

تحلیل رفتار پیزومترها و تعیین تأخیر زمانی تأثیر بارندگی بر نوسانات عمق آب زیرزمینی آبرفت شیراز با شاخص‌های SPI و GRI

علیرضا احدی و مسعود نوشادی^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱)

چکیده

بخش عمده‌ای از تأمین آب شرب و کشاورزی، دو نیاز اساسی بشر از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. پیش‌بینی، پایش، بررسی عملکرد و برنامه‌ریزی این منبع حیاتی نیازمند مدل‌سازی است. تأخیر زمانی نوسانات عمق آب زیرزمینی با بارندگی یکی از داده‌های ضروری مدل‌ها است. تحلیل رفتار پیزومترها با استفاده از روش همبستگی متقاطع پیرسون بین شاخص‌های SPI و GRI در آبرفت دشت شیراز به‌منظور تعیین تأخیر زمانی مذکور هدف پژوهش حاضر است. نتایج نشان داد که رفتار ۸۶/۲ درصد از پیزومترها شبیه یکدیگر است و در ۷۹/۳ درصد از پیزومترها عمق آب زیرزمینی یک ماه پس از بارندگی کاهش نشان می‌دهد. بهترین ضریب همبستگی بین شاخص‌های موصوف در امتداد محور جنوب غربی به سمت شمال شرقی دشت وجود دارد. به‌علت شیب شمالی-جنوبی دشت، آبرفت شمالی از ضریب همبستگی بهتری نسبت به بخش جنوبی برخوردار است. منطقه مرکزی دشت دارای بیشترین ضریب همبستگی است و حداکثر ضرایب همبستگی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه رخ می‌دهد. همچنین از سال ۱۳۸۳ به بعد به‌دلیل کاهش نزولات جوی دشت شیراز، شاخص SPI به‌سمت خشکسالی میل کرده، اگرچه روند معنی‌دار نبوده است. اما شاخص GRI از این روند تبعیت نکرده و به‌طور معنی‌داری خشکسالی هیدرولوژیک حاد را نشان می‌دهد که علت آن برداشت بیش از تغذیه، از آبخوان آبرفتی این دشت است.

واژه‌های کلیدی: تأخیر زمانی، شاخص‌های SPI و GRI، همبستگی متقاطع پیرسون، نوسانات عمق آب زیرزمینی

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

*: مسئول مکاتبات: noshadi@shirazu.ac.ir

مقدمه

آب‌های زیرزمینی شیرین با تخصیص ۳۰ درصد از حجم کل آب شیرین دنیا، به دلیل ترکیبات ثابت شیمیایی، دمای ثابت، ضریب آلودگی پایین و سطح اطمینان بالاتر، بزرگ‌ترین و پایدارترین منبع تأمین آب شرب ۵۰ درصد از جمعیت جهان و بیش از ۸۰ درصد از ساکنین نواحی خشک و نیمه‌خشک است و نقش قابل توجهی در توسعه اقتصادی- اجتماعی و بهداشت عمومی دارد (۲ و ۱۰). دخالت‌های انسانی، تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی، تغییر نظام بارش و رخداد خشکسالی‌های ممتد و متوالی اهمیت پایش این منبع حیاتی را مضاعف کرده است. فرایند خشکسالی پس از طوفان، به‌عنوان مخرب‌ترین پدیده طبیعی شناخته می‌شود، این فرایند به‌ترتیب در چهار مرحله هواشناسی، آب‌شناسی، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی رخ می‌دهد که هر مرحله با یک تأخیر زمانی پی‌آمد مرحله بعد است. سه مرحله اول ماهیتی فیزیکی داشته و مرحله چهارم در اثر فزونی تقاضای آب در برابر عرضه آن حادث می‌شود. از آنجایی که وضعیت کمی بارش در مرحله اول و پاسخ منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در مرحله دوم مطرح می‌شود، مدل‌سازی و برنامه‌ریزی منابع آب به‌شدت به تعیین تأخیر زمانی مذکور وابسته است.

وردی‌پورآزاد و همکاران (۱۱) به بررسی اثر خشکسالی هواشناسی بر تغییرات عمق آب زیرزمینی دشت مشهد با استفاده از شاخص‌های GRI و SPI پرداختند. نتایج حاکی از عدم همبستگی بالابین GRI با SPI بود، اما در مقیاس طولانی‌مدت سه ساله همبستگی آنها بهتر بود. به‌عبارت دیگر خشکسالی‌های هواشناسی با تأخیر فاز زمانی و بعد از سه سال بیشترین تأثیر خود را بر منابع آب زیرزمینی دشت می‌گذارند. همچنین در مقایسه فصول، زمستان نسبت به فصول دیگر به‌دلیل اینکه اغلب بارش در آن به‌صورت برف بوده و در تغذیه آب‌های زیرزمینی بیشترین تأثیر را داشته، دارای همبستگی بالاتری است. عباسی و همکاران (۱) تغییرات زمانی و مکانی تراز آب‌زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و رابطه آن با خشکسالی را

بررسی کردند و ضریب همبستگی بین شاخص GRI و SPI بدون اعمال تأخیر زمانی و با ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴ و ۴۸ ماه تأخیر را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که بیشترین مقادیر ضرایب همبستگی مثبت معنی‌دار بین SPI-24 و GRI-48 با تأخیر ۴۸ ماهه بوده و در ۸/۸۹ درصد از چاه‌ها GRI با SPI با تأخیر ۴۸ ماهه همبستگی مثبت معنی‌دار دارند. بنابراین خشکسالی هیدروژئولوژیک با تأخیر زمانی نسبت به خشکسالی هواشناسی اتفاق افتاده است.

مندیسینو و سناتور (۸) در پژوهشی، شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) را برای مناطق کالابریا با اقلیم مدیترانه‌ای برای دوره ۴۵ ساله به‌کار بردند و با SPI منطقه مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که همبستگی GRI و SPI در مقیاس زمانی بالاتر مناسب‌تر است و ویژگی‌های سنگ‌شناسی حوضه بر GRI مؤثر بوده است و باعث تأخیر GRI نسبت به SPI می‌شود. ضمن آنکه GRI نسبت به SPI در پیش‌بینی وضعیت منابع آب‌زیرزمینی عملکرد بهتری دارد.

خان و همکاران (۵) در بررسی رابطه بین خشکسالی و عمق آب زیرزمینی در اراضی یکی از دشت‌های استرالیا به این نتیجه رسیدند که بین SPI و عمق آب زیرزمینی کم عمق منطقه ارتباطی قوی وجود دارد.

چمن‌پیرا و همکاران (۴) تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی به‌منظور مدیریت بهینه بهره‌برداری (مطالعه موردی: دشت الشتر) را بررسی کردند. تحلیل‌های آماری نشان داد که SPI در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه بدون تأخیر زمانی با میانگین تراز آب زیرزمینی و GRI در سطح یک درصد رابطه معنی‌داری دارد و دارای بیشترین ضریب همبستگی است که حاکی از تأثیرگذاری خشکسالی بر آب زیرزمینی دشت الشتر است. رابطه رگرسیون بین تراز متوسط سطح ایستابی و SPI-24 نشان داد که ۴/۶۴ درصد از واریانس تراز متوسط سطح ایستابی تحت تأثیر SPI-24 و ۶/۳۵ درصد متأثر از سایر عوامل است.

