

ارزیابی خشکسالی‌های هیدروژئولوژیکی و هواشناسی دشت شهرکرد و تعیین مناطق بحرانی آبخوان

زینب حسین‌پور^{۱*}، مهدی رادفر^۲ و رسول میرعباسی نجف‌آبادی^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد و ^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴

چکیده

یکی از منابعی که به شدت تحت تأثیر خشکسالی واقع شده و کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، آب‌های زیرزمینی است. با توجه به خشکسالی‌های اخیر به خصوص در مناطق مرکزی کشور، مطالعه تأثیر این خشکسالی‌ها بر منابع آب بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی این پژوهش، مشخص کردن خشکسالی‌های هواشناسی و هیدروژئولوژیکی، بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی و تعیین نواحی بحرانی آبخوان دشت شهرکرد است. برای این منظور، از شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (SPI^{mod}) برای بررسی خشکسالی هواشناسی و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) برای بررسی خشکسالی آب زیرزمینی و آزمون همبستگی متقاطع برای بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی هیدروژئولوژیکی استفاده شد. برای انجام این پژوهش، از آمار بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک شهرکرد و اطلاعات مربوط به سطح ایستابی ۳۵ پیزومتر موجود در سطح دشت به صورت ماهانه در بازه زمانی ۹۴-۱۳۶۳ استفاده شد. بر اساس شاخص GRI، آبخوان به سه محدوده در شمال، مرکز و جنوب غربی تقسیم شد. نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص SPI اصلاح شده در مقیاس‌های یک، سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه و شاخص GRI بیانگر وجود بیشترین ارتباط بین شاخص SPI اصلاح شده در مقیاس ۱۸ ماهه و شاخص GRI یک ماهه است. همچنین، شاخص GRI با تأخیر فاز زمانی شش و ۱۸ ماهه در نواحی شمالی و مرکزی و بدون تأخیر زمانی بر مناطق جنوب غرب، اثر خشکسالی هواشناسی را بر آبخوان دشت شهرکرد نمایان می‌سازد. مقایسه شاخص GRI معرف این سه محدوده نشان داد که نواحی شمالی و مرکزی آبخوان در وضعیت بحرانی‌تر از نظر افت تراز آب زیرزمینی قرار دارند و نواحی خروجی دشت از وضعیت پایدارتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه سینوپتیک، تأخیر زمانی، شاخص اصلاح شده بارش استاندارد، شاخص منبع آب زیرزمینی، منطقه‌بندی آبخوان

مقدمه

مضاعفی را برای کاهش بیشتر سطح آب زیرزمینی وارد می‌کند (Samadi و همکاران، ۲۰۱۵). زمانی که سامانه‌های آب زیرزمینی تحت تأثیر خشکسالی واقع می‌شوند، ابتدا آبیگری، سپس سطح و در نهایت

در سال‌های اخیر، استفاده از آب زیرزمینی به طور پیوسته برای تأمین نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت افزایش یافته است. تغییر پارامترهای اقلیمی نیز فشار

شاخص SPI لحاظ می‌کند. همچنین، Mahmoudi و Mirabbasi Najafabadi (۲۰۱۴) با مقایسه دو شاخص SPI و SPI اصلاح‌شده با سری زمانی بارش در ایستگاه دهدشت واقع در استان استان کهگیلویه و بویراحمد به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI نمی‌تواند تغییرات فصلی بارش را به‌طور دقیق برآورد کند و SPI اصلاح‌شده جایگزین مناسبی برای آن است. آن‌ها به‌منظور بررسی عملکرد این شاخص‌ها در تشخیص رویدادهای خشکسالی، تعداد خشکسالی‌هایی که در ماه تقویم خورشیدی رخ داده بود را با نتایج به‌دست آمده از دو شاخص مذکور مقایسه کردند. Majidi و همکاران (۲۰۱۵) نیز خصوصیات خشکسالی هواشناسی حوزه آبخیز قره‌چای را در طول دوره آماری ۱۳۹۲-۱۳۶۳ با استفاده از شاخص اصلاح‌شده بارش استاندارد در مقیاس زمانی شش ماهه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی ایستگاه‌های حوضه قره‌چای در سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۶۹ شدیدترین دوره خشکسالی را متحمل شده‌اند.

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI^۳) برای اولین بار به‌وسیله Mendicino و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شد. آن‌ها طی تحقیقی با استفاده از شاخص‌های SPI و GRI به بررسی خشکسالی در منطقه کالابریا ایتالیا پرداخته، به این نتیجه رسیدند که خصوصیات سنگ‌شناسی حوضه بر شاخص GRI مؤثر بوده، باعث تأخیر مرحله‌ای GRI نسبت به SPI می‌شود. از طرفی، در این منطقه هر چه 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. در زمینه استفاده از شاخص‌های آب زیرزمینی، مطالعاتی در ایران و سایر نقاط جهان انجام شده است. Chamanpira و همکاران (۲۰۱۴)، خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را با شاخص‌های SPI و GRI بر دشت الشتر مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که شاخص SPI در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه بدون تأخیر زمانی با میانگین تراز

آبدهی سفره آب زیرزمینی کاهش پیدا می‌کند، چنین خشکسالی را خشکسالی آب زیرزمینی می‌نامند (van Lanen و Peters، ۲۰۰۰). در خشکسالی‌های اخیر، آب‌های زیرزمینی برای مصارف مختلف کشاورزی، شهری و صنعتی به‌شدت مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. این مسئله، تنش خشکی بر منابع آب زیرزمینی را در بیشتر نقاط ایران تشدید می‌کند. گرچه آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم آبی در دنیا محسوب می‌شوند، اما در بسیاری از بررسی‌های مربوط به خشکسالی مورد توجه قرار نمی‌گیرند (Shakiba و همکاران، ۲۰۱۰). بدین‌منظور یافتن اثرات بارندگی و بررسی تغییرات آن بر روی سطح آب زیرزمینی ضروری است.

شاخص‌های خشکسالی مقادیر عددی هستند که تصمیم‌گیری برای خشکسالی براساس آن‌ها به‌مراتب مفیدتر از داده‌های خام است. شاخص بارش استاندارد شده^۱ SPI، به‌وسیله McKee و همکاران (۱۹۹۳) معرفی شد. با وجود این‌که SPI به‌طور گسترده به‌عنوان یک ابزار عمومی رایج برای ارزیابی خشکسالی پذیرفته شده است، ولی دارای محدودیت‌هایی است. یکی از این محدودیت‌ها این است که SPI تغییرپذیری فصلی را نمی‌تواند توصیف کند. یعنی زمانی که فصل خشک با فصل بارش مقایسه می‌شود، یک مقدار معین بارش باید معنای ضمنی متفاوتی داشته باشد ولی با توجه به این‌که شاخص SPI بر اساس میانگین کلی بیان می‌شود، مقدار آن برای ماه‌ها و فصل‌های مختلف معنای یکسانی دارد که این با واقعیت مطابقت ندارد (Govindaraju و Kao، ۲۰۱۰). بر همین اساس، Kao و Govindaraju (۲۰۱۰) برای در نظر گرفتن تغییرپذیری بارش، شاخص اصلاح‌شده بارش استاندارد (SPI^{mod۲}) را ارائه کردند. Mirabbasi Najafabadi و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی پایش بلندمدت خشکسالی‌های ارومیه با استفاده از شاخص‌های مختلف، به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI اصلاح‌شده تا حدود زیادی معایب SPI متداول را برطرف می‌کند و تغییرات فصلی بارش را در محاسبه

^۱ Standardized Precipitation Index

^۲ Modified standardized precipitation index

^۳ Groundwater Resource Index

است. بر اساس این شاخص، از سال ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۴ سطح آب زیرزمینی در حال افت است که در مرداد ۱۳۸۴ بیشترین مقدار را در گستره وسیعی از دشت نشان می‌دهد. همچنین، نقشه‌های پهنه‌بندی این پژوهش نشان دادند که مردادماه دارای بیشترین مقدار پهنه خشکسالی و بهمن‌ماه دارای کمترین مقدار آن بوده است. Ezzine و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از سه شاخص SPI، SWI و SVI^۲ به بررسی خشکسالی در منطقه نیمه‌خشک مدیترانه در مراکش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بین SPI و SWI همبستگی خوبی وجود دارد و هماهنگی بین دو شاخص SVI و SWI بیشتر از شاخص‌های SVI و SPI است. Kubicz و Bağ (۲۰۱۹)، با هدف تعیین اثر بارش بر سطح آب زیرزمینی و تأثیر خشکسالی هواشناسی بر سطوح آب زیرزمینی در مناطق کوچاوی^۳ و ویلکوپولسکا^۴ لهستان طی بازه زمانی ۲۰۱۵-۱۹۸۱ به مطالعه دوره‌های خشکسالی بر اساس شاخص SPI و شاخص سطح استاندارد آب زیرزمینی (SGI^۵) در چهار مقیاس زمانی (شش، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد، بین شرایط خشکسالی هواشناسی و خشکسالی آب زیرزمینی رابطه‌ای خطی وجود ندارد، چرا که مقدار نسبتاً کم ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و SGI نشان می‌دهد که خشکسالی‌های آب زیرزمینی تحت تأثیر سایر عوامل مستقل از بارش قرار دارند. Bloomfield و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از سه شاخص SGI، STI^۶ و SPI به بررسی توأمان اثرات بارش و دما بر تغییرات سطوح آب زیرزمینی در دو چاهک مشاهده‌ای در جنوب شرقی و شرق انگلستان واقع در آبخوان‌های آهکی طی بازه زمانی طولانی مدت ۲۰۱۵-۱۸۹۱ پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که بر خلاف آنچه که در پنجمین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) بیان شده، شواهدی برای تغییرات فراوانی، شدت و بزرگی خشکسالی آب زیرزمینی ناشی از گرم‌شدن جهانی

