

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره هشتم، شماره‌ی بیست و نهم، پاییز ۱۳۹۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱

صص ۸۷-۱۰۲

توسعه‌ی یک شاخص ترکیبی جدید (CDI) برای ارزیابی چندمتغیره

خشک‌سالی‌های دشت شهرکرد

فرزانه اسدی آقبلاغی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب-دانشگاه شهرکرد

رسول میرعباسی نجف‌آبادی*، دانشیار منابع آب-دانشگاه شهرکرد

محمدعلی نصر اصفهانی، استادیار منابع آب-دانشگاه شهرکرد

احمدرضا قاسمی دستگردی، استادیار آبیاری و زهکشی-دانشگاه شهرکرد

چکیده

خشک‌سالی پدیده‌ای اقلیمی است که به‌کندی شروع شده و دارای طبیعت پنهانی است. مدت‌زمان وقوع آن طولانی و خسارت‌های ناشی از آن در بخش‌های مختلف تدریجی است؛ بنابراین، ارزیابی و بررسی خشک‌سالی در برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های مقابله با آن، حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر، استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی ترکیبی متفاوتی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مطالعه، خشک‌سالی‌های دشت شهرکرد در یک دوره‌ی آماری ۳۱ ساله (۱۳۶۴-۱۳۹۴) با استفاده از یک شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) جدید که حاصل ترکیب سه مؤلفه‌ی شاخص خشک‌سالی منبع آب زیرزمینی (GRI)، شاخص بارش استاندارد شده‌ی اصلاحی (SPI^{mod}) و تبخیر-تعرق پتانسیل (ETP) است، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شاخص GRI نشان می‌دهند که در ابتدای دوره‌ی آماری (۱۳۶۴) تا اواسط ۱۳۷۸، بلندترین دوره‌ی ترسالی به وقوع پیوسته و تا سال ۱۳۷۸ وضعیت آبخوان شهرکرد مناسب بوده است، ولی از آذرماه ۱۳۸۷ طولانی‌ترین دوره‌ی خشک‌سالی شروع و تا انتهای دوره‌ی آماری (۱۳۹۴) ادامه یافته است. نتایج حاصل از بررسی خشک‌سالی آب زیرزمینی با شاخص GRI نشان‌دهنده‌ی افزایش خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر است که دلیل اصلی آن، افزایش میزان برداشت از سفره به دلیل توسعه‌ی کشاورزی می‌باشد. نتایج حاصل از شاخص CDI نشان می‌دهد به‌طور کلی دشت شهرکرد در فاصله زمانی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸ با ترسالی‌هایی مواجه بوده، ولی از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ دچار خشک‌سالی‌های پی‌درپی و شدیدی شده است. از آنجایی که شاخص مزبور خشک‌سالی‌های هواشناختی و آب زیرزمینی را به‌طور هم‌زمان در محدوده‌ی مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌دهد، می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار مدیران و برنامه ریزان منابع آب این دشت قرار دهد.

واژگان کلیدی: شاخص SPI^{mod} ، شاخص GRI، شاخص خشک‌سالی ترکیبی، تبخیر-تعرق پتانسیل، دشت شهرکرد.

* Email: Mirabbasi@agr.sku.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول:

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد با عنوان ارزیابی خشک‌سالی‌های حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی بهشت‌آباد با استفاده از شاخص خشک‌سالی ترکیبی می‌باشد.

۱- مقدمه

خشک‌سالی به‌عنوان یک پدیده‌ی طبیعی، نتیجه‌ی کمبود بارش نسبت به مقدار مورد انتظار یا نرمال منطقه است و نباید با خشکی مخصوص نواحی کم‌بارش که خاصیت دائمی یک اقلیم است، اشتباه شود. خشک‌سالی به لحاظ وقوع آن در طولانی‌مدت، یک پدیده‌ی ناخواسته است. در حال حاضر یکی از معضلات جهانی، کم‌آبی و خشک‌سالی است که با برنامه‌ریزی مناسب می‌توان از شدت خسارات آن کاست، اما خشک‌سالی در ایران، در حال تبدیل شدن به یک بحران شدید است. به دلیل افزایش خسارت‌های ناشی از خشک‌سالی، لزوم ارزیابی در بررسی‌های مربوط به خشک‌سالی و برنامه‌ریزی برای مقابله با آن در سطح بین‌المللی، منطقه‌ای و محلی روزبه‌روز بیش‌تر احساس می‌شود. کشور ایران به خاطر اقلیم و تغییرات اقلیمی گسترده در اکثر نقاط آن، یکی از مناطق خشک جهان است که در دهه‌های گذشته خشک‌سالی‌های متعددی را تجربه کرده که خسارات زیادی را به همراه داشته است. محققان به‌منظور بررسی و ارزیابی خشک‌سالی از شاخص‌های خشک‌سالی استفاده می‌کنند. تاکنون شاخص‌های بسیاری توسط محققین برای مطالعه و ارزیابی انواع مختلف خشک‌سالی‌ها (هواشناسی، هیدرولوژیکی، آب زیرزمینی، کشاورزی و اقتصادی و اجتماعی) ایجاد و استفاده شده است.

بارش یکی از مهم‌ترین متغیرهایی است که در تعریف خشک‌سالی به‌کار می‌رود و بیش از ۹۰ درصد تحقیقات مربوط به خشک‌سالی بر مبنای آن انجام گرفته است (مرید و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۳). شاخص بارش استاندارد شده^۱ (SPI)، توسط مک‌کی^۲ و همکاران (۱۹۹۳) معرفی گردید. این شاخص برای هر محل بر اساس آمار بارندگی بلندمدت برای یک مقیاس زمانی موردنظر محاسبه می‌گردد. مرید^۳ و همکاران (۲۰۰۶) هفت شاخص خشک‌سالی هواشناسی را برای پیش‌خشک‌سالی‌های ایران مورد مقایسه قرار دادند که نتایج نشان داد شاخص‌های SPI و EDI نتایج بهتری داشتند. هرچند شاخص SPI، امروزه به‌طور گسترده در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد؛ لذا با وجود این محدودیت‌ها کائو و گوینداراجو^۴ (۲۰۱۰) به فکر اصلاح این روش پرکاربرد افتادند و شاخص بارش استاندارد اصلاح‌شده^۵ (SPI^{mod}) را پیشنهاد نمودند. میرعباسی و همکاران (۱۳۹۲) با بررسی پیش بلندمدت خشک‌سالی‌های ارومیه با استفاده از شاخص‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI اصلاح‌شده، نتایج دقیق‌تری در بررسی خشک‌سالی نسبت به شاخص SPI متداول ارائه می‌دهد. همچنین محمودی و میرعباسی (۱۳۹۳) در استان کهگیلویه و بویراحمد با مقایسه دو شاخص SPI و SPI اصلاح‌شده به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI نمی‌تواند تغییرات فصلی بارش را به‌طور دقیق برآورد کند و SPI اصلاح‌شده جایگزین مناسبی برای آن است.

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین ذخایر آبی هر منطقه به‌شمار می‌روند که شناخت صحیح و بهره‌برداری اصولی از آن‌ها می‌تواند در توسعه‌ی پایدار فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی یک منطقه به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش به‌سزایی داشته باشد. عدم شناخت صحیح و بهره‌برداری بی‌رویه از این منابع، خسارات جبران‌ناپذیری مانند افت شدید و غیرقابل‌بازگشت سطح آب زیرزمینی، کاهش دبی چاه‌ها و قنوت، تغییرات الگوی جریان آب زیرزمینی را به دنبال خواهد داشت. بدین منظور برای آگاهی از وضعیت آب زیرزمینی و مدیریت بهینه‌ی آن، لازم است مطالعات دقیقی از نوسانات سطح آب زیرزمینی انجام پذیرد. اکبری و همکاران (۱۳۸۸) در مطالعه‌ی آبخوان دشت مشهد وقوع پدیده‌ی خشک‌سالی، برداشت بی‌رویه، ازدیاد جمعیت، افزایش سطح زیر کشت و تعداد زیاد چاه‌های برداشت را از عوامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی آبخوان بیان کردند. محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت کرمان مشاهده کردند که افت سطح آب زیرزمینی در اکثر نقاط به‌ویژه در خروجی شمالی و غربی اتفاق افتاده است.