لی‌لاروبان و همکاران (۶) بررسی رابطه شاخص‌های خشکسالی و تراز آب‌های زیرزمینی را انجام دادند. نتایج نشان

در دشت شیراز از شمال به سمت مرکز و جنوب به ترتیب با مقادیر ۱۰۰-۸۰ متر، ۲۵۰ متر و بیش از ۵۰۰ متر گزارش شده است. واریزه‌های ارتفاعات مشرف به دشت و رسوبات رودخانه‌های خشک و چنارراهدار یک آبخوان آزاد آبرفتی غنی با وسعت ۲۳۸ کیلومترمربع و ضخامت متوسط ۳۰۰ متر ایجاد کرده است. در انجام پژوهش حاضر اطلاعات مورد نیاز شامل بارندگی ماهانه ۹ ایستگاه هواشناسی در محدوده منطقه مورد مطالعه و نوسانات تراز آب زیرزمینی ۲۹ پیژومتر در دشت شیراز در سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۷۲ به شرح شکل (۱) از سازمان هواشناسی و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان فارس دریافت شد که با عنایت به کامل بودن و دقت داده‌ها، هیچ‌گونه بازسازی و تصحیح صورت نپذیرفت.

روش پژوهش

هدف از پژوهش حاضر تعیین تأخیر زمانی نوسانات عمق آب زیرزمینی آبرفت شیراز با بارندگی از طریق ارتباط خشکسالی آب‌شناسی و هواشناسی به کمک شاخص‌های SPI و GRI است. از آنجایی که ویژگی‌های لایه‌های زمین‌شناسی در هر منطقه تأثیر بسزایی در ارتباط بین شاخص‌های مذکور دارند متعاقب آن می‌توان دشت شیراز را در گروه‌های مختلف زمانی از لحاظ واکنش عمق آب زیرزمینی به باران دسته‌بندی کرد.

شاخص‌های SPI و GRI

شاخص بارش استاندارد شده یا SPI دارای مزیت انتخاب مقیاس زمانی منعطف است. در پژوهش حاضر هشت میانگین متحرک ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه به‌عنوان مقیاس زمانی در نظر گرفته شده است. این زمان‌ها به‌منظور تشریح خشکسالی‌های هواشناسی، آب‌شناسی و کشاورزی اعداد مناسبی هستند. مقادیر SPI با روش اسدی و همکاران (۳) محاسبه شده است. در این روش در ابتدا توزیع گاما تجمعی به روش مک‌کی محاسبه شده است. این توزیع به‌عنوان تابع فراوانی یا تابع چگالی احتمال در نظر گرفته می‌شود.

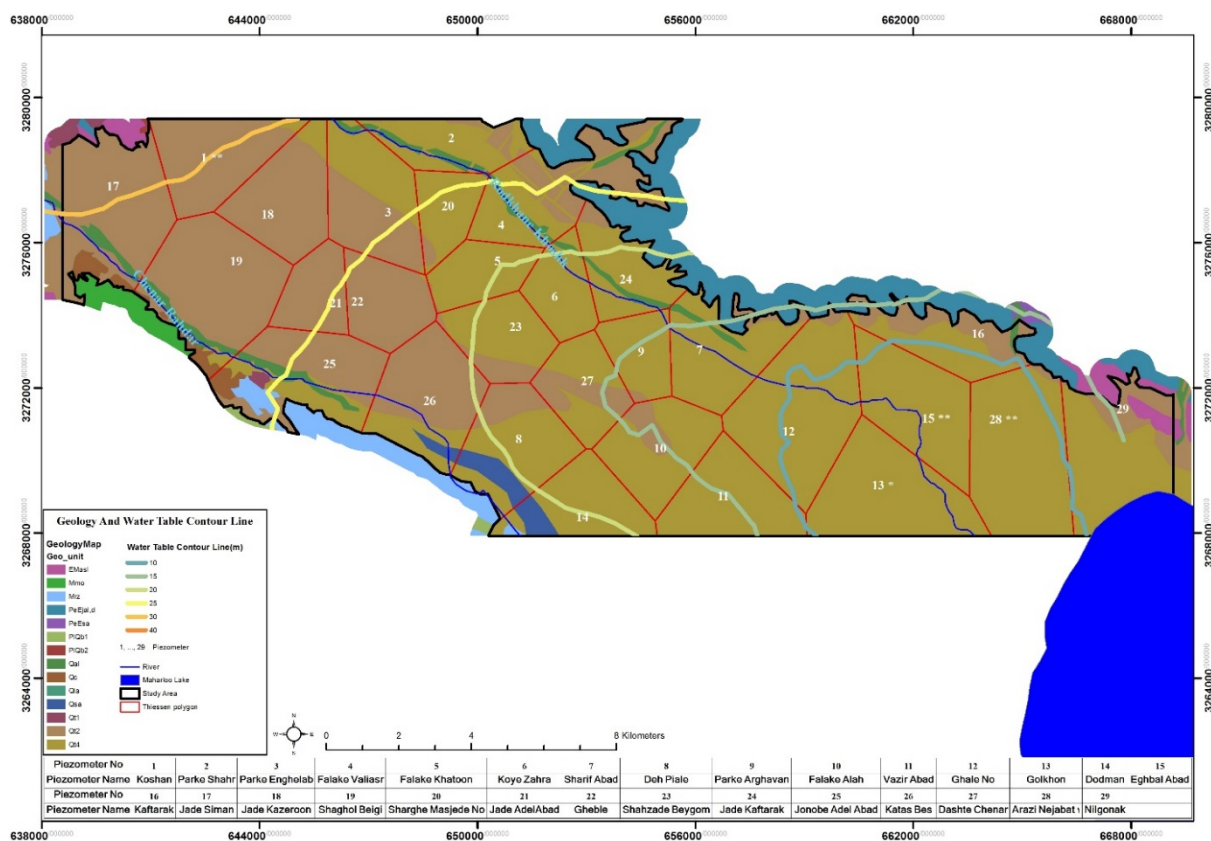
داد SPI-24 در خلال خشکسالی با تراز آب زیرزمینی رابطه خوبی دارد. برای ۱۷ چاه از ۳۲ حلقه چاه، SPI-24 بهترین همبستگی را نشان داد و برای ۱۲ حلقه از ۳۲ حلقه، SPI-24 ضریب همبستگی ۰/۶- و یا قوی‌تری داشت و برای چاه‌های دیگر، همبستگی منطقی خوبی وجود داشت.