سطح سفره آب زیرزمینی و شاخص GRI در سطح یک درصد معنی‌دار بوده، دارای بیشترین ضریب همبستگی است که حاکی از تأثیرگذاری خشکسالی هواشناسی بر آب زیرزمینی دشت الشتر است. Pourmohammadi و همکاران (۲۰۱۸) نیز به بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی بر تغییرات سطح ایستابی و بیلان آب زیرزمینی دشت توپسرکان همدان به‌وسیله مدل عددی MODFLOW پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که خشکسالی هواشناسی به تنهایی نمی‌تواند بر تغییرات افت سطح آب زیرزمینی تأثیر بگذارد و استفاده بی‌رویه از چاه‌های بهره‌برداری و برداشت از آن‌ها تأثیر زیادی بر تغییرات آب زیرزمینی داشته است. Aleboali و همکاران (۲۰۱۶)، آثار خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت کاشان را با استفاده از شاخص SPI بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، علاوه بر خشکسالی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی نیز عامل افت سطح آب زیرزمینی است و سهم برداشت بی‌رویه در افت سطح آبخوان به‌مراتب بیش از خشکسالی است. نتایج Shekari و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدروژئولوژیکی دشت ششده و قره بلاغ استان فارس به‌ترتیب با استفاده از شاخص‌های SPI و GRI در طی بازه زمانی ۹۳-۱۳۷۲ بیانگر وجود تأخیر زمانی ۲۴ تا ۴۸ ماهه خشکسالی هواشناسی بر روی منابع آب زیرزمینی دشت است. همچنین، بر اساس این پژوهش میزان افت سطح آب زیرزمینی طی این دوره ۲۱ ساله، در حدود ۳۷ متر بوده، میزان افت متوسط سالانه را ۱/۷۶ متر تخمین زده است. Roshan و Habibnejad Roshan (۲۰۱۸) با تحلیل داده‌های آب زیرزمینی ۴۰ حلقه چاه پیژومتری دشت ساری-نکا، تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمینی این دشت را با استفاده از شاخص‌های GRI و SWI^۱ طی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شاخص GRI به‌عنوان معرف وضعیت سطح آب زیرزمینی منطقه بیشترین خشکسالی‌ها را در ماه‌های مرداد هر سال نشان داده

^۲ Standardized Vegetation Index

^۳ Kujawy

^۴ Wielkopolska

^۵ Standardised Groundwater level Index

^۶ Standardised Temperature Index

^۱ Standardized Water-level Index

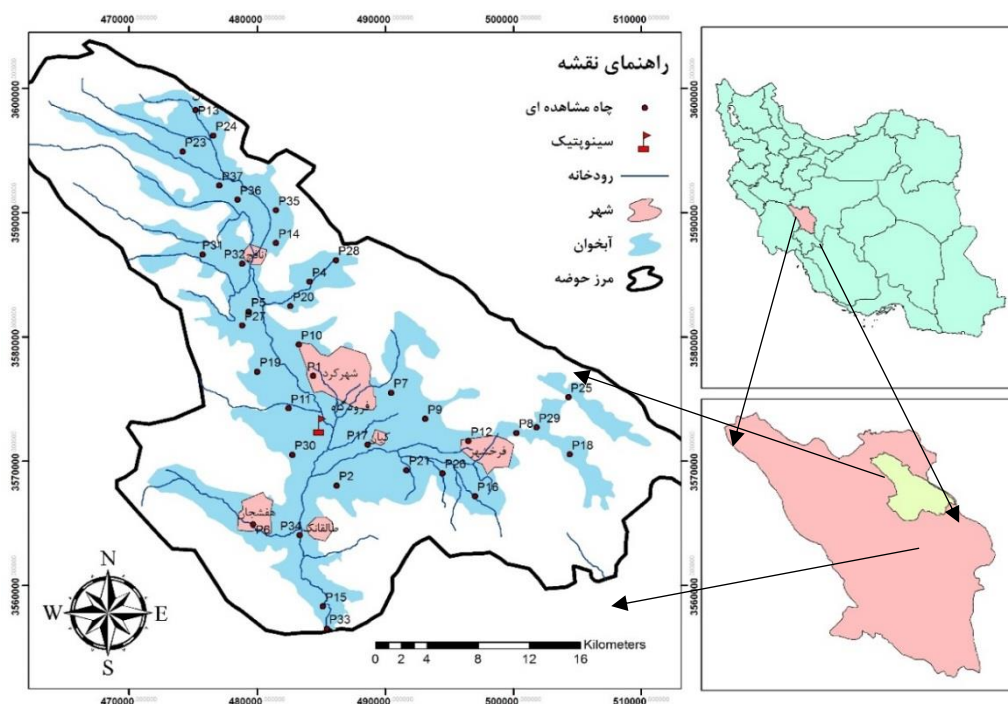
این کار خشکسالی و ترسالی‌های هیدروژئولوژیک نواحی مختلف آبخوان را با دید بهتر مورد ارزیابی قرار داده و در نهایت مناطق بحرانی آبخوان جهت مدیریت مناسب شناسایی شود. برای این منظور، خشکسالی هواشناسی دشت شهرکرد بر اساس شاخص اصلاح‌شده بارش استاندارد (SPI^{mod}) و همچنین، خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص GRI با کمک ۳۵ پیژومتر موجود در دشت در بازه زمانی مشترک ۹۴-۱۳۶۳ مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

دشت شهرکرد به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در ناحیه شرقی استان بین عرض جغرافیایی $۳۲^{\circ} ۳۵'$ تا $۳۱^{\circ} ۱۰'$ شمالی و $۵۰^{\circ} ۳۸'$ تا $۵۱^{\circ} ۱۰'$ طول شرقی قرار دارد. منطقه مورد نظر از حیث ارتفاع از سطح دریا بین کمینه ۱۹۹۶ متر و بیشینه ۳۲۶۰ متر است. متوسط بارش سالانه حوضه ۳۸۴ میلی‌متر و دارای میانگین درجه حرارت سالانه $۱۱/۷$ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۱، موقعیت قرارگیری آبخوان و حوزه آبخیز شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری را نشان می‌دهد.

وجود دارد. آن‌ها پیش‌بینی کردند که در سامانه‌های کم‌عمق آب زیرزمینی و یا آبخوان‌هایی با حاشیه‌های موئینگی نسبتاً ضخیم که می‌تواند تحت تأثیر تبخیر-تعرق (ET) قرار بگیرند، احتمالاً گرم‌شدن جو بر اثر فعالیت‌های انسانی در شکل‌گیری و گسترش خشکسالی آب‌های زیرزمینی اثرگذار خواهد بود.

آبخوان دشت شهرکرد از جمله منابع تأمین آب نیازهای شرب، کشاورزی و صنعت منطقه بوده، برداشت مازاد و خشکسالی‌های اخیر، باعث کاهش شدید تراز آبخوان و ممنوعه‌شدن دشت شده است. به‌دلیل اثرپذیری دیرتر منابع آب زیرزمینی در برابر کاهش ریزش‌های جوی نسبت به سایر متغیرهای هیدروژئولوژی، اغلب خشکسالی آب زیرزمینی نادیده گرفته می‌شود. سابقاً بررسی‌هایی بر روی خشکسالی‌های دشت شهرکرد به‌صورت سالانه انجام شده ولیکن در این پژوهش سعی شد، با یک شاخص جدید به بررسی خشکسالی هواشناسی منطقه پرداخته شود. همچنین، به‌منظور پایش دو نوع خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی با تأکید بر تعیین تأخیر زمانی در بخش‌های مختلف آبخوان شهرکرد اقدام به منطقه‌بندی آبخوان با مقایسه روند افت و خیزهای گراف‌های حاصل از محاسبه شاخص GRI کرده تا با



شکل ۱- موقعیت قرارگیری حوزه آبخیز، آبخوان و پیژومترهای دشت شهرکرد

ارزیابی خشکسالی هیدروژئولوژیکی آبخوان محاسبه شد و آبخوان دشت شهرکرد بر اساس افت و خیزهای گراف‌های حاصله برای هر پیژومتر در طول زمان، طبقه‌بندی شد. برای دستیابی به نتایج مطمئن‌تر و حذف نوسانات ماهانه و فصلی از میانگین‌های متحرک ۱۲ و ۴۸ ماهه استفاده شد. در مرحله بعد، برای تعمیم ارزش‌های اندازه‌گیری شده پیژومترهای مربوط به هرکدام از طبقات به کل سطح طبقه مربوطه از روش تیسن در محیط نرم‌افزاری Arc GIS 10.2 استفاده شد و شاخص GRI معرف هر طبقه به‌دست آمد تا ارزیابی دوره‌های خشکسالی آب زیرزمینی و اثر خشکسالی هواشناسی بر هر محدوده از دشت راحت‌تر صورت پذیرد. شاخص‌ها و روش‌های به‌کار رفته در این پژوهش در ادامه شرح داده شده است.