1- Standardized Precipitation Index

2- Mckee

3- Morid

4- Kao and Govindaraju

5- Modified Standardized Precipitation Index

خان^۶ و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی رابطه‌ی بین خشک‌سالی و سطح آب زیرزمینی در یکی از دشت‌های استرالیا به این نتیجه رسیدند که بین شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و سطح آب زیرزمینی کم‌عمق منطقه ارتباطی قوی وجود دارد. مندسینو^۷ و همکاران (۲۰۰۸) شاخصی تحت عنوان شاخص منبع آب زیرزمینی^۸ (GRI) پیشنهاد کردند و با استفاده از شاخص‌های SPI و GRI به بررسی خشک‌سالی در منطقه‌ی کالابریا^۹ در کشور ایتالیا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که خصوصیات سنگ‌شناسی حوضه بر شاخص GRI مؤثر بوده و باعث تأخیر در تغییر میزان شاخص GRI نسبت به SPI می‌شود. از طرفی در این منطقه هرچه مقیاس زمانی SPI بزرگ‌تر باشد، همبستگی آن با شاخص GRI بیش‌تر است. ضمن آن‌که شاخص GRI نسبت به شاخص SPI در پیش‌بینی وضعیت منابع آب زیرزمینی مناسب‌تر است. عباسی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و رابطه‌ی آن با خشک‌سالی پرداختند. نتایج نشان داد بیش‌ترین مقادیر ضرایب همبستگی مثبت معنی‌دار بین SPI^{۲۴} و GRI^{۴۸} با تأخیر ۴۸ ماهه بوده و در ۸۹/۸ درصد از چاه‌ها SPI با GRI با تأخیر ۴۸ ماهه همبستگی مثبت معنی‌دار داشته است؛ بنابراین، خشک‌سالی آب زیرزمینی با تأخیر زمانی نسبت به خشک‌سالی هواشناسی اتفاق افتاده است و در طول دوره‌ی آماری مورد مطالعه سطح تراز آب چاه‌های پی‌زومتری کاهش یافته است. نسب‌پور و همکاران (۱۳۹۶) ارتباط شاخص SPI و شاخص GRI را در دشت کرمان-باغین بررسی کردند. نتایج نشان داد شدیدترین خشک‌سالی هواشناسی در دشت کرمان-باغین در سال ۱۳۷۹ با شدت (۱/۷-) و بهترین ترسالی در سال ۱۳۸۳ با شدت (۱/۵) رخ داده است. از نظر شاخص GRI، خشک‌ترین دوره‌ی سال ۱۳۸۸ و مرطوب‌ترین دوره‌ی سال ۱۳۸۴ است.

خشک‌سالی اساساً در ارتباط با کمبود بارش تعریف می‌گردد، اما امروزه همگان پذیرفته‌اند که خشک‌سالی یک پدیده‌ی چندمتغیره است و نوسانات هر یک از متغیرهای جوی و اقلیمی می‌تواند سبب افزایش یا کاهش شدت این پدیده گردد. در پدیده‌ی خشک‌سالی افزایش دما، تبخیر-تعرق و کاهش رواناب، سبب تشدید اثرات کمبود بارش می‌شود (Govindaraju, 2013: 735). در دهه‌های گذشته تلاش‌های مختلفی برای توصیف خشک‌سالی و پی بردن به الگوی بارش فصول خشک در زمان و مکان برای مواجه‌شدن با شرایط خشک‌سالی از طریق شاخص‌های خشک‌سالی انجام شده است. شاخص‌های منفرد یا تک‌متغیره برای مکان‌های خاص و هدف و کاربردی مشخص تا حد زیادی مفیدند، اما تصویر جامعی از ویژگی‌های خشک‌سالی به‌عنوان یک پدیده‌ی اقلیمی چندمتغیره ارائه نمی‌کنند. علاوه بر این، ارزیابی خشک‌سالی با شاخص تک‌متغیره ممکن است برای ارزیابی و تصمیم‌گیری قابل‌توجه و قابل‌اعتماد خشک‌سالی کافی نباشد. از این‌رو، تلاش‌هایی برای توسعه‌ی شاخص‌های چندمتغیره مبتنی بر ترکیب شاخص‌های مختلف خشک‌سالی یا معرف‌های مختلف خشک‌سالی به‌منظور ارائه‌ی تصویری جامع از شرایط و ویژگی‌های خشک‌سالی از سال‌های قبل شروع شده است و در حال حاضر نیز ادامه دارد. ویسم^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵) برای ارزیابی خشک‌سالی‌های چندمتغیره، یک شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) ایجاد کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با شاخص‌های تک‌متغیره مانند شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص خشکی رودخانه (SDI)، CDI توصیف جامع‌تری از تنوع مستتر در ویژگی‌های منفرد خشک‌سالی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، به نظر می‌رسد که CDI ایجادشده یک شاخص فیزیکی انعطاف‌پذیر و مؤثر است که وابسته به شرایط آب و هوایی منطقه‌ی مورد مطالعه است. دشت شهرکرد یکی از دشت‌های مهم استان چهارمحال و بختیاری به لحاظ کشاورزی و جمعیتی است. آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده‌ی آب بخش کشاورزی در این دشت است. در دهه‌های اخیر افزایش ناگهانی جمعیت و توسعه‌ی کشاورزی در دشت شهرکرد، سبب افزایش تقاضا و برداشت زیاد از منابع آب‌های زیرزمینی شده که عدم تغذیه‌ی متناسب با آن، باعث افت شدید سطح آب

6- Khan

7- Mendicino

8- Groundwater Resource Index

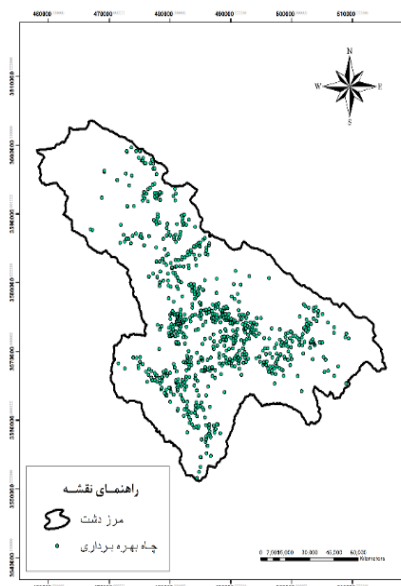
9- Calabria

10- Waseem

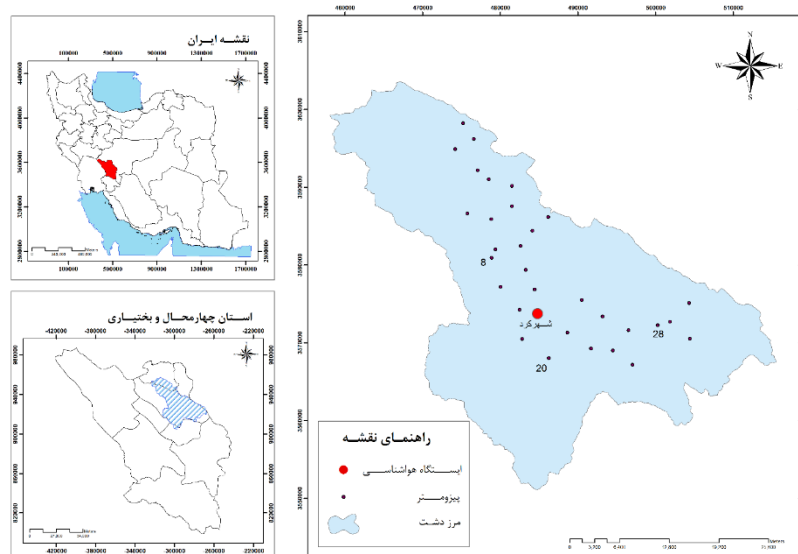
زیرزمینی در این دشت شده است. هدف از مطالعه‌ی حاضر، ایجاد شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) جدید از ترکیب دو شاخص خشک‌سالی GRI و SPI^{mod} بعلاوه تبخیر-تعرق پتانسیل (با روش هارگریوز-سامانی) برای بررسی خشک‌سالی‌های دشت شهرکرد در دوره‌ی زمانی ۹۴-۱۳۶۴ است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، دشت شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری با وسعت ۱۲۴۴ کیلومترمربع است که ۵۵۱ کیلومترمربع از آن را آبرفت و دشت و مابقی را کوهستان فرا گرفته است. دشت شهرکرد بین ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. ارتفاع منطقه‌ی مورد نظر از سطح دریا بین حداقل ۱۹۹۶ متر و حداکثر ۳۲۶۰ متر است. شکل ۱ (الف) موقعیت دشت شهرکرد را نشان می‌دهد. این دشت دارای ۴۱۷ حلقه چاه کشاورزی، ۵۹ حلقه چاه آب شرب، ۱۵۹ حلقه چاه آب صنعتی، ۷۹ رشته قنات، ۴۰ دهنه چشمه‌ی فعال است که سالانه حدود ۳۳۰ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی دشت را تخلیه کرده و به مصارف گوناگون می‌رساند. بیش از ۹۰ درصد از آب زیرزمینی این دشت در بخش کشاورزی در فصل زراعی استفاده می‌شود. بخشی از آب شرب شهرستان شهرکرد نیز از همین چاه‌ها تأمین می‌شود (حسین‌پور و همکاران، ۱۳۹۵: ۳). در این دشت تغییرات آب زیرزمینی توسط ۳۴ حلقه چاه مشاهده‌ای به صورت ماهانه پایش می‌شود که ۳۱ حلقه دارای آمار با طول مناسب هستند (شکل ۱ (الف)).