حدود ۷۸ درصد از تأمین آب شرب کلان شهر شیراز از منابع زیرزمینی کارست و آبرفت صورت می‌پذیرد. منابع آبرفتی به دلیل دبی بالا، نزدیکی به مبادی مصرف، سطح ایستابی بالا و در پی آن انرژی موردنیاز کمتر، سهم بسزایی در توسعه شهری از نظر شرب، صنعت و فضای سبز ایفا می‌کنند و کمبود آن چالش‌های بزرگ اقتصادی-اجتماعی را به دنبال خواهد داشت. بنابراین در پژوهش حاضر رفتار پیژومترها و تأخیر زمانی نوسانات عمق آب زیرزمینی آبرفت شیراز با بارندگی به‌منظور استفاده از آن در مدل‌سازی و برنامه‌ریزی‌های آتی با تکیه بر شاخص‌های SPI و GRI مورد محاسبه و تحلیل قرار گرفته است. نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین، استفاده از منحنی‌های رفتاری مقادیر ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI در تأخیرهای زمانی متفاوت به‌منظور طبقه‌بندی عملکرد پیژومترهای دشت است.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه و داده‌های مورد استفاده

شهر شیراز با ۱۱ منطقه مستقل شهری و مساحتی بالغ بر ۲۴ هزار هکتار در شهرستان شیراز و بخش مرکزی استان فارس، در عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۲ دقیقه جنوبی تا ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۶ دقیقه غربی تا ۵۲ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی با ارتفاع ۱۴۸۶ تا ۱۶۷۰ متر از سطح دریا در منطقه کوهستانی زاگرس واقع شده است و آب و هوای معتدل دارد. سنگ کف دشت شیراز در بخش‌های شمال شرقی، مرکز و جنوب از سازند آسماری-جهرم و در بخش شمال غربی از سازند رازک تشکیل شده است. بر اساس مطالعات ژئوالکترونیک و لوگ چاه‌های موجود، عمق سنگ کف



شکل ۱. نقشه زمین شناسی، جانمایی پیزومترها و خطوط هم عمق آب زیرزمینی آبرفت دشت شیراز در محدوده مورد مطالعه

آزمون ناپایداری من کندال دنباله‌ای

آزمون من کندال جزء متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ناپارامتریک تحلیل روند سری‌های زمانی به‌شمار می‌رود. با این روش تغییرات داده‌ها شناسایی، نوع و زمان آن مشخص می‌شود. این آزمون ابتدا توسط من (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. آماره آزمون من کندال (S) برای سری داده‌ها با مجموع علامت‌های تفاضل‌های متوالی، با استفاده از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آید و با میانگین صفر و واریانس یک محاسبه شده در رابطه (۴) به‌طور مجانبی دارای توزیع نرمال است (هیرش و اسلاک، ۱۹۸۴).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k), \quad \forall 1 < i < j < n \quad (2)$$

که X_j مقدار داده زام، n تعداد داده‌ها و $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت است.

$$G(x_k) = \int_0^{x_k} g(x_k) dx_k = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^{x_k} t^{\alpha-1} e^{-t/\beta} dt \quad (1)$$

در این رابطه، علائم α و β با مقادیر بزرگ‌تر از صفر به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس بود و توسط تقریب تورن (Thorn) تخمین زده می‌شوند. x مقدار باران ماهانه بر حسب میلی‌متر با مقیاس زمانی (k) است. $\Gamma(\alpha)$ به تابع گاما اشاره دارد و وقتی $x_k = 0$ باشد توزیع تجمعی گاما و احتمال تجمعی تعریف نشده‌اند. محاسبات SPI همچنین شامل تطبیق تابع چگالی احتمال گاما در داخل توزیع فراوانی باران برای هر ایستگاه است. همچنین مقدار ماهانه عمق آب زیرزمینی به جای مقدار x قرار گرفت و کلیه محاسبات برای شاخص منبع آب زیرزمینی یا GRI انجام شد و در نهایت با عنایت به ماهیت معادلات مورد استفاده شاخص‌های مذکور به توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف از معیار یک انتقال داده شدند و بر اساس جدول (۱) طبقه‌بندی شدند.

جدول ۱. طبقه‌بندی خشکسالی و ترسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

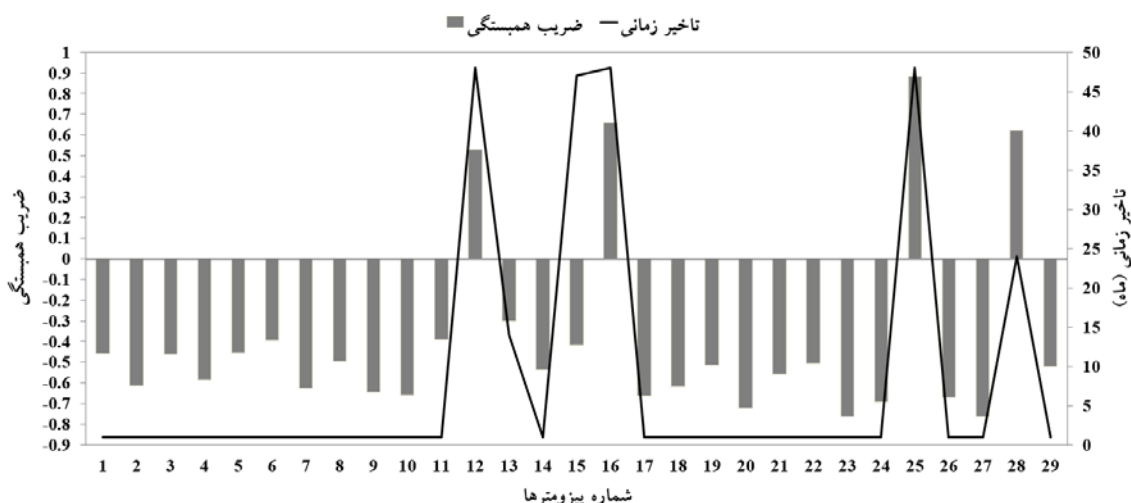
شاخص	شاخص بارش استاندارد شده	شاخص منبع آب زیرزمینی
ترسالی حاد	بیشتر از ۲	کمتر از ۲-
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵- تا ۱/۹۹-
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹	۱- تا ۱/۴۹-
ترسالی خفیف	۰/۵ تا ۰/۹۹	۰/۵- تا ۰/۹۹-
نرمال	۰/۴۹ تا ۰/۴۹	۰/۴۹- تا ۰/۴۹
خشکسالی خفیف	۰/۵- تا ۰/۹۹-	۰/۵ تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	۱- تا ۱/۴۹-	۱ تا ۱/۴۹
خشکسالی شدید	۱/۵- تا ۱/۹۹-	۱/۵ تا ۱/۹۹
خشکسالی حاد	کمتر از ۲-	بیشتر از ۲

شود. در پردازش سیگنال، معمولاً برای تخمین انتقال قدرت بین ورودی و خروجی یک سیستم خطی استفاده می‌شود. اگر هر دنباله یا نمونه‌ای قابل توجه از سیگنال‌ها نماینده کل باشند (Ergodic) و سیستم عملکرد خطی داشته باشد، می‌توان آن را برای تخمین رابطه بین ورودی و خروجی استفاده کرد. از آنجایی که سری زمانی نوسانات سطح آب زیرزمینی یک سیگنال خروجی از سیگنال ورودی باران است که با ترسیم منحنی‌های مقدار وابستگی بین شاخص‌های معرف در مقیاس‌های زمانی یکسان و تأخیرهای زمانی متفاوت، تأخیر مذکور که یک آستانه زمانی است و مقدار وابستگی بعد از آن به بالاترین سطح خود می‌رسد، قابل تعیین است. فاز طیفی متقاطع رابطه بین دو سری زمانی را به‌عنوان تابعی از فرکانس بیان می‌کند. پیک‌های قابل توجهی در یک فرکانس مشابه در دو سری زمانی وجود دارد که معمولاً پریودیک است و اختلاف فاز دارند. با این دیدگاه می‌توان سری‌های زمانی باران و نوسانات سطح آب زیرزمینی را در قالب اختلاف فاز در مقیاس‌های زمانی یکسان با تأخیرهای زمانی متفاوت ترسیم و تأخیر زمانی را از روی نوسانات مشابه شاخص‌های معرف دو سری زمانی مشاهده کرد. چگالی طیفی متقاطع، سیگنال‌های دو منبع مختلف را با توجه به دامنه‌ها و تفاوت‌های فیزیکی دو سیگنال با یکدیگر در بعد زمانی مقایسه می‌کند. بنابراین اگر