شاخص SPI اصلاح شده (SPI^{mod}): برای محاسبه شاخص SPI اصلاح شده یا SPI^{mod} ، Kao و Govindaraju (۲۰۱۰) پیشنهاد کردند که X_w (میزان بارش ماهانه) را با ماه مختوم به آن جمع کرده و به صورت X_w^{month} نشان داده شود که در آن رونویس month نشان‌دهنده یکی از ماه‌های ژانویه، فوریه تا دسامبر است. به عبارت دیگر، سری زمانی بارش در بازه زمانی W ماهه، $X_w(t)$ ، به ۱۲ زیر سری تقسیم می‌شود.

$$X_w^{month}(g) = X_w(12(g-1)+m) = X_w(t) \quad (1)$$

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. برای مثال، X_{Jan} بیانگر بارش ژانویه و X_{Aug} بیانگر کل بارش پنج ماهه از آوریل تا اوت است. به این ترتیب، نمونه‌ها در هر گروه X_w^{month} به‌طور سالانه جمع‌آوری می‌شوند. واضح است تا زمانی که $w \leq 12$ 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 و بنابراین، تغییرات فصلی با یک شیوه مناسب در نظر گرفته می‌شوند. با برازش دادن توزیع آماری بر هر گروه به‌طور مجزا (یعنی ایجادکردن

این دشت در مجموع دارای ۶۳۵ حلقه چاه مجاز (۴۱۷ حلقه چاه کشاورزی، ۵۹ حلقه چاه آب شرب، ۱۵۹ حلقه چاه آب صنعتی)، ۷۹ رشته کاریز (قنات) و ۴۰ دهنه چشمه فعال است که سالانه حدود ۲۳۰ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی دشت را تخلیه کرده، به مصارف شرب، صنعت و کشاورزی می‌رساند (Lalezari, ۲۰۰۸). با توجه به رقوم سطح آب نسبت به تراز سطح زمین، تبعیت سطح ایستابی از مؤلفه‌های تغذیه و تخلیه در آبخوان، مطالعات زمین‌شناسی، حفاری‌های اکتشافی و مطالعات ژئوفیزیک، آبخوان دشت شهرکرد، آبخوانی آزاد از نوع آبرفتی است که در مرکز دشت ضخامت آن بیشینه و به طرف حواشی دشت بسیار کاهش می‌یابد (Radfar, ۲۰۰۹).

برای انجام این پژوهش، از اطلاعات بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک شهرکرد و آمار سطح ایستابی ماهانه ۳۵ پیژومتر موجود در سطح دشت شهرکرد طی دوره آماری ۶۴-۱۳۶۳ تا ۹۴-۱۳۹۳ استفاده شد. این اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای استان دریافت شد. در مواردی که در بین داده‌ها، داده‌های مشکوک و یا گمشده وجود داشت نسبت به اصلاح و بازسازی آن اقدام شد، به این صورت که معمولا در صورت عدم وجود عوامل غیرعادی تأثیرگذار بر سطح آب، در بین دو یا چند چاه مشاهده‌ای مجاور، چگونگی تغییرات سطح آب ماهانه از هم تبعیت می‌کند. در چنین شرایطی، همبستگی قابل‌قبولی بین ارقام این چاه‌ها وجود خواهد داشت و ضریب همبستگی و حدود اطمینان آن با افزایش دوره‌های مشترک آماری بالا می‌رود. با به‌دست آوردن رابطه همبستگی می‌توان با استفاده از تغییرات سطح آب یک چاه نسبت به ترمیم خلأهای آماری چاه مشابه اقدام کرد. در این مطالعه، در ابتدا خشکسالی هواشناسی دشت شهرکرد با استفاده از اطلاعات بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک شهرکرد بر اساس شاخص SPI اصلاح‌شده در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه با بهره‌گیری از کدهای نوشته شده در برنامه MATLAB محاسبه و ارزیابی شد.

با استفاده از داده‌های ماهانه تراز سطح آب موجود در پیژومترهای سطح دشت نیز شاخص GRI برای

به طور جداگانه برآورد می‌شوند. وضعیت طبقه‌بندی خشکسالی هواشناسی با این شاخص همانند شاخص SPI بوده و در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش، رویداد خشکسالی به صورت دوره-ای که در آن مقادیر SPI کمتر از صفر هستند، بر اساس گفته Loukas و Vasiliades (۲۰۰۴) تعریف شد. محققان دیگری نیز از جمله Shiau و Modarres (۲۰۰۹) و Mirabbasi و همکاران (۲۰۱۲) خشکسالی را به همین صورت تعریف کرده‌اند. شدت خشکسالی برابر قدر مطلق مجموع SPI^{mod} در طول مدت یک رویداد خشکسالی در نظر گرفته می‌شود.

$$S = -\sum_{i=1}^D SPI_i^{mod} \quad (3)$$

که در آن، D مدت خشکسالی و S شدت خشکسالی است.

$u_w^{Feb} = F_{X_w^{Feb}}(x_w^{Feb})$ ، $u_w^{Jan} = F_{X_w^{Jan}}(x_w^{Jan})$ و $u_w^{Dec} = F_{X_w^{Dec}}(x_w^{Dec})$ با شیوه‌ای مشابه با SPI متداول محاسبه می‌شود (Mirabbasi و Najafabadi و همکاران، ۲۰۱۳).

$$SPI_w^{mod} = \phi^{-1}(u_w^{month}) = \phi^{-1}(F_{X_w^{month}}(x_w^{month})) \quad (2)$$

با توجه به این که برای هر ماه ۱۲ SPI_w^{mod} متناظر با بازه‌های زمانی مختلف $w=1,2,\dots,12$ محاسبه می‌شود، تعداد SPI^{mod} های محاسبه شده ۱۲ بار بیشتر از SPI های متداول است. در واقع تفاوت دو شیوه SPI متداول و SPI اصلاح شده، در این است که در شیوه متداول برای هر ایستگاه و هر مقیاس زمانی (سه، شش، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماه و غیره) پارامترهای توزیع گاما محاسبه می‌شد ولی در شیوه اصلاح شده برای هر ایستگاه، هر مقیاس زمانی (سه، شش، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماه و غیره) و برای هر ماه سال (ژانویه، فوریه و ...)، پارامترهای α و β مربوط به تابع چگالی احتمال گاما

جدول ۱- طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی بر حسب مقادیر SPI و GRI (McKee و همکاران، ۱۹۹۳؛ Mendicino و همکاران، ۲۰۰۸)

طبقات	وضعیت	مقادیر SPI	مقادیر GRI
۱	ترسالی بسیار شدید	۲ و بیشتر	۲ و بیشتر
۲	ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۱/۹۹
۳	ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹
۴	ترسالی ملایم	۰ تا ۰/۹۹	۰ تا ۰/۹۹
۵	خشکسالی ملایم	۰ تا -۰/۹۹	۰ تا -۰/۹۹
۶	خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹	-۱ تا -۱/۴۹
۷	خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹	-۱/۵ تا -۱/۹۹
۸	خشکسالی بسیار شدید	-۲ و کمتر	-۲ و کمتر

m است. طبقات مختلف رطوبتی در شاخص GRI دقیقاً همانند شاخص SPI وضعیت خشکسالی‌ها را در هفت طبقه، مطابق جدول ۱ از شرایط بسیار تر تا خشکسالی بسیار شدید تقسیم می‌کند.

نتایج و بحث

نتایج شاخص SPI اصلاح شده برای خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه با استفاده از کد نوشته شده در برنامه MATLAB به دست آمد. نتایج خصوصیات خشکسالی حاصل از محاسبه شاخص SPI اصلاح شده

شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI): برای اولین بار به وسیله Mendicino و همکاران (۲۰۰۸)، به عنوان شاخصی مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی هیدروژئولوژی برای منطقه مدیترانه به کار برده شده است. مقدار شاخص GRI با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (4)$$

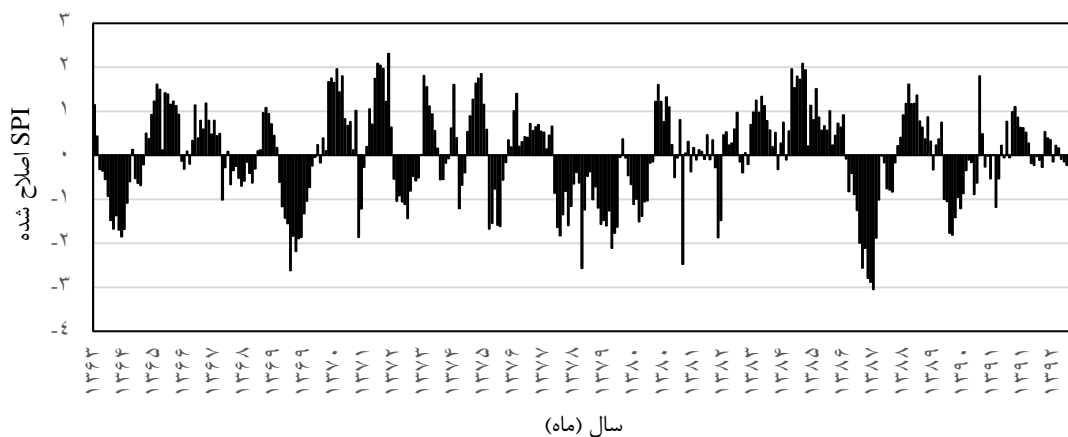
که در آن، $D_{y,m}$ مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سال y و ماه m ، و $\mu_{D,m}$ و $\sigma_{D,m}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در ماه

رویدادهای خشکسالی مورد انتظار کاسته می‌شود، لیکن طول دوره‌های خشکسالی افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج Majidi و همکاران (۲۰۱۵) برای دشت رزن- قهاوند با استفاده از شاخص SPI^{mod} ، Ahmadi و همکاران (۲۰۱۵) برای مرودشت خرامه و Shekari و همکاران (۲۰۱۷) برای دشت ششده و قره- بلاغ با استفاده از شاخص SPI، مطابقت دارد.

