

## آنالیز همبستگی پایه زمانی و تأخیر زمانی بین خشکسالی اقلیمی و خشکسالی آب‌شناختی دشت هشتگرد

بهرام بختیاری عنایت<sup>۱\*</sup>، آرش ملکبان<sup>۲</sup> و علی سلاجقه<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشگاه تهران

۲. دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱۶ - تاریخ تصویب ۱۳۹۴/۶/۲۱)

### چکیده

به منظور بررسی آثار زمانی خشکسالی اقلیمی بر خشکسالی آب‌شناختی در منابع آب زیرزمینی، تحقیق حاضر در دشت هشتگرد انجام شد. در این تحقیق، ابتدا SPI به عنوان نمایه خشکسالی اقلیمی استاندارد شده و GRI به عنوان شاخص منابع آب زیرزمینی محاسبه شد. از آزمون من‌کنندال برای بررسی وجود روند در داده‌ها استفاده شد. همبستگی پیرسون بین SPI و GRI از طریق همبستگی متقابل محاسبه شد. برای بررسی دقیق همبستگی، از پایه‌های زمانی ۰ تا ۲۰۰ ماهه SPI و هم تأخیر زمانی صفر تا ۱۵۰ ماهه با GRI استفاده شد. در نهایت، مشخص شد که در ارتباط زمانی بین SPI و GRI علاوه بر وابستگی به پایه زمانی شاخص خشکسالی و تأخیر زمانی بین این دو شاخص، به ارتباط درونی بین تأخیر و پایه زمانی نیز وابسته است و الگوی رفتاری هر پیرومتر منجر به گروه‌بندی پیرومترها در سه گروه متفاوت شد.

کلیدواژگان: الگوی پیرومتر، SPI، GRI.

### مقدمه

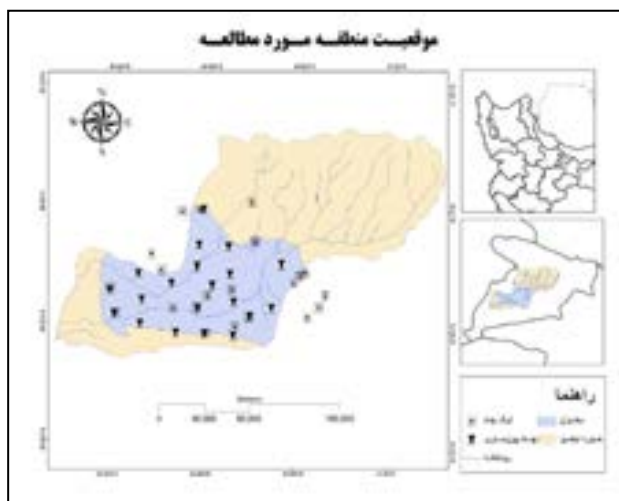
بررسی خشکسالی آب‌شناختی استفاده شده است (Hayes *et al.*, 1999).

Hoseinzade and Nohegar (2011) به بررسی آثار خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی در دو دهه اخیر در دشت میناب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که برداشت بی‌رویه و خشکسالی از عوامل اصلی افت آب در این مناطق بوده است. Vicente-Serrano and Lopez-Moreno (2005) به منظور بررسی آثار خشکسالی اقلیمی بر خشکسالی آب‌شناختی از شاخص معیار بارندگی (SPI) استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که SPI با پایه زمانی بزرگ‌تر از دوازده ماه، در این منطقه اثر قابل توجهی بر منابع آب ندارد، همچنین جریان‌های سطحی به پایه زمانی پایین SPI و مخازن ذخیره آب به پایه‌های زمانی بلندمدت هفت تا ده ماهه در این حوضه وابسته است. Khan *et al.* (2008) از SPI برای بررسی اثر خشکسالی بر سطح آب زیرزمینی استفاده کردند و نتایج نشان داد که SPI معیار مناسبی برای این منظور است. Azizi (2004) در دشت قزوین با بررسی ارتباط خشکسالی اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی بیان کرد که منابع آب زیرزمینی در این منطقه از سیکل و رژیم بارش منطقه تبعیت می‌کند و تأخیر زمانی بین خشکسالی اقلیمی و خشکسالی در منابع آب زیرزمینی با تأخیر دو ماهه گزارش شده است.

منابع آب زیرزمینی در اکثر مناطق جهان دارای جایگاه ویژه‌ای از لحاظ تأمین آب مورد نیاز بشر است. منابع مذکور از لحاظ کمیت، همچنین کیفیت مطلوب، باعث استقرار و تجمع انسان در مناطق مستعد، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است. کمیت این منابع تحت تأثیر تغذیه (اکثراً بارش‌های جوی) و تخلیه قرار دارد. خشکسالی یکی از بلایای طبیعی مطرح است که تأثیرات اقتصادی و محیطی در منطقه وسیع دارد (Vicente-Serrano and López-Moreno, 2005). خشکسالی‌ها اکثراً به چهار دسته اقلیمی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی طبقه‌بندی می‌شود (Wilhite and Glantz, 1985).