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1, & \text{if } (X_j - X_k) > 0 \\ 0, & \text{if } (X_j - X_k) = 0 \\ -1, & \text{if } (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{18} \left(n(n-1)(2n-5) - \sum t_m(t_m-1)(2t_m+5) \right) \quad (4)$$

با استفاده از چهار روش همبستگی متقاطع (Cross Correlation)، وابستگی طیفی متقاطع (Cross Spectral Coherence)، فاز طیفی متقاطع (Cross Spectral Phase) و چگالی طیفی متقاطع (Cross Spectral Density) که در ادامه به‌طور اختصار بیان شده‌اند امکان محاسبه تأخیر زمانی بین شاخص‌های SPI و GRI میسر است. ضریب همبستگی، تنها رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد و همبستگی متقاطع اندازه شباهت دو سری زمانی به‌عنوان یک تابع از جابه‌جایی یکی نسبت به دیگری را بیان می‌کند. با توجه به شباهت سری‌های زمانی باران و نوسانات سطح آب زیرزمینی که همبستگی‌های آنها دارای تأخیر زمانی است، اگر شاخص‌های معرف (SPI و GRI) در مقیاس‌های زمانی یکسان با تأخیرهای زمانی متفاوت مقادیر همبستگی متقاطع‌شان محاسبه شود اختلاف زمانی که دارای بیشترین همبستگی است تأخیر زمانی مورد نظر است. در پردازش سیگنال، ارتباط، وابستگی یا چسبندگی (Coherence) بین دو سیگنال یک رابطه آماری است که می‌تواند برای بررسی روابط علت و معلولی بین دو سیگنال یا مجموعه‌ای از داده‌ها استفاده



شکل ۲. ضریب همبستگی و تأخیر زمانی در پیزومترهای دشت شیراز

شد. نتایج نشان می‌دهد که در ۲۳ عدد از ۲۹ پیزومتر (۷۹/۳ درصد) تأخیر زمانی یک‌ماهه است (شکل ۲). این بدین معنی است که یک ماه پس از بارندگی به دلیل منفی بودن مقدار ضریب همبستگی (وجود رابطه معکوس) عمق آب زیرزمینی با افزایش بارندگی کاهش می‌یابد. اما در دو پیزومتر (۶/۹ درصد) به شماره‌های ۱۳ و ۱۵ این عمل به ترتیب با تأخیر زمانی ۱۴ و ۴۷ ماهه رخ می‌دهد و در نهایت در چهار پیزومتر باقیمانده (۱۳/۸ درصد) به شماره‌های ۱۲، ۱۶، ۲۵ و ۲۸ به دلیل مثبت بودن ضریب همبستگی (وجود رابطه مستقیم) عمق آب زیرزمینی به ترتیب در سه پیزومتر اول با تأخیر زمانی ۴۸ ماهه و در پیزومتر ۲۸ با تأخیر زمانی ۲۴ ماهه افزایش نشان می‌دهد (شکل ۲). همچنین نتایج محاسبات نشان می‌دهد در کلیه پیزومترها با افزایش مقیاس زمانی از ۱ به ۴۸ ماه ضریب همبستگی بین شاخص‌ها افزایش می‌یابد و حداکثر ضریب همبستگی در تمامی پیزومترها به جز پیزومترهای ۱۲، ۱۹ و ۲۲ (با مقیاس زمانی ۲۴ ماهه) در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه حادث شده است.

هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی دشت شیراز

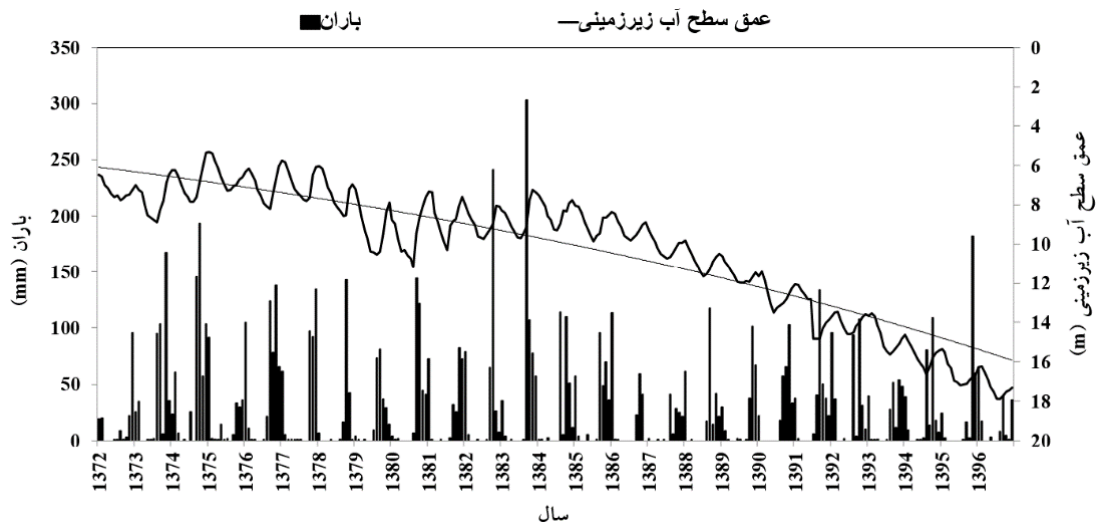
بر اساس موقعیت پیزومترهای آبخوان آبرفتی دشت شیراز، پلی‌گون تیسن پیزومترها ترسیم شد (شکل ۱). بر اساس این

چگالی طیفی مقاطع سیگنال ورودی باران و سیگنال مشتق شده نوسان سطح آب زیرزمینی در مقیاس‌های زمانی مساوی با اختلاف فازهای متفاوت ترسیم شود، سیگنال‌ها تا یک آستانه از اختلاف فاز چگالی ثابت دارند اما بعد از آستانه، چگالی با یک رشد تقریباً عمودی، خود را به سطح جدید رسانده و منحنی با شیب تقریباً صفر ادامه می‌یابد این نقطه به عنوان تأخیر زمانی در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر از روش همبستگی مقاطع پیرسون استفاده شده است.

در ابتدا داده‌های باران برای محاسبه شاخص SPI و داده‌های نوسانات عمق آب زیرزمینی برای محاسبه شاخص GRI در Notepad وارد و سپس فایل مذکور در نرم‌افزار DIP بازخوانی شد و شاخص‌های SPI و GRI از منوی مربوطه، محاسبه و از طریق منوی View به نرم‌افزار Excel انتقال داده شده است و در نهایت هر دو شاخص با کمک نرم‌افزار Minitab17 با ایجاد تأخیر زمانی بین شاخص‌ها، همبستگی پیرسون و P-value هر گروه از پیزومترها محاسبه شد.

