

## ارزیابی خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیک و آب‌زیرزمینی در دشت کاشمر و بردسکن و

## بررسی ارتباط آن‌ها با یکدیگر

سمیه رجب‌زاده<sup>۱</sup> ابوالفضل مساعدی<sup>۲\*</sup> محمد قبائی‌سوق<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد، ایران

۳. دکتری علوم و مهندسی آب، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

## چکیده

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین مخاطرات طبیعی است که از جنبه‌های گوناگون بر سیستم‌های طبیعی و بخش‌های مختلف یک اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. بررسی رفتار خشکسالی مانند تعیین زمان وقوع آن، درک روابط انواع خشکسالی و شناخت ویژگی‌های آن مانند بزرگی، شدت و تداوم دوره‌های خشکسالی می‌تواند کمک بسزایی در مدیریت منابع آب داشته باشد. این پژوهش به منظور تعیین خصوصیات خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی دشت کاشمر و بردسکن و ارتباط زمانی وقوع آن‌ها با بهره‌گیری از شاخص‌های SPEI، SDI و GRI در یک دوره زمانی ۲۹ ساله (۶۷-۱۳۶۶ تا ۹۵-۱۳۹۴) انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، بطور کلی وضعیت خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی در منطقه روند افزایشی دارد. افزایش وقایع خشکسالی در مورد خشکسالی آب زیرزمینی کاملاً مشهود است. بیشترین ضریب همبستگی انواع خشکسالی با یکدیگر، مربوط به شاخص‌های SPEI و SDI در همه مقیاس‌های مورد بررسی در تأخیرهای کمتر از ۳ ماه و در مورد شاخص‌های SPEI و GRI مربوط به تأخیر ۶ ماهه است که بیانگر ارتباط ناچیز خشکسالی‌های هواشناسی با خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی در منطقه می‌باشد. بطور کلی همبستگی بین شاخص‌های SPEI با GRI و همچنین SDI با GRI در هیچ مقیاس زمانی در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد و می‌توان گفت در منطقه مورد مطالعه ارتباط معنی‌داری بین خشکسالی آب زیرزمینی و خشکسالی هیدرولوژیک یا خشکسالی هواشناسی وجود ندارد. بنابراین، می‌توان بیان نمود که خشکسالی آب زیرزمینی و هیدرولوژیک تحت تأثیر عوامل دیگری غیر از خشکسالی هواشناسی (و بارش) می‌باشد. کاهش پیوسته تراز آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه هم می‌تواند دلیل دیگری بر این ادعا باشد. همچنین بررسی ویژگی‌های خشکسالی نشان داد در مقیاس کوتاه‌مدت شاخص GRI دارای شدت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها می‌باشد و بیشترین کمبودها توسط شاخص SPEI شناسایی گردید. پیشنهاد می‌شود اثر برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر کمیت و کیفیت منابع آب مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** تئوری ران، خصوصیات خشکسالی، شاخص‌های خشکسالی، کاهش تراز آب زیرزمینی، کاشمر.

## مقدمه

خشکسالی یک رخداد حدی است که در دراز مدت بر منابع طبیعی، محیط زیست و جامعه تأثیر می‌گذارد. این پدیده تقریباً تمامی مناطق اقلیمی جهان را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل مقدار پائین بارش سالانه حتی نسبت به کاهش و یا افزایش اندک بارش حساسیت بیشتری به خشکسالی در مقایسه با مناطق مرطوب دارد (خوش‌گفتار و همکاران، ۱۳۹۸). تعیین زمان دقیق شروع خشکسالی و همچنین تعیین دقیق تداوم آن به راحتی امکان‌پذیر نیست. این مشکل در مورد مناطق خشک و نیمه‌خشک که در آن‌ها تعداد روزهای بارانی اندک است، بیشتر خود را نمایان می‌نماید. خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که در طول ماه‌های متوالی (۱، ۳، ۶ ماه) یا در طول سال (۱۲ ماه)، مقدار بارندگی کمتر از شرایط نرمال در یک منطقه باشد و یا اینکه به دلیل نوسانات سایر عوامل آب و هوایی (کاهش بارش، افزایش

\*Email: mosaedi@um.ac.ir نویسنده مسئول: ابوالفضل مساعدی

دما و تبخیر و تعرق و ...) رطوبت خاک تحت‌تاثیر قرار گیرد (Sen & Almazroui, 2021). تداوم کمبود بارش در یک منطقه نسبت به میانگین بلندمدت (خشکسالی هواشناسی) باعث کاهش جریان آب سطحی (خشکسالی هیدرولوژیکی) و افت تراز آب زیرزمینی (خشکسالی آب زیرزمینی) می‌شود (تیموری و همکاران، ۱۳۹۴). پایش خشکسالی، اهمیت زیادی در آمادگی برای مواجهه با خشکسالی قبل از تبدیل آن به یک فاجعه مخرب دارد و تاکنون تلاش‌های زیادی برای توسعه روش‌های پایش خشکسالی صورت گرفته است (Li et al., 2016).

شاخص‌های خشکسالی مختلفی بدین منظور توسعه یافتند که انحراف متغیرهای آب و هوایی را از شرایط نرمال ارزیابی می‌کنند (Vicente-Serrano et al., 2010). هر چند تعریف شاخص‌های کمی از اهمیت بالایی برخوردار است، اما ایجاد یک شاخص خشکسالی یکسان برای تمامی مناطق آب و هوایی و همه وضعیت‌های خشکسالی در سطح جهانی بسیار دشوار است (Li et al., 2016). یک شاخص خشکسالی قوی باید بتواند شروع و پایان حوادث خشکسالی را شناسایی کند، همچنین مدت، شدت و اوج آن را تعیین کند (Malik et al., 2021). بارش و دما مهم‌ترین متغیرهایی هستند که در پایش خشکسالی هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده<sup>۱</sup> (SPEI) از جمله شاخص‌هایی است که با در نظر گرفتن نقش این دو متغیر برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی به طور گسترده استفاده شده است. شاخص خشکی جریان رودخانه<sup>۲</sup> (SDI) نیز یکی از پرکاربردترین شاخص‌هایی است که برای تجزیه و تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی بر مبنای جریان رودخانه به عنوان منبع آب سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رودخانه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب به صورت فصلی بوده و در اکثر مواقع سال خشک می‌باشند به طوری که تامین نیازهای آبی مصرف‌کنندگان (از جمله شرب، کشاورزی و حتی محیط زیست) در اکثر این مناطق وابسته به منابع آب زیرزمینی است. بنابراین در این مناطق کاربرد شاخصی که تنها بر مبنای جریان سطحی باشد به تنهایی کافی نمی‌باشد و در کنار آن لازم است شاخصی استفاده شود که نوسانات سفره‌های آب زیرزمینی را لحاظ کند. بدین منظور شاخص منابع آب زیرزمینی<sup>۳</sup> (GRI) توسعه داده شد (مرتضائی فریزندی و میراکبری، ۱۳۹۷).

تاکنون پژوهش‌های مختلفی به منظور بررسی انواع خشکسالی‌ها و بررسی ارتباط زمانی خشکسالی‌ها با استفاده از شاخص‌های خشکسالی صورت گرفته است (ding et al., 2021). با بررسی رابطه انتشار بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در جنوب چین، بیان داشتند تبدیل و گسترش انواع خشکسالی تنها تابع شرایط اقلیمی نیست و عوامل مختلفی مانند پوشش گیاهی و توپوگرافی در آن دخیل هستند. (Salimi et al., 2021) با تعیین ویژگی‌های خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در سه منطقه اقلیمی متفاوت شامل حوضه‌های ليقوان، ناورود و سقز با استفاده از شاخص‌های SPEI و SPI و SSI بیان داشتند که تغییرات اقلیمی تأثیر عمده‌ای بر ویژگی‌های خشکسالی دارد و طبق نتایج، خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی در حوضه‌های ناورود و ليقوان با دوره‌های ۴۸ ماهه و در حوضه سقز با دوره‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه همبستگی معنی‌داری با یکدیگر داشته و در هر سه حوضه، همبستگی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در سطح ۹۹٪ معنی‌دار است. خیری و همکاران (۱۴۰۰) با ارزیابی تغییرات خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص‌های SPEI و SC-PDSI در یک دوره ۲۹ ساله دریافتند که در هر دو شاخص بیشترین درصد سال‌ها، در طبقه نرمال با تمرکز هسته‌های بیشینه نرمال در نیمه شرقی کشور و کمترین درصد سال‌ها در طبقه خشکسالی بسیار شدید با تمرکز هسته‌های بیشینه در نیمه غربی، مرکز و جنوب کشور بوده است. بهی‌فر و همکاران (۱۴۰۰)، برای ارزیابی خشکسالی از داده‌های سنجش از دور در دو حوزه داخلی و ساحلی کشور استفاده نمودند. آنان با مقایسه نتایج شاخص SPI که به کمک تصاویر ماهواره‌ای بارش TRMM محاسبه شده بود و مقادیر محاسبه شده از ایستگاه‌های سینوپتیک دریافتند که این مقادیر ۰/۹۴ همبستگی دارند و اظهار داشتند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به خوبی می‌توان به مشخصه گستره خشکسالی، که توسط سایر روش‌ها قابل محاسبه نیست، دست یافت و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توانسته خلاء جزئیات مکانی موجود در داده‌های ایستگاهی را مرتفع نماید.