SPI را مک‌کی و همکاران برای بررسی خشکسالی در پایه‌های زمانی مختلف توسعه دادند (McKee *et al.*, 1993). SPI امکان مطالعه منابع آب را برای دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت به منظور بررسی منابع آب سطحی و زیرزمینی فراهم می‌کند (Lloyd-Hughes and Saunders, 2002). SPI به دلیل سادگی محاسبات و استفاده از متغیر بارندگی، همچنین قابلیت محاسبه در پایه زمانی دلخواه، روشی مناسب برای بررسی خشکسالی مطرح است و با پایه زمانی بالای شش ماه جهت

جنوبی کاهش می‌یابد و جهت جریان‌های سطحی و زیرزمینی از روند شرقی به غربی تبعیت می‌کند. به‌طور کلی، رسوبات درشت‌دانه در شمال دشت به‌خصوص مخروط‌افکنه رودخانه کردان، مکان مناسبی را برای تغذیه آبخوان از جریانات سطحی ایجاد کرده است. هر چه از قسمت‌های شمالی دشت به سمت جنوب پیش می‌رویم رسوبات دانه‌ریزتر و از عمق آبخوان کاسته می‌شود. در محل مخروط‌افکنه کردان بیشترین عمق رسوبات درشت‌دانه مشاهده می‌شود که عمق آبخوان در این قسمت بیشترین عمق را شامل می‌شود. در قسمت‌های غربی و جنوب غربی دشت، عمق رسوبات کاهش می‌یابد. همچنین، در نیمه جنوبی دشت، آبخوان چندلایه و تحت فشار مشاهده می‌شود که با توجه به رسوبات دانه‌ریزتر نسبت به نیمه شمالی، آبدهی چاه‌ها کمتر از قسمت‌های شمالی و شرقی است (Shemshaki *et al.*, Spring 2011).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، چاه‌های پیرومتری، لوگ‌های حفاری و حوضه آبخیز مشرف

### بارندگی

در منطقه مورد مطالعه سه ایستگاه باران‌سنجی ده‌صومعه، ولیان و کریم‌آباد وجود دارد که داده‌های آن‌ها در بازه زمانی ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ از سازمان هواشناسی تهیه شد. ابتدا وجود داده‌های پرت کنترل و پس از آن اقدام به بازسازی داده‌ها از روش ایستگاه معرف شد. آزمون روند من-کنندال برای کنترل روند داده‌های بارش ماهانه سه ایستگاه انجام شد که داده‌ها در طول دوره بدون روند بود.

### تراز آب زیرزمینی

داده‌های سطح تراز آب زیرزمینی مربوط به دوره آماری سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰ از شرکت مدیریت منابع ایران اخذ شد. داده‌ها از لحاظ صحت ارزیابی و داده‌های ناقص از طریق

Naderianfar *et al.* (2010) با بررسی تغییرات آب زیرزمینی تحت شرایط اقلیمی مختلف به این نتیجه رسیدند که بارندگی با تأخیر ده ماهه بیشترین تأثیر را بر سطح آب دشت نیشابور دارد اما با محاسبه SPI و همبستگی آن با سطح آب زیرزمینی به این نتیجه رسیدند که تأخیر شاخص خشکسالی با نوسانات سطح آب زیرزمینی ۴۲ ماهه است. همچنین، Naderianfar and Ansari (2011) با خوشه‌بندی دشت نیشابور، همچنین حذف روند داده‌های بارش و سطح آب زیرزمینی، تأخیر خشکسالی اقلیمی با تغییرات سطح منابع آب زیرزمینی را یک‌ساله و در ارتباط با SPI با پایه‌های زمانی ۳۶ تا ۵۴ ماهه بیان کردند. Ekrami *et al.* (2013) با بررسی تأخیر خشکسالی اقلیمی با آبدهی قنوت و چشمه‌ها در دشت یزد-اردکان به این نتیجه رسیدند که در مناطق کوهستانی تأخیر یک‌ساله و در مناطق دشتی تأخیر دو سال است. Mendicino *et al.* (2008) در پژوهش خود ضمن معرفی نمایه GRI (شاخص منابع آب زیرزمینی)، این نمایه را در ایتالیا به کار گرفتند و با SPI ۶، ۱۲، ۲۴ ماهه مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که رفتار GRI بسیار شبیه SPI است اما تأخیر زمانی بین این دو شاخص به دلیل ساختار زمین‌شناسی مشاهده می‌گردد و این شاخص در ماه‌های تابستان در اقلیم مدیترانه‌ای همبستگی بالایی نشان داده است. Ekrami *et al.* (2013) با مطالعه اثر خشکسالی اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی به این نتیجه رسیدند که با افزایش پایه زمانی SPI همبستگی آن با GRI افزایش می‌یابد و تأخیر زمانی بین خشکسالی اقلیمی با آب‌شناختی در دشت یزد-اردکان یک تا دو سال است. در این تحقیق علاوه بر بررسی تأخیر خشکسالی اقلیمی و آب‌شناختی، رابطه آن با پایه زمانی SPI و تأخیر نسبت به GRI بررسی شد تا رابطه آن‌ها به طور دقیق مشخص شود.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