شکل ۱- الف: موقعیت دشت شهرکرد و چاه‌های پیژومتری در استان چهارمحال و بختیاری



شکل ۱-ب: موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در دشت شهرکرد

۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های ماهانه بارندگی برای محاسبه شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (SPI^{mod})، داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی ۳۱ پیژومتر در دشت شهرکرد برای محاسبه شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) و نیز بیشینه و کمینه دما در ایستگاه دشت شهرکرد برای محاسبه ETP در دوره آماری ۳۱ ساله (۱۳۹۴-۱۳۶۴) استفاده شده است. داده‌های مورداستفاده از شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری و سازمان هواشناسی کشور اخذ شد.

با افزایش جمعیت و توسعه فعالیت‌ها، تقاضای آب نیز افزایش پیدا کرده است که این رشد تقاضای آب تنها با افزایش برداشت از سفره‌های آب‌های زیرزمینی که ظرفیت و قدرت تجدیدپذیری محدودی داشته‌اند، تأمین شده است. این فشار واردشده، سبب حفر چاه‌هایی به صورت عمیق و نیمه عمیق در دشت‌های منطقه شده است. همان‌طور که در شکل ۱ (ب) مشخص است، در دشت شهرکرد ۸۸۳ چاه بهره‌برداری حفر شده که تجمع این چاه‌ها بیش‌تر در مرکز دشت است.

پس از جمع‌آوری، مرتب‌سازی و بازسازی داده‌های مفقود، آمار بارندگی ماهانه در طی یک دوره آماری مشترک ۳۱ ساله (۱۳۶۴-۹۴) برای محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI^{mod} در دشت شهرکرد مورداستفاده قرار گرفت. آمار سطح آب زیرزمینی ۳۱ چاه پیژومتری با طول آماری ۳۱ ساله (۱۳۶۴-۹۴) برای محاسبه شاخص خشک‌سالی GRI در دشت شهرکرد مورداستفاده قرار گرفت. چاه‌های پیژومتری منتخب با در نظر گرفتن موارد مختلفی از قبیل داشتن آمار طولانی‌مدت، نوسانات سطح ایستابی و نواقص آماری کم، برای مطالعه انتخاب شدند. آمار دمای بیشینه و متوسط روزانه برحسب $^{\circ}C$ در طی یک دوره آماری مشترک برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل در دشت شهرکرد مورداستفاده قرار گرفت. در نهایت، در این مطالعه یک شاخص ترکیبی جدید که ترکیبی از سه متغیر GRI، SPI و ETP است، برای بررسی خشک‌سالی در دشت شهرکرد ایجاد و مورداستفاده قرار گرفت. در ادامه، نحوه محاسبه شاخص‌های SPI اصلاح‌شده و GRI و همچنین ETP توضیح داده می‌شود.

۳-۱- شاخص SPI اصلاح شده (SPI^{mod})

این شاخص با هدف اصلاح معایب روش SPI، توسط کائو و گویندراجو (۲۰۱۰) ارائه گردید. در این روش، ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه استخراج و بعد سری‌های زمانی X_W^{month} در مقیاس W ماهه (۱۲، ۶، ۳، ۱) برای هر ماه سال به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$X_W^{month}(g) = X_W(12(g-1) + m) = X_W(t) \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

که در آن، g شاخص سال و m شاخص ماه و برابر ۱ (ژانویه)، ۲ (فوریه)، ... ۱۲ (دسامبر) و t شاخص زمان و برابر $t = 12(g-1) + m$ است.

به این ترتیب، نمونه‌ها در هر گروه X_W^{month} به طور سالانه جمع می‌شوند. واضح است تا زمانی که $w \ll 12$ باشد، نمونه‌ها هیچ‌گونه هم‌پوشانی نخواهند داشت. به عبارت دیگر، درجه خودهمبستگی بین داده‌ها به مقدار زیادی کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، نمونه‌های داخل گروه یکسان X_W^{month} تحت اثرات فصلی مشابه قرار دارند؛ بنابراین، تغییرات فصلی به یک شیوه‌ی مناسب در نظر گرفته می‌شود. با برازش دادن توزیع آماری بر هر گروه به طور مجزا (یعنی ایجاد کردن $F_{X_W^{month}}$)، SPI^{mod} مشابه با SPI متداول از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Mckee et al., 2013: 39).

$$SPI_W^{month} = \Phi^{-1}(u_W^{month}) = \Phi^{-1}(F_{X_W^{month}}(x_W^{month})) \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

احتمال تجمعی گاما به متغیر نرمال استاندارد تبدیل می‌شود (موغلی، ۱۳۹۴: ۳۴). در این روش، مقادیر متغیر نرمال استاندارد (Z) به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$0 < H(x) \ll 0.5 \quad \text{برای}$$

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3} \right) \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

$$0.5 < H(x) < 1 \quad \text{برای}$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3} \right) \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

که در آن،

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad 0 < H(x) \ll 0.5 \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad 0.5 < H(x) < 1 \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

در روابط فوق، $C_0, C_1, C_2, d_1, d_2, d_3$ به ترتیب برابر ۲/۵۲، ۰/۸۰، ۰/۰۱، ۱/۴۳، ۰/۱۲ و ۰/۰۱ می‌باشند. در نهایت، SPI_W^{month} ها به ترتیب زمانی مرتب می‌گردند.

وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص SPI در منطقه، طبق جدول ۱ در ۷ طبقه از شرایط ترسالی بسیار شدید تا خشک‌سالی بسیار شدید تقسیم‌بندی می‌شود.

۳-۲- شاخص GRI

مهندسین و همکاران (۲۰۰۸) شاخصی تحت عنوان شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) پیشنهاد کردند که شاخصی قابل‌اعتماد برای مدل‌سازی، پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه عنوان شد. وضعیت مختلف سنگ‌شناسی زمین، تأثیر مهمی بر واکنش آب‌های زیرزمینی حوضه در فصل تابستان نسبت به بارش‌های فصل زمستان دارد. به طور کلی مقادیر شاخص GRI تغییرات مکانی زیادی دارد و نسبت به خصوصیات سنگ‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه نیز حساس است. مهم‌ترین قابلیت این شاخص همبستگی بالای آن با متوسط رواناب در برخی از رودخانه‌های حوضه در پیش‌بینی خشک‌سالی‌های فصل تابستان است.

مقدار شاخص GRI با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad \text{رابطه ی ۷}$$

که در آن، $GRI_{y,m}$ مقدار شاخص در ماه m از سال $D_{y,m}$ سطح ایستابی در ماه m از سال y ، $\mu_{D,m}$ میانگین داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال و $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال می‌باشند. طبقه‌بندی وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص GRI همانند شاخص SPI طبق جدول ۱ است.

جدول ۱: طبقه‌بندی شرایط رطوبتی برحسب مقادیر GRI و SPI

توصیف وضعیت	طبقات شاخص GRI و SPI
ترسالی بسیار شدید	بیش‌تر از ۲
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نرمال	-۰/۹۹ تا ۰/۹۹
خشک‌سالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشک‌سالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشک‌سالی بسیار شدید	کم‌تر از -۲

منبع (Mendicino et al., 2008: 283; Mckee et al., 1993: 18)

۳-۳- تبخیر-تعرق پتانسیل (ETP)

زارعی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهش خود پس از بررسی روش‌های مختلف محاسبه‌ی تبخیر-تعرق پتانسیل (ETP)، روش هارگریوز-سامانی^{۱۱} را برای محاسبه‌ی تبخیر-تعرق پتانسیل در دشت شهرکرد پیشنهاد دادند. لذا در این پژوهش نیز از روش هارگریوز-سامانی (۱۹۸۲) برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل در ایستگاه شهرکرد استفاده شد. فرمول محاسبه‌ی ETP با روش هارگریوز-سامانی به صورت زیر است:

$$ETP = 0.0023 * Ra * (T_{mean} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad \text{رابطه ی ۸}$$

که در آن، مقادیر T_{max} و T_{min} و T_{mean} به ترتیب دمای بیشینه، کمینه و متوسط روزانه برحسب $^{\circ}C$ هستند. Ra حداکثر ممکن تابش خورشید به سطح زمین است که برحسب $mm.day^{-1}$ می‌باشند.