Yisehak و Zenebe (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص‌های SPI و SRI با مدل‌سازی شاخص خشکسالی استاندارد چند متغیره (MSDI) بر اساس اطلاعات خشکسالی حاصل از بارش و رواناب طی دوره زمانی (۲۰۱۴-۱۹۸۰) در یکی از حوزه‌های آبخیز اتیوپی و با استفاده از توابع کاپولا برای ایجاد تابع توزیع چند متغیره، اظهار داشتند که بر مبنای نتایج شاخص MSDI،

<sup>1</sup> Standardized precipitation-Evapotranspiration Index

<sup>2</sup> Streamflow Drought Index

<sup>3</sup> Groundwater Resource Index

مدت‌زمان خشکسالی با شدت‌های متفاوت، ۲۶ تا ۲۸ ماه تداوم داشته، اما فراوانی دوره‌های خشکسالی نسبت به شاخص‌های SPI و SRI کم‌تر بوده است. همچنین شاخص MSDI از همبستگی بالایی با دو شاخص SPI و SRI برخوردار است و بنابراین مدل‌سازی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از متغیرهای چندگانه را بهتر از برآورد تقریبی یک متغیر دانستند. Li و همکاران (۲۰۲۰)، با بررسی ارتباط زمانی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در رودخانه Shaying چین در دوره‌های ۱ تا ۲۴ ماهه گزارش نمودند که فاصله زمانی اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب سطحی و ایجاد خشکسالی هیدرولوژیکی با توجه به فصل وقوع آن متفاوت است. مرتضایی فریزه‌ندی و میراکبری (۱۳۹۷) در پژوهشی با مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی با شاخص‌های SDI و GRI در حوزه آبخیز رودخانه اعظم هرات استان یزد نشان دادند که شاخص SPEI در مقیاس ۲۴ و ۴۸ ماهه با شاخص GRI و با تاخیر ۳ ماهه بیشترین همبستگی را دارد. نتایج این پژوهش نشان داده است که در منطقه مورد مطالعه خشکسالی هواشناسی (وضعیت رطوبتی) بعد از گذشت ۲ تا ۴ سال بر منابع آب زیرزمینی اثرگذار است. زینالی و همکاران (۱۳۹۵) دوره‌های متوالی خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی دشت مرند را در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه بررسی و دریافتند که نتایج همبستگی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در سطح یک درصد معنی‌دار است و تأثیرپذیری منابع زیرزمینی را با یک تأخیر ۵ ماهه نشان دادند.

بازگیر و همکاران (۱۳۹۹)، کارایی تعدادی از نمایه‌های خشکسالی را در مناطق اقلیمی مختلف کشور به کمک سنجه کارآمد مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج، شاخص درصد نرمال بارش PNPI شاخص مناسبی به ویژه برای مناطق مرطوب نمی‌باشد و شاخص SPEI، شرایط خشکسالی در مناطق مرطوب‌تر را بهتر نشان می‌دهد. آن‌ها دریافتند برخلاف رفتار دیگر شاخص‌ها، شاخص SPI در پایش خشکسالی در تمامی طبقات اقلیمی نتایج یکسانی داشته و عنوان نمودند نتیجه مذکور منطقی نبوده و بیانگر این موضوع است که استفاده از SPI بایستی با دقت بیشتری صورت گیرد. همچنین در خصوص تداوم خشکسالی‌ها به جزء نمایه Z چینی، که در برخی موارد، در تعیین دوره‌های تر و خشک نتایج کاملاً معکوسی را نشان داد تمامی شاخص‌ها تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند.

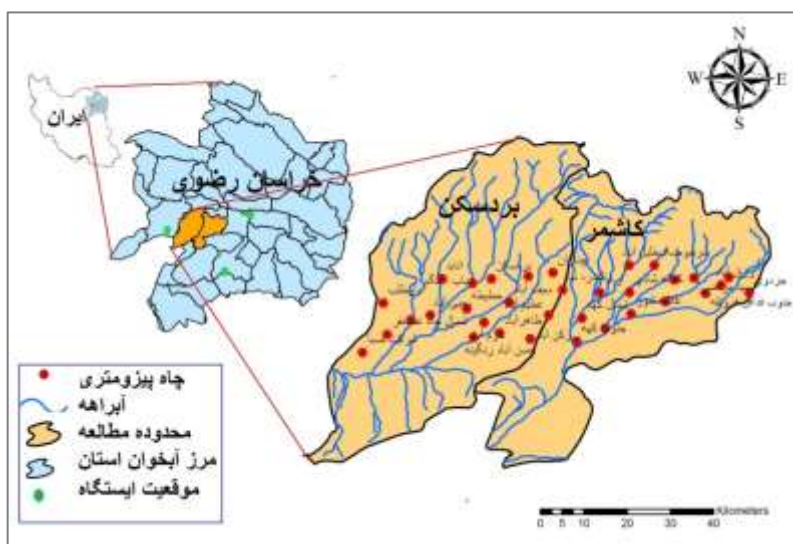
ویسی‌یزدی و همکاران (۱۳۹۶) با مطالعه ارتباط خشکسالی‌های هواشناسی و آب‌زیرزمینی دشت مشهد بر اساس شاخص‌های SPI، SPEI و GRI در مقیاس‌های فصلی و سالانه گزارش کردند همبستگی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در دشت مشهد چندان زیاد نمی‌باشد و وضعیت خشکسالی آب‌های زیرزمینی این منطقه علاوه بر عوامل آب و هوایی، می‌تواند ناشی از عوامل انسانی نظیر برداشت باشند. مصباح‌زاده و سلیمانی‌ساردو (۱۳۹۷) در پژوهشی با بررسی روند زمانی خشکسالی هیدرولوژیک و هواشناسی در حوضه آبخیز کرخه با استفاده از شاخص SPI و SDI دریافتند که ارتباط زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار و در مقیاس ۴۸ ماهه حداکثر بوده است. علاوه بر این وقوع خشکسالی در منطقه، اثر خود را با تأخیر ۲ ماهه یا ۱ ماهه روی منابع آب سطحی نشان داد. Boudad و همکاران (۲۰۱۸) با تحلیل ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه Inaouen واقع در شمال مراکش با استفاده از شاخص SPI و شاخص جریان رودخانه (SDI)، دریافتند فرکانس وقوع خشکسالی با توجه به مقیاس زمانی متغیر است و در مقیاس ۱۲ ماهه همبستگی قوی بین SPI و SDI وجود دارد. Garcia و همکاران (۲۰۱۷) برای تحلیل تأثیر تغییرات اقلیمی بر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه دریای مدیترانه، ترکیبی از شاخص‌های استاندارد شده نظیر SPI، SPEI و شاخص جریان استاندارد شده (SDI) را مورد استفاده قرار دادند. یافته‌های آنان بیانگر افزایش کلی شدت و میزان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در سناریوهای تغییرات اقلیمی بود و بیان داشتند که اگرچه شاخص‌ها ارزش‌های مشابهی را برای دوره مطالعه نشان می‌دهند، ولی در شرایط تغییرات اقلیمی، SPI می‌تواند شدت خشکسالی هواشناسی را با نادیده گرفتن نقش درجه حرارت کمتر برآورد کند.

سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های کاشمر و بردسکن طی سال‌های اخیر با افت شدید مواجه شده‌اند و مانند اکثر دشت‌های کشور دچار کسری مخزن شده‌اند. تداوم برداشت از منابع آب زیرزمینی و وقوع خشکسالی‌های متعدد سبب تشدید افت سطح آب زیرزمینی خواهد شد. با توجه به اهمیت متغیرهای هواشناسی به ویژه بارش و تبخیر و تأثیر آن‌ها بر منابع آب سطحی و زیرزمینی لازم است ابتدا خشکسالی هواشناسی و همچنین خشکسالی‌های هیدرولوژیک و آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر مورد پایش قرار گرفته و با تعیین ویژگی‌های این خشکسالی‌ها، میزان تأثیرپذیری و ارتباط خشکسالی‌های هیدرولوژیک و آب زیرزمینی از خشکسالی هواشناسی مورد بررسی قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی در محدوده دشت کاشمر و بردسکن واقع شده است که دارای وسعت ۴۵۶۰ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۹۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد و در محدوده ۵۷ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. در این پژوهش، اطلاعات ماهانه متغیرهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر سه ایستگاه صنوبر، درونه و گناباد در دوره زمانی ۲۹ ساله از سال آبی ۶۶-۶۷ تا ۹۴-۹۵ برای تعیین خشکسالی هواشناسی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های جریان آب سطحی نیز از ایستگاه ایرج‌آباد واقع در مجاورت شش‌طراز که رودخانه اصلی محدوده مورد مطالعه است؛ در طول دوره آماری ۶۷-۶۶ تا ۹۴-۹۵ برای تعیین خشکسالی هیدرولوژیکی بکار گرفته شد. برای محاسبه شاخص آب زیرزمینی نیز از اطلاعات مربوط به سطح آب چاه‌های پیژومتری محدوده دشت کاشمر و بردسکن که بصورت جداگانه در هر آبخوان اندازه‌گیری شده است، استفاده شد. به منظور بررسی استقلال داده‌ها و همچنین وجود یا عدم وجود داده پرت به ترتیب از آزمون‌های والد-ولفویتر و گروز-بک استفاده شد. جهت بررسی همگنی داده‌ها نیز از آزمون ران‌تست استفاده شد. بازسازی نواقص آماری سری‌های بارش و دما با استفاده از همبستگی بین ایستگاه‌ها انجام شد و به روش تیسن، میانگین وزنی متغیرها محاسبه و برای کل منطقه استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده و چاه‌های پیژومتری در محدوده مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱): موقعیت محدوده مورد مطالعه، ایستگاه‌های مورد استفاده و چاه‌های پیژومتری

## معرفی شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده

## شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰)، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پیشنهاد دادند. این شاخص با ترکیب حساسیت شاخص پالمر از طریق تغییرات تقاضای تبخیر و بر پایه‌ی مفاهیم قابلیت محاسبه در مقیاس‌های مختلف شاخص SPI توسعه یافته است. برای محاسبه شاخص SPEI در گام نخست باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه برآورد شود سپس از طریق یک مدل ساده‌ی بیلان آب تفاوت بین مقدار بارندگی (P) و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای ماه  $i$  از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

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

محاسبه این شاخص همانند روش ارائه شده برای محاسبه شاخص SPI نیازمند برآورد مقادیر احتمال تجمعی مقادیر  $D_i$  از طریق برازش یک تابع چگالی احتمال می‌باشد. Stagge و همکاران (۲۰۱۶) تابع سه پارامتری مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) را دارای بهترین برازش بر مقادیر  $D_i$  تشخیص دادند که فرم کلی تابع چگالی احتمال آن به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp(-(1+kz)^{-1/k}) (1+kz)^{-1/(k-1)} & k=0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)) & k \neq 0 \end{cases} \quad z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (2)$$

که در آن پارامترهای  $\mu$ ،  $\sigma$  و  $k$  به ترتیب پارامترهای مکان، مقیاس و شکل برای مقادیر  $D_i$  در دامنه  $-\infty$  تا  $+\infty$  می‌باشند. در ادامه مقادیر احتمال تجمعی برای مقادیر  $D_i$  مطابق روش استفاده شده در شاخص SPI به تابع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ تبدیل می‌شوند که برابر مقادیر شاخص SPEI می‌باشند.

