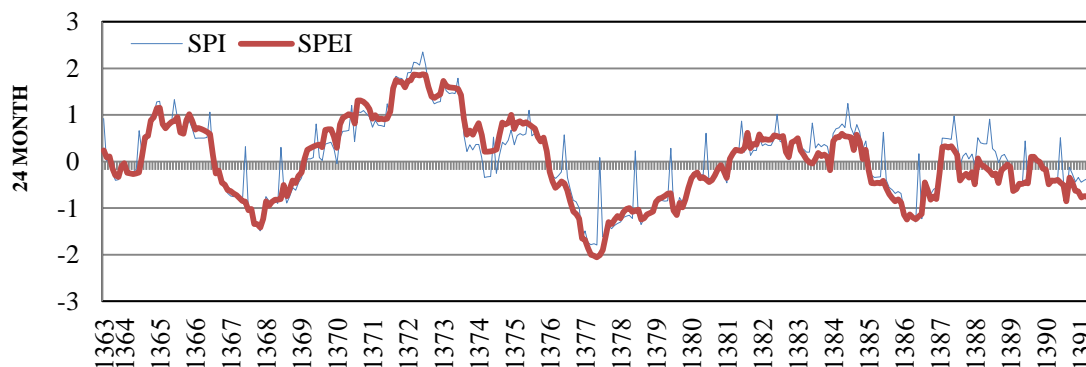
نتایج و بحث

نتایج بررسی روند تغییرات بارش در ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک استان کردستان به‌وسیله Tabari و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که از ۱۳۰ سری داده‌های بارش ماهانه و سالانه ۷۱ سری دارای روند افزایشی و ۵۹ سری دارای روند کاهشی هستند،

همان ماه و یک ماه تاخیر می‌باشد. بدین مفهوم که دبی جریان در زمان بارش و یک ماه بعد از بارش بیشترین تاثیر را از بارندگی دارد. در حالت پیوسته همبستگی بین داده‌های بارندگی و دبی در سطح حوضه ۰/۵۶ با p-value برابر با ۰/۰۰۱ به دست آمد که بیان‌کننده همبستگی قابل قبولی بین بارندگی و دبی است (جدول ۲ و ۳).

سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. این همبستگی در بازه سه ماهه پیشینه مقدار را دارد. همچنین، میزان تأخیر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوزه آبخیز اترک همان ماه و یا یک ماه می‌باشد.

نتایج حاصل از محاسبه همبستگی متقابل بین بارندگی و دبی با پنج تاخیر زمانی در سطح استان کردستان نشان داد، بیشترین تاثیر بارش بر دبی در

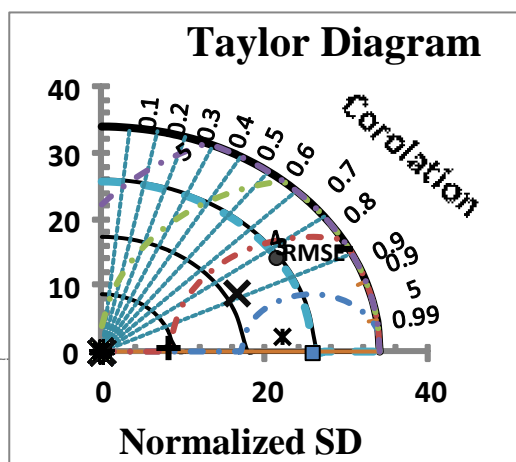


شکل ۳- مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در کل استان کردستان

GRI در حوزه آبخیز مورد مطالعه بیشترین همبستگی را با شاخص SPEI ۲۴ و ۴۸ ماهه دارد. این بدان معناست که خشکسالی هواشناسی بعد از گذشت دست کم دو سال بر منابع آب زیرزمینی تاثیر می‌گذارد (جدول ۴) که با نتایج مطالعات Mendicino و Senator (۲۰۰۸) و Mortezaie و همکاران (۲۰۱۲)، نیز مطابقت دارد.