قمرنیا و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند برای منطقه‌هایی که به اندازه‌ی کافی بزرگ هستند و با استفاده از داده‌های مطمئن و تعداد کافی ایستگاه‌ها ضریب اولیه $۰/۰۰۲۳$ استفاده‌شده در معادله‌ی هارگریوز-سامانی نیازی به تعدیل نداشته و می‌تواند با اطمینان بالا به کار برده شود.

۳-۴- شاخص خشک‌سالی ترکیبی CDI

روش محاسبه‌ی شاخص ترکیبی^{۱۲} (CDI) ایجادشده در این مطالعه، برگرفته از روش پیشنهادی ویسم و همکاران (۲۰۱۵) است. آن‌ها یک شاخص خشک‌سالی ترکیبی که مرکب از بارش، دبی، شاخص NDVI و دمای سطح زمین (LST) بود، ایجاد کردند.

در این شیوه دو نوع متغیر در نظر گرفته می‌شود: دسته اول متغیرهایی که به‌طور مستقیم با وقوع خشک‌سالی متناسب هستند که با Y (مقدار بزرگ‌تر آن نشانگر تشدید شرایط خشک و بالعکس) نشان داده می‌شوند. دسته‌ی دوم، متغیرهایی که به‌طور معکوس با وقوع خشک‌سالی متناسب هستند و با X (مقدار بزرگ‌تر آن نشانگر شرایط مرطوب و بالعکس) نشان داده می‌شوند.

11- Hargreaves-Samani

12- Composite Drought Index

در این مطالعه، متغیرهای موجود شامل شاخص GRI و شاخص SPI (متغیر X) و تبخیر-تغرق پتانسیل (متغیر Y) در نظر گرفته شد. با این وجود، تعداد متغیرهای X و Y را می‌توان بسته به در دسترس بودن داده‌ها افزایش داد. در ادامه، مراحل محاسبه شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) به صورت گام‌به‌گام ارائه شده است:

۱. مجموعه داده‌های تاریخی [سری زمانی از میانگین ماهانه مربوط به سال (t_i)] از متغیرهای X و Y در یک ماتریس مرتب می‌شود (رابطه‌ی (۹)) که ستون n و ردیف m به شرح زیر است:

$$DB_k = \begin{matrix} t_1 \\ \vdots \\ t_m \end{matrix} \left[\begin{matrix} (X_{11} & \cdots & X_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (X_{m1} & \cdots & X_{mn}) \end{matrix} \right] \left[\begin{matrix} (Y_{11} & \cdots & Y_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (Y_{m1} & \cdots & Y_{mn}) \end{matrix} \right] \quad \text{رابطه‌ی ۹}$$

برای ارزیابی خشک‌سالی، DB_k یک ماتریس واحد $(n \times m)$ حاوی متغیرهای متوسط ماهانه X و Y در مدت زمان خشک‌سالی K (هفتگی، ماهانه و یا سالانه) انتخاب می‌شود.

در این مطالعه (K ماهانه) t_i سال متناظر و $m = 1, 2, \dots, m$ است. X_{ij} مقدار متوسط i ام از متغیر j ام X (در اینجا SPI و GRI) است، Y_{ij} مقدار متوسط i ام از متغیر j ام Y (در این مطالعه ETP) و $n = 1, 2, \dots, n$ است. در ماتریس DB_k ، گروه به منظور تمایز قائل شدن بین متغیرهای X و Y بکار رفته است.

۲. DB_k شامل متغیرهای با ابعاد مختلف است، لذا با استفاده از $N_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m \text{abs}(X_{ij})}$ و $N_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m \text{abs}(Y_{ij})}$ به متغیرهای بدون بعد تبدیل می‌شوند.

متغیرهای بدون بعد در یک ماتریس جدید (NDB_k) به صورت زیر ذخیره می‌شوند:

$$NDB_k = \begin{matrix} t_1 \\ \vdots \\ t_m \end{matrix} \left(\begin{matrix} N_{11} & \cdots & N_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{m1} & \cdots & N_{mn} \end{matrix} \right) \quad \text{رابطه‌ی ۱۰}$$

که در آن، N_{ij} مقدار استانداردشده‌ی متناظر است.

۳. در مرحله‌ی بعد، وزن متناظر متغیرهای j بر اساس آنتروپی متغیر معین می‌شوند. آنتروپی، در زمینه‌ی تئوری اطلاعات، توسط شانون (۱۹۴۸) برای اندازه‌گیری درجه اختلال اطلاعات معرفی شد.

آنتروپی معیاری مؤثرتر از واریانس برای توصیف اطلاعات و خصوصیات داده‌ها است (Rajsekhar et al, 2014: 169). وزن‌های آنتروپی به منظور ارائه‌ی یک رابطه‌ی متعادل شده بین متغیرها و ارائه‌ی وزن‌های نسبی ناریب بر اساس تغییرپذیری منفرد داده‌ها معرفی شدند. وزن آنتروپی بیشتر، نشان‌دهنده‌ی تغییر بیشتر در متغیر موردبررسی است.

$$Na_{ij} = \frac{\text{abs}(X_{ij})}{\sum_{i=1}^m \text{abs}(X_{ij})} \quad \text{رابطه‌ی ۱۱}$$

$$Na_{ij} = \frac{\text{abs}(Y_{ij})}{\sum_{i=1}^m \text{abs}(Y_{ij})} \quad \text{رابطه‌ی ۱۲}$$

$$EN_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m N_{ij} \ln(Na_{ij}) \quad \text{رابطه‌ی ۱۳}$$

$$DS_j = 1 - EN_j \quad \text{رابطه‌ی ۱۴}$$

$$EW_j = \frac{DS_j}{\sum_{j=1}^n DS_j} \quad \text{رابطه‌ی ۱۵}$$

که در آن، EW_i وزن اختصاص داده‌شده به متغیرهاست؛ به طوری که $\sum_{j=1}^n EW_i = 1$ می‌باشد. DS_j یک معیاری از آنتروپی بین متغیرهای j ام است.

۴. در مرحله‌ی بعد مرطوب‌ترین شرایط ممکن از منطقه‌ی موردنظر (MWC) (رابطه‌ی ۱۶) با انتخاب مجموعه‌ای از مقادیر حداکثر داده‌های تاریخی متغیرهای j ام متعلق به X و حداقل مقادیر از متغیر j ام متعلق به Y تعریف شد. برای تعریف خشک‌ترین شرایط ممکن (MDC) از مقادیر معکوس متناظر استفاده شد (رابطه‌ی ۱۷):

$$MWC = a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+ \quad \text{رابطه‌ی ۱۶}$$

$$MDC = a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^- \quad \text{رابطه‌ی ۱۷}$$

که در آن،

$$a_j^+ = \{\max N_{ij}, j \in X; \min N_{ij}, j \in Y\} \quad \text{رابطه‌ی ۱۸}$$

$$a_j^- = \{\min N_{ij}, j \in X; \max N_{ij}, j \in Y\} \quad \text{رابطه‌ی ۱۹}$$

۵. تاکنون تعداد زیادی معیار تشابه ایجاد شده و در زمینه‌های مختلف به کار رفته است (چا، ۲۰۰۷: ۳۰۱). در مطالعه‌ی حاضر، تفاوت‌ها در شرایط کنونی (PC) (ردیف داده N_{ij} داده‌های مربوط به سال t_i ، به‌عنوان مثال برای t_1 ، $PC = (N_{11}, N_{12}, \dots, N_{1N})$ و به‌طور مشابه برای بقیه‌ی t_i ها) در مقایسه با MWC و MDC با استفاده از فاصله اقلیدسی وزن‌دار برآورد شد (به ترتیب با روابط ۲۰ و ۲۱):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n Ew_j (S_{ij}^+)^2} \quad \text{رابطه‌ی ۲۰}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n Ew_j (S_{ij}^-)^2} \quad \text{رابطه‌ی ۲۱}$$

که در آن، S_i^+ فاصله اقلیدسی وزن‌دار بین MWC و PC و S_i^- فاصله اقلیدسی وزن‌دار بین MDC و PC است:

$$S_{ij}^- = N_{ij} - a_j^+ \quad \text{رابطه‌ی ۲۲}$$

$$S_{ij}^+ = N_{ij} - a_j^- \quad \text{رابطه‌ی ۲۳}$$

۶. درنهایت، CDI ایجاد شده (رابطه‌ی ۲۴) بر اساس شباهت هر PC به NWC برآورد می‌شود. از آنجایی که مقدار CDI (که بین صفر و یک تغییر می‌کند) بر اساس شباهت نسبی به NWC تعریف شده است؛ بنابراین بالاترین مقدار آن (نزدیک به ۱/۰) مرطوب‌ترین شرایط را نشان می‌دهد و برعکس. علاوه بر این، شدت خشک‌سالی بر اساس مقدار محاسبه‌شده‌ی CDI_i (که در محدوده‌ی ۰/۰ تا ۱/۰ تغییر می‌کند) بر طبق معیارهای تعریف‌شده توسط ویسم و همکاران (۲۰۱۵) تعریف و طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۲).