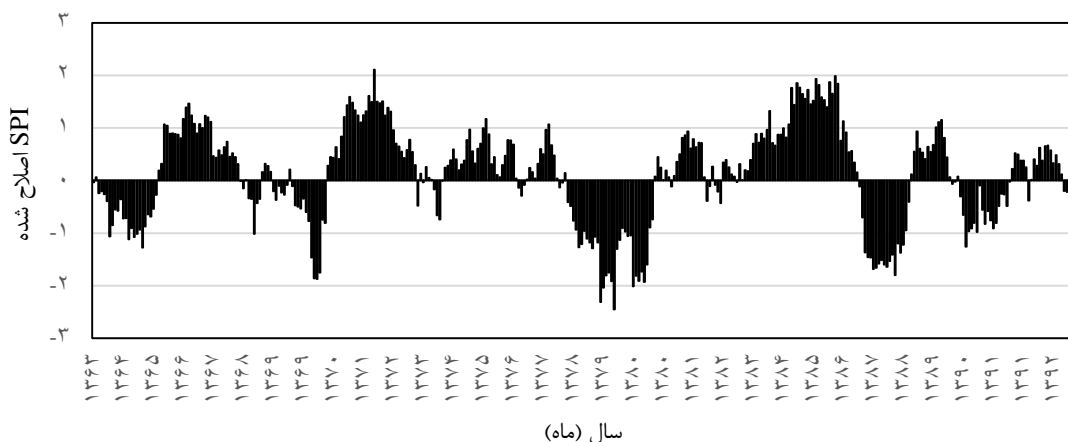
در بازه‌های زمانی مختلف در جدول ۲ و نمودارهای مقیاس‌های منتخب شش، ۱۸ و ۴۸ ماهه در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است. بیشینه رویدادهای خشک، تر و نرمال متعلق به SPI اصلاح‌شده یک ماهه و کمینه آن مربوط به SPI اصلاح شده ۴۸ ماهه است. هر چه مقیاس زمانی مورد مطالعه برای شاخص SPI اصلاح شده طولانی‌تر می‌شود، از تعداد متوسط

جدول ۲- نتایج خصوصیات خشکسالی ایستگاه سینوپتیک شهرکرد برای شاخص SPI اصلاح‌شده در مقیاس‌های زمانی مختلف

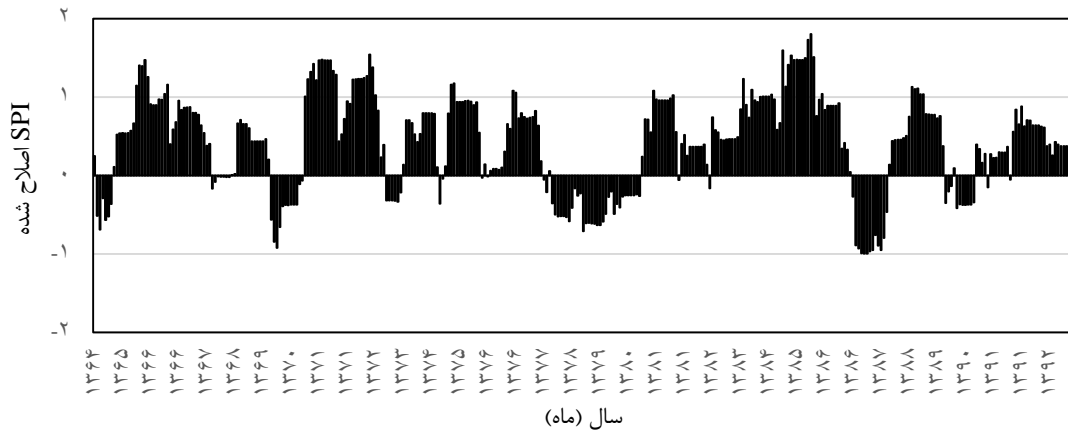
یک ماهه	سه ماهه	شش ماهه	نه ماهه	۱۲ ماهه	۱۸ ماهه	۲۴ ماهه	۴۸ ماهه	
۱۰۸	۱۷۹	۱۹۰	۱۷۱	۱۶۳	۱۵۵	۱۳۶	۹۶	تعداد ماه‌های خشک
۶۰	۵۶	۴۰	۲۶	۱۷	۲۲	۱۸	۱۶	تعداد دوره‌های خشک
۸۶-۸۷	۶۳-۶۴	۷۷-۷۹	۷۷-۸۰	۷۷-۸۰	۷۸-۸۰	۷۷-۸۰	۷۸-۸۰	طولانی‌ترین دوره خشک
۶	۱۲	۲۵	۳۷	۳۷	۳۲	۳۷	۳۲	تعداد ماه‌های طولانی‌ترین D
۸۶-۸۷	۸۶-۸۷	۷۷-۷۹	۷۷-۸۰	۷۷-۸۰	۷۸-۸۰	۷۷-۸۰	۷۸-۸۰	شدیدترین دوره خشک S
-۶/۴۹	-۱۵/۰۱	-۲۹/۸۵	-۴۳/۲۶	-۴۷/۲۴	-۴۳/۱۶	-۳۰/۴۸	-۱۳/۶۲	مقدار S



شکل ۲- نمودار شاخص SPI اصلاح‌شده شش ماهه ایستگاه شهرکرد



شکل ۳- نمودار شاخص SPI اصلاح‌شده ۱۸ ماهه ایستگاه شهرکرد



شکل ۴- نمودار شاخص SPI اصلاح شده ۴۸ ماهه ایستگاه شهرکرد

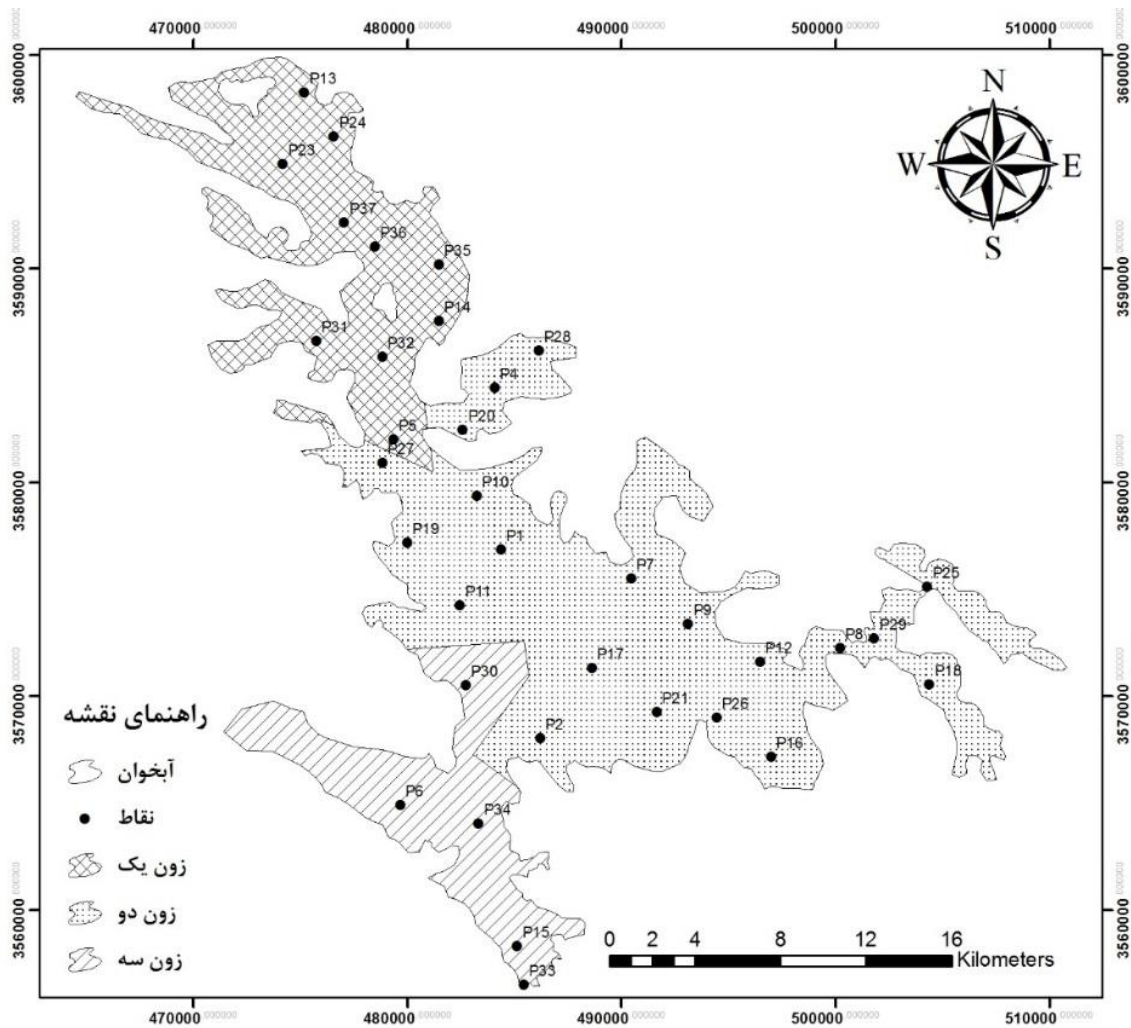
ماه تداوم (۴/۵ سال) در خردادماه سال ۱۳۸۴ پایان یافته است. شدت خشکسالی در این دوره مقداری برابر با $S = -15/58$ دارد. دوره بعدی خشکسالی از تیرماه سال ۱۳۹۰ شروع شده و تا پایان دوره آماری یعنی شهریورماه ۱۳۹۴ همچنان روند نزولی خود را ادامه داده است. تداوم این دوره (۵۱ ماه) تقریباً برابر با دوره قبل بوده ولی با شدت آن با مقدار $S = -41/67$ حدود سه برابر دوره قبلی است.