Laaha و Van Loon (۲۰۱۵) شدت خشکسالی هیدرولوژیکی را به وسیله متغیرهای اقلیمی و مشخصه‌های ۴۴ حوزه آبخیز در اتریش به وسیله داده‌های هیدرواقلیم و پارامترهای فیزیوگرافی حوضه تحلیل کردند. شاخصی که در این مطالعه برای استخراج مشخصه‌های خشکسالی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت، روش سطح آستانه است. نتایج این تحلیل نشان داد، تداوم خشکسالی هیدرولوژیکی به وسیله میزان ذخیره یا همان جریان پایه و مشخصه‌های حوضه از جمله زمین‌شناسی و کاربری اراضی کنترل می‌شود. همچنین، شدت خشکسالی به وسیله متوسط دوره‌های مرطوب (میانگین بارندگی سالانه) و ارتفاع کنترل می‌شود که نتایج حوزه آبخیز مورد مطالعه با تحقیقات فوق مشابهت بسیار زیادی دارد (جدول ۴).

همچنین، شاخص SDI بیشترین همبستگی را با شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی نه و ۱۲ ماهه دارد که با نتایج Mahmodi و Zeynivand (۲۰۱۴) برای حوزه آبخیز کاشان نیز مطابقت دارد. شاخص



شکل ۴- نمودار تیلور شدت SDI ۱۲ ماهه در ایستگاه بانه

جدول ۱- نتایج مشخصه‌های مختلف خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس نتایج SDI

یساول	تونل چهل قزی	شیلان	تونل رمشت	بانه	SDI	
۱۱۷/۳۸	۶۶/۸۵	۱۰۴/۵۸	۱۱۲/۹۸	۱۱۵/۹۰	SDI6	مجموع شدت خشکسالی
۱۰۸/۴۷	۵۱/۵۸	۹۳/۹۷	۱۰۴/۷۹	۱۰۴/۰۳	SDI12	
۹۷/۵۱	۳۵/۵۳	۸۲/۰۶	۹۱/۶۷	۹۰/۱۷	SDI24	
۴۷/۷۵	۱۸/۲۹	۴۰/۵۸	۴۷/۸۱	۳۷/۸۶	SDI6	حد اکثر شدت خشکسالی
۷۱/۹۰	۲/۰۶	۴۰/۶۴	۵۱/۵۸	۷۱/۵۴	SDI12	
۶۷/۱۰	۲۲/۰۲	۴۱/۶	۴۵/۸۲	۶۵/۶۵	SDI24	
ماه ۵۸	ماه ۲۹	ماه ۴۷	ماه ۴۷	ماه ۵۱	SDI6	بیشترین تداوم خشکسالی
ماه ۱۱۲	ماه ۴۲	ماه ۷۷	ماه ۷۶	ماه ۱۰۲	SDI12	
ماه ۱۰۵	ماه ۴۸	ماه ۸۷	ماه ۷۵	ماه ۹۴	SDI24	
۳/۷۸	۶/۵۱	۳/۷۳	۳/۶۹	۴/۵۳	SDI6	مجموع بزرگی
۱/۵۶	۲/۰۶	۲/۰۶	۱/۷۵	۱/۹۸	SDI12	
۱/۳۴	۱/۳۴	۱/۲۰	۱/۴۴	۱/۴۰	SDI24	
۰/۸۲	۰/۹۵	۰/۹۲	۱/۰۸	۱/۰۱	SDI6	حد اکثر بزرگی
۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۷۸	۰/۷۰	SDI12	
۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۷۳	۰/۶۹	SDI24	
-۱/۸۰	-۱/۷۷	-۱/۵۵	-۱/۶۰	-۱/۸۴	SDI6	اوج خشکسالی
-۱/۲۷	-۱/۰۵	-۱/۳۵	-۱/۴۱	-۱/۷۵	SDI12	
-۱/۱۳	-۰/۷۴	-۱/۱۳	-۱/۲۶	-۱/۳۴	SDI24	