دشت هشتگرد با مساحتی در حدود ۴۱۰ کیلومترمربع در قسمت مرکزی استان البرز واقع شده است. این دشت بین طول‌های ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۶ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۷ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). آب‌وهوای منطقه در بخش‌های شمالی نیمه‌مرطوب است و به تدریج به سوی جنوب دشت، با کاهش ارتفاع، به نیمه‌خشک تمایل می‌یابد. بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم دشت هشتگرد نیمه‌خشک است.

به‌طور کلی، شیب دشت از قسمت‌های شمالی به سمت

$$GRI_{D,m} = \frac{D_{y,m} - u_{D,m}}{\delta_{D,m}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه  $GRI_{D,m}$  شاخص منابع آب زیرزمینی مربوط به ماه  $m$  از سال  $y$ ،  $D_{y,m}$  رقم سطح ایستابی ماه  $m$  از سال  $y$ ،  $u_{D,m}$  میانگین سطح ایستابی ماه  $m$  برای  $D$  سال یا ماه،  $\delta_{D,m}$  انحراف معیار سطح ایستابی ماه  $m$  برای  $D$  سال یا ماه است.

در این مرحله بعد از حذف روند از داده‌های سطح ایستابی،  $GRI$  برای هر پیژومتر جداگانه محاسبه شد. هدف از این تحقیق مطالعه تأخیر زمانی بین نوسانات مقدار بارش و اثر آن بر سطح تراز آب زیرزمینی بود. لذا، با توجه به اثر عوامل مختلف بر سطح آب زیرزمینی، اقدام به بررسی آثار خشکسالی اقلیمی بر خشکسالی آب‌شناختی شد. با توجه به اینکه در هر یک از پیژومترهای مورد ارزیابی، عامل تجمعی بارش در طول چندین دوره قبل تأثیر متفاوتی دارد، اقدام به تعیین رابطه بین شاخص منابع آب زیرزمینی با اثر تجمعی عامل هواشناختی ( $SPI$  با پایه زمانی مختلف) شد. اختلاف زمانی بین  $SPI$  و  $GRI$ ، با استفاده از شاخص خشکسالی با پایه زمانی ۰ تا ۱۵۰ ماهه محاسبه شد.

### نتایج و بحث

آنالیز داده‌های بارش نشان داد که در منطقه مورد مطالعه چندین دوره خشکسالی و ترسالی اقلیمی در طول دوره مورد مطالعه (۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰) رخ داده است که با افزایش پایه زمانی در  $SPI$  تعداد این دوره‌ها کاهش می‌یابد ولی بر تداوم آن‌ها افزوده می‌شود که به علت تعدیل نوسانات کوتاه‌مدت است.

به دلیل ماهیت کمی شاخص‌ها، همبستگی پیرسون بین  $SPI$  و  $GRI$  محاسبه شد و مشاهده شد که در اکثر پیژومترها همبستگی پایین است. سپس از پایه‌های زمانی ۲ تا ۲۰۰ ماهه برای  $SPI$  استفاده شد. در این حالت همبستگی در پایه‌های زمانی مختلف نسبت به پیژومترها متفاوت است. با توجه به متغیر بودن منطقه از لحاظ هندسه آبخوان، همچنین موقعیت قرارگیری چاه‌های پیژومتری در سطح دشت، اقدام به آنالیز داده‌ها برای هر پیژومتر منتخب شد (جدول ۱) تا تغییرات بهتر نمایان شود. در این تحقیق از تمامی پیژومتر با داده‌های مناسب برای بررسی تغییرات مکانی، علاوه بر زمان تأخیر استفاده شد. نتایج نشان داد که به دلیل تغییرات زیاد ساختار زمین‌شناسی، مطالعات در این زمینه باید در واحدهای کوچک انجام گیرد زیرا

ایستگاه معرف بازسازی شد. در نهایت بیست پیژومتر معرف دشت با پراکنش و داده‌های مناسب انتخاب شد. با بررسی آزمون من-کندال روند نزولی در داده‌های سطح آب زیرزمینی شناسایی شد که عامل اصلی آن را می‌توان به اضافه برداشت از آب زیرزمینی نسبت داد. این روند در هر پیژومتر از طریق روش برون‌یابی منحنی روند و رگرسیون خطی برازش یافته حذف شد (Naderianfar, and Ansari 2011). بدین صورت که ابتدا مقدار عددی رگرسیون محاسبه و به داده‌های دارای روند نزولی افزوده می‌شود. در مرحله بعد داده‌ها در حالت ایستابی برای آنالیز استفاده شد.