#### شاخص کمبود جریان سطحی (SDI)

McKee و همکاران (۱۹۹۳) شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، را به منظور پایش خشکسالی هواشناسی با برازش توزیع گامای دو متغیره بر داده‌های مقادیر بارش پیشنهاد دادند. شاخص SDI را می‌توان با توجه به روش مک‌کی و همکاران در محاسبه شاخص SPI، از برازش توزیع گامای دو متغیره بر داده‌های دبی جریان تعیین نمود. ورودی شاخص SDI در واقع شامل داده‌های دبی ماهانه است و کمبود یا مازاد جریان را بیان می‌کند. در این روش فرض می‌شود که سری زمانی حجم جریان ماهانه در دسترس است که در آن  $i$  بیانگر شماره سال هیدرولوژیکی و  $z$  شماره ماه در آن سال هیدرولوژیکی است که برای اکتبر (معادل مهرماه) برابر ۱ و برای سپتامبر (معادل شهریورماه) برابر ۱۲ می‌باشد. بر این اساس:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i=1,2,3,\dots \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4 \quad (3)$$

که در آن:  $V_{i,k}$  = حجم تجمعی جریان در سال هیدرولوژیکی  $i$  برای دوره مبنای  $k$ ، که مقدار  $k$  برای دوره اکتبر تا دسامبر برابر با یک، اکتبر-مارس برابر با ۲، اکتبر-ژوئن برابر ۳ و برای اکتبر-سپتامبر برابر ۴ می‌باشد. بر اساس حجم تجمعی جریان ( $V_{i,k}$ )، شاخص خشکسالی جریان بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad i=1,2,\dots \quad k=1,2,3,4 \quad (4)$$

که در آن:  $\bar{V}_k$  و  $s_k$  به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد حجم جریان تجمعی در دوره زمانی  $k$  هستند و در طول یک دوره زمانی طولانی تخمین زده می‌شوند

در این پژوهش داده‌های دبی ماهانه رودخانه شش‌تراز از سال ۱۳۶۶-۶۷ تا ۱۳۹۴-۹۵ برای محاسبه شاخص SDI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه مورد استفاده قرار گرفت.

#### شاخص منبع آب‌زیرزمینی (GRI)

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) برای اولین بار توسط Mendicino و همکاران (۲۰۰۸) از یک مدل توازن ساده‌ی آب ایجاد شده که می‌تواند جهت ارزیابی وضعیت مخزن سفره آب زیرزمینی و هم‌چنین ارزیابی واقعی میزان ذخیره آبخوان به کار رود و با استانداردسازی مقادیر ماهانه‌ی سطح آب‌زیرزمینی محبوس برای همه‌ی ماه‌ها بدون هیچ‌گونه تغییر شکل، از رابطه ۵ محاسبه می‌شود

$$GRI = \frac{D_{Y,M} - \mu_{D,M}}{\delta_{Y,M}} \quad (5)$$

که در آن:  $D_{Y,M}$  مقادیر ارتفاع سطح آب‌زیرزمینی در سال  $Y$ ،  $\mu_{D,M}$  و  $\sigma_{Y,M}$  میانگین و انحراف معیار مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در ماه  $M$  است.

در این پژوهش از داده‌های تراز آب زیرزمینی آبخوان‌های کاشمر و بردسکن برای محاسبه شاخص GRI با برازش توزیع گامای دو متغیره استفاده شده است. در جدول (۱) طبقات مختلف خشکسالی در شاخص GRI و سایر شاخص‌های مورد بررسی ارائه شده‌اند.

جدول (۱): طبقات وضعیت‌های مختلف رطوبتی در شاخص‌های SDI, SPEI و GRI

مقدار عددی شاخص	طبقه خشکسالی (نماد اختصاری)
۲ یا بیشتر	ترسالی بسیار شدید (EW)
۱/۵۰ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید (SW)
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط (MW)
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نرمال (N)
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط (MD)
-۱/۵۰ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید (SD)
-۲ یا کمتر	خشکسالی بسیار شدید (ED)

## تئوری ران

Yevjevich (۱۹۶۷) پیشنهاد استفاده از تئوری ران را برای تعریف ویژگی‌های هیدرولوژیکی طبق شکل (۲) ارائه نمود. تئوری ران پیمایش سری زمانی و قسمتی از آن است که در آن مقادیر خشکسالی در زیر یا بالای سطح آستانه مشخص قرار می‌گیرد (Mishra et al., 2009). بر اساس شکل (۲) پارامترهای اصلی خشکسالی به صورت زیر تعریف می‌گردد: طول دوره خشکسالی: بر اساس تئوری ران طول دوره‌ی خشکسالی برابر فاصله زمانی است که در طول آن، خشکسالی به وقوع می‌پیوندد. یعنی طول دوره‌ای که طی آن مقدار متغیر اصلی از سطح بحرانی مورد نظر کمتر شود. مقدار این متغیر برابر است با

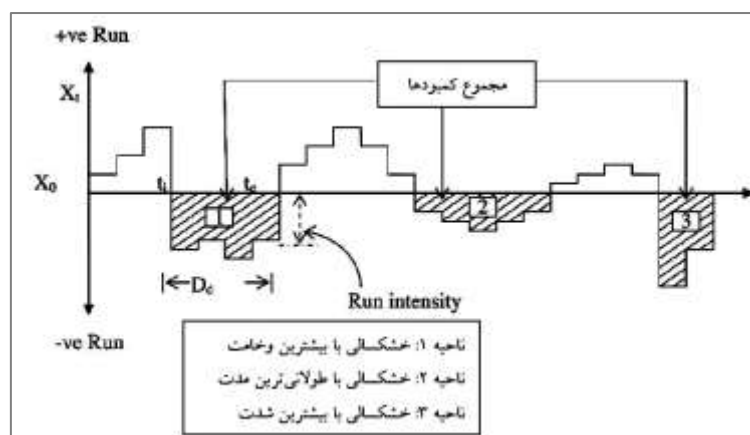
$$D_d = t_e - t_i \quad (۶)$$

در این رابطه  $t_i$  و  $t_e$  به ترتیب زمان آغاز و پایان دوره‌ی خشکسالی می‌باشند. در شکل (۲) ناحیه‌های هاشور خورده نشان‌دهنده دوره‌هایی می‌باشند که مقدار متغیر اصلی از سطح بحرانی کمتر است و ناحیه هاشور خورده ۲ دوره خشکسالی با بیشترین دوره تداوم را نشان می‌دهد.

مجموع کمبودها: مقدار این پارامتر برابر با مجموع کمبودهای متغیر اصلی از سطح بحرانی مورد نظر در دوره‌ی وقوع خشکسالی می‌باشد. این پارامتر با عناوین مختلفی مانند وخامت و بزرگی بیان می‌شود. در شکل (۲) ناحیه‌ی هاشور خورده‌ی ۱ دوره‌ی خشکسالی با بیشترین وخامت را نشان می‌دهد.

میانگین کمبودها: مقدار آن برابر است با نسبت مجموع کمبودها به طول دوره‌ی خشکسالی. این پارامتر معرف میانگین کمبود یا شدت متوسط در واحد زمان است. در شکل (۲) ناحیه‌ی هاشور خورده‌ی ۳ دوره خشکسالی با بیشترین شدت متوسط را نشان می‌دهد (Mishra et al., 2009؛ قبائی سوق، ۱۳۸۹).

فراوانی خشکسالی: با توجه به وقوع خشکسالی با شدت‌های بسیار متفاوت، بررسی فراوانی‌ها برای هر یک از رخدادها می‌تواند به تفکیک صورت گیرد. محاسبه‌ی توزیع فراوانی وقایع خشکسالی با شدت‌های مختلف می‌تواند در ارزیابی قابلیت منطقه مورد بررسی نسبت به شدت‌های متفاوت خشکسالی کاربرد داشته باشد. این محاسبه می‌تواند از طریق توابع توزیع احتمال فراوانی برای بررسی احتمال یا دوره‌های برگشت خشکسالی جهت پیش‌بینی دوره‌های آینده مورد استفاده قرار گیرد.