جدول ۲- ضریب همبستگی بین مجموع بارندگی و میانگین دبی در دو حوضه ۱ و ۲

حوضه	ایستگاه	بدون تاخیر	یک ماه تاخیر	دو ماه تاخیر	سه ماه تاخیر
حوضه ۱	بانه-وئین	۰/۵۱**	۰/۴۸**	۰/۴۰**	۰/۳۳**
حوضه ۲	یساول-ظفرآباد	۰/۳۹**	۰/۳۴**	۰/۲۲**	۰/۱۳**
	یساول-چنگیز قلعه	۰/۴۳**	۰/۳۰**	۰/۰۸	۰/۰۰۵

** همبستگی در سطح ۹۹ درصد معنی دار است.

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین میانگین وزنی بارش استان کردستان و دبی آب‌های سطحی با تاخیرهای متفاوت

ایستگاه	بدون تاخیر	یک ماه تاخیر	دو ماه تاخیر	سه ماه تاخیر
تونل چهل قزی	۰/۵۱**	۰/۵۳**	۰/۳۴**	۰/۲۶**
یساول	۰/۵۰**	۰/۴۶**	۰/۳۴**	۰/۲۲**
شیلان	۰/۲۲**	۰/۲۴**	۰/۱۹**	۰/۱۷**
تونل رمشت	۰/۵۳**	۰/۵۲**	۰/۳۵**	۰/۲۳**
بانه	۰/۵۴**	۰/۵۱**	۰/۳۶**	۰/۲۷**

جدول ۴- ضریب همبستگی SPI و SDI ایستگاه‌های مختلف

ایستگاه	تاخیر	یک ماهه	سه ماهه	شش ماهه	نه ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
مقایسه SPI ایستگاه بوئین و SDI ایستگاه بانه	بدون تاخیر	۰/۳۳**	۰/۳۴**	۰/۴۴**	۰/۴۷**	۰/۴۹**	۰/۵۳**
	یک ماه تاخیر	۰/۲۵**	۰/۲۶**	۰/۳۱**	۰/۳۹**	۰/۴۵**	۰/۵۲**
	دو ماه تاخیر	۰/۱۶**	۰/۲۰**	۰/۲۹**	۰/۳۶**	۰/۴۰**	۰/۴۹**
	سه ماه تاخیر	۰/۱۶**	۰/۲۱**	۰/۲۶**	۰/۳۱**	۰/۳۷**	۰/۴۶**
مقایسه SPI ایستگاه ظفرآباد و SDI ایستگاه یساول	بدون تاخیر	۰/۲۶**	۰/۳۲**	۰/۳۳**	۰/۳۳**	۰/۳۵**	۰/۳۸**
	یک ماه تاخیر	۰/۲۵**	۰/۳۰**	۰/۳۱**	۰/۳۲**	۰/۳۵**	۰/۳۷**
	دو ماه تاخیر	۰/۲۲**	۰/۲۶**	۰/۲۸**	۰/۳۰**	۰/۳۲**	۰/۳۶**
	سه ماه تاخیر	۰/۱۴**	۰/۲۴**	۰/۲۷**	۰/۲۹**	۰/۲۹**	۰/۳۲**
مقایسه SPI ایستگاه چمگنرقله و SDI ایستگاه یساول	بدون تاخیر	۰/۳۳**	۰/۳۳**	۰/۳۴**	۰/۳۷**	۰/۳۹**	۰/۳۹**
	یک ماه تاخیر	۰/۳۱**	۰/۳۱**	۰/۳۲**	۰/۳۴**	۰/۳۵**	۰/۳۷**
	دو ماه تاخیر	۰/۲۵**	۰/۲۵**	۰/۲۸**	۰/۲۹**	۰/۳۲**	۰/۳۴**
	سه ماه تاخیر	۰/۲۳**	۰/۲۳**	۰/۲۷**	۰/۲۹**	۰/۳۰**	۰/۳۳**