طبقه دو شامل نواحی مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی آبخوان است. این طبقه با تعداد ۲۰ پیژومتر بیشترین تعداد پیژومترها را به خود اختصاص داده است (شکل ۵). بر طبق شکل ۷، پیژومترهای این طبقه نیز مطابقت خوبی در زمان‌های اوج و فرود (ترسالی و خشکسالی) با هم دارند. هر چند که نمونه‌هایی از چند تناقص نیز مشاهده می‌شود، به‌عنوان مثال ناهمگونی گراف ایستگاه دوراهی بروجن-اصفهان در ابتدای دوره آماری با سایر پیژومترها. برای این طبقه نیز دو دوره خشکسالی آب زیرزمینی را در طول دوره آماری می‌توان مشاهده کرد. اولین دوره خشکسالی از فروردین‌ماه سال ۱۳۸۱ شروع شده و با ۶۶ ماه تداوم (حدود پنج سال) در شهریور ماه سال ۱۳۸۶ پایان یافته است. شدت خشکسالی در این دوره مقداری برابر با $S = -30/26$ دارد. دوره بعدی خشکسالی از خردادماه سال ۱۳۹۰ شروع شده و تا پایان دوره آماری یعنی شهریورماه ۱۳۹۴ همچنان روند نزولی خود را ادامه داده است. تداوم این دوره (۵۲ ماه) نسبت به دوره قبل کمتر بوده ولی شدت آن با مقدار $S = -45/34$ بیشتر از دوره قبلی است.

به‌طور کلی، می‌توان پنج دوره بارز خشکسالی را در این دوره ۳۱ ساله مشاهده کرد که مربوط به سال‌های ۶۳-۶۴، ۶۹-۷۰، ۷۷-۸۰، ۸۶-۸۷ و ۸۹-۹۰ است که طولانی‌ترین آن‌ها با حدود ۳۵ ماه متوالی از آذر ماه ۷۷ تا آبان ماه سال ۸۰ تداوم داشته است. همچنین، سال‌های ۸۶-۸۷ با وجود تداوم ماه‌های خشک کمتر نسبت به دوره ۷۷-۸۰، شدیدترین دوره خشکسالی بوده است.

برای بررسی خشکسالی آب زیرزمینی دشت با استفاده از شاخص GRI در نهایت سه طبقه برای آبخوان دشت شهرکرد در نظر گرفته شد. طبقه اول در نواحی شمال و شمال غرب آبخوان و طبقات دوم و سوم نیز به‌ترتیب در مرکز و جنوب غرب (خروجی) آبخوان انتخاب شدند. پیژومترهای مربوط به هر طبقه در شکل ۵ قابل مشاهده است. در مرحله بعد، برای تعمیم ارزش‌های اندازه‌گیری شده پیژومترهای مربوط به هر کدام از طبقات به کل سطح طبقه مربوطه با استفاده از روش تیسن، شاخص GRI معرف هر طبقه به‌دست آمد. با استفاده از این روش می‌توان به‌طور کلی به بررسی خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در طول دوره آماری برای هر طبقه پرداخت.

طبقه یک، نواحی شمالی آبخوان را شامل می‌شود. در این طبقه پنج، پیژومتر با آمار طولانی مدت و پنج پیژومتر با آمار کوتاه‌مدت (سال بهره‌برداری در بهمن ۱۳۸۱) قرار گرفته‌اند. بر اساس گراف معرف برای این طبقه (شکل ۶)، دو دوره خشکسالی آب زیرزمینی را در طول دوره آماری می‌توان مشاهده کرد. اولین دوره خشکسالی از دی‌ماه سال ۱۳۷۹ شروع شده و با ۵۴



شکل ۵- موقعیت قرارگیری محدوده‌های سه‌گانه آبخوان دشت شهرکرد و پیزومترهای مربوط به آن

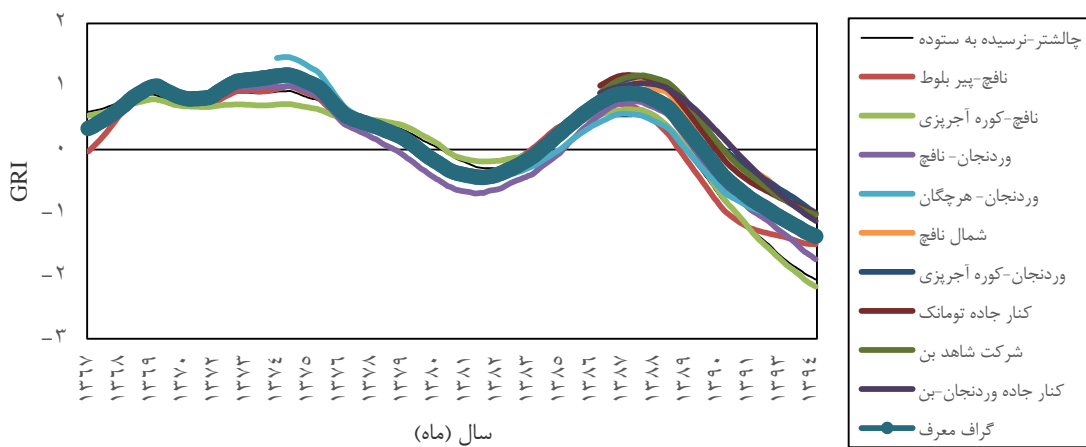
خشکسالی آب زیرزمینی در طول دوره آماری مشاهده می‌شود. اولین دوره خشکسالی از تیرماه سال ۱۳۷۹ شروع شده و با ۶۴ ماه تداوم (حدود پنج سال) در مهر ماه سال ۱۳۸۴ پایان یافته است. شدت خشکسالی در این دوره، مقداری برابر با $S = -۳۳/۶۵$ دارد. دوره بعدی خشکسالی از تیرماه سال ۱۳۸۸ شروع شده و تا پایان دوره آماری یعنی شهریورماه ۱۳۹۴ همچنان روند نزولی خود را ادامه داده است. تداوم این دوره نسبت به دوره قبل بیشتر بوده ولی شدت آن با مقدار $S = -۳۱/۱۲$ اندکی کمتر از دوره قبلی است.

تغییرات ضخامت آبرفت بین صفر، یعنی در مناطقی که سنگ کف رخ‌نمون دارند و بیشینه حدود ۳۵۰ متر در بخش‌های مرکزی دشت تغییر می‌کند. روند عمومی منحنی‌های هم‌ضخامت از روند عمومی ساختاری دشت پیروی می‌کند به‌گونه‌ای که با دور

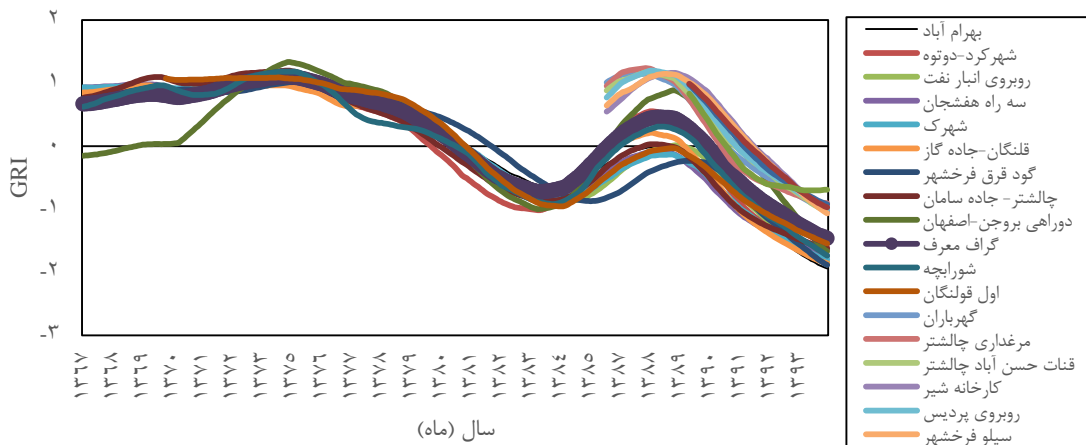
طبقه سه، شامل سه پیزومتر با آمار طولانی‌مدت در ایستگاه‌های شمس‌آباد و نوآباد در قسمت خروجی آبخوان و ایستگاه مزرعه استکی واقع در جنوب غرب آبخوان است. دو ایستگاه با آمار کوتاه‌مدت نیز در قسمت خروجی آبخوان واقع شده‌اند (شکل ۵). از آنجا که این منطقه خروجی آبخوان بوده و رواناب ناشی از بارش در نهایت به این منطقه می‌رسد، همچنین، به‌دلیل عمق کم سطح ایستابی و پاسخ سریع این ناحیه به تغییرات اقلیمی، گاهی زمین‌های این منطقه حالت ماندابی دارند و باعث ایجاد نوسانات بیشتر و شدیدتری در نمودارهای این طبقه شده است. برخلاف دو طبقه قبلی که فراز و نشیب‌ها به آرامی و بدون پرش در جریان است، در این طبقه مقادیر شاخص در ماه‌های مختلف گاهی دچار پرش می‌شود و از روند منظمی پیروی نمی‌کند. طبق شکل ۸ دو دوره