$$CDI_i = \frac{S_j^+}{S_j^- + S_j^+} \quad \text{رابطه‌ی ۲۴}$$

در مطالعه‌ی حاضر، برای محاسبه‌ی شاخص‌های مورد استفاده، برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی Matlab نوشته شد و مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲: طبقه‌بندی شرایط خشک‌سالی بر اساس شاخص CDI

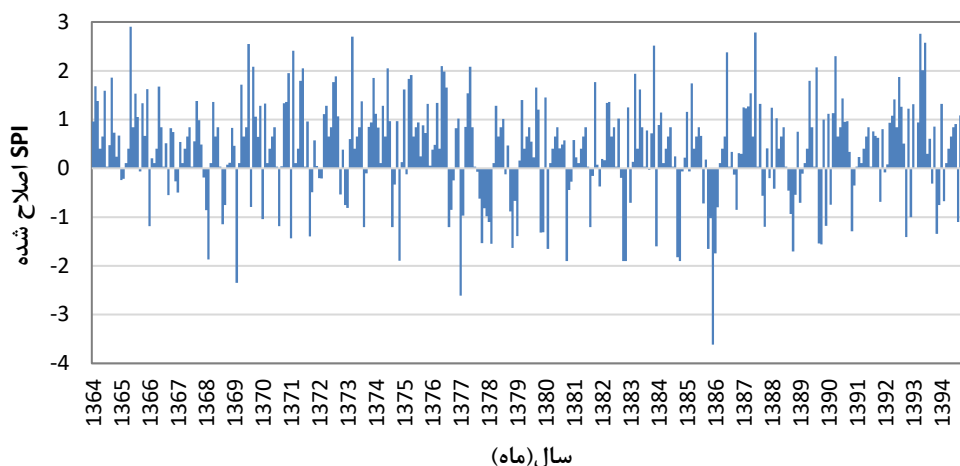
شدت خشک‌سالی	CDI
خشک‌سالی بسیار شدید	< ۰/۱
خشک‌سالی شدید	۰/۰ - ۲/۱
خشک‌سالی متوسط	۰/۰ - ۳/۲
خشک‌سالی خفیف	۰/۰ - ۴/۳
نزدیک به نرمال	۰/۰ - ۵/۴
نرمال	> ۰/۵

منبع (Waseem et al., 2015: 33)

۴- بحث و نتایج

نتایج حاصل از محاسبات و بررسی خشک‌سالی دشت شهرکرد، با محاسبه‌ی شاخص SPI^{mod} در ایستگاه شهرکرد و شاخص GRI در پیژومترهای شماره‌ی ۸، ۲۰ و ۲۸ (برای نمونه) و نمودار میانگین ماهانه‌ی ETP ایستگاه شهرکرد در پایه زمانی ۳۱ ساله (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴) به ترتیب در شکل‌های ۲ تا ۵ آورده شده است. همچنین نتایج بررسی وضعیت خشک‌سالی با استفاده از شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) در دوره‌ی زمانی ۳۱ ساله به‌عنوان نمونه در ایستگاه شهرکرد و پیژومتر شماره‌ی ۸، ۲۰ و ۲۸ در شکل‌های ۷ تا ۹ آورده شده است.

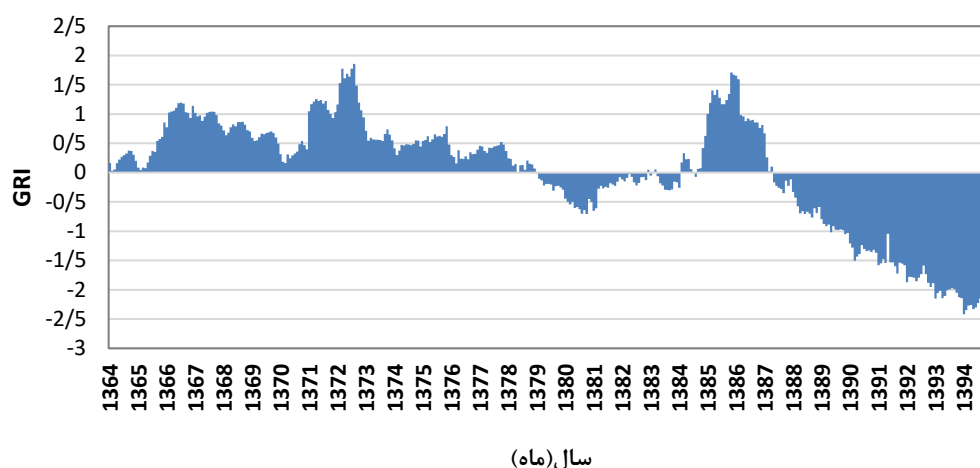
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بر اساس شاخص SPI اصلاح‌شده تعداد ماه‌های تر در ایستگاه شهرکرد در طول دوره‌ی موردبررسی بیش‌تر از تعداد ماه‌های خشک بوده است؛ بنابراین از نظر خشک‌سالی هواشناسی، در این دوره‌ی ۳۱ ساله تعداد دوره‌های تر بیش از تعداد دوره‌های خشک بوده است، هرچند خشک‌سالی‌های شدیدی هم ثبت شده است.



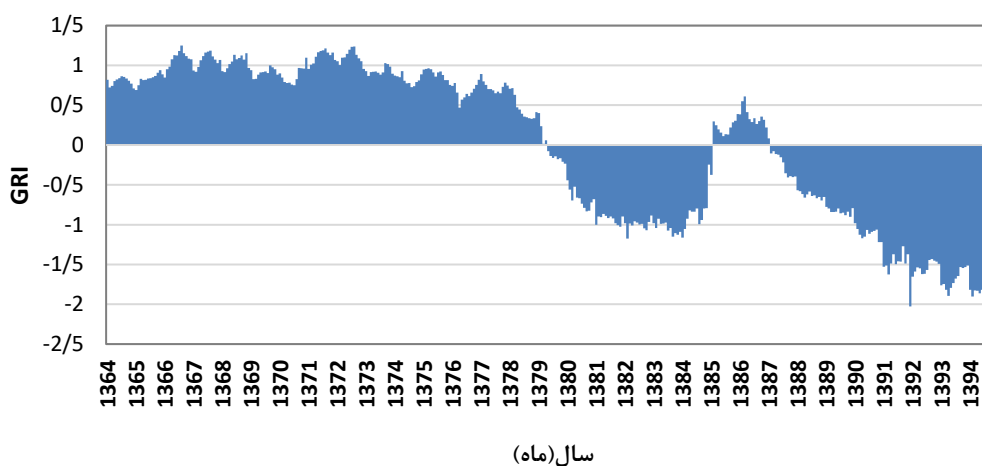
شکل ۲: سری زمانی شاخص SPI^{mod} ایستگاه شهرکرد در دوره‌ی زمانی ۳۱ ساله (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)

از سوی دیگر، همان‌گونه که در شکل‌های ۳ تا ۵ سری زمانی شاخص GRI یک‌ماهه در پیزومترهای ۸، ۲۰ و ۲۸ نشان می‌دهند، در ابتدای دوره‌ی آماری (۱۳۶۴) تا اواسط ۱۳۷۸، بلندترین دوره‌ی ترسالی به وقوع پیوسته که در پیزومترهای ۸، ۲۰ و ۲۸ بیش‌ترین مقدار آن‌ها به ترتیب برابر ۱/۸۵ در آبان ۱۳۷۲، ۱/۲۴ در آبان ۱۳۶۶ و ۱/۵۳ در مرداد ۱۳۷۲ می‌باشند که نشان می‌دهند تا سال ۱۳۷۸ وضعیت آبخوان شهرکرد مناسب بوده است. بیش‌ترین دوره‌ی خشک‌سالی نیز از آذرماه ۱۳۸۷ شروع و تا انتهای دوره‌ی آماری (۱۳۹۴) ادامه یافته است. شدیدترین مقدار شاخص GRI یک‌ماهه در پیزومترهای ۸، ۲۰ و ۲۸ به ترتیب برابر ۲/۴۱- در فروردین ۱۳۹۴، ۲/۰۲۶- در اسفند ۱۳۹۱ و ۲/۴۸- در فروردین ۱۳۹۴ به دست آمده است. نتایج حاصل از بررسی خشک‌سالی آب زیرزمینی با شاخص GRI نشان‌دهنده‌ی افزایش خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر است؛ بنابراین مقایسه‌ی شکل‌های ۲ با ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهد که دلیل اصلی وقوع خشک‌سالی آب زیرزمینی در دشت شهرکرد، کاهش نزولات جوی نبوده است، بلکه افزایش میزان برداشت از سفره به دلیل توسعه‌ی کشاورزی، علت اصلی وخامت وضعیت آبخوان است. حسین‌پور و همکاران (۱۳۹۵) به تحلیل و بررسی وضعیت خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های SPI اصلاح‌شده و GRI در آبخوان دشت شهرکرد پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که خشک‌سالی‌های اخیر در دشت با یک تأخیر زمانی بر منابع آب زیرزمینی دشت شهرکرد تأثیرگذار بوده است. همچنین هرچه مقیاس زمانی شاخص‌ها افزایش می‌یابد، از فراوانی وقوع خشک‌سالی‌ها کاسته و به تداوم وقوع آن‌ها می‌افزاید.