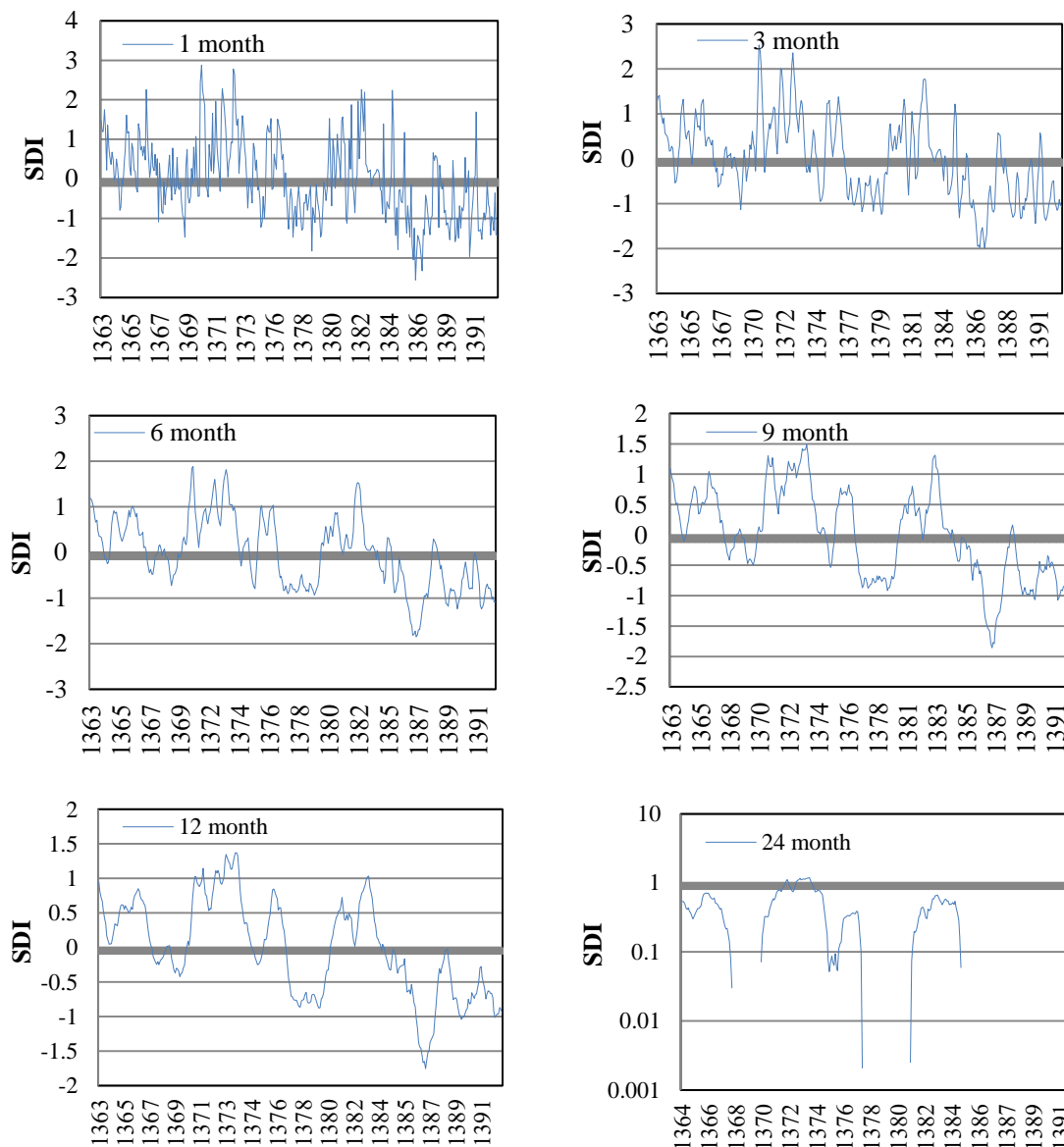
** همبستگی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است.