نتایج و بحث

به‌منظور تحلیل رفتار پیزومترها در تأخیرهای زمانی و مقیاس‌های زمانی متفاوت، ضریب همبستگی پیرسون (R^2) و P-value، شاخص SPI در برابر GRI، برای هر پیزومتر محاسبه



شکل ۳. هیدروگراف واحد آبخوان دشت شیراز

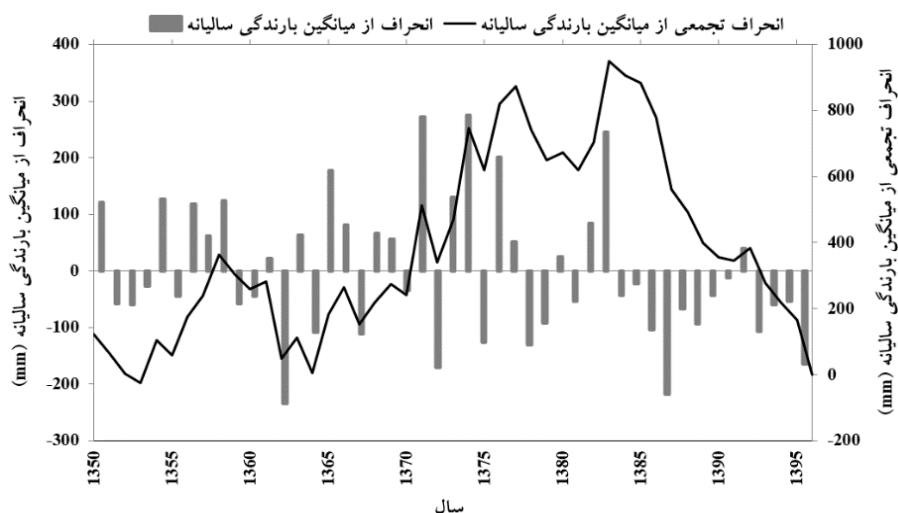
بارندگی، خشکسالی و ترسالی‌های هواشناسی و

هیدرولوژیک دشت شیراز

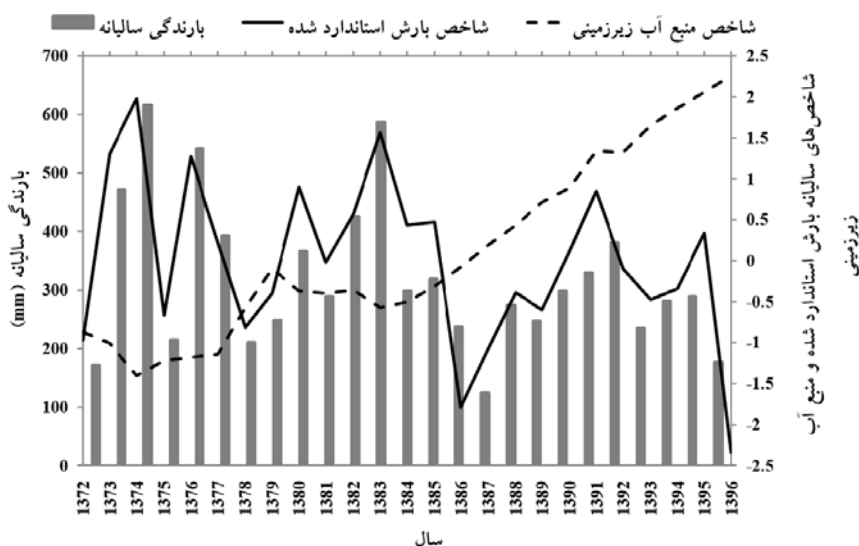
در شکل (۴) به کمک میانگین بارندگی بلندمدت (۴۷ ساله) شیراز با مقدار $340/72$ میلی‌متر، انحراف از میانگین و مقدار تجمعی انحراف از میانگین باران به صورت سالیانه محاسبه شده است. در این شکل، چهار سیکل پیاپی از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۶ به ترتیب شامل پنج سال (۱۳۵۸-۱۳۵۲) با مقدار تجمعی انحراف از میانگین باران صعودی، شش سال (۱۳۶۴-۱۳۵۸) نزولی، ۱۹ سال (۱۳۸۳-۱۳۶۴) صعودی و ۱۳ سال (۱۳۹۶-۱۳۸۳) نزولی دیده می‌شود. در طی ۴۷ سال به ترتیب ۲۰ (۴۲/۵۵ درصد) و ۲۷ (۵۷/۴۵ درصد) سال و در طی سال‌های ۷۲ تا ۹۶ (دوره مورد پژوهش) به ترتیب ۸ (۳۲ درصد) و ۱۷ (۶۸ درصد) سال باران بیشتر و کمتر از میانگین وجود داشته است که این موضوع نشان از ورود به دوره خشکسالی از سال ۱۳۸۳ دارد.

شکل (۵) نشان می‌دهد که طی سال‌های آماری دوره مورد مطالعه به ترتیب با ۱، ۱، ۱ و ۴ سال خشکسالی هواشناسی حاد (۴ درصد)، شدید (۴ درصد)، متوسط (۴ درصد) و خفیف (۱۶ درصد) و ۱۱، ۳، ۲ و ۲ سال به ترتیب شرایط نرمال (۴۴ درصد)، ترسالی خفیف (۱۲ درصد)، متوسط (۸ درصد) و

پلی‌گون، وزن مساحت اطراف هریک از پیزومترها مشخص و هیدروگراف معرف آبخوان در شکل (۳) ترسیم شده است. همان‌طور که در هیدروگراف دیده می‌شود روند شیب منحنی هیدروگراف از سال ۱۳۷۴ به بعد به دلیل کاهش نسبی میزان بارش نزولی است و از سال ۱۳۸۴ به بعد به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی با شدت بیشتری افزایش داشته است به طوری که عمق آب زیرزمینی از $5/34$ متر در مدت ۲۵۹ ماه به $17/87$ متر با نرخ سالانه $0/58$ متر افزایش یافته است. تحلیل ۲۹ هیدروگراف پیزومترهای موجود در دشت نشان می‌دهد که به ترتیب حداقل و حداکثر عمق سطح آب زیرزمینی با مقادیر صفر و $51/32$ متر مربوط به پیزومترهای شماره ۱۱ و ۱۷، کمترین و بیشترین دامنه نوسانات عمق سطح آب زیرزمینی ۴ و $30/45$ متر است که به ترتیب در پیزومترهای شماره ۱۳ و ۱۱ رخ داده است. کمینه و بیشینه واریانس عمق آب با مقادیر $1/01$ و $7/22$ متر به ترتیب مربوط به پیزومترهای شماره ۲۵ و ۶ است. مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه دامنه نوسانات عمق سطح آب زیرزمینی در پیزومتر معرف آبخوان به ترتیب $5/34$ ، $10/33$ و $17/87$ بوده و کمینه و بیشینه واریانس آن $3/27$ و $12/53$ متر است.