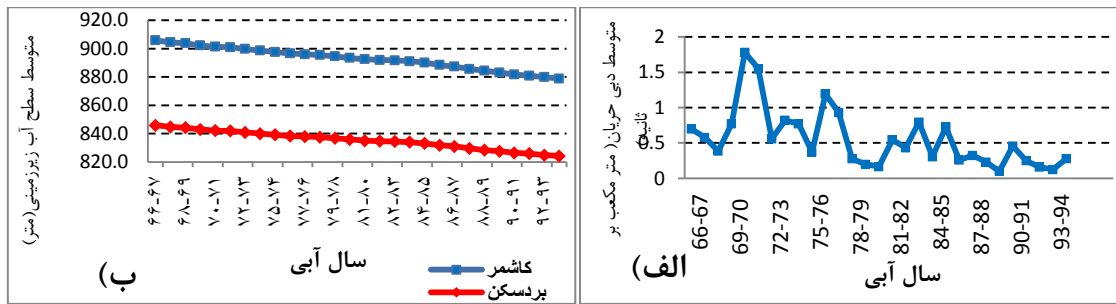
شکل (۲): توصیف خصوصیات خشکسالی با استفاده از تئوری ران در نظر گرفتن سطح آستانه  $X_0$  (Mishra et al., 2009)

خشکسالی می‌تواند برای تداوم مشخصی مورد بررسی قرار گیرد. تداوم خشکسالی از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا اگر یک خشکسالی متوسط برای چند سال متوالی در یک منطقه رخ دهد، اثرات آن به مراتب مخرب‌تر از یک خشکسالی شدید است که تنها یک سال و یا مدت کوتاه‌تری رخ داده است. زیرا هر چه تداوم خشکسالی بیشتر باشد، اثر آن بر منابع آب‌های سطحی و هم با یک تاخیر بیشتر در منابع آب‌های زیرزمینی بیشتر خواهد بود (درگاهیان و همکاران، ۱۳۹۹). در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت (تداوم کوتاه مدت)، کمبود بارش و خشکسالی ناشی از آن بر میزان رطوبت خاک اثر می‌گذارد و خشکسالی کشاورزی را به همراه دارد. در صورتی که این کمبود بارش و یا افزایش تبخیر و تعرق در مقیاس زمانی میان مدت و یا بلند مدت بر دبی رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی و منابع ذخیره آب اثر می‌گذارد و خشکسالی‌های هیدرولوژیکی را ایجاد می‌نمایند. همچنین با توجه به این که ویژگی‌های شدت خشکسالی و تکرار و تداوم آن توابعی هستند که به طور مستقیم و غیر مستقیم به مقیاس زمانی وابسته‌اند، بهتر است خشکسالی در مقیاس‌های مختلف بررسی شود. بنابراین، در این پژوهش شاخص‌های SPEI، SDI و GRI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی روابط بین شاخص‌ها در مقیاس‌ها و زمان‌های تأخیر مختلف از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. با توجه به این که مقدار بارش بطور مستقیم بر میزان دبی جریان رودخانه مؤثر است و معمولاً خشکسالی هیدرولوژیکی تحت تأثیر خشکسالی هواشناسی رخ می‌دهد و از طرفی منابع زیرزمینی نیز تحت تأثیر مقدار بارش می‌باشند و متعاقب کمبود بارش و وقوع خشکسالی هواشناسی مقدار آب نفوذ یافته به داخل خاک و میزان نشت آن به داخل سفره زیرزمینی کاهش می‌یابد؛ بنابراین برای تحلیل ارتباط زمانی خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی، همبستگی شاخص خشکسالی هواشناسی با شاخص‌های هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی در گام‌های متفاوت تأخیر زمانی شامل: ۰ (بدون تأخیر)، ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶ و ۴۲ ماهه مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، همبستگی خشکسالی هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی نیز با تاخیرهای زمانی ۰ (بدون تأخیر)، ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۸، ۲۴ ماهه مورد بررسی قرار گرفت. در بخش دیگری از این پژوهش، مشخصه‌های هر یک از انواع خشکسالی شامل شدت، مدت، طول دوره خشکسالی، تعداد دوره‌ها و مجموع کمبودها بر اساس تئوری ران مورد بررسی قرار گرفت.

## نتایج و بحث

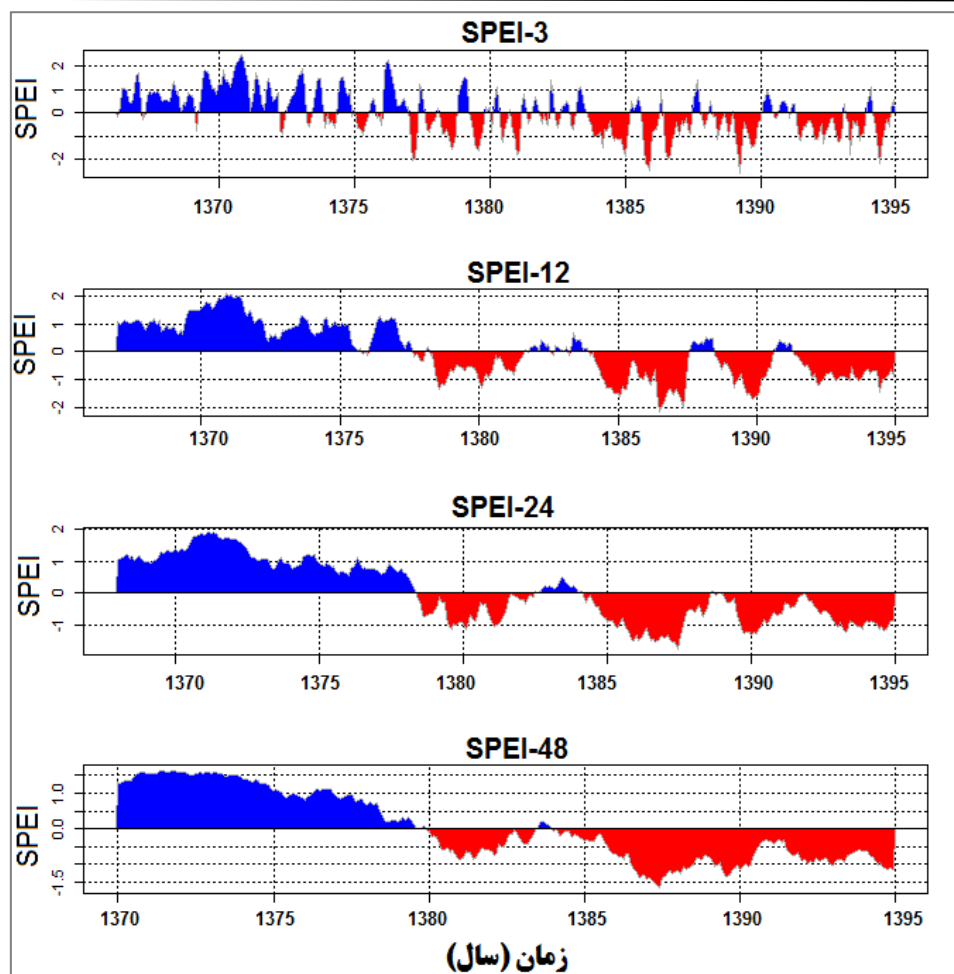
### نتایج بررسی نوسانات آبدی رودخانه و سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت کاشمر و بردسکن

نتایج چگونگی تغییرات متغیرهای متوسط آبدی رودخانه و همچنین متوسط سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت کاشمر و بردسکن، در طول دوره مورد بررسی در شکل (۳) ارائه شده است. بیشترین مقدار دبی متوسط جریان رودخانه حدود ۲/۴ مترمکعب در ثانیه است که در سال ۱۳۷۱-۷۲ اتفاق افتاده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود نوسانات آبدی رودخانه زیاد است و به‌طور کلی روند کاهشی دارد. سطح آب زیرزمینی در محدوده هر دو آبخوان نیز دارای روند کاهشی (و تقریباً دائمی) است. متوسط سالانه تراز سطح آب آبخوان کاشمر در سال آبی ۶۷-۱۳۶۶ حدود ۹۰۵/۸ متر و در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ حدود ۸۷۷/۴ متر و در آبخوان بردسکن این مقادیر حدود ۸۴۵/۸ و ۸۲۳/۰۳ متر بوده است که نشان می‌دهد در طول ۲۹ سال دوره آماری، آبخوان کاشمر با حدود ۲۸ متر و بردسکن با ۲۲/۷۷ متر افت سطح تراز آب زیرزمینی مواجه شده است. روند کاهشی تراز آب زیرزمینی این دو دشت می‌تواند دلیلی بر اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی باشد. این موضوع از سوی آزادی شیبکوه و همکاران (۱۳۹۹) در همین دشت مورد تاکید قرار گرفته است. ایشان به‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی دشت کاشمر را عامل اصلی افت تراز آب زیرزمینی در این دشت دانسته و تأثیر خشکسالی هواشناسی بر تراز آب زیرزمینی در این دشت را کم‌اهمیت‌تر می‌دانند.



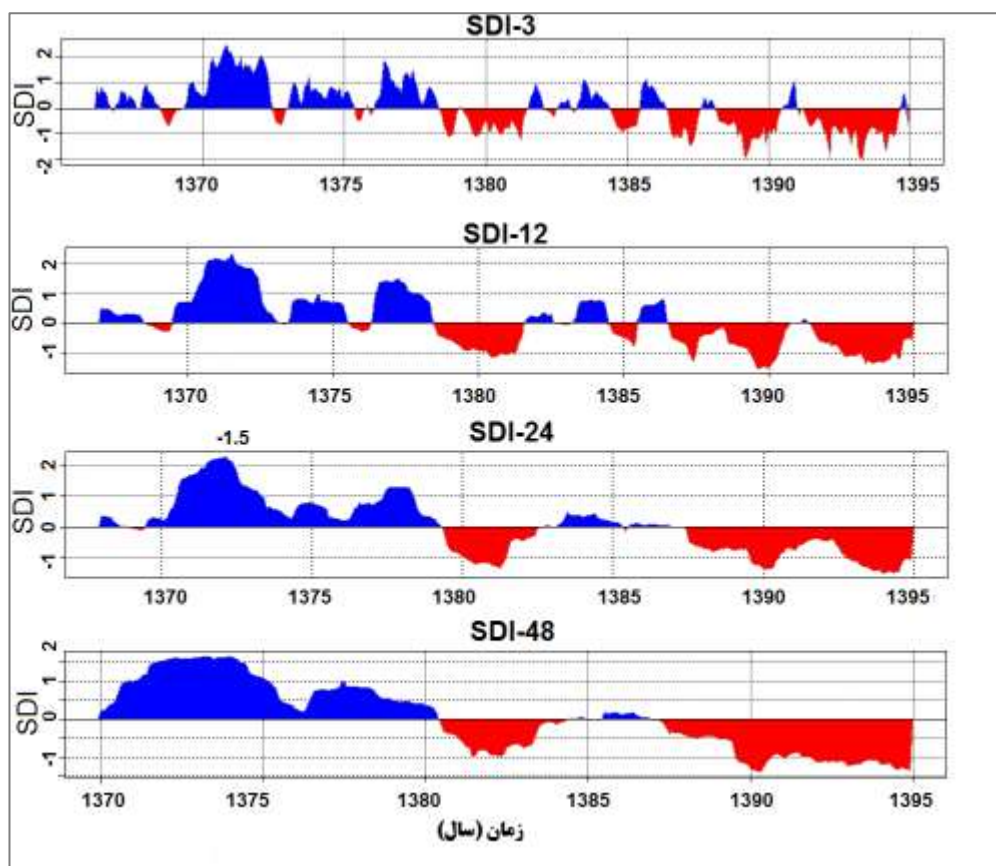
شکل (۳): (الف) تغییرات مقادیر متوسط آبدهی و (ب) متوسط سطح آب زیرزمینی در محدوده دشتهای کاشمر و بردسکن در مقیاس سالانه