شاخص SPI و GRI به بررسی تاثیر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ در دشت الشتر پرداختند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد، شاخص SPI در مقیاس ۲۴ ماهه بدون تاخیر با متوسط سطح آب زیرزمینی و شاخص GRI در سطح ۰/۰۱ دارای همبستگی است که این تاثیر خشکسالی هواشناسی را بر منابع زیرزمینی تایید می‌کند. همچنین، رابطه همبستگی بین متوسط سطح آب زیرزمینی و شاخص SPI ۲۴ ماهه نشان داد که ۶۴ درصد واریانس میانگین سطح سفره زیرزمینی تحت تاثیر خشکسالی هواشناسی قرار می‌گیرد که این نتایج با دستاوردهای تحقیقات در استان کردستان در پژوهش حاضر به‌طور کامل مطابقت دارد (جدول ۴ و شکل ۵).

مطابق نتایج تحقیقات، Khosravi و همکاران (۲۰۱۶) نیز با افزایش پایه زمانی، ضریب همبستگی بین دو شاخص SPI و GRI افزایش می‌یابد. طبق مطالعات فوق، تاخیر زمانی بین دو خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی در اردکان یزد یک تا دو سال برآورد شد. همچنین، نتایج بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی حاکی از روند نزولی آن بوده و متوسط افت سطح سفره در طول دوره آماری ۰/۵ متر در سال گزارش شده است.

بر اساس نتایج حاصل از آزمون من-کندال، در تمام مقیاس‌های زمانی روند معنی‌داری وجود دارد که در مقایسه با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، شاخص SDI از تغییرپذیری بالاتری در دوره آماری برخوردار است (شکل ۵).