شکل ۴. انحراف از میانگین و مقدار تجمعی انحراف از میانگین بارندگی سالیانه در حوضه آبریز شیراز



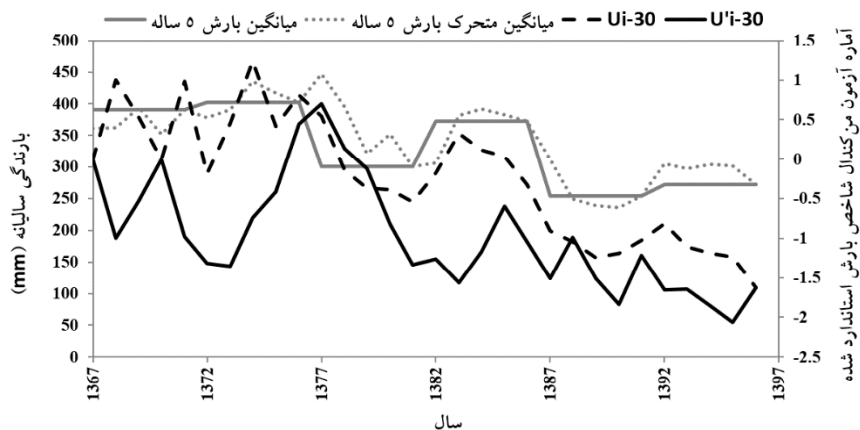
شکل ۵. شاخص‌های بارش استاندارد شده و منبع آب زیرزمینی و مقدار بارندگی سالیانه در حوضه آبریز شیراز

هیدرولوژیک در سال ۹۶ اتفاق افتاده است. هیدروگراف معرف دشت نیز بر این موضوع تأکید دارد.

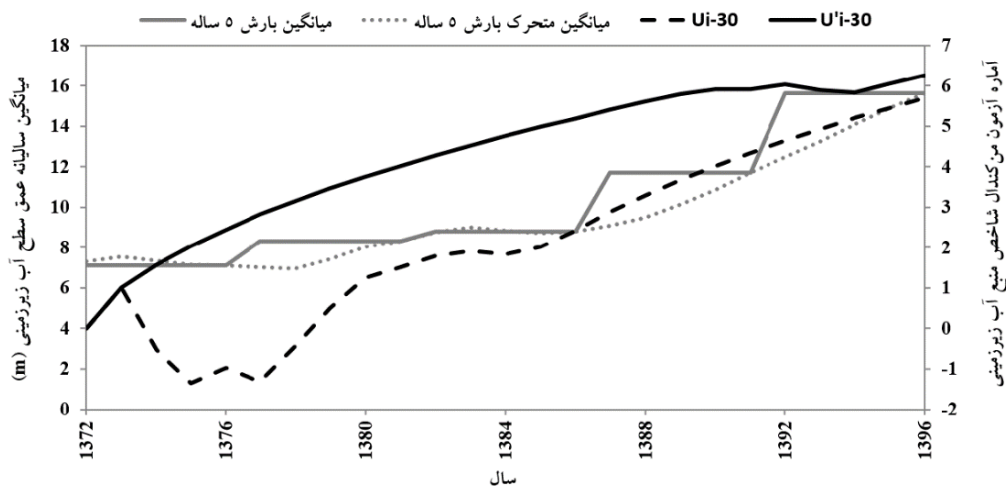
روندهای خشکسالی و ترسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک در دشت شیراز

آماره آزمون من‌کنдал شاخص SPI و باران سالانه طی سال‌های مورد مطالعه در شکل (۶) ترسیم شده است. در این شکل دو منحنی U_i و U'_i (منحنی‌های پیش‌رو و پس‌رو آماره من‌کنдал

شدید (۸ درصد) رخ داده است. شدیدترین ترسالی هواشناسی در سال ۷۴ و حادترین خشکسالی هواشناسی در سال ۹۶ اتفاق افتاده است. همچنین طی دوره مذکور به ترتیب با ۱، ۲، ۲ و ۸ سال خشکسالی هیدرولوژیک حاد (۴ درصد)، شدید (۸ درصد)، متوسط (۸ درصد) و خفیف (۸ درصد) و ۹، ۴ و ۵ سال به ترتیب شرایط نرمال (۳۶ درصد)، خفیف (۱۶ درصد) و ترسالی متوسط (۲۰ درصد) رخ داده است. بزرگ‌ترین ترسالی متوسط هیدرولوژیک در سال ۷۴ و حادترین خشکسالی



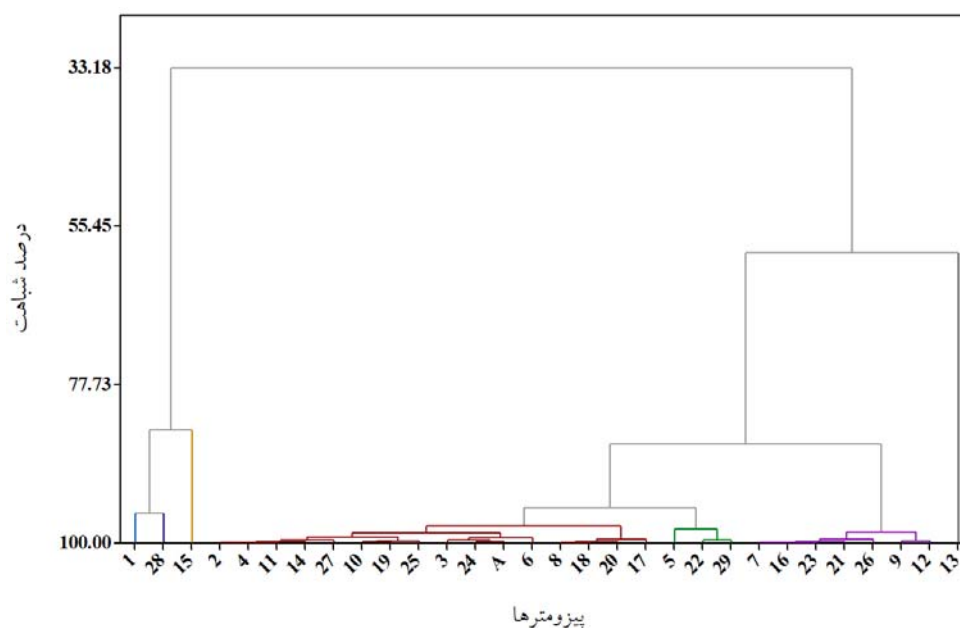
شکل ۶. آماره آزمون من کندال شاخص بارش استاندارد شده



شکل ۷. آماره آزمون من کندال شاخص منبع آب زیرزمینی

آماره من کندال روند شاخص (GRI) یکدیگر را در سال ۱۳۷۴ قطع کردند، اما به دلیل اینکه مقدار U_i بزرگتر از $-1/96$ است سری در این محدوده تصادفی بوده و روند خاصی وجود ندارد، منحنی U_i تا سال ۱۳۷۹ به مدت پنج سال وضعیت کاهشی و پس از آن حالت افزایشی داشته است و به دلیل خروج منحنی از دامنه $+1/96$ از سال ۱۳۸۳ به بعد در سطح پنج درصد روند افزایشی معنی داری وجود دارد که این موضوع حاکی از عدم تبعیت روند خشکسالی هیدرولوژیک از خشکسالی هواشناسی است. به عبارت دیگر خشکسالی هیدرولوژیک به دلیل دخالت انسانی در برداشت بی‌رویه از منابع آبی تغییر روند غیر طبیعی و خارج از قاعده‌ای داشته است.