با بررسی‌های دقیق مشخص شد که تمام چاه‌ها عمدتاً دو دوره خشکسالی طولانی مدت را تجربه کرده‌اند که شروع آن‌ها از سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۷ بوده است. در بیشتر هیدروگراف چاه‌ها دوره خشکی ۹۴-۱۳۸۷ به‌عنوان طولانی‌ترین تداوم دیده می‌شود. اثر دو دوره خشکسالی هواشناسی رخ داده طی سال‌های ۸۰-۷۷ و ۸۶-۸۷ را می‌توان به‌وضوح در دو تداوم بزرگ خشکسالی آب زیرزمینی در نمودارهای شاخص GRI برای تمامی پیژومترها مشاهده کرد.

شدن از حواشی دشت و نزدیک شدن به مرکز دشت بر ضخامت رسوبات آبرفتی افزوده می‌شود (Chaharmahal and Bakhtiari Regional Water Company, ۲۰۰۷). به تناسب آن همین تغییرات در لایه غیراشباع خاک وجود دارد که با همراهی عواملی همچون ساختار زمین‌شناسی منطقه در تبدیل فرایند بارش به‌عنوان مهمترین شاخص اقلیمی به رواناب و سپس فرایند نفوذ و پیوستن به منابع آب زیرزمینی فاصله زمانی ایجاد و باعث عدم هم‌زمانی در رخداد دو خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی خواهد شد.



شکل ۶- ایستگاه‌های مربوط به طبقه یک، بر اساس شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه



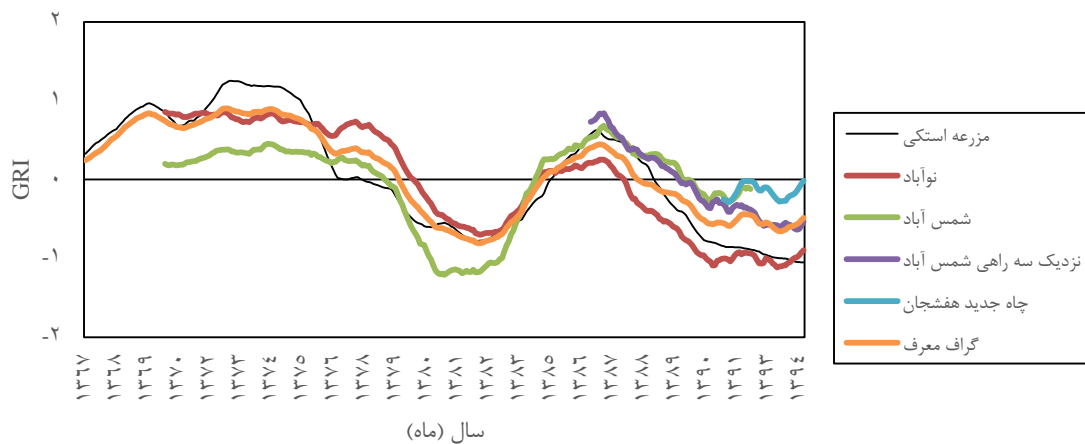
شکل ۷- ایستگاه‌های مربوط به طبقه دو، بر اساس شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه

اصلاح شده در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه و GRI در مقیاس‌های زمانی یک، ۱۲ و ۴۸ ماهه پرداخته شد. این محاسبات برای هرکدام از محدوده‌ها به‌طور جداگانه انجام گرفت که

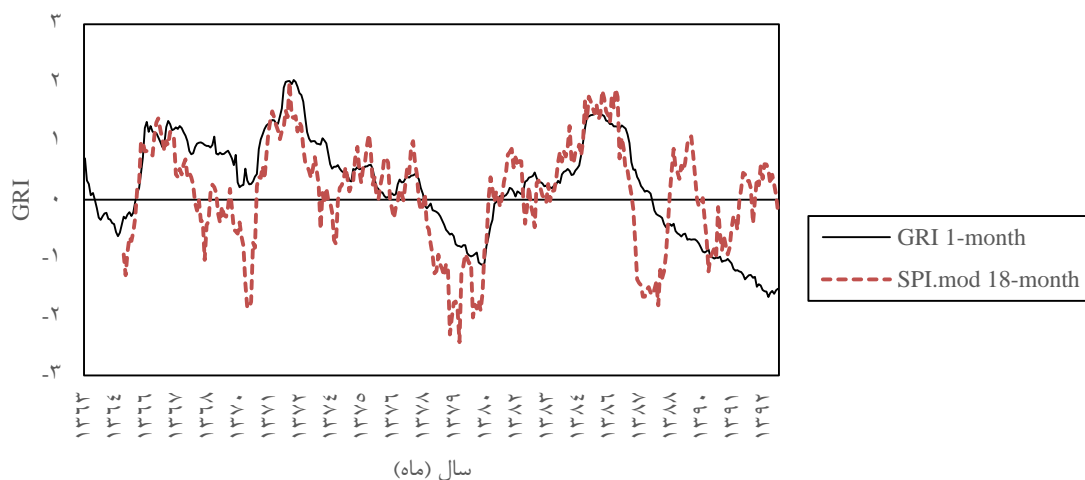
در ادامه، برای آشکارسازی هرچه بهتر تفاوت‌های این سه منطقه، به بررسی میزان تأثیرپذیری خشکسالی آب زیرزمینی از خشکسالی هواشناسی با استفاده از ضریب همبستگی متقاطع بین شاخص SPI

همزمانی در رخداد این دو نوع خشکسالی را می‌توان به این دلیل دانست که در تبدیل فرایند بارش به‌عنوان مهمترین شاخص اقلیمی به رواناب و سپس فرایند نفوذ و پیوستن به منابع آب زیرزمینی فاصله زمانی وجود دارد و عواملی همچون ساختار زمین‌شناسی منطقه نقش اساسی بر آن دارد. طبیعتاً هر چه فاصله رسیدن رواناب نفوذی به سطح ایستایی بیشتر باشد، زمان بیشتری برای این کار لازم است و این امر به‌دلیل قرارگیری نواحی مرکزی آبخوان در اعماق پایین‌تر نسبت به تراز سطح زمین است. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج حاصل از تحقیقات Mendicino و همکاران (۲۰۰۸) در منطقه کالابریا اسپانیا و Imani و Talebi Esfandarani (۲۰۱۱) در دشت بهاباد یزد هم‌خوانی دارد.

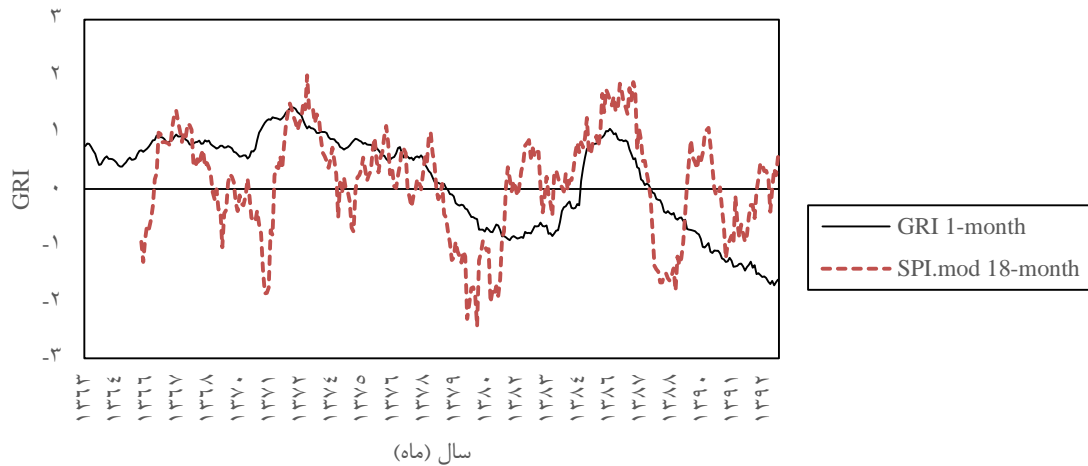
نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. بیشترین همبستگی معنی‌دار در سطح پنج درصد برای هر سه محدوده از آبخوان بین شاخص SPI اصلاح‌شده در مقیاس ۱۸ ماهه و شاخص GRI یک ماهه است. برای تعیین اثر تأخیر زمانی خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی نیز ضریب همبستگی بین شاخص SPI اصلاح‌شده در مقیاس ۱۸ ماهه با شاخص GRI یک ماهه، در تأخیرهای زمانی یک، دو، سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی، باتوجه به جدول‌های ۳ و ۴، می‌توان نتیجه گرفت که برای طبقه یک بیشترین ضریب همبستگی مربوط به شاخص SPI اصلاح‌شده در مقیاس ۱۸ ماهه و شاخص GRI یک ماهه با سه تا نه ماه تأخیر زمانی است (شکل ۹). این تأخیر زمانی برای طبقه دو، ۱۲ تا ۱۸ ماه است (شکل ۱۰). عدم