Chamanpira و همکاران (۲۰۱۴) به‌وسیله دو



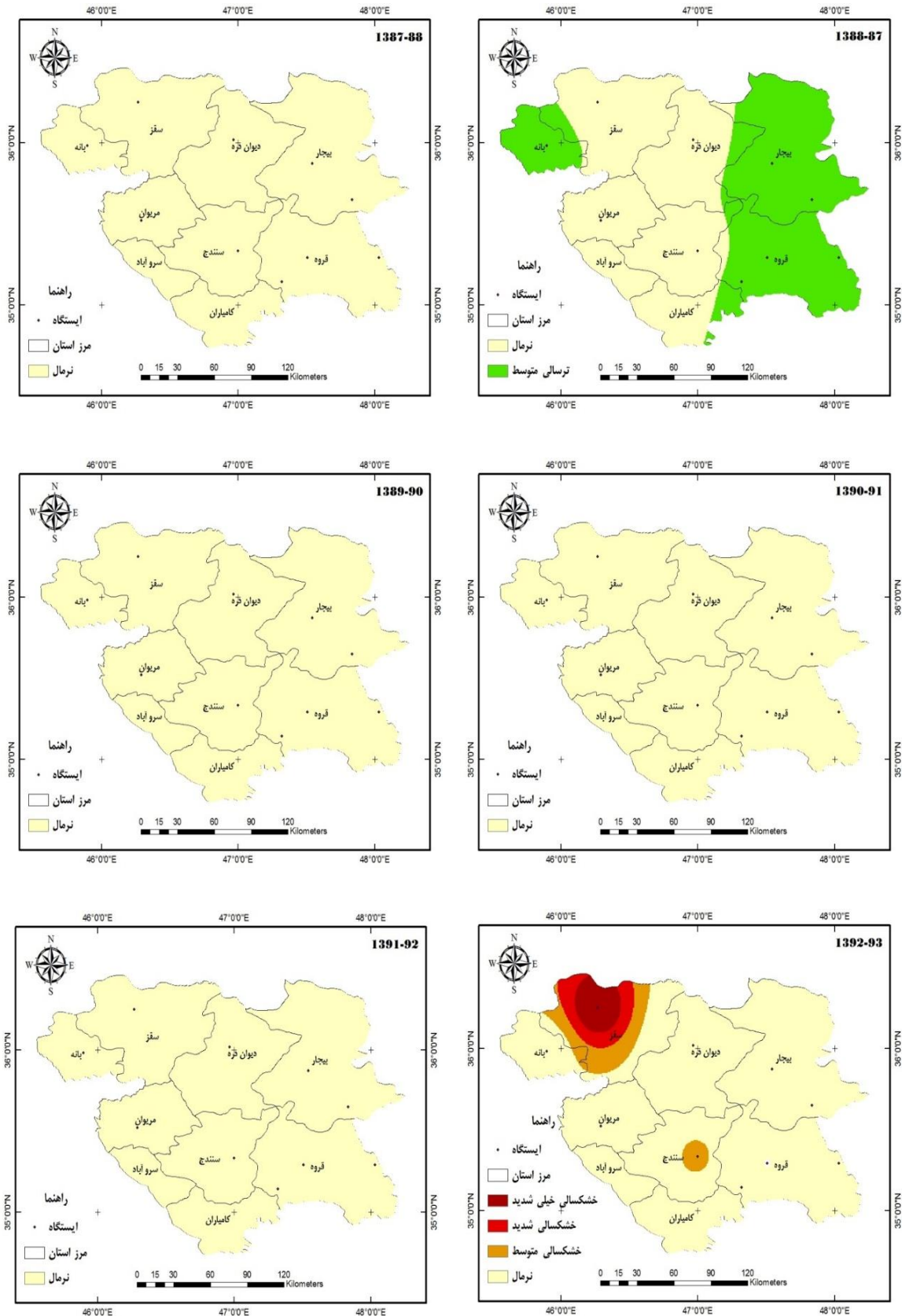
شکل ۵- نمودار مقادیر SDI در مقیاس زمانی ۲۴، ۱۲، نه، شش، سه، یک ماهه برای ایستگاه هیدرومتری بانه

جدول ۵- احتمالات تعادل دوره‌های خشک، مرطوب، نرمال در SPI سالانه به درصد (زنجیره مارکف)

سقز	سنندج	چنگیز قلعه	بلبلان آباد	بوئین	
۳۱	۳۵	۲۸	۳۶	۳۴	خشک
۴۲	۳۸	۳۶	۴۲	۳۶	نرمال
۲۷	۲۷	۳۸	۲۲	۲۹	مرطوب

سلامت‌آباد بر خلاف نمودار دندروگرام شاخص SPI، در یک طبقه قرار گرفتند که این موضوع با نتایج Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰)، مبنی بر توانایی بالای شاخص SPEI، در تعیین دقیق خشکسالی‌ها نسبت به شاخص SPI مطابقت دارد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از خوشه‌بندی ایستگاه‌های مختلف استان کردستان بر اساس مقادیر سالانه SPI و SPEI، مشخص شد که به‌طور کلی نتایج شاخص‌های SPI و SPEI نزدیک به هم هستند (شکل ۳)، اما با توجه به تأثیر دما و تبخیر و تعرق پتانسیل در شاخص SPEI، ایستگاه‌های چنگیزقلعه و



شکل ۶- تعدادی از نقشه‌های پهن‌بندی خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص SPEI در سال‌های مختلف مورد مطالعه

شاخص SDI از تغییرپذیری بیشتری در دوره آماری برخوردار بود. همچنین، شاخص بارندگی و تبخیر تعرق استاندارد شده SPEI در مقیاس ۱۲ و ۲۴ ماهه با سه ماه تاخیر با شاخص GRI بیشترین همبستگی را دارد که حاکی از تاثیرگذاری خشکسالی هواشناسی بعد از گذشت دو سال و بیشتر بر سطح آب زیرزمینی است (شکل‌های ۵ و ۶).