در شکل ۶ مقادیر شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) برای چهار سال ۱۳۶۴، ۱۳۷۴، ۱۳۸۴ و ۱۳۹۳ نشان داده شده است. آن‌گونه که در این شکل نیز مشخص است، میزان شاخص در سال ۱۳۹۳ در تمامی ماه‌ها کم‌تر از مقادیر متناظر در ۳۱ سال گذشته و مقادیر شاخص در همه‌ی ماه‌ها کم‌تر از ۰/۵ است که نشان‌دهنده‌ی خشک‌سالی در سال‌های آخر دوره‌ی آمار است. در این میان خشک‌سالی در ماه‌های خرداد تا مهر و نیز ماه بهمن ۱۳۹۳ از نوع شدید و بسیار شدید می‌باشد.

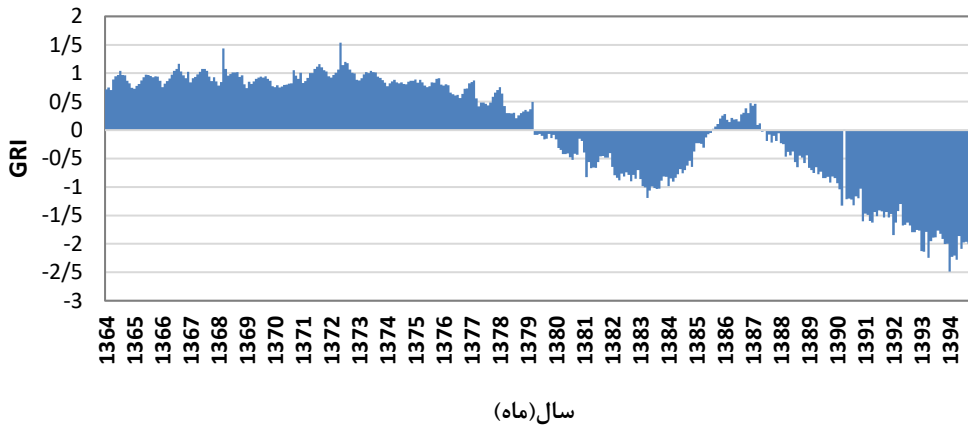


شکل ۳: سری زمانی شاخص GRI پیژومتر شماره ۸ در دوره‌ی زمانی ۳۱ ساله (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)

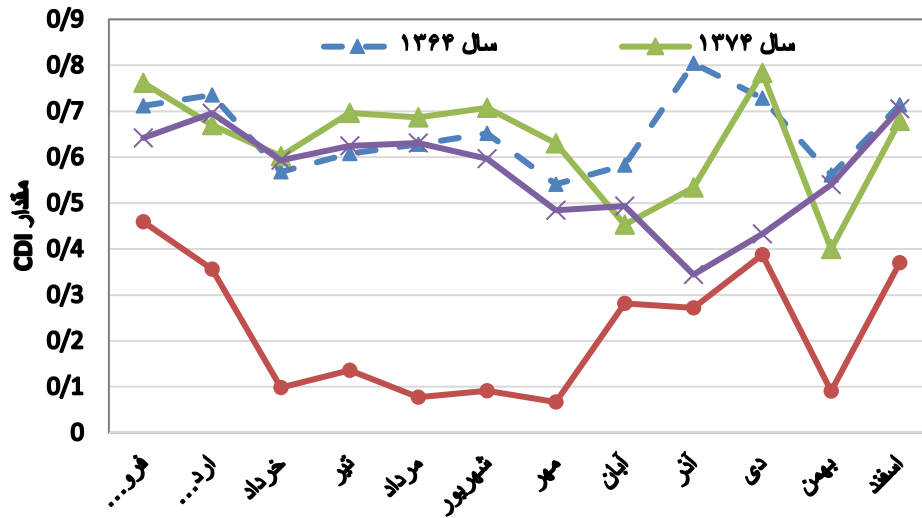


شکل ۴: سری زمانی شاخص GRI پیژومتر شماره ۲۰ در دوره‌ی زمانی ۳۱ ساله (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)

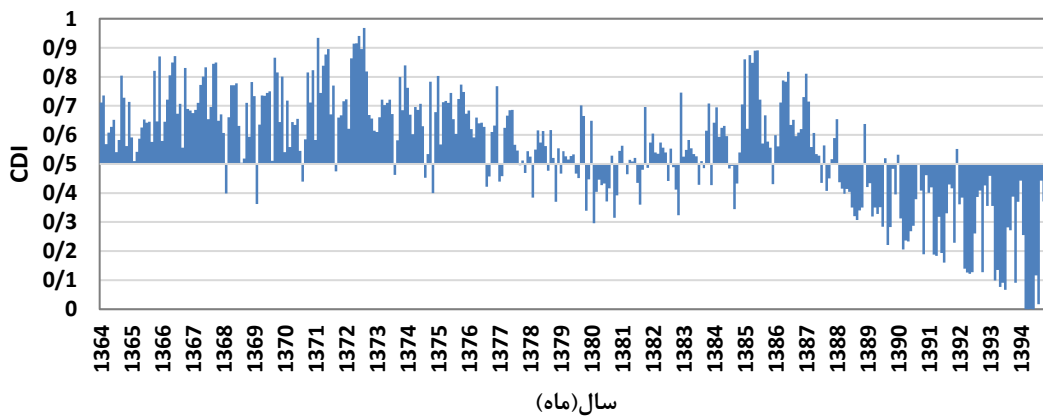
در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ سری زمانی شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) در پیژومترهای شماره ۸، ۲۰ و ۲۸ در دوره‌ی زمانی ۳۱ ساله نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، در ابتدای دوره‌ی آماری (۱۳۶۴) تا اواخر ۱۳۷۹، طولانی‌ترین دوره‌ی ترسالی به وقوع پیوسته که بیش‌ترین مقدار آن در پیژومترهای ۸، ۲۰ و ۲۸ به ترتیب برابر ۰/۹۶ در آبان ۱۳۷۲، ۱ در اسفند ۱۳۷۰ و ۰/۹۹۷ در اسفند ۱۳۷۰ می‌باشند. البته در این بین، ماه‌های معدودی هم با خشکی روبه‌رو شده‌اند. پس از سال ۱۳۷۹ تا سال ۱۳۸۵ ماه‌های خشک و تر متوالی ثبت شده است. از ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۷ یک دوره‌ی تر روی داده است و پس از آن، طولانی‌ترین دوره‌ی خشک‌سالی شروع شده که از اواسط سال ۱۳۸۷ تا انتهای دوره‌ی موردبررسی (۱۳۹۴) ادامه یافته است. شدیدترین مقدار شاخص CDI در این دوره در هر سه پیژومتر، نمونه برابر صفر در خردادماه ۱۳۹۴ ثبت شده است. نتایج حاصل از بررسی خشک‌سالی با شاخص CDI نشان‌دهنده‌ی وقوع خشک‌سالی‌های شدید در سال‌های اخیر به‌خصوص در سال ۱۳۹۴ (پایان دوره‌ی آماری) است که دلیل آن افزایش تبخیر-تعرق در سال‌های اخیر به دلیل افزایش متوسط دمای هوا و نیز افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی است؛ لذا می‌توان دلیل اصلی خشک‌سالی‌های رخ داده در منطقه را به عدم مدیریت صحیح در سال‌های گذشته نسبت داد.