### شاخص استاندارد شده بارش ( $SPI$ )

شاخص  $SPI$  را *McKee et al.* (1993) پیشنهاد کردند. در تحقیق حاضر برای بررسی دوره‌های خشک و تر آب‌وهوایی و تأثیرات آن بر سطح تراز آب زیرزمینی از  $SPI$  استفاده شد (رابطه ۱).

$$SPI = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{\delta_i} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه  $SPI$  شاخص خشکسالی،  $X_{ij}$  بارش مربوط به ماه مورد نظر،  $\bar{X}$  میانگین بارش ماه مورد نظر، و  $\delta_i$  انحراف معیار بارش ماه مورد نظر است.

این شاخص برای هر سه ایستگاه هواشناسی موجود در داخل حوضه آبخیز دشت هشتگرد محاسبه و بعد از آنالیز داده‌ها مشخص شد که این شاخص در ایستگاه‌ها همبستگی بالایی در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. در نهایت، از میانگین وزنی بارش ماهانه این سه ایستگاه برای ارتباط با شاخص آب زیرزمینی استفاده شد. برای بررسی آثار زمانی دوره‌های خشک و تر بر تراز آب زیرزمینی از میانگین متحرک ۲ تا ۲۰۰ ماهه استفاده شد. و برای تعیین ارتباط بین  $SPI$  با پایه‌های زمانی مختلف و  $GRI$  (شاخص منابع آب زیرزمینی) از همبستگی پیرسون با تأخیرهای صفر تا ۱۵۰ ماهه بین این دو شاخص استفاده شد (محدودیت پایه زمانی و تأخیر بین اعداد مذکور به دلیل طول دوره است).

### شاخص منابع آب زیرزمینی ( $GRI$ )

نمایه منابع آب زیرزمینی ( $GRI$ ) در سال ۲۰۰۸ میلادی در ایتالیا ارائه شد (Mendicino et al., 2008). این نمایه به منظور ارزیابی وضعیت مخزن سفره آب زیرزمینی به کار می‌رود. این شاخص با توجه به آمار بلندمدت سطح ایستابی با رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

اختلاف بین پیرومترها زیاد است.

جدول ۱. همبستگی پیرسون، پایه زمانی SPI و تأخیر زمانی بین SPI و GRI در پیرومترها

شماره پیرومتر	محل پیرومتر	پایه زمانی SPI (ماه)	تأخیر زمانی بین SPI و GRI (ماه)	همبستگی پیرسون
۱	اراضی سعیدآباد	۴۷	۳	۰/۶۶**
۲	اراضی کردان	۳۴	۴	۰/۷۴**
۳	انبار تپه	۸۶	۱۲	۰/۵۶**
۴	تنکمان	۱۵۸	۰	۰/۶۱**
۵	حسین آباد	۳۵	۲	۰/۶۹**
۶	دولت آباد	۱۸۳	۹	۰/۵۹**
۷	سنقرآباد	۷۵	۳	۰/۷۹**
۸	سه راه زکی	۸۱	۸۲	۰/۷۹**
۹	شیخ حسن	۱۵۵	۲۲	۰/۵۳**
۱۰	عرب آباد کوه	۷۴	۱۱	۰/۸۴**
۱۱	عزیز آباد	۱۵۶	۷۴	۰/۴۶**
۱۲	فلکه اول زعفرانیه	۱۵۴	۲	۰/۷۱**
۱۳	قاسم آباد آقا	۳۵	۲	۰/۵۷**
۱۴	قاسم آباد بزرگ	۵۲	۱۲	۰/۸۳**
۱۵	قلعه آذری	۵۱	۰	۰/۷۶**
۱۶	کوروش ییلاقی	۷۵	۱	۰/۶۹**
۱۷	لشکرآباد	۵۱	۳	۰/۶۱**
۱۸	محمدآباد افخم	۷۳	۲۰	۰/۶۸**
۱۹	نجم آباد	۱۵۴	۱	۰/۶۸**
۲۰	نمک آلان	۵۲	۱۰۶	۰/۸۳**