دلیل همبستگی در این مقیاس را می‌توان تاخیر زمانی در نفوذ آب حاصل از باران و یا ذوب برف به اعماق زمین ذکر کرد. بنابراین، با تعیین فاصله زمانی بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی می‌توان قبل از این‌که خشکسالی‌های هواشناسی طولانی‌مدت بر منابع آب سطحی و زیرزمینی تاثیرگذار شود، اقدامات لازم را برای جلوگیری از اثرات سوء بر منابع آبی انجام داد که در مورد افت سطح آب زیرزمینی این مسئله قابل توجه است. در واقع، با دانستن فاصله زمانی دو ساله فوق به مدیران و برنامه‌ریزان این امکان داده می‌شود که بدانند در صورت آغاز خشکسالی هواشناسی چه مدت زمانی تا بروز خشکسالی هیدرولوژیکی و در نهایت کاهش منابع آب در اختیار دارند.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های شایان توجه مادی و معنوی صندوق حمایت از پژوهشگران و جهاد دانشگاهی در اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌شود. همچنین لازم است، از مسئولین محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و گروه پژوهشی مدیریت حوزه‌های آبخیز به دلیل همکاری قابل توجه در به ثمر رساندن نتایج تحقیقات فوق قدردانی به عمل آید.

Tribeni و همکاران (۲۰۱۴) تداوم و بزرگی خشکسالی هیدرولوژیکی را در شمال غرب کانادا مدل‌سازی کردند. در این مطالعه، از شاخص استاندارد هیدرولوژیکی SHI برای تحلیل مشخصه‌های خشکسالی استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد، پیش‌بینی‌های حاصل از تئوری اعداد حدی برای تداوم خشکسالی در مقیاس ماهانه و سالانه قابل مقایسه با روش زنجیره مارکف مرتبه اول در مقیاس ماهانه می‌باشد. همچنین پیش‌بینی بزرگی خشکسالی به‌وسیله زنجیره مارکف، نتایج مطلوب‌تری را نسبت به تئوری اعداد حدی داشت. در این پژوهش نیز از مدل زنجیره مارکف برای پیش‌بینی حالت فعلی یک سامانه به حالت‌های قبلی استفاده شد. طبق نتایج مورد مطالعه، به‌طور میانگین، احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های منطقه به ترتیب ۳۱، ۲۹ و ۴۰ درصد است که این بدین معنی است که در بیشتر مواقع منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک و مرطوب خیلی به هم نزدیک است (جدول ۵).

Joshi و همکاران (۲۰۱۶) به تحلیل روند و دوره‌های تناوب متغیرهای خشکسالی هواشناسی در هند در یک دوره ۱۴۱ ساله پرداختند. نتایج آزمون روند نشان داد، بیش از نیمی از قرن ۲۰ شدت خشکسالی افزایش یافته است. هر چند که اجزای تناوب ۱۰ ساله و سالانه نقش مهمی دارند، اما ممکن است، تغییرپذیری متغیرهای خشکسالی را در طول قرن به‌طور کامل توصیف نکند که با نتایج آزمون من-کندال در استان کردستان در پژوهش حاضر مطابقت دارد (شکل ۵).

در مقایسه با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی

منابع مورد استفاده

1. Abhishek, A., P. Channaveerappa and B.M. Dodamani. 2016. Comparison of two hydrological drought indices. *Perspectives in Science*, 8(2016): 626-628.
2. Van Loon, A.F. and G. Laaha. 2015. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526: 3-14.
3. Aghabeygi, M. 2015. Study of meteorological hydrological drought in Gilan Province using different indices. MSc Thesis, Hormozgan University, 132 pages (in Persian).
4. Chamanpira, Gh., Gh. Zehtabian, H. Ahmadi and A. Malekian. 2014. Effect of drought on groundwater resources, a study to optimize utilization management, Alashtar Plain. *Academy for Environment and Life Sciences*, 10: 48-56.