نتایج پایش خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی در محدوده دشت کاشمر و بردسکن مطابق آنچه در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، ابتدا مقادیر هر یک از شاخص‌های SPEI، SDI و GRI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در طول دوره آماری ۱۳۶۶-۶۷ تا ۱۳۹۴-۹۵، با استفاده از سری‌های مقادیر تفاضل بارش از تبخیر و تعرق پتانسیل، سری داده‌های دبی و مقادیر سطح آب زیرزمینی محاسبه گردید. نتایج پایش خشکسالی هواشناسی براساس شاخص SPEI در مقیاس‌های مورد بررسی (۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در شکل (۴) ارائه شده‌اند. بر مبنای این شاخص دو دوره متمایز مرطوب و خشک قابل ملاحظه است. دوره اول درجات مختلفی از ترسالی را تا اواخر سال آبی ۱۳۷۷-۷۸ مشخص نموده است و پس از آن بجز در حدود سال ۱۳۸۲-۸۳ که شرایط نرمال بوده، تا پایان دوره زمانی مورد بررسی، دوره‌های خشک تداوم و تمایز بیشتری دارند و در مقیاس زمانی کوتاه‌تر دوره مرطوب تداوم کمتری داشته در مقیاس زمانی طولانی‌تر این دوره‌ها تداوم بیشتری داشته و دوره خشک کمی دیرتر آغاز شده است. با توجه به شکل (۴)، در مقیاس ۴۸ ماهه دوره خشک از سال ۸۰-۱۳۷۹ شروع شده و تا قبل از آن شرایط نرمال یا مرطوب بوده است اما در مقیاس ۱۲ ماهه دوره خشک از سال ۱۳۷۷-۷۸ آغاز شده و قبل از آن شرایط مرطوب یا نرمال بوده است. کمبود جریان و شدت خشکسالی در حدود سال ۸۸-۱۳۸۷ بیشتر است که در این سال متوسط بارش نیز کمترین مقدار را طی دوره‌ی آماری مورد بررسی داشته است. با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که نوسانات شرایط رطوبتی در دوره‌های زمانی کوتاه مدت (۳ ماهه) زیاد می‌باشد و با افزایش طول مقیاس زمانی از نوسانات این شاخص کاسته می‌شود. این مطلب با نتایج سیلاخوری و همکاران (۱۳۹۷)، که بیان می‌دارد در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب زیاد است و با افزایش مقیاس زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش، اما تداوم آنها افزایش می‌یابد. هم‌خوانی دارد. علاوه بر این با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که خشکسالی بلندمدت در منطقه حاکم شده است. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش دما و تغییرات اقلیمی باشد.



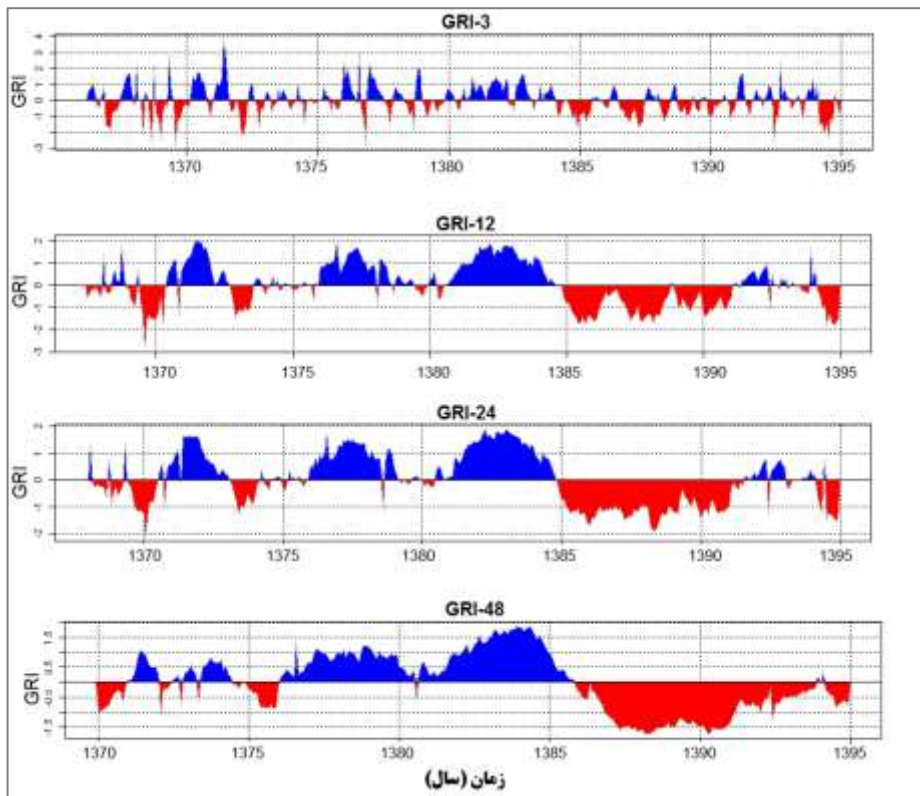
شکل (۴): نتایج پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص SPEI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه

نتایج پایش وضعیت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی بر اساس شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی مورد بررسی در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش مقیاس زمانی از ۳ ماه به ۴۸ ماه از نوسانات شرایط رطوبتی کاسته می‌شود. در عین حال بر اساس نتایج ارائه شده، دو دوره مشخص زمانی شامل رخداد‌های ترسالی و خشکسالی در شکل‌ها مشخص می‌باشد. دوره اول که از ابتدای دوره آماری تا پایان سال آبی ۱۳۷۷-۷۸ تداوم دارد، عمدتاً شامل دوره‌های نرمال و ترسالی با درجات مختلف می‌باشد که دارای تداوم و حجم مازاد قابل ملاحظه‌ای می‌باشند. دوره دوم که از سال آبی ۱۳۷۸-۷۹ شروع و تا پایان دوره آماری مورد بررسی ادامه دارد بیشتر شامل دوره‌های خشک و برخی سال‌های مرطوب می‌باشد که تداوم دوره‌های خشکسالی به ویژه طی سال‌های ۷۸ تا ۸۱ و نیز ۱۳۸۶ به بعد متمایزتر می‌باشد. نکته قابل توجه در نتایج پایش وضعیت‌های خشکسالی هیدرولوژیکی در شکل ۵، تداوم طولانی و حجم کمبود زیاد وقایع خشکسالی هیدرولوژیکی از سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ به بعد می‌باشد که جدای از وقایع هیدرولوژیکی می‌تواند ناشی از کاهش آبدهی رودخانه به دلیل برداشت آب از رودخانه باشد. اثرات عوامل انسانی در کاهش آبدهی رودخانه‌ها در بررسی سری زمانی آبدهی رودخانه‌ها در حوضه‌های آبریز مختلف ایران در پژوهش‌های متعددی توسط محققان مورد تأیید و روش‌های مختلفی نیز برای کمی‌سازی اثرات این عوامل نیز ارائه شده است (قره‌چایی و همکاران، ۱۳۹۴؛ صانع و همکاران ۱۳۹۶؛ عباسی و ملکان، ۱۳۹۸).

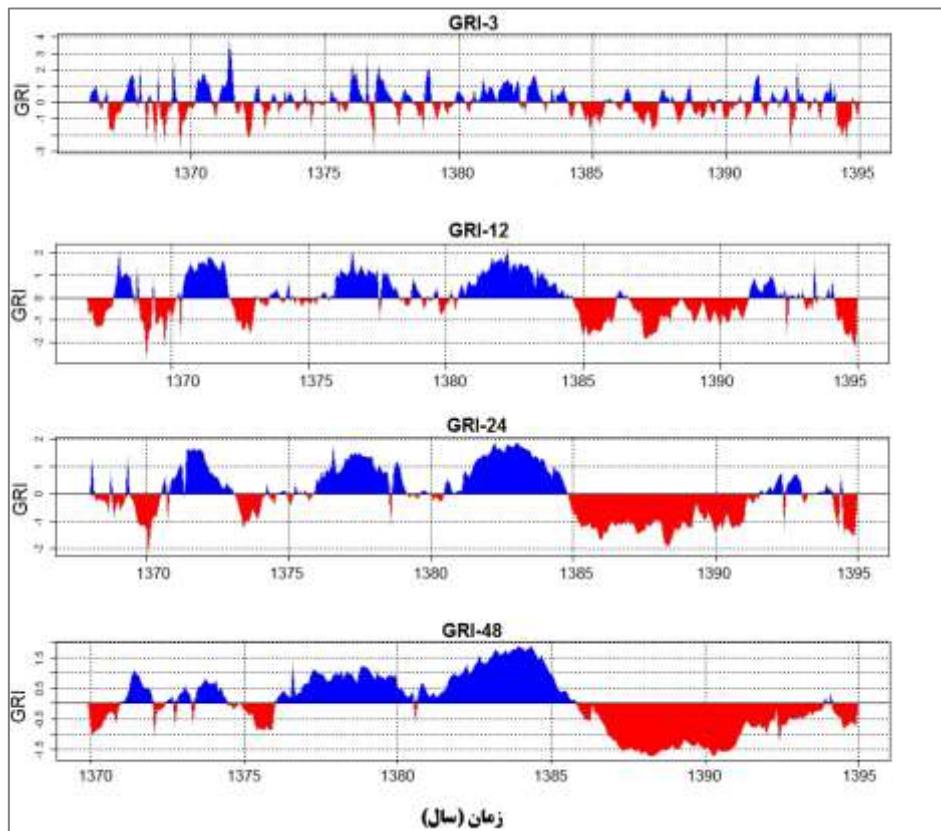


شکل (۵): نتایج پایش وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص SDI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه

وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی در محدوده آبخوان‌های کاشمر و بردسکن در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه، به صورت جداگانه در هر محدوده بر اساس شاخص GRI محاسبه شده است (شکل‌های ۶ و ۷). بررسی مقادیر شاخص خشکسالی در محدوده هر دو آبخوان نشان‌دهنده روند کاهشی سطح آب زیرزمینی در منطقه است که این مسئله با افزایش مقیاس زمانی به وضوح قابل مشاهده است. شاخص GRI در آبخوان‌های کاشمر و بردسکن نسبت به شاخص‌های SPEI و SDI الگوی متفاوتی را از نظر تغییر فاز و شروع دوره‌های خشک ارائه می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۶) و (۷) در همان سال‌های ابتدایی دوره، وقوع دوره‌های خشک با شدت‌های متفاوت قابل تأمل است که در مقیاس کوتاه‌مدت از شدت قابل ملاحظه‌ای برخوردارند. همچنین طولانی‌ترین دوره خشک در منطقه از حدود سال ۱۳۸۵-۸۶ شروع شده و تا پایان دوره نیز قابل مشاهده است. منطقه در سال‌های اول دوره زمانی از نظر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی دوره‌های مرطوبی را گذرانده ولی از نظر خشکسالی آب زیرزمینی دوره‌های خشک نیز دیده می‌شود و به نظر می‌رسد در این سال‌ها عواملی غیر از اقلیم مانند اضافه برداشت در منطقه حاکم بوده که این شرایط را ایجاد نموده است. طولانی‌ترین دوره خشک با توجه به شاخص GRI از حدود سال ۱۳۸۵-۸۶ به بعد شروع شده است و همچنان ادامه دارد.



شکل (۶): نتایج پایش وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی دشت کاشمر بر مبنای شاخص GRI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه



شکل (۷): نتایج پایش وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی دشت بردسکن بر اساس شاخص GRI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه

نتایج استخراج ویژگی‌های دوره‌های خشک بر اساس تئوری ران

نتایج استخراج ویژگی‌های دوره‌های خشکسالی بر اساس هریک از شاخص‌های مورد بررسی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در جدول (۲) آورده شده‌اند. در جدول مذکور تقریباً در تمامی شاخص‌ها، با افزایش مقیاس زمانی تعداد

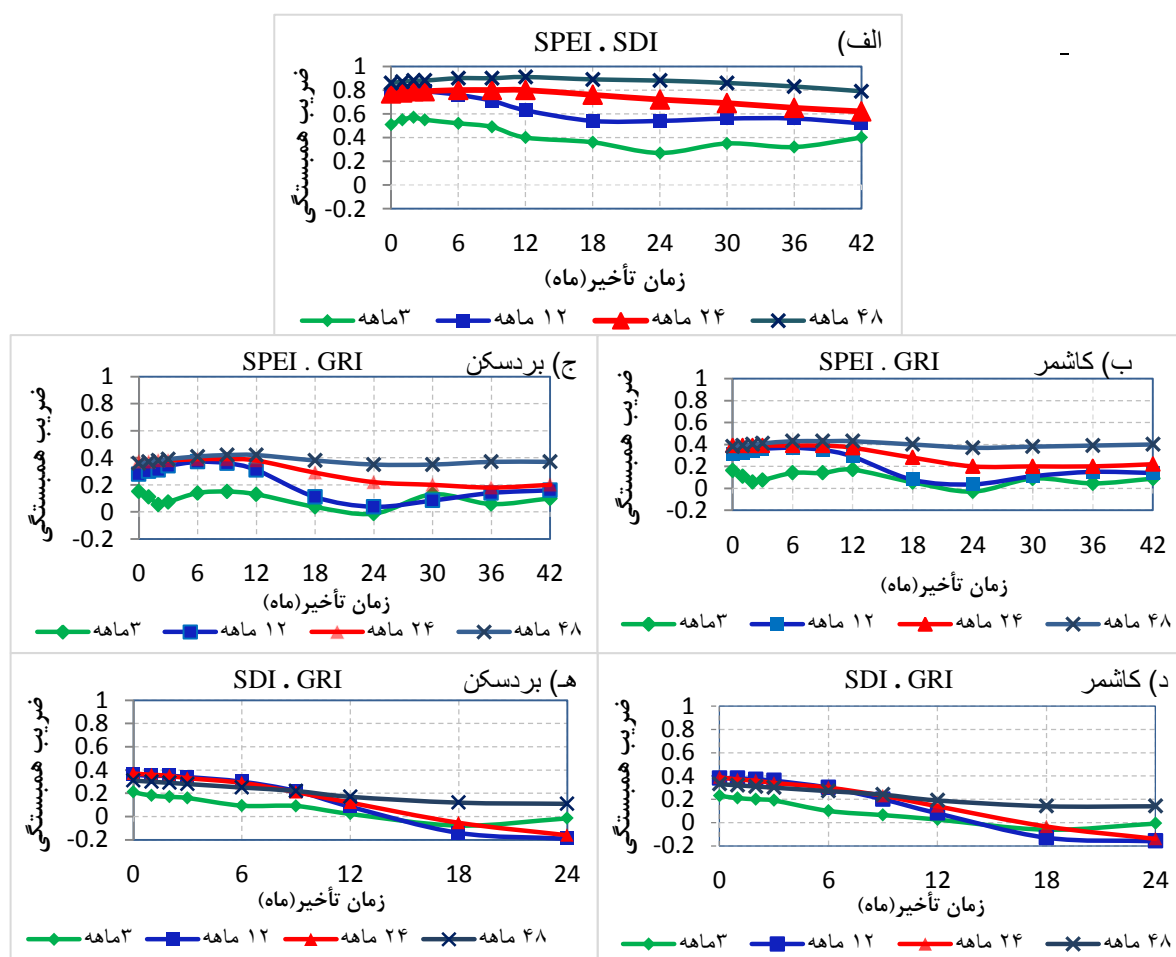
دوره‌های خشک کاهش و مجموع کمبود افزایش می‌یابد که ناشی از طولانی‌تر شدن تداوم دوره‌های خشکسالی می‌باشد. بطور مثال شاخص SPEI به ترتیب مقادیر مجموع کمبود ۱۳۸/۷ و ۱۲۳/۷ و تعداد ۳۲ و ۷ مورد دوره خشک را در مقیاس ۳ و ۴۸ ماهه نشان داده است. تعداد بیشتر دوره‌های خشک در شاخص SPEI که مبتنی بر تبخیر و تعرق می‌باشد و شاخص GRI مبتنی بر آب زیرزمینی، می‌تواند بیانگر این مسئله می‌باشد که تنها بیلان آبی و میزان تبخیر و تعرق در وضعیت خشکی هیدروژئولوژیک مؤثر نبوده و عوامل دیگری نیز در این امر دخالت دارند. این مطلب، نتایج پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۷) که بیان می‌دارند خشکسالی هواشناسی به تنهایی نمی‌تواند بر خشکسالی هیدروژئولوژیک تأثیرگذار باشد را تأیید می‌نماید. بررسی مقادیر متوسط شدت خشکسالی در شاخص‌های مورد بررسی در محدوده دشت کاشمر و بردسکن نشان می‌دهد که مقادیر متوسط شدت خشکسالی، در شاخص‌های مبتنی بر آب زیرزمینی نسبت به شاخص‌های هواشناسی و هیدروژئولوژیک در مقیاس‌های کوتاه مدت (۳ ماهه) و میان مدت (۱۲ ماهه) بزرگتر می‌باشند و با افزایش مقیاس، در مقیاس‌های بلند مدت (۲۴ و ۴۸ ماهه)، متوسط شدت‌های دوره‌های خشک در خشکسالی‌های هیدروژئولوژیک، آب‌زیرزمینی و هواشناسی به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند که ناشی از اثرات تجمیعی و کاهش نوسانات در میانگین متحرک می‌باشد. بررسی مقادیر بیشترین شدت خشکسالی که از طریق متغیرهای بیشترین حجم کمبود و طولانی‌ترین تداوم محاسبه می‌شود، نشان می‌دهد که در مقیاس کوتاه مدت شاخص GRI دارای شدت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها می‌باشد که با افزایش مقیاس زمانی مقادیر بیشترین شدت شاخص‌ها در عدد ۱ به همدیگر نزدیک می‌شوند.

جدول (۲): ویژگی‌های دوره خشک در شاخص‌های هواشناسی و مقیاس‌های مختلف

مقیاس‌های زمانی				شاخص خشکسالی	مشخصه خشکسالی
۴۸ ماهه	۲۴ ماهه	۱۲ ماهه	۳ ماهه		
۷	۵	۱۷	۳۲	SPEI	تعداد دوره
۱۰	۶	۹	۱۶	SDI	
۱۰	۲۰	۲۹	۴۵	GRI-Kashmar	
۷	۲۰	۳۰	۴۳	GRI-Bardaskan	
۱۲۳/۷	۱۲۵/۳	۱۳۰/۴	۱۳۸/۷	SPEI	مجموع کمبودها
۱۲۵/۴	۱۱۵/۹	۱۰۹/۸	۱۲۵/۷	SDI	
۱۲۴/۲	۱۳۰/۹	۱۲۰/۳	۱۳۱/۴	GRI-Kashmar	
۱۱۲/۴	۱۲۶/۵	۱۲۵/۲	۱۳۴/۳	GRI-Bardaskan	
۰/۴۹	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۴	SPEI	متوسط شدت
۰/۵۳	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۴۹	SDI	
۰/۶	۰/۵	۰/۵۳	۰/۹	GRI-Kashmar	
۰/۴	۰/۴۱	۰/۵۵	۰/۶۶	GRI-Bardaskan	
۹۶	۶۹	۴۷	۴۶	SPEI	طولانی‌ترین دوره (ماه)
۹۷	۹۳	۵۱	۴۱	SDI	
۹۰	۸۱	۴۰	۱۲	GRI-Kashmar	
۷۰	۷۶	۳۵	۱۸	GRI-Bardaskan	
۹۴/۷	۹۸	۷۹	۷۰/۴	SPEI	بیشترین کمبود
۱۰۰/۱	۸۳/۴	۳۶/۶	۴۰/۵	SDI	
۹۵/۴	۸۶/۱	۳۸/۴	۱۱/۸	GRI-Kashmar	
۷۴/۹	۸۰/۹	۲۰/۳	۱۳/۵	GRI-Bardaskan	
۱/۰۴	۱/۴۲	۱/۶۸	۱/۵	SPEI	بیشترین شدت
۱/۰۳	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۹۹	SDI	
۱/۱	۱/۴	۰/۹۶	۱/۸	GRI-Kashmar	
۱/۱	۱/۱	۱/۵	۱/۷	GRI-Bardaskan	