روند شاخص (SPI) یکدیگر را در شش نقطه قطع کرده‌اند ولی فقط در سال‌های ۶۷، ۷۷، ۸۰ و ۸۸ با توجه به تغییرات متوسط پنج ساله باران، چهار تغییر روند هواشناسی به ترتیب با وضعیت افزایشی، کاهشی، افزایشی و کاهشی در منحنی U_i اتفاق افتاده است هر چند که به دلیل عدم خروج منحنی از دامنه $-1/96$ تا $+1/96$ در سطح پنج درصد روند معنی دار نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روند خشکسالی هواشناسی به‌طور طبیعی رخ داده و هیچ تغییر خاص و خارج از قاعده‌ای به‌وجود نیامده است. اما در شکل (۷) که نشان‌دهنده آماره آزمون من کندال شاخص GRI و باران سالانه طی سال‌های مورد مطالعه است، دو منحنی U_i و U'_i (منحنی‌های پیش‌رو و پس‌رو



شکل ۸. نمودار دندروگرام پیژومترهای دشت شیراز

جدول ۲. مقدار ویژه شش مؤلفه اول ضریب همبستگی بین شاخص‌های بارش استاندارد شده و منبع آب زیرزمینی

مؤلفه‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مقدار ویژه	۲۴/۹۳	۳/۱۷۶	۰/۷۲۲	۰/۱۳۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۹
درصد	۰/۸۶	۰/۱۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰
درصد تجمعی	۰/۸۶	۰/۹۶۹	۰/۹۹۴	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱

دسته‌بندی پیژومترها

به منظور دسته‌بندی پیژومترها از روش‌های خوشه‌بندی (Clustering) و آنالیز مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis) استفاده شده است و در آخر به کمک شکل توابع ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI نسبت به زمان تأخیر دسته‌بندی انجام شده است.

روش خوشه‌بندی

در شکل (۸) پیژومترها بر اساس ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI در تأخیرهای زمانی متفاوت و مقیاس زمانی که بیشینه مقدار همبستگی در آن رخ داده، به روش Complete-Link با اندازه فاصله اقلیدسی خوشه‌بندی شده‌اند. پیژومترها در سطح ۸۴/۱۷ درصد شباهت، به سه گروه اصلی

شامل پیژومتر ۱۳ در گروه (۱) با علامت * مشخص شده در شکل (۱)، پیژومترهای ۱، ۱۵ و ۲۸ در گروه (۲) با علامت ** و سایر پیژومترها در گروه (۳) تقسیم‌بندی شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود اطلاعات هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی دشت شیراز که در قالب پیژومتر مجازی A تصویر شده است در گروه سوم که بیشتر پیژومترها در آن قرار دارند واقع شده است.

روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی

در جدول (۲) با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis)، داده‌های ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI نسبت به تأخیر زمانی در پیژومترها به شش مؤلفه اصلی تقسیم‌بندی شده است.

دشت تطبیق دارد (۷ و ۹). این در حالی است که پیزومترهای ۱۳ و ۱۵ واقع در شمال شرقی دشت به ترتیب پس از ۱۴ و ۴۷ ماه واکنش مشابه نشان می‌دهند، پیزومترهای مذکور در پایین دست رودخانه خشک و در دو طرف آن قرار دارند. در این محل رودخانه توسعه پیدا کرده و با شیب بسیار ملایم به ورودی دریاچه مهارلو نزدیک می‌شود. دشت سیلابی به دلیل جزر و مد در مصب رودخانه شکل گرفته و به مرور زمان، به دلیل خشکسالی‌های متعدد دریاچه عقب‌نشینی کرده و اراضی کشاورزی موجود ایجاد شده است و رودخانه هنگام پیچ خوردن و رفتن به طرف دریاچه در کناره‌های خود گل‌ولای (ذرات ریزدانه) بر جای گذاشته است که علت تأخیر زمانی در این منطقه خاص، نفوذپذیری پایین آن است. در چهار پیزومتر به شماره‌های ۱۲، ۱۶، ۲۸ و ۲۵ که به ترتیب سه پیزومتر اول در شمال شرقی بافت ریز دانه و چهارمین پیزومتر در جنوب دشت با بافت مارن واقع شده‌اند، ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار (رابطه مستقیم) است، عمق آب زیرزمینی به دلیل بافت سطحی در کوتاه‌مدت تغییرات چشمگیری نداشته است اما در بلندمدت در پیزومتر ۲۸، ۲۴ ماه و در سه پیزومتر دیگر ۴۸ ماه پس از بارندگی افزایش نشان می‌دهد. پیزومترهای ۱۶، ۲۵ و ۲۸ به تشکیلات آهکی نزدیک هستند و در زیر آبخوان آزاد پیزومتر ۱۲، یک آبخوان تحت فشار وجود دارد که با کاهش عمق آبخوان آزاد در این مناطق (در اثر استمرار خشکسالی) آبخوان‌های آهکی و تحت فشار فعال می‌شوند و جهت حرکت آب در این شرایط از آهک و آبخوان تحت فشار به سمت آبرفت است.

بهترین ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI در پیزومترهای دشت در امتداد محور جنوب غربی (بالادست رودخانه چنار راهدار) به سمت شمال شرقی (پایین دست رودخانه خشک) وجود دارد. به علت شیب شمالی-جنوبی دشت، پیزومترهای نزدیک به آبرفت رودخانه خشک به دلیل بافت درشت دانه و مناسب‌تر، از ضریب همبستگی بهتری نسبت به آبرفت رودخانه چنار راهدار برخوردارند و پیزومترهای مرکزی دشت به شماره‌های ۲۰، ۲۳، ۲۵ و ۲۷

مؤلفه‌های ۱، ۲ و ۳ به صورت تجمعی ۹۹/۴ درصد از واریانس را به خود اختصاص می‌دهند. بر اساس نتایج پیزومتر ۱۳ در مؤلفه سوم با مقدار ضریب همبستگی ۰/۸۱۲-، پیزومترهای ۱، ۲۸ و ۱۵ به ترتیب با مقادیر ضریب همبستگی ۰/۳۹۶-، ۰/۴۸۵- و ۰/۵۰۸- در مؤلفه دوم و سایر پیزومترها در مؤلفه اول با دامنه تغییرات ضریب همبستگی از ۰/۱۸۵ تا ۰/۲ (مشروط بر صرف نظر کردن از اختلاف ناچیز بین مقادیر مؤلفه‌های ۱ و ۲ در پیزومترهای ۹، ۲۹ و ۱۲) دارای بیشترین ضریب همبستگی بودند و در سه گروه بالا طبقه‌بندی خواهند شد. از این رو این روش، عملکرد خوشه‌بندی در گروه‌بندی پیزومترها در روش قبل را تأیید می‌کند.

روش شکل توابع همبستگی شاخص‌های SPI و GRI و زمان تأخیر

به منظور دسته‌بندی پیزومترها، از ویژگی شکل توابع همبستگی شاخص‌های SPI و GRI و تأخیر زمانی در مقیاس‌های زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه به عنوان نوآوری پژوهش حاضر استفاده شده است. نتایج نشان داد تابع مربوط به پیزومتر ۱۳ از نوع مقعر-محدب (Concave-Convex) بود و شکل سینوسی دارد. توابع پیزومترهای ۱، ۱۵ و ۲۸ محدب (Convex) شکل بود و در نهایت تمامی پیزومترهای باقیمانده دارای شکل نیمه‌محدب (Semi Convex) هستند. بنابراین بر اساس شکل توابع می‌توان رفتار پیزومترها را در سه گروه دسته‌بندی کرد که نتایج به دست آمده با سایر روش‌ها تطبیق دارد.