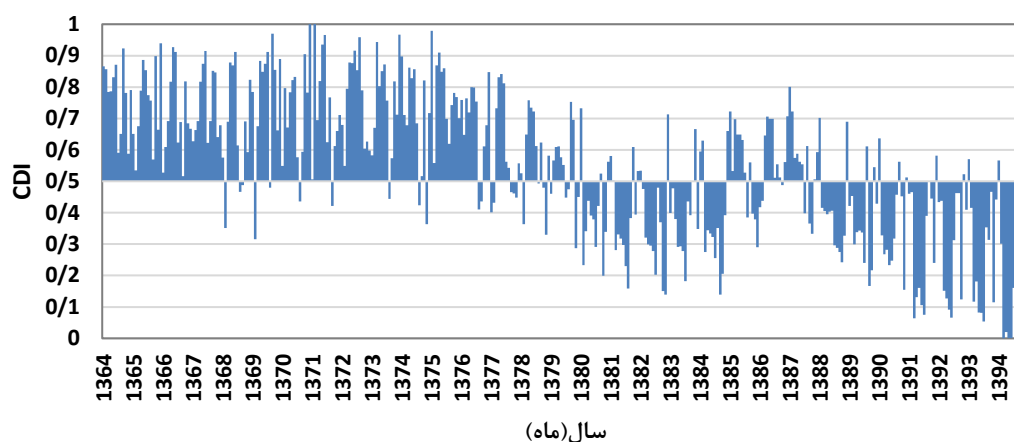
شکل ۵: سری زمانی شاخص GRI پیژومتر شماره‌ی ۲۸ در دوره‌ی زمانی ۳۱ ساله (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)



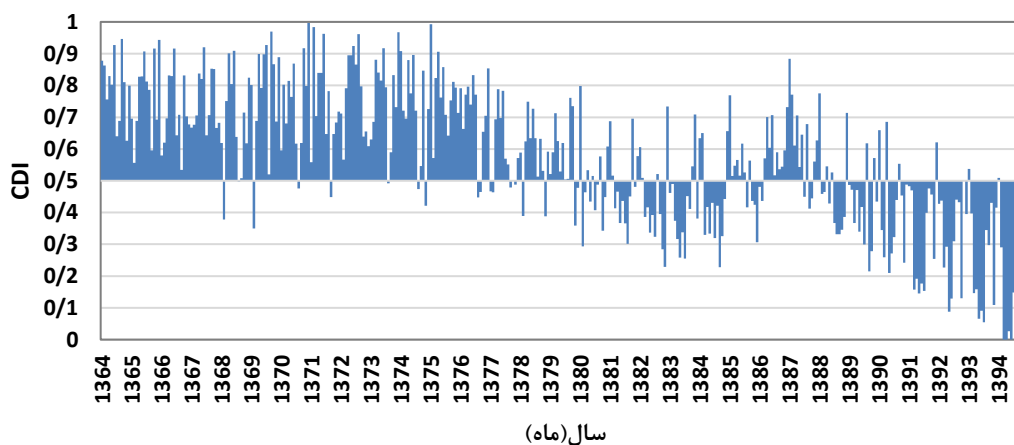
شکل ۶: مقادیر شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) در سال‌های ۱۳۶۴، ۱۳۷۴، ۱۳۸۴ و ۱۳۹۳



شکل ۷: سری زمانی شاخص CDI در پیژومتر شماره‌ی ۸ در دشت شهرکرد (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)



شکل ۸: سری زمانی شاخص CDI در پیژومتر شماره ۲۰ در دشت شهرکرد (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)



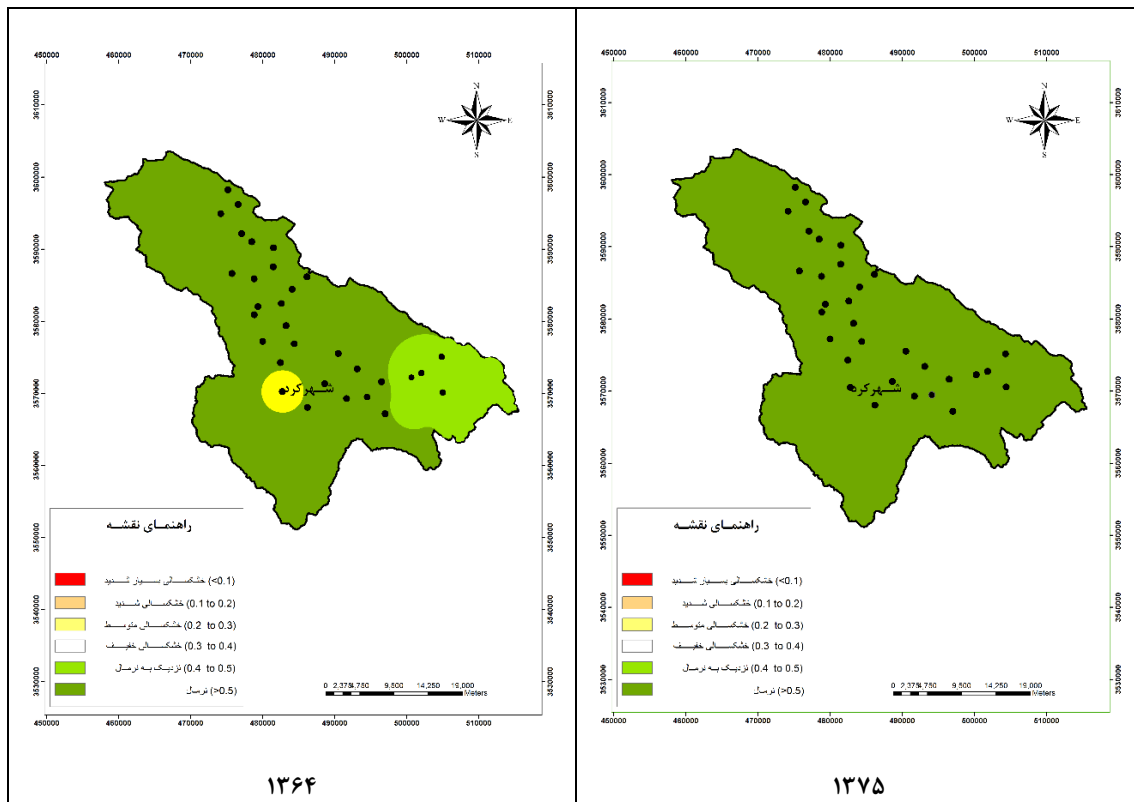
شکل ۹: سری زمانی شاخص CDI در پیژومتر شماره ۲۸ در دشت شهرکرد (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)

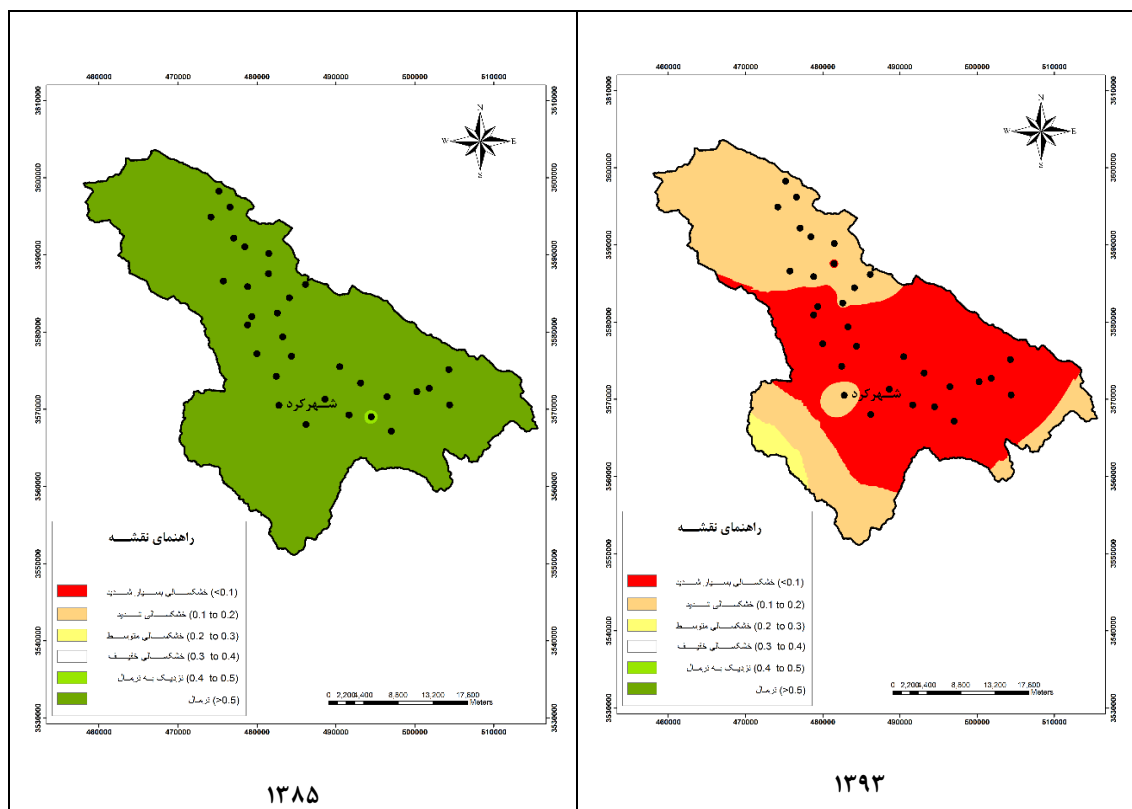
نقشه‌ی پهنه‌بندی شاخص CDI در دشت شهرکرد برای سال‌های ۱۳۶۴، ۱۳۷۵، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۳ در شکل ۱۰ آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در سال‌های ۱۳۶۴، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵ به‌طور میانگین تمام دشت وضعیت نرمال را نشان می‌دهد؛ اما در سال ۱۳۹۳ در کل منطقه‌ی خشک‌سالی رخ داده است که در قسمت‌های مرکزی دشت بسیار شدیدتر از سایر مناطق است. ممکن است علت خشک‌سالی بسیار شدید در قسمت مرکزی دشت به علت برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی روی داده باشد، همان‌طور که در شکل ۱ (ب) نیز نمایان است، تعداد چاه‌های بهره‌برداری در این قسمت بیش از سایر مناطق دشت است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک شاخص ترکیبی خشک‌سالی جدید از ترکیب شاخص SPI اصلاحی، شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی (GRI) و تبخیر-تعرق پتانسیل توسعه داده شد. این شاخص به‌طور هم‌زمان توصیفی از شرایط خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی منطقه ارائه می‌دهد. بررسی خشک‌سالی‌های دشت شهرکرد با شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) توسعه‌داده‌شده نشان داد که دشت شهرکرد از سال ۱۳۸۷ به این‌سو با خشک‌سالی شدیدی به‌خصوص در اواخر دوره‌ی موردبررسی (۱۳۹۴) مواجه بوده است. همچنین نقشه پهنه‌بندی دشت در سال ۱۳۹۳ نشان‌دهنده‌ی شرایط وقوع خشک‌سالی بسیار شدید در کل دشت است که به دلیل تراکم زیاد چاه‌های بهره‌برداری در مرکز دشت، این ناحیه وضعیت

بدتری نسبت به سایر مناطق دارد. همچنین زارع بیدکی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی مهم‌ترین عامل افت آب زیرزمینی در دشت شهرکرد را برداشت مازاد بر ظرفیت اعلام کردند که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، روند نزولی میزان شاخص CDI در سال‌های اخیر حاکی از اثرپذیری عواملی چون کاهش بارندگی، افزایش دمای هوا و تبخیر-تعرق، برداشت بیش‌ازحد مجاز برای مصارف شرب و کشاورزی به دلیل افزایش جمعیت است که در این بین، به نظر می‌رسد سهم افزایش برداشت از سفره بیش از بقیه‌ی عوامل تأثیرگذار بوده است. همچنین نتایج بررسی خشک‌سالی در ایستگاه شهرکرد با نتایج حسین‌پور و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی دارد. در نهایت، بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اگر راهکارهای مدیریتی برای کاهش میزان برداشت از آبخوان اندیشیده نشود، در سال‌های آتی خشک‌سالی‌های شدیدتری را به دنبال خواهد داشت که باعث خسارات جبران‌ناپذیری خواهد شد.





شکل ۱۰: پهنه‌بندی خشک‌سالی با استفاده از شاخص CDI در سال‌های ۱۳۶۴، ۱۳۷۵، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۳

۶- منابع

۱. اکبری، مرتضی، جرگه، محمدرضا، مدنی سادات، حمید (۱۳۸۸)، بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه‌ی موردی: آبخوان دشت مشهد، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، دوره ۱۶، شماره ۴، صص ۷۸-۶۳.
۲. حسین‌پور، زینب، رادفر، مهدی، میرعباسی نجف‌آبادی، رسول (۱۳۹۵)، تحلیل وضعیت خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های SPI اصلاح‌شده و GRI در محدوده مطالعاتی آبخوان دشت شهرکرد، هشتمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران، تهران، ایران.
۳. خسروی، حسین، حیدری، اسماعیل، زهتابیان، غلامرضا، بذرافشان، جواد (۱۳۹۴)، بررسی روند زمانی و مکانی شاخص منابع آب زیرزمینی (مطالعه‌ی موردی: دشت یزد-اردکان)، فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۲۲، صص ۷۲۰-۷۱۱.
۴. زارعی، محمدمین، طباطبائی، سیدحسن، بابازاده، حسین، صدقی، حسین (۱۳۹۴)، تعیین مناسب‌ترین مدل تایش در معادله‌ی هارگریوز-سامانی در دشت شهرکرد با استفاده از داده‌های لایسیمتر، مجله‌ی پژوهش آب ایران، دوره ۹، شماره ۳، صص ۴۷-۵۶.
۵. عباسی، فریده، آذرخشی، مریم، چپی، کامران، بشیری، مهدی (۱۳۹۵)، تغییرات زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و رابطه‌ی آن با خشک‌سالی، نشریه‌ی دانش آب‌و‌خاک، دوره ۲۵، شماره ۲، صص ۱۵۵-۱۴۳.
۶. محمدی، صدیقه، سلاجقه، علی، مهدوی، محمد، باقری، رضا (۱۳۹۱)، بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از روش زمین‌آماری مناسب (طی یک دوره‌ی آماری ۱۰ ساله، ۱۳۷۵-۱۳۸۵)، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۱۹، شماره ۱، صص ۷۱-۶۰.

۷. محمودی، عزیز الله و میرعباسی نجف‌آبادی رسول (۱۳۹۳)، مقایسه‌ی عملکرد دو شاخص SPI و SPI اصلاح‌شده در تشخیص رویدادهای خشک‌سالی (مطالعه‌ی موردی: شهرستان دهدشت، استان کهگیلویه و بویر احمد)، دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست). ۱۸ تا ۱۹ شهریورماه، دانشگاه شهرکرد.
۸. مرید، سعید، مقدسی، مهنوش. پایمزد، شهلا. قائمی، هوشنگ (۱۳۸۴)، طرح تحقیقاتی: طراحی سیستم پایش خشک‌سالی استان تهران، وزارت نیرو، ۱۹۴ ص.
۹. موغلی، مرضیه (۱۳۹۴)، ارزیابی شاخص‌های درون‌یابی در پهنه‌بندی خشک‌سالی‌ها با استفاده از GIS (مطالعه‌ی موردی: لارستان)، فصلنامه‌ی جغرافیای طبیعی، دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۲۸، صص ۲۹-۴۲.
۱۰. میرعباسی نجف‌آبادی، رسول، فاخری فرد، احمد، دین‌پژوه یعقوب، اسلامیان، سید سعید (۱۳۹۲). پایش بلندمدت خشک‌سالی‌های ارومیه با استفاده از شاخص کمبود توأم، نشریه دانش آب‌و‌خاک، جلد ۲۳، صص ۸۷ تا ۱۰۳.
۱۱. نسب‌پور، سحر، حیدری، اسماعیل، خسروی، حسن (۱۳۹۶)، بررسی ارتباط شاخص SPI و شاخص GRI (مطالعه‌ی موردی: دشت کرمان-باغین)، چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، ۲ و ۳ خردادماه، دانشگاه تهران، ایران.
12. Cha, S. H. (2007). Comprehensive survey on distance/similarity measures between probability density functions. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 1(4), 300-307.
13. Ghamarnia, H., Rezvani, V., Khodaei, E., Mirzaei, H. (2012). Time and place calibration of the Hargreaves equation for estimating monthly reference evapotranspiration under different climatic conditions. *Journal of Agricultural Science*. 4(3), 111-122.
14. Govindaraju, R. S. (2013). Special issue on data-driven approaches to droughts. *Journal of Hydrologic Engineering*. 18(7), 735-736.
15. Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 108(3), 223-230.
16. Kao, S. C., Govindaraju, R. S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*. 380(1), 121-134.
17. Khan, S., Gabriel, H. F., Rana, T. (2008). Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on water tables in irrigation areas. *Irrigation Drainage System*. 22(2), 159-177.
18. Mckee, T. B., Doseken, N. J., Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration Times Scales, Eightieth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California.
19. Mendicino, G., Senatore, A. (2008). A Ground Water Resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*. 357(3), 282-302.
20. Mirabbasi, R., Anagnostou, E. N., Fakhri-Fard, A., Dinpashoh, Y., Dinpashoh, S. (2013). Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology*. 492, 35-48
21. Morid, S., Smakhtin, V., Moghaddasi, M. (2006). Comprison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*. 26(7), 971-985.
22. Rajsekhar, D., Singh, V. P., Mishra, A. K. (2014). Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. *Journal of Hydrology*. 526, 164-182.
23. Shannon, C. E. (1984). A mathematical theory of communication. Reprinted with corrections from the Bell System Technical Journal. 27(3), 379-423.
24. Waseem, M., Ajmal, M., Kim, T. W. (2015). Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment. *Journal of Hydrology*. 527, 30-37.
25. Yang, B., Ma, S., Li, J., Liao, Y., Zhao, B. (2012). Claudia K. Agriculture drought monitoring in Dongting lake basin by MODIS data. In: Proceedings of 1st International Conference on Agro-geoinformatics, 2-4 August, Shanghai, China.