## نتایج بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی

نتایج همبستگی شاخص‌های SPEI، SDI و GRI در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه با یکدیگر به ازای زمان‌های تاخیرهای مختلف در شکل (۸) آورده شده است. نتایج همبستگی شاخص SPEI و SDI نشان می‌دهد کمترین ضریب همبستگی شاخص‌های مذکور مربوط به مقیاس ۳ ماهه می‌باشد و با افزایش مقیاس زمانی از ۳ ماه به ۴۸ ماه مقادیر ضریب همبستگی افزایش یافته است. به نحوی که مقادیر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPEI) و هیدرولوژیک (SDI) در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه دارای همبستگی حدود ۰/۸۵ می‌باشند که با اعمال تاخیر زمانی این عدد تغییر فاحشی نمی‌کند. در عین حال در مقیاس زمانی ۳ ماهه این دو شاخص دارای همبستگی نسبتاً پائینی می‌باشند (حدود ۰/۵) که با اعمال تاخیر زمانی این همبستگی تمایل به کاهش دارد (شکل ۸ الف). در مقیاس‌های بلندمدت (۲۴ و ۴۸ ماهه) با افزایش زمان تاخیر، مقادیر ضریب همبستگی بین این دو شاخص اگرچه کاهش می‌یابد، اما مقدار کاهش آن در مقایسه با مقیاس‌های ۱۲ و ۳ ماهه بسیار کمتر است. به طور کلی بیشترین ضریب همبستگی و ارتباط بین شاخص‌های SPEI و SDI در مقیاس‌های مختلف به ازای تاخیرهای زمانی مورد بررسی (۱ تا ۴۲ ماهه) مربوط به تاخیرهای کمتر از ۳ ماه می‌باشد. در همه این موارد همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی (SPEI) و هیدرولوژیک (SDI) در هر مقیاس زمانی (۳ تا ۴۸ ماهه) و با هر میزان تاخیر (۰ تا ۴۲ ماه) با توجه مقادیر آن و طول دوره آماری در سطح ۰/۹۵ معنی‌دار است.



شکل (۸): تغییرات ضرایب همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی، هیدرولوژیک و آب‌بیرزمینی در مقیاس‌های ۳، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در زمان‌های تاخیر مختلف در دو دشت کاشمر و بردسکن

در خصوص همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPEI) و آب‌بیرزمینی (GRI) در محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شود که به طور کلی و در تمامی مقیاس‌های زمانی این همبستگی تقریباً ۰/۴ و یا کمتر از آن است و با کوتاه‌تر شدن مقیاس زمانی این همبستگی کاهش می‌یابد (شکل ۸-ب (کاشمر) و ۸-ج (بردسکن)). در مقیاس طولانی مدت (۴۸

ماهه) تغییر مقادیر همبستگی در تاخیرهای مختلف بسیار ناچیز و در هر دو دشت در حدود ۰/۴ می‌باشد. کمترین مقادیر همبستگی و بیشترین نوسانات مقادیر همبستگی این بین دو شاخص مربوط به مقیاس کوتاه مدت ۳ ماهه است که در اکثر موارد مقدار آن کمتر از ۰/۲ و در مواردی نزدیک به ۰ می‌باشد. ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPEI و GRI در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه در تأخیر ۶ ماهه بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشند و به ۰/۴ نزدیک می‌شوند. با توجه به تعداد سال‌های آماری (۲۹ سال) و مقادیر ضریب همبستگی می‌توان بیان نمود که هیچ همبستگی معنی‌داری (در سطح ۰/۰۵) بین شاخص SPEI و GRI در مقیاس‌های زمانی ۲۴ ماهه و کمتر از آن در دشت‌های مورد بررسی وجود ندارد. بنا بر این، تنها همبستگی معنی‌دار (در سطح ۰/۰۵) بین شاخص SPEI و GRI فقط در مقیاس‌های زمانی ۴۸ ماهه در این دو دشت وجود دارد و در مقیاس‌های زمانی کمتر همبستگی معنی‌داری بین این دو شاخص وجود ندارد. این نتیجه یافته‌های حاصل از پژوهش مرتضائی فریزه‌ندی و میراکبری (۱۳۹۷) که بیان می‌دارند شاخص SPEI و GRI تنها در مقیاس ۲۴ و ۴۸ ماهه با یکدیگر همبستگی دارند تأیید می‌کند. همبستگی ناچیز خشکسالی هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی با نتایج مطالعه پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۷) در خصوص تطابق خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی دشت توپسرکان که بیان می‌دارند خشکسالی هواشناسی به تنهایی نمی‌تواند بر سطح آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد، نیز مطابقت دارد. این نتایج با نتایج ویسی‌یزدی و همکاران (۱۳۹۶) که بیان داشتند همبستگی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در دشت مشهد چندان زیاد نمی‌باشد، منطبق است. علاوه بر این، نتایج پژوهش آزادی شیبکوه و همکاران (۱۳۹۹) را که ارتباط قوی بین خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی در دشت کاشمر نیافتند را هم تأیید می‌نماید. ایشان عامل مهم اضافه برداشت را دلیل خشکسالی آب زیرزمینی دشت کاشمر می‌دانند.

بررسی مقادیر همبستگی بین شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) و آب زیرزمینی (GRI) در آبخوان‌های کاشمر و بردسکن نشان می‌دهد که به طور کلی همبستگی این دو شاخص با یکدیگر در مقایسه با سایر شاخص‌های خشکسالی کمتر است. به نحوی که در مقایسه این دو شاخص در همه مقیاس‌های زمانی همبستگی کمتر از ۰/۴ می‌باشد (شکل ۸-د-کاشمر) و ۸-ه (بردسکن)). با توجه به مقادیر همبستگی بین خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) و آب زیرزمینی (GRI) در این دو آبخوان و با توجه به تعداد سال‌های آماری (۲۹ سال) می‌توان به این نتیجه رسید که هیچ همبستگی معنی‌داری (در سطح ۰/۰۵) بین شاخص SDI و GRI در دشت‌های مورد بررسی وجود ندارد. در عین حال مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه در تأخیرهای کمتر از ۹ ماه همبستگی بیشتری نسبت به مقیاس‌های دیگر دارند، ولی باز هم این همبستگی‌ها معنی‌دار (در سطح ۰/۰۵) نمی‌باشند.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تلاش شده است علاوه بر پایش انواع خشکسالی در محدوده دشت کاشمر و بردسکن، چگونگی تأثیر خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی هیدرولوژیکی و همچنین خشکسالی آب زیرزمینی در زمان‌های تأخیر مختلف مورد بررسی قرار گیرد. طبق نتایج شاخص SPEI، منطقه کاشمر و بردسکن تا سال ۱۳۷۷-۷۸ از نظر وضعیت خشکسالی هواشناسی، دوره‌های ترسالی و مرطوب را هم پشت سر گذاشته و با گذشت زمان، شدت و مدت خشکسالی هواشناسی (SPEI) تا انتهای به تدریج افزایش یافته‌است. بر مبنای نتایج بدست آمده، خشکسالی هواشناسی با خشکسالی هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی در مقیاس کوتاه مدت دارای کمترین همبستگی است و با افزایش مقیاس زمانی این همبستگی افزایش می‌یابد. همبستگی بین شاخص‌های SPEI با SDI در مقیاس‌های ۱۲ تا ۴۸ و با هر تاخیر زمانی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است در حالی که در مورد مقیاس ۳ ماهه این همبستگی فقط تا تأخیر زمانی ۱۲ ماه معنی‌دار است. که نشان می‌دهد در بازه‌های کوتاه مدت، تأثیرپذیری زمانی جریان سطحی از مقادیر بارش همان زمان یا دوره‌های نزدیک به همان زمان بیشتر است. از طرف دیگر همبستگی بین شاخص‌های SPEI با GRI و همچنین SDI با GRI در هیچ مقیاس زمانی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نمی‌باشد. به طور کلی می‌توان بیان نمود که در منطقه مورد مطالعه ارتباط معنی‌داری (حتی در سطح ۰/۰۵) بین خشکسالی آب زیرزمینی و خشکسالی هیدرولوژیکی یا خشکسالی هواشناسی وجود ندارد. از طرف دیگر با توجه به روند کاهشی مقادیر سطح آب زیرزمینی در طول دوره زمانی مورد بررسی، می‌توان بیان نمود که خشکسالی آب زیرزمینی متأثر از عوامل مهم‌تر دیگری

می‌باشد. به نظر می‌رسد که اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی سبب شده است که همبستگی خشکسالی آب زیرزمینی با سایر خشکسالی‌ها غیرمعنی‌دار باشد. علاوه بر آن روند نزولی تراز آب زیرزمینی و خشکسالی آب زیرزمینی در سال‌های اخیر ممکن است ناشی از اثرپذیری عواملی غیر از خشکسالی چون افزایش جمعیت، توسعه صنایع آب‌بر و افزایش نیاز آب بخش‌های صنعتی باشد، به طوری که دشت کاشمر و بردسکن به عنوان دشت‌های ممنوعه عنوان شده‌اند. بیان منفی پایدار هر دو آبخوان در سال‌های اخیر نه تنها مشکلاتی چون کاهش کمی و کیفی آب را در پی داشته‌است، بلکه در بخشی از دشت کاشمر پدیده فرونشست نیز مشاهده شده است که لازم است مدیریت جدی در بحث نظارت و برداشت از منابع زیرزمینی اعمال گردد.