شکل ۸- ایستگاه‌های مربوط به طبقه سه، بر اساس شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه



شکل ۹- رابطه شاخص SPI اصلاح‌شده ۱۸ ماهه با تأخیر زمانی شش ماه با شاخص GRI یک ماهه (طبقه یک)



شکل ۱۰- رابطه شاخص SPI اصلاح شده ۱۸ ماهه با تأخیر زمانی ۱۸ ماهه با شاخص GRI یک ماهه (طبقه دو)

خروجی رواناب دشت بوده، به دلیل ضخامت کم ناحیه غیراشباع و گاهی در برخی نواحی پیدا کردن حالت ماندابی، تأثیرپذیری مستقیمی از خشکسالی هواشناسی دارد (جدول‌های ۳ و ۴). نمودار رابطه بین شاخص‌های GRI و SPI اصلاح شده برای طبقه سه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

نتایج همبستگی متقاطع برای طبقه سه، بیشترین همبستگی را مانند دو طبقه قبلی بین SPI اصلاح شده ۱۸ ماهه و GRI یک ماهه نشان می‌دهد. ولی با اعمال تأخیر زمانی بین دو خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی دریافت شد که هرچه زمان تأخیر افزایش می‌یابد، میزان همبستگی در حال کاهش است. می‌توان بیان کرد که این بخش از آبخوان چون

جدول ۳- ضرایب همبستگی بین شاخص SPI اصلاح شده ماهانه با شاخص GRI طبقات مختلف آبخوان دشت شهرکرد

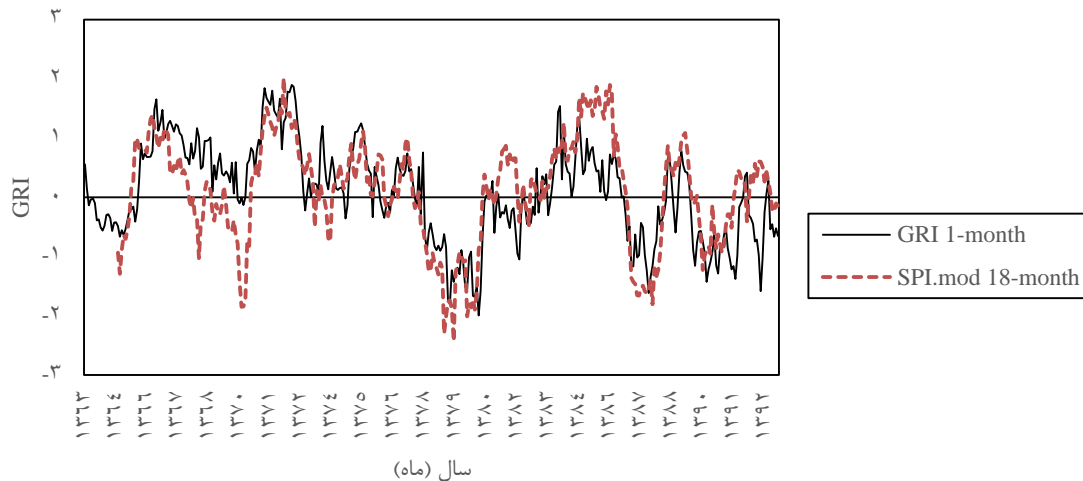
۴۸ SPI	۲۴ SPI	۱۸ SPI	۱۲ SPI	نه SPI	SPI شش	SPI سه	SPI یک	طبقات آبخوان	
۰/۳۲۱*	۰/۳۴۱*	۰/۴۸۸*	۰/۳۳۹*	۰/۲۳۸	۰/۱۳۷	۰/۰۴۷	۰/۰۰۶	طبقه ۱	یک GRI ماهه
۰/۱۳۳	۰/۱۶۹	۰/۲۶۳*	۰/۱۶	۰/۰۷۸	۰/۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	طبقه ۲	
۰/۶۳۳*	۰/۶۳۳*	۰/۶۹۱*	۰/۶۲۵*	۰/۵۴۸*	۰/۳۹۵*	۰/۲۲۲	۰/۰۷۶	طبقه ۳	
۰/۱۲۲	۰/۱۲۳	۰/۳۱۲*	۰/۱۲۲	۰/۰۴۴	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۰۱	طبقه ۱	۱۲ GRI ماهه
۰/۰۱۷	۰/۰۲	۰/۱۲۲	۰/۰۰۵	۰/۰۴۲	۰/۰۵۱	۰/۰۲	۰/۰۰۳	طبقه ۲	
۰/۳۷۳*	۰/۳۶۴*	۰/۵۸۶*	۰/۳۶۴*	۰/۲۱۹	۰/۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳	طبقه ۳	
۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۸۳	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴	۰/۰۱۴	۰/۰۱	طبقه ۱	۴۸ GRI ماهه
۰/۱۴۵	۰/۱۴۶	۰/۱۱۹	۰/۱۴۶	۰/۱۴۵	۰/۱۲۷	۰/۰۵۱	۰/۰۱۷	طبقه ۲	
۰/۰۴۹	۰/۰۴۸	۰/۱۴۹	۰/۰۳۷	۰/۰۰۵	۰/۰۲۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	طبقه ۳	

* سطح معنی داری ۰/۰۵

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین شاخص SPI اصلاح شده با مقیاس ۱۸ ماهه با شاخص GRI یک ماهه طبقات مختلف آبخوان دشت شهرکرد با اعمال تأخیرهای زمانی مختلف

۴۸ ماه	۲۴ ماه	۱۸ ماه	۱۲ ماه	نه ماه	شش ماه	سه ماه	دو ماه	یک ماه	تأخیر زمانی	
۰/۰۷	۰/۲۸	۰/۴۲*	۰/۵۱*	۰/۵۵*	۰/۵۷*	۰/۵۵*	۰/۵۴*	۰/۵۲*	طبقه ۱	یک GRI ماهه
۰/۱۷	۰/۳۹*	۰/۴۱*	۰/۴۰*	۰/۳۸*	۰/۳۶*	۰/۳۲*	۰/۳۱*	۰/۲۹*	طبقه ۲	
۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۳۹*	۰/۵۳*	۰/۶۴*	۰/۶۷*	۰/۶۸*	طبقه ۳	

* سطح معنی داری ۰/۰۵



شکل ۱۱- رابطه شاخص SPI اصلاح شده ۱۸ ماهه بدون تأخیر زمانی با شاخص GRI یک ماهه (طبقه سه)

به‌خصوص در طی دوره خشکسالی دوم داشته که نیازمند تدابیر لازم و اقدام سریع برای مدیریت بهینه مصرف و تغذیه مناسب است. مناطق نزدیک به خروجی آبخوان نیز هرچند در وضعیت خشکسالی نرمال به‌سر می‌برند ولی نسبت به سایر نواحی از وضعیت پایدارتری برخوردار هستند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مشخص کردن خشکسالی‌های هواشناسی و هیدروژئولوژیکی، بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی و تعیین نقاط بحرانی آبخوان دشت شهرکرد انجام شد. برای این منظور، از شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (SPI^{mod}) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) طی دوره آماری ۳۱ ساله استفاده شد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که هر چه مقیاس زمانی مورد مطالعه برای شاخص SPI اصلاح شده طولانی‌تر می‌شود، از تعداد متوسط رویدادهای خشکسالی مورد انتظار کاسته می‌شود، لیکن طول دوره‌های خشکسالی افزایش می‌یابد که با نتایج Majidi و همکاران (۲۰۱۵) برای دشت رزن-قهاوند، Ahmadi Akhorme و همکاران (۲۰۱۵) برای مرودشت خرامه و Shekari و همکاران (۲۰۱۷) برای دشت ششده و قره‌بلاغ، مطابقت دارد. به‌طور کلی، پنج دوره خشکسالی اقلیمی برجسته با تداوم بالا طی سال‌های ۷۰-۶۹، ۷۳، ۸۰-۷۷، ۸۷-۸۶ و ۹۰-۸۹ در

ذکر این نکته نیز قابل توجه است که با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ هرچند در سال‌های اولیه تطابق نسبتاً مناسبی بین این دو شاخص دیده می‌شود. ولی در پی خشکسالی آب زیرزمینی سال ۱۳۹۰ به بعد که در پی شدیدترین خشکسالی هواشناسی طی سال‌های ۸۸-۱۳۸۶ رخ داده، روند نزولی تا انتهای دوره آماری ادامه داشته و از جنبه دیگر، میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری به قدری بر تغییرات سطح ایستابی دشت مؤثر بوده که حتی ترسالی‌های سال‌های بعد باعث جبران برداشت بی‌رویه نشده و نتوانسته افت سطح ایستابی را جبران کند.