5. Ekrami, M., H. Malekinejadand and M.R. Ekhtesasi. 2014. Investigation of the effect of meteorological and hydrological drought in ground water resources. *Journal of Iran Watershed Management Science and Engineering*, 20: 47-54 (in Persian).
6. Gonzalez, J. and J.B. Valdes. 2003. Bivariate drought recurrence analysis using tree ring reconstructions. *Hydrologic Engineering*, 8(5): 247-258.
7. Haiyan, Z., G. Ge, A. Wei, Z. Xukai, L. Haitao and H. Meiting. 2015. Timescale differences between SC-PDSI and SPEI for drought monitoring in China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 102: 48-58.
8. Joshi, N., G. Divya, S. Shakti, A. Jan and A.M. Chandra. 2016. Analysis of trends and dominant periodicities in drought variables in India: a wavelet transform based approach. *Atmospheric Research*, 182: 200-220.
9. Karimi, M. and K. Shahedi. 2013. Hydrological drought analysis of Karkheh River Basin in Iran using variable threshold level method. *Environmental Science*, 8(3): 41-59.
10. Khosravi, H., E. Haidari, Gh. Zehtabian and J. Bazrafshan. 2016. Analysis of spatial and temporal trends of Groundwater Resource Index (GRI), case study: Ardakan Yazd. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 22(4): 21-32 (in Persian).
11. Lukas, A. and L. Vasiliades. 2005. Identification of the relationship between meteorological and hydrological drought. *Geophysics Research Letters*, 7: 1-10.
12. McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conference on Applied Climatology*, Anaheim, Californiaif, American Meteorological Society, 179-184.
13. Mahmodi, Z. and H. Zeynivand. 2014. An analysis of relationship between meteorological and hydrological drought, case study: Kashkan Watershed. *International Bulletin of Water Resources and Development*, 2(3): 150-162 (in Persian).
14. Mendicino, G., A. Senatore and P. Versace. 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 12: 282-302.
15. Mohammadi, M., H. Moradi and M. Vafakhah. 2013. Local distribution and relation between meteorological and hydrological droughts in Arak Plain. *Journal of Physical Geography*, 15(5): 77-84 (in Persian).
16. Mofidipour, N., M. Birdishish, M. Onagh and A. Saadoddin. 2012. A survey of meteorological and hydrological droughts in Atrak Watershed. *Watershed Management Research Center*, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 3(5): 12-24 (in Persian).
17. Mortezaie, F.G. and R. Shahbazi. 2012. Survey indicators for assessing and mapping water and wind erosion desertification and provide sustainable development strategy. *Journal of Watershed Management Engineering Association Iran*, 6: 45-52 (in Persian).
18. Nosrati, K. 2013. Regional analysis of hydrological drought at Sefidrod Watershed by base flow index. *Journal of Rangeland and Watershed Management*, 2(65): 257-267 (in Persian).
19. Soleymani, L. and A. Haghizadeh. 2016. Evaluation of the effect recent droughts on lake discharge reduction, case study: Lake Keeyow, Khorramabad. *International Bulltein of Water Resources and Development*, 3: 99-108 (in Persian).
20. Tribeni, C., U. Sharma and S. Panu. 2014. Modeling of hydrological drought durations and magnitudes: experiences on Canadian stream flows. *Journal of Hydrology*, 1: 92-106.
21. Tabari, H., J. Nikbakht and P.H. Talae. 2013. Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on Streamflow Drought Index (SDI). *Water Resources Management*, 27(1): 11-22.
22. Van Loon, A.F. and G. Laaha. 2015. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526: 3-14.
23. Vicente-Serrano, S.M., S. Beguería and J.I. López-Moreno. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696-1718.
24. Wanders, N., Y. Wada and H.A.J. Van Lanen. 2015. Global hydrological droughts in the 21st century under a changing hydrological regime. *Earth System Dynamic*, 6: 1-15.