نتیجه‌گیری

تحلیل‌های صورت گرفته روی داده‌های عمق آب زیرزمینی پیزومترها و داده‌های بارندگی نشان داد که رفتار ۸۶/۲ درصد از پیزومترها شبیه یکدیگرند. در ۷۹/۳ درصد از پیزومترهای دشت شیراز که در منطقه‌ای وسیع و یکپارچه قرار دارند، عمق آب زیرزمینی یک ماه پس از بارندگی کاهش نشان می‌دهد، تأخیر زمانی مذکور با نتایج پژوهش‌های انجام شده در حوضه آبریز

عمق آب زیرزمینی در پیژومتر ۲۸ از سال ۱۳۸۵ به بعد نوسان شدید همچون گذشته ندارد و همانطور که پیش از این بیان شد با استمرار خشکسالی به نظر می‌رسد این پیژومتر از آهک همجوار خود تغذیه می‌شود. پیژومتر ۵ از سال ۱۳۸۸ به بعد به دلیل حفر چاه فضای سبز شهرداری روند نزولی دارد.

از سال ۱۳۸۳ به بعد به دلیل کمتر بودن میزان بارندگی سالانه دشت شیراز نسبت به میانگین بلندمدت، مقدار تجمعی انحراف از میانگین باران را به سمت صفر سوق داده و شاخص SPI به سمت خشکسالی میل کرده، اگرچه روند معنی‌دار نبوده است. اما شاخص GRI از این روند تبعیت نکرده و به‌طور معنی‌داری خشکسالی هیدرولوژیک حاد را نشان می‌دهد.

این امر دلالت بر تأثیر شدید عوامل غیرطبیعی (انسان‌ساخت) بر این روند دارد که علت آن برداشت بیش از تغذیه، از آبخوان آبرفتی این دشت است. این روند به‌خوبی در هیدروگراف معرف دشت، به‌ویژه به دلیل برداشت از منابع زیرزمینی برای فضای سبز از سال ۱۳۸۶ به بعد محسوس‌تر است.

دارای بیشترین ضریب همبستگی هستند. بنابراین در امتداد محور مذکور، دشت دارای دانه‌بندی مناسب و همگن‌تری است. با افزایش مقیاس زمانی ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI بهبود می‌یابد و بیشترین ضریب در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه حادث می‌شود. اما در پیژومترهای ۱۲، ۱۹ و ۲۲ تا مقیاس زمانی ۲۴ ماهه ضریب همبستگی بین شاخص‌ها بهبود نشان می‌دهد، در واقع تا مقیاس زمانی ۲۴ ماهه بین ضرایب هم‌گرایی وجود دارد و پس از آن در این گروه از پیژومترها عواملی همچون تغییرات در بافت خاک سبب واگرایی میانگین متحرک ۴۸ ماهه GRI نسبت به SPI می‌شود.

عمق آب در پیژومتر ۱۳ از سال ۱۳۸۸ به بعد به دلیل بهره‌برداری از تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک شیراز که در فاصله ۲۶۲۵ متری بالادست آن واقع شده است و توسط پساب خروجی، منطقه تغذیه می‌شود روند صعودی نشان می‌دهد. پیژومتر ۱ از سال ۱۳۸۸ به بعد به دلیل حفر چاه توسط فضای سبز شهرداری در فاصله ۶۰ متری از آن روند نزولی دارد. پیژومتر ۱۵ نیز به دلیل واقع شدن در منطقه زراعی و برداشت آب از آبخوان برای کشاورزی وضعیتی مشابه پیژومتر ۱ دارد.

منابع مورد استفاده

1. Abasi, F., M. Azarakhshi, K. Chapi and M. Bashiri. 2016. Spatial and Temporal variations of groundwater level in Qorveh-Dehgolan plain and its relationship with drought. *Journal of Water and Soil Science* 25 (2-3): 143-155. (In Farsi).
2. Alizadeh, A. 2014. Principles of Applied Hydrology. Imam Reza University, Mashhad. (In Farsi).
3. Asadi Zarch, M. A., B. Sivakumar and A. Sharma. 2015. Assessment of global aridity change. *Journal of Hydrology* 520: 300-313.
4. Chamanpira, Gh., Gh. Zehtabian, H. Ahmadi and A. Malekian. 2014. Review of drought effect on groundwater resources; a study to optimize utilization management (case study: Alashtar plain). *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences* 3(10): 48-56.
5. Khan, S., H. F. Gabriel and T. Rana. 2008. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Journal of Irrigation and Drainage Systems* 22(2): 159-177.
6. Leelaruban, N., G. Padmanabhan and P. Oduor. 2017. Examining the relationship between drought indices and groundwater levels. *Water* 9(2): 82-98.
7. Mardaneh, M., M. Aflaton and F. Bostani. 2012. Review of correlation between rainfall and groundwater level in Shiraz plain. *Journal of Water Resources Engineering* 5(13): 89-98 (In Farsi).
8. 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(3-4): 282-302.
9. Samani, N. 2001. Responce of karst aquifers to rainfall and evaporation, maharlu basin, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies* 63(1): 33-40.
10. Sedaghat, M. 2013. Land and Water Resources (Groundwater). Payame Noor University, Tehran. (In Farsi).

11. Verdi Pourazad, A., M. Azarakhshi, A. Mosaedi and J. Farzadmehr. 2015. The effect of meteorological drought on groundwater level variations in mashhad plain using SPI and GRI indices. *In: Proceeding of the International Conference on Sustainable Development, Strategy and Challenges with a Focus on Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism, Tabriz, Iran.* pp: 25-27. (In Farsi).

Analyzing Piezometers' Behavior to Determine the Lag Time of the Rainfall Effects on the Groundwater Level Fluctuations in the Alluvial Plain of Shiraz by Using SPI and GRI Indices

A. Ahadi and M. Noshadi^{1*}

(Received: January 13-2019 ; Accepted: May 21-2019)

Abstract

Groundwater supplies a major portion of two basic human needs: drinking and agricultural water. Forecasting, monitoring, evaluating the performance and planning of this vital resource require modelling. The lag time of the groundwater level fluctuations against the rainfall is one of the essential data of the models. The purpose of the present study was to evaluate the piezometers behaviour by using the Pearson cross-correlation method between SPI and GRI indices in the Shiraz alluvial plain in order to determine the mentioned lag time. The results showed a similar behaviour for 86.2% of the piezometers. In 79.3% of the piezometers, groundwater level was declined one month after the rainfall event. The best correlation coefficient between the aforementioned indices was observed along the southwestern to the northeastern axis of the plain. The northern alluvial plain has a better correlation, as compared to the southern section because of the northern-southern slope of the plain. The central area of the plain had the highest correlation coefficient. The maximum correlation coefficients occurred at a time scale of 48 months. Also, since 2004, due to the decline in the atmospheric precipitation in the Shiraz plain, the SPI index has surpassed the drought level, although the trend has not been significant. However, the GRI does not follow this trend, showing a significant hydrological drought. The reason can be the disproportionate water extraction to recharge ratio in the alluvial aquifer of the plain.

Keywords: Lag time, SPI and GRI indices, Pearson cross correlation, Groundwater level fluctuations

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

*: Corresponding author: noshadi@shirazu.ac.ir