\*\* درصد معناداری در سطح ۱ درصد

بر اساس این الگو می‌توان مشاهده کرد که این پیرومترها به دلیل موقعیت نزدیک‌تر به منبع تغذیه، همچنین رسوبات دانه‌درشت، به شدت تحت تأثیر تغییرات بارش قرار می‌گیرد. در این الگو رفتاری در محدوده همبستگی بالا، مشاهده می‌شود که با کاهش تأخیر و افزایش پایه زمانی SPI، همبستگی افزایش می‌یابد که این به دلیل رابطه درونی بین تأخیر و پایه زمانی SPI است و آثار بلندمدت بارش را نمایان می‌سازد. در واقع این عکس‌العمل را می‌توان بدین صورت بیان کرد که به دلیل ارتباط آب زیرزمینی در مناطق مختلف با هم و تغذیه متفاوت در نقاط مختلف، همچنین با فواصل متفاوت، در یک نقطه اثر یک رویداد در یک نقطه زمانی مشاهده نمی‌شود و حالت خزنده دارد و در چندین زمان مختلف دارای اثر با شدت متفاوت است. در بعضی از پیرومترها، در تأخیرهای ۱۰۰ ماهه و پایه زمانی SPI ۲۰۰ ماهه نیز همبستگی بالا مشاهده می‌شود که به دلیل کاهش تعداد داده‌ها، همچنین ساختار زمین‌شناسی در محدوده پیرومتر منطقی نیست و احتمالاً به دلیل شباهت دوره‌ای خشکسالی‌ها در داده‌ها ایجاد شده است. پیرومتر کردان و سنقرآباد به عنوان نمونه ارزیابی شده است (شکل ۲).

#### پیرومتر ۲: اراضی کردان (شکل ۳)

در این پیرومتر واکنش نسبتاً سریع تغییرات سطح آب در مقابل تغییرات بارش مشاهده می‌شود. با افزایش تأخیر بین SPI و GRI همبستگی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد که این نشان‌دهنده تأثیر سریع تغییرات بارش بر نوسانات سطح آب زیرزمینی است. از طرفی، با SPI با پایه زمانی ۳۴ ماهه و تأخیر ۴ ماهه بیشترین همبستگی معادل ۰/۷۴ را نشان می‌دهد. با افزایش پایه زمانی شاخص خشکسالی، همچنین افزایش تأخیر، همبستگی کاهش می‌یابد که عدم تأثیر از تغییرات بارش با پایه زمانی بالا و عدم فاصله زمانی بلندمدت است. مطالعات زمین‌شناسی نشان‌دهنده وجود تشکیلات درشت‌دانه شن و ماسه و قلوه‌سنگ در این منطقه است. همچنین، این پیرومتر روی مخروط‌افکنه کردان واقع شده است که سیلاب‌های فصلی در آن پخش می‌شود و به علت درشت‌دانه بودن تشکیلات زمین‌شناسی، سریع به آب زیرزمینی راه پیدا می‌کند. عمق زیاد رسوبات در این منطقه بر اساس مطالعات اکتشافی گزارش شده و آبخوان در این منطقه از نوع آزاد است (Shemshaki et al., Spring 2011).

#### پیرومتر ۷: سنقرآباد (شکل ۴)

در این پیرومتر تغییرات سطح آب زیرزمینی با SPI پایه زمانی ۷۵ ماهه و تأخیر سه ماهه بیشترین همبستگی را دارد. تشکیلات آبخوان در این منطقه از مواد درشت‌دانه تشکیل شده

بر اساس آنالیز گراف‌های خروجی، الگوی همبستگی GRI نسبت به تغییرات SPI در منطقه دارای رفتار خاصی است، به طوری که هشت پیرومتر از بیست پیرومتر مورد بررسی دارای همبستگی بلندمدت از لحاظ پایه زمانی با SPI است و تعداد دوازده پیرومتر، به دلیل وجود دو آبخوان آزاد و تحت فشار در منطقه، رفتاری نسبتاً مشابه با پایه زمانی کمتر دارد. اهمیت تأخیر زمانی نیز در شکل‌های ۲، ۵ و ۷ به خوبی مشخص است. به منظور بررسی آثار کلی تغییرات بارش بر نوسانات آب زیرزمینی، اقدام به تفکیک پیرومترها از لحاظ الگوی رفتاری نسبت به بارش شد. در این گروه‌بندی سه رفتار کلی در منطقه مشاهده شد که به شرح زیر است.

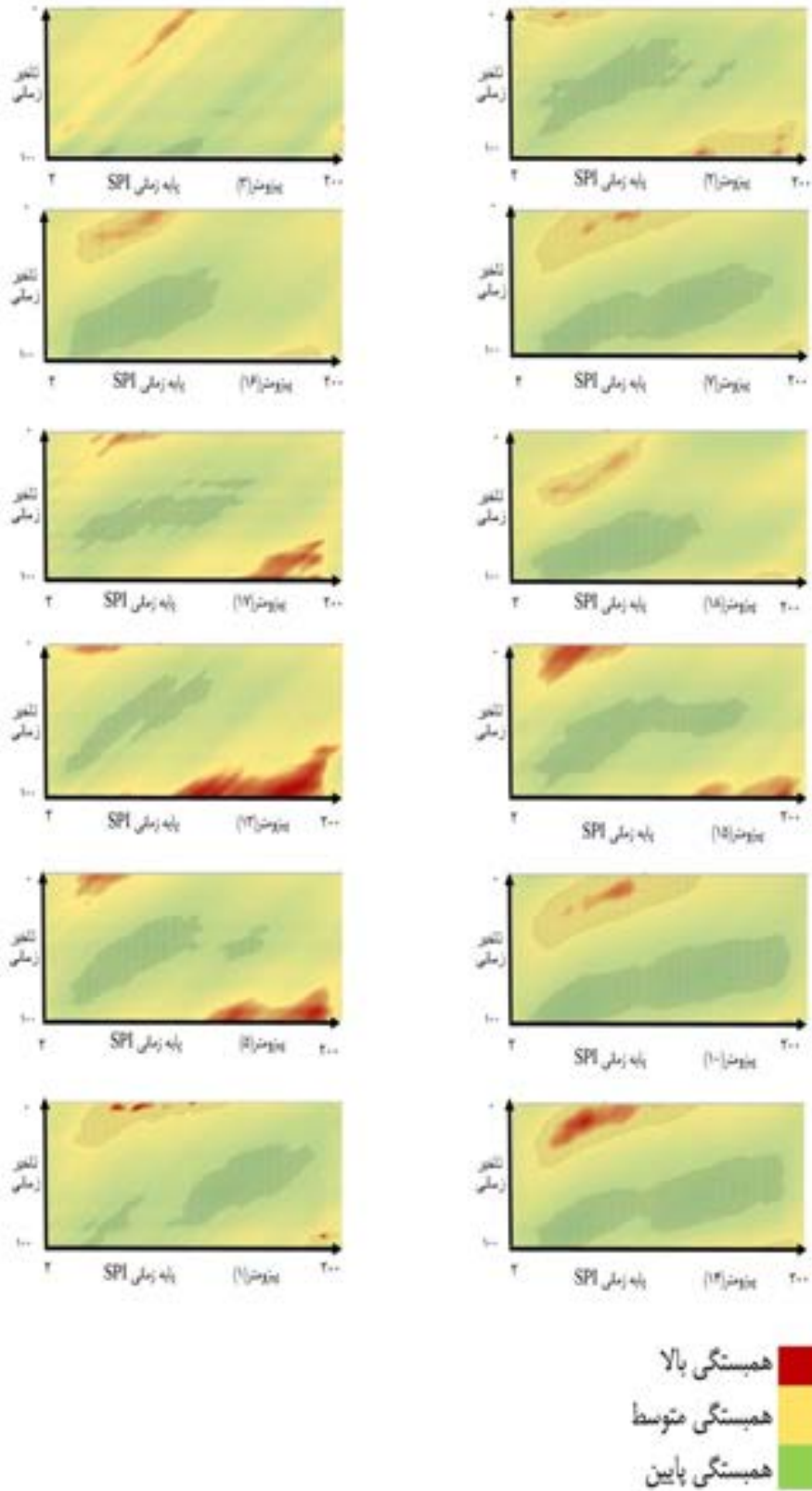
#### الگوی اول

در این پیرومترها عکس‌العمل تغییرات سطح آب نسبت به تغییرات بارش نسبتاً کند و در بازه دو تا پنج سال رخ می‌دهد.

ناشی از سیلاب‌های فصلی در آن پخش می‌شود. همبستگی بالای تغییرات بارش با نوسانات سطح آب زیرزمینی در این منطقه نسبتاً سریع است.

است و عمق آبخوان در این منطقه عمیق گزارش شده است (Shemshaki *et al.*, Spring 2011).

این منطقه هم جزئی از مخروط‌افکنه کردان است که آب



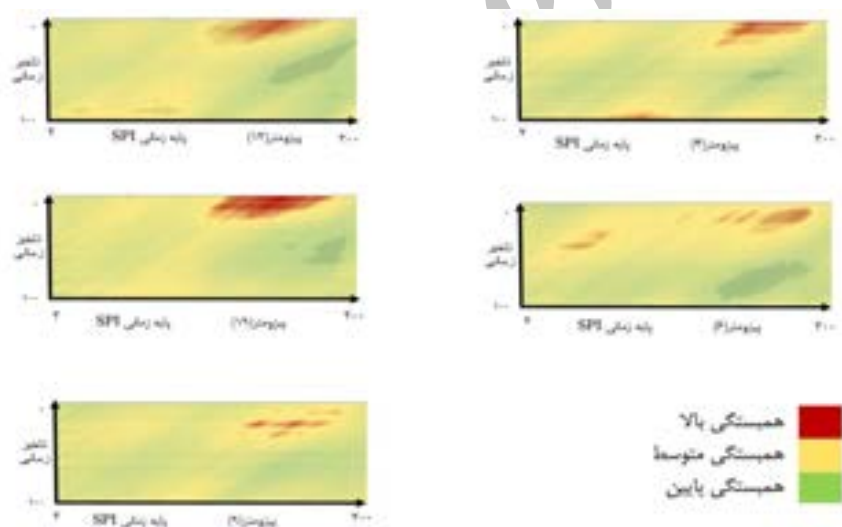
شکل ۲. الگوی اول رفتاری پیژومترها (پیژومترهای ۱، ۵، ۱۴، ۱۰، ۱۵، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۱۶، ۷، ۲ و ۳)

### الگوی دوم (شکل ۵)

در پنج پیژومتر الگویی متفاوت با الگوی اول دشت مشاهده شد، به طوری که در این نواحی همبستگی بالا در پایه‌های زمانی بالای SPI مشاهده می‌شود. از مقدار عددی همبستگی هم کاسته شد و همبستگی بالا در بازه ۱۲۰ تا ۱۸۰ ماهه مشاهده شد. در این پیژومترها همبستگی بالا در یک بازه مشخص دیده می‌شود و نمی‌توان روند خاصی برای آن در نظر گرفت. در دو پیژومتر ۶ و ۹ تأخیر ده تا پانزده ماهه هم مشاهده می‌شود. در اینجا پیژومتر تنکمان به عنوان نمونه ارزیابی شد.

### پیژومتر ۴: تنکمان (شکل ۶)

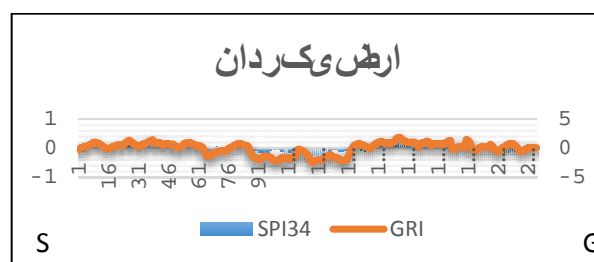
با توجه به افزایش رسوبات دانه‌ریز و کاهش هدایت هیدرولیکی، پایه زمانی SPI (که با GRI همبستگی بالایی دارد) افزایش یافته است. بیشترین همبستگی با SPI ۱۵۸ ماهه برابر ۰/۶ مشاهده می‌شود. با توجه به الگوی همبستگی، تغییرات بارش در کوتاه‌مدت اثر قابل توجهی بر تغییرات سطح آب در این نواحی ندارد.



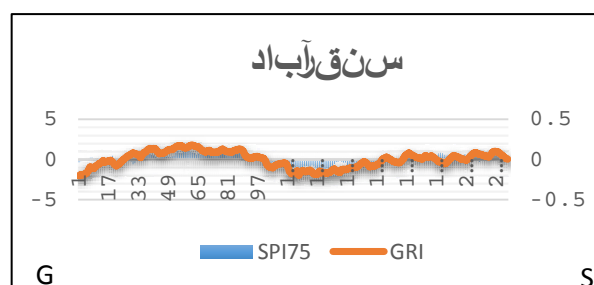
شکل ۵. الگوی دوم رفتاری پیژومترها (پیژومترهای ۱۲، ۴، ۶، ۱۹ و ۹)

### الگوی سوم (شکل ۷)

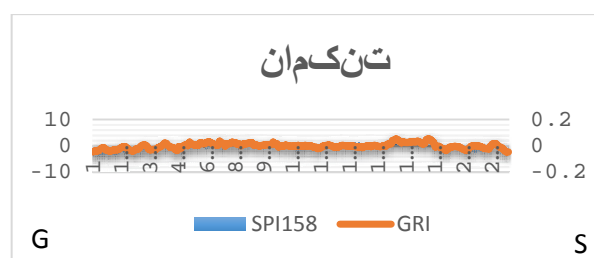
در این الگو سه پیژومتر جای دارد که رفتاری کاملاً متفاوت با دو الگوی قبلی دارد. در این پیژومترها همبستگی بالا با تأخیر نسبتاً بلندمدت ۱۰۰ ماهه مشاهده شد. در پیژومتر ۱۱ این همبستگی با پایه زمانی SPI ۱۵۰ ماهه همراه است که به دلیل برداشتهای زیاد و زمان طولانی و تعداد کم داده‌ها اتکاپذیر نیست. از لحاظ زمین‌شناسی نیز این سه پیژومتر در محدوده رسوبات ریزدانه است (Shemshaki et al., Spring 2011). در اینجا برای نمونه پیژومتر سه‌راه زکی‌آباد بررسی شد.



شکل ۳. انطباق شاخص‌های خشکسالی هواشناختی و منابع آب زیرزمینی در پیژومتر اراضی کردان



شکل ۴. روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی هواشناختی و منابع آب زیرزمینی در پیژومتر سنقرآباد



شکل ۶. انطباق شاخص خشکسالی هواشناختی با شاخص منابع آب زیرزمینی در پیژومتر تنکمان

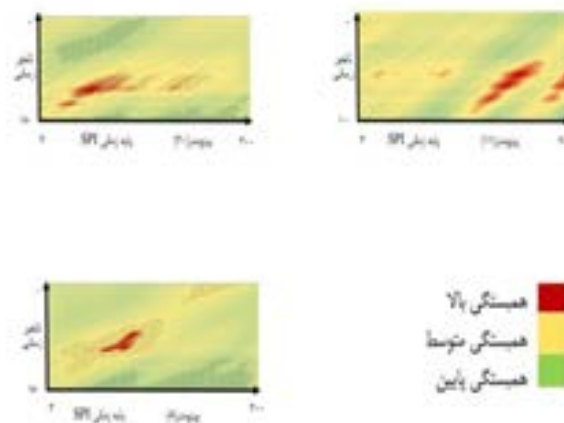
میانگین سطح آب دشت استفاده شده است که با توجه به محدوده دشت و پیچیدگی ساختار زمین‌شناسی به نتایج قابل قبول منجر نمی‌شود و تا حد امکان باید از تمام اطلاعات استفاده شود. در این پژوهش از بیست پیرومتر استفاده شد که هر کدام دارای همبستگی بالا در بازه زمانی متفاوت در ارتباط با تغییرات سطح آب نسبت به بارش بود. همچنین، در برخی نقاط دشت به دلیل وجود آبخوان چندلایه و تحت فشار تغییرات پیش‌بینی‌پذیر نیست.

#### آبخوان تحت فشار

در این منطقه، یک آبخوان تحت فشار شناسایی شده است که این آبخوان در جنوب و جنوب غرب دشت گسترش دارد و منبع تغذیه این آبخوان قسمت شمالی دشت بیان شده است (Shemshaki et al., Spring 2011). با توجه به اینکه پیرومترهای گروه الگوی دوم و سوم به طور کامل در محدوده تحت فرونشست قرار دارد و در این محدوده تحت فشار، فرونشست زمین با نرخ بالا رخ می‌دهد و در اکثر مطالعات علت آن برداشت بیش از حد آب بیان شده است. یکی از علت‌های رفتار متفاوت پیرومترهای الگوی دوم و سوم را می‌توان به دلیل وجود آبخوان تحت فشار و فرونشست بیان کرد.

#### نتیجه‌گیری کلی

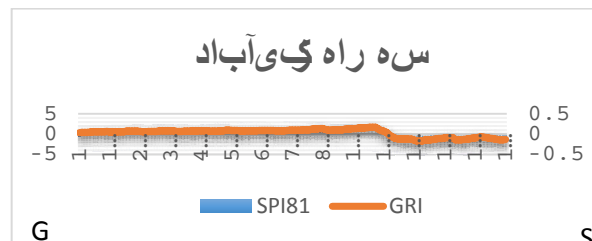
در بسیاری از مطالعات در مورد همبستگی بالای بین SPI با پایه‌های زمانی مختلف و GRI بحث شده است اما ارتباط بین پایه زمانی با تأخیر بیان نشده است. در این تحقیق با بررسی پیوسته همبستگی بین SPI با پایه زمانی مختلف و تأخیر زمانی بین آن‌ها مشخص شد که در محدوده‌ای که همبستگی بالاست، با کاهش تأخیر و افزایش پایه زمانی، همبستگی افزایش می‌یابد. البته، این واکنش بیشتر در الگوی رفتاری اول مشاهده شد و منجر به ایجاد محدوده شمال شرقی - جنوب غربی با همبستگی بالا شده است که از سمت جنوب غرب به شمال شرق همبستگی اکثراً افزایش می‌یابد. البته، این روند را می‌توان به نقش پایه زمانی SPI هم نسبت داد. بدین صورت که جهت نمایان شدن آثار یک ماه بارش در یک پیرومتر، نیازمند رسیدن این آثار از نقاط مختلف با مسافت‌های زیاد و کم در محیط خاک است که این عامل همبستگی بالا را در پایه‌های بلندمدت SPI توجیه می‌کند. به این روند همبستگی نیز در مطالعات قبلی توجه نشده و فقط به یک نقطه با همبستگی بالا اشاره شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان در برنامه‌ریزی بلندمدت مدیریت مصرف آب زیرزمینی در محدوده دشت بهره برد.



شکل ۷. الگوی سوم رفتاری در پیرومترها

#### پیرومتر ۸: سه‌راه زکی آباد (شکل ۸)

نوسانات سطح آب زیرزمینی در این پیرومتر با تأخیر زمانی بالایی رخ می‌دهد. همبستگی بالا، بین SPI با پایه زمانی بالای ۸۱ ماهه و تأخیر ۸۲ ماهه با GRI برابر ۰/۷۹ است. تشکیلات