## منابع

- آزادی شیبکوه ش.، ه. معماریان خلیل آباد، م. رضاپور بیلندی، م. عابدین پور و م. اکبری (۱۳۹۹). ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی منابع آب زیرزمینی دشت کاشمر مبتنی بر تحلیل سری زمانی داده‌های بارش و خشکسالی، سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۸(۲۴): ۵۵-۶۹.
- بازگیر، س.، ا. اسعدی اسکویی، ف. عباسی، پ. رضازاده و م. حقیقت (۱۳۹۹). مطالعه تطبیقی کارایی برخی نمایه‌های خشکسالی هواشناسی در مناطق مختلف اقلیمی ایران، تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۱): ۲۷۵۲-۲۷۶۰.
- بهی‌فر، م.، ع. عبدالهی، م. کیاورز و ف. امیراصلانی (۱۴۰۰). ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی شدت، تداوم، فراوانی و گستره خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجش از دور، سنجش از دور و GIS ایران، doi: 10.29252/ijrsgis.2021.214235.0.
- پورمحمدی، س.، م. ت. دستورانی، ه. جعفری، ع. مساح بوانی، م. گودرزی، ف. باقری و م. ح. رحیمیان (۱۳۹۷). بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی بر بیان آب زیرزمینی دشت تویسرکان، مهندسی و مدیریت آبخیز، ۹(۱): ۴۶-۵۷.
- تیموری، ف.، خ. قربانی، ج. بذرافشان و ح. شریفان، (۱۳۹۴). مطالعه تطبیقی نمایه‌های هواشناسی با نمایه‌های هیدرولوژیکی برای پایش خشکسالی به روش داده‌کاوی (مطالعه موردی: ایستگاه ارازکوسه، استان گلستان)، تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶(۳): ۴۰۵-۴۱۳.
- خوش‌گفتار، م.، م. آخوندزاده هنزائی و ا. خسروی (۱۳۹۸). مقایسه روش‌های ARIMA و شبکه عصبی در مدل‌سازی و پایش وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های سری زمانی سنجش از دوری (مطالعه موردی: شهر اراک)، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۸(۱۰۹): ۱۸۵-۱۹۷.
- خیری، ر.، ف. مجرد، ج. معصوم‌پور و ب. فرهادی (۱۴۰۰). ارزیابی تغییرات خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص‌های SPEI و SC-PDSI، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۲۵(۱): ۱۷۵-۲۰۶.
- درگاهیان، ف.، س. لطفی نسب اصل و م. خسروشاهی (۱۳۹۹). بررسی ویژگی‌های خشکسالی حوضه آبخیز هنديجان- جراحی با استفاده از زمین‌آمار، مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۱۰(۳۷): ۱۳-۲۸.
- زینالی، ب.، م. فریدپور و ص. اصغری سراسکانرود (۱۳۹۵). بررسی تأثیر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بر ویژگی‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مرند)، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز سال هفتم، شماره ۱۴ پاییز و زمستان.
- سیلاخوری، ا.، م. اوق، ا. مساعدی، ا. بابائیان و ع. سلمان‌ماهینی (۱۳۹۷). کاربست داده‌های بازتحلیل و دیده‌بانی جهت مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی: شهرستان اسفراین - سبزوار)، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۵): ۲۵۴-۲۶۸.
- صانع، ا.، ب. ثقفیان و م. ناصری (۱۳۹۶). اثر تغییرات اقلیمی و انسانی بر آبدهی رودخانه راوند با استفاده از مدل ونلون. تحقیقات منابع آب ایران ۱۳(۱): ۱۷۸-۱۹۰.

۱۲. عباسی، ح. و ل. ملکانی (۱۳۹۸)، مدل‌سازی رواناب و برآورد میزان تغییرات رواناب در اثر عوامل اقلیمی و انسانی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۲): ۴۷۵-۴۸۵.
۱۳. قبائی‌سوق، م. (۱۳۸۹). ارزیابی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی آب و خاک، ۲۲۲ ص.
۱۴. قره‌چائی، ح.، ع. مقدم‌نیا، ا. ملکیان و ا. احمدی (۱۳۹۴). پاسخ رواناب به تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در حوضه رودخانه کشکان. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۷(۳): ۲۵۵-۲۶۴.
۱۵. مرتضائی فریزه‌ندی، ق. و م. میراکبری (۱۳۹۷). پایش خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های SDI و GRI در حوزه آبخیز رودخانه اعظم هرات استان یزد، مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، ۷(۳): ۷۷۵-۷۸۵.
۱۶. مصباح زاده، ط. و ف. سلیمانی ساردو (۱۳۹۷). بررسی روند زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی در حوزه آبخیز کرخه، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۲(۴۰): ۱۰۵-۱۱۴.
۱۷. ویسی‌یزدی، س.، ع. فریدحسینی و ا. مساعدی (۱۳۹۶). بررسی همبستگی خشکسالی‌های هواشناسی و آب‌زیرزمینی در دشت مشهد، شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ۱۵ و ۱۶ شهریور.
18. Boudad B., Sahbi H. and Manssouri I. (2018). *Analysis of meteorological and hydrological drought based in SPI and SDI index in the Inaouen Basin (Northern Morocco)*. Journal of Materials and Environmental Sciences, 9(1): 219-227.
19. Ding Y., Xu J., Wang X., Cai H., Zhou Z., Sun Y. and Shi H. (2021). *Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China*. Journal of Environmental Management, 283, 111980.
20. Garcia P.M., Nikolas A.L. and Velanzquez M.P. (2017). *Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin*. Journal of Hydrology, 554, 292-305.
21. Li B., Liang Z., Zang J. and Wang G. (2016). *A revised drought index based on precipitation and pan Evaporation*. International Journal of Climatology, 37(2): 793-801.
22. Li Q., He P., He Y., Han X., Zeng T., Lu G. and Wang H. (2020). *Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis*. Atmospheric Research, 234, 104743.
23. Malik A., Kumar A., Salih S.Q. and Yaseen Z.M. (2021). *Hydrological drought investigation using streamflow drought index*. In Intelligent Data Analytics for Decision-Support Systems in Hazard Mitigation, Springer, Singapore. 63-88.
24. McKee T. B., Doesken N. J. and Kleist J. (1993). *The Relationship of drought frequency and duration to time scales*. In: Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, January 17e22, Anaheim, California, 179-184.
25. Mendicino G., Senatore A. and Versace P. (2008). *A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate*. Journal of hydrology. 357(3-4), 282-302.
26. Mishra A. k., Singh V. P. and Desai V. R. (2009). *Drought characterization: a probabilistic approach*. Stochastic Environ Research Risk Assess, 23:41-55.
27. Salimi H., Asadi E. and Darbandi S. (2021). *Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices*. Applied Water Science, 11(2): 1-10.
28. Sen Z. and Almazroui M. (2021). *Actual precipitation index (API) for drought classification*. Earth Systems and Environment, 5(1): 59-70.
29. Stage J.H., Tallaksen L.M., Gudmundsson L., Van Loon A.F. and Stahl K. (2016). *Response to comment on 'Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)*. International Journal of Climatology, 36(4): 2132-2138.
30. Vicente-Serrano S. M., Beguería S. and López-Moreno J. I. (2010). *A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI*. Journal of Climate, 23(7):1696-1718.
31. Yevjevich V. (1967). *"An Objective Approach to Definitions and Investigation of Continental Hydrological Droughts"*, Hydrology Paper 23, Colorado State University, Fort Collins, CO, P. 18.
32. Yisehak B. and Zenebe A. (2021). *Modeling multivariate standardized drought index based on the drought information from precipitation and runoff: a case study of Hare watershed of Southern Ethiopian Rift Valley Basin*. Modeling Earth Systems and Environment, 7(2): 1005-1017.

## Assessment of meteorological, hydrological and groundwater droughts in the Kashmar and the Bardaskan plains and their relationship with each other

Somaye Rajabzade<sup>1</sup>, Abolfazl Mosaedi \*<sup>2</sup>, Mohammad Ghabaei Sough<sup>3</sup>

1. Master of watershed management, Ferdowsi University of Mashhad, Khorasan Razavi, Iran.

2. Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Khorasan Razavi, Iran.

3. PhD in Water Science and Engineering, Iran Water Recourses Management Company, Tehran, Iran.

Received: 2021/05

Accepted: 2021/06

### Abstract

Drought is one of the most complex natural hazards that affect natural systems and different parts of an ecosystem in various ways. Evaluation of drought behavior such as determining the time of its occurrence, understanding the relationships between types of drought, and recognizing its characteristics such as magnitude, severity, and duration of drought periods can be an important aid in water resources management. This study was conducted to determine the meteorological, hydrological, and groundwater drought characteristics and the relationship between their occurrence using SPEI, SDI, and GRI indices over a period of 29 years (1987-88 to 2015-16) of the Kashmar and the Bardaskan plains. According to the results, in general, the occurrence of meteorological, hydrological, and groundwater drought in the region is increasing. The increase in drought events is quite evident in the groundwater drought. The highest correlation coefficient of drought types with each other is related to SPEI and SDI indices in return periods of less than 3-months and SPEI and GRI indices, with a return period of 6-month, which indicates a slight association of meteorological droughts with hydrological and/or groundwater droughts in the region. In general, the correlations between SPEI with GRI, and SDI with GRI are not significant at a 95% level of significance. It can be mentioned that there is no significant relationship between groundwater drought and hydrological drought or meteorological drought in the study area. Therefore, it can be stated that groundwater and hydrological drought are affected by factors other than meteorological drought (and precipitation). The continuous decrease of groundwater level in the study area can be another reason for this remark. Also, the study of drought characteristics showed that in the short scales, the GRI index is more intense than other indices and the most deficiencies were identified by the SPEI index. It is suggested that the effect of extraction from surface water and groundwater resources on the quantity and quality of water resources be further investigated.

**Keywords:** Run theory, Drought indices, Drought characteristics, Groundwater level reduction, Kashmar.

\* mosaedi@um.ac.ir