در نهایت، آن‌که هرچند تطابق خوبی بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدروژئولوژیکی جز در سال‌های انتهایی دوره آماری وجود دارد، با این حال به دلیل عدم تفکیک میزان بهره‌برداری از میزان کمبود بارش نمی‌توان به‌طور قطع میزان تأخیر خشکسالی آب زیرزمینی را نسبت به خشکسالی هواشناسی تعیین کرد.

به‌طور کلی، با توجه به این که شبکه پیزومتری نسبتاً قابل قبولی در آبخوان دشت شهرکرد وجود دارد، با طبقه‌بندی انجام شده در سطح آبخوان راحت‌تر می‌توان مناطق بحرانی‌تر آبخوان را برای مدیریت و کنترل شناسایی کرد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، طبقه یک و دو شامل مناطق شمالی و مرکزی و جنوب شرق آبخوان با توجه به شدت‌های محاسبه شده برای شاخص GRI ۴۸ ماهه وضعیت حادثتری

Shekari و همکاران (۲۰۱۷) در دشت شنیده و قره-بلاغ، همخوانی دارد.

روند نزولی تراز آب زیرزمینی در سال‌های اخیر حاکی از اثرپذیری عواملی غیر از خشکسالی چون برداشت بیش از حد مجاز برای مصارف شرب و کشاورزی، افزایش جمعیت، رونق صنعت و افزایش نیاز آب بخش‌های صنعتی است، به طوری که دشت شهرکرد به عنوان دشت ممنوعه عنوان شده است. بیان منفی پایدار آبخوان در سال‌های اخیر نه تنها مشکلاتی چون کاهش کیفیت آب و خشک شدن مراتع دشت را در پی داشته، بلکه در نواحی از دشت پدیده فرونشست مشاهده شده که اگر راهکاری برای نجات از این بحران اندیشیده نشود، در سال‌های آتی مرگ آبخوان را طی این پدیده به دنبال خواهد داشت. از جمله راهکارهای مدیریتی برای احیای دوباره آب‌های زیرزمینی دشت می‌توان به اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی در محل‌های مناسب از نظر تغذیه، ایجاد سد زیرزمینی، هدایت رواناب‌های ناشی از باران و ذوب برف به مناطق تغذیه آبخوان و نظارت جدی بر میزان برداشت چاه‌های سطح دشت اشاره کرد.

دوره آماری مورد نظر وجود داشت که در این بین سال‌های ۸۷-۸۶ با وجود تداوم ماه‌های خشک کمتر نسبت به دوره ۸۰-۷۷، شدیدترین دوره خشکسالی دشت بوده است.

نتایج حاصل از شاخص GRI نیز بیانگر دو دوره خشکسالی هیدروژئولوژی برجسته بوده که هیدروگراف شاخص‌های مذکور برای بیشتر پیزومترها شروع آن‌ها را از سال‌های ۷۹ و ۸۴ نشان می‌دهد. بر اساس شاخص GRI، آبخوان به سه محدوده در شمال، مرکز و جنوب غربی آبخوان تقسیم شد که نواحی شمالی و مرکزی آبخوان در وضعیت بحرانی‌تر به لحاظ افت تراز آب زیرزمینی بوده، نواحی خروجی دشت از وضعیت پایدارتری برخوردار است. همچنین، نتایج حاصل از همبستگی بین دو شاخص مد نظر، اثر خشکسالی هواشناسی را جز در مناطق خروجی، با تأخیر فاز زمانی در بخش‌های مختلف آبخوان نشان می‌دهد که با نتایج Mendicino و همکاران (۲۰۰۸) در منطقه کالابریا اسپانیا، Talebi و Esfandarani (۲۰۱۱) در دشت بهاباد یزد، Aleboali و همکاران (۲۰۱۶) در دشت کاشان، Davoodi و همکاران (۲۰۱۷) در دشت مهیار شمالی اصفهان و

منابع مورد استفاده

- Ahmadi Akhorme, M., A. Nohegar, M. Soleimani and M. Taie Semiromi. 2015. Evaluation of ground water drought using SWI and GRI indices in Marvdasht Kharame Aquifer, Fars. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 21: 105-118 (in Persian).
- Aleboali, A., R. Ghazavi and S.J. Sadatinejad. 2016. Study the effects of drought on groundwater resources using SPI Index, a case study: Kashan Plain. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5(10): 13-22 (in Persian).
- Bloomfield, J.P., B.P. Marchant and A.A. McKenzie. 2019. Changes in groundwater drought associated with anthropogenic warming. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3): 1393-1408.
- Chaharmahal and Bakhtiari Regional Water Company. 2007. The first phase studies of artificial nutrition in Shahrekord Plain. *Jamekar Sepahan Consulting Engineers Company*, Volume 3.
- Chaman Pira, G.R., Gh. Zehtabian, H. Ahmadi and A. Malekian. 2014. The effect of groundwater drought management in order to optimize utilization, case study: Elster Plain. *Journal of Engineering and Watershed Management*, 6(1): 10-20 (in Persian).
- Davoodi, E., H. Ghasemeieh, M. Soleimani Motlagh and M. Moeinzadeh. 2017. Spatial and temporal analysis of meteorological and groundwater droughts, a case study: Northern Mahyar Plain of Isfahan. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5(10): 13-22 (in Persian).
- Ezzine, H., A. Bouziane and D. Quasar. 2014. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in morocco using open short time series data. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 36-48.
- Imani, M. and A. Talebi Esfandarani. 2011. Evaluation of ground water table in Bahabad Plain using SPI and GRI. 4th Conference on Water Resources Management, Tehran, Amirkabir University of Technology (in Persian).
- Kao, S.C. and R.S. Govindaraju. 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 380: 121-134.

10. Kubicz, J. and B. Bağ. 2019. The reaction of groundwater to several months' meteorological drought in Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(1): 187-195.
11. Lalezari, R. 2008. Evaluate the effect of nutrition with sewage on nitrate discharge using MT3D Model on Shahrekord Aquifer. MSc Thesis. Shahrekord Univesity, 145 PAGES.
12. Loukas, A. and L. Vasilides. 2004. Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly region, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 719-731.
13. Mahmoudi, A.A. and R. Mirabbasi Najafabadi. 2014. Compare the performance of two indices SPI and modified SPI in recognition of drought events, a case study: Dehdasht City, Kohgiluyeh and Boyer Ahmad. 2nd National Conference on Water Crisis (Climate Change, Water and the Environment), Shahrekord, Shahrekord University (in Persian).
14. Majidi, A., R. Mirabbasi Najafabadi, M. Radfar and S. Marofi. 2015. Analysis of meteorological drought characteristics in Qarechay Basin. 3rd National Conference on Scientific and Student Associations of Agricultural and Natural Resources Fields. Tehran, College of Agriculture and Natural Resources of Tehran University (in Persian).
15. McKee, T.B., N.J. Doeskin and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, January 17-22, Anaheim, California, 179-184.
16. 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*, 357: 282-302.
17. Mirabbasi, R., A. Fakheri-Fard and Y. Dinpashoh. 2012. Bivariate drought frequency analysis using the Copula method. *Theoretical and Applied Climatology*, 108: 191-206.
18. Mirabbasi Najafabadi, R., A. Fakheri-Fard, Y. Dinpashoh and S. Eslamian. 2013. Long-term monitoring of Urmia droughts using JDA. *Journal of Agricultural Science (Water and Soil)*, 23:87-107 (in Persian).
19. Pourmohammadi, S., M.T. Dasturani, H. Jafari, E. Massah Bavani, M. Gudarzi, F. Bagheri and M.H. Rahimian. 2018. Evaluation of meteorological and hydrogeological droughts on the balance of groundwater of Tuyserkhan Plain. *Journal of Engineering and Watershed Management*, 9(1): 46-57 (in Persian).
20. Radfar, M. 2009. Hydrogeological and hydrogeochemical characterization and modelling of the tertiary-quaternary aquifer system in shahrekord Plain, Iran. PhD Theses, Tehran University, 519 pages.
21. Roshan, S.H. and M. Habibnejad Roshan. 2018. Monitoring of temporal and spatial variation of groundwater drought using GRI and SWI indices, case study: Sari-Neka Plain. *Journal of Watershed Management Research*, 9(17): 269-279 (in Persian).
22. Samadi, R., J. Behmanesh and H. Rezaei. 2015. Investigating the trend of groundwater level changes, a case study: Urmia Plain. *Journal of Soil and Water Protection Research*, 22(4): 67-84 (in Persian).
23. Shakiba, A.R., B. Mirbagheri and A. Kheiri. 2010. Drought analysis using SPI Index and its effects on groundwater resources in east of Kermanshah. *Journal of Geography*, 8(25): 104-124 (in Persian).
24. Shekari, M.R., S.J. Sadatinejad and A.A. Vali. 2017. Relationship between meteorological and hydrogeological drought in an arid area, a case study of Sheshdeh and Gharebolagh plains. *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 6(14): 79-90 (in Persian).
25. Shiau, J.T. 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, 20: 795-815.
26. Shiau, J.T. and R. Modarres. 2009. Copula based drought severity-duration frequency analysis in Iran. *Meteorological Applications*, 16: 481-489.
27. Van Lanen, H.A.J. and E. Peters. 2000. Definition, effects and assessment of groundwater droughts. *Drought and Drought Mitigation in Europe*, 2: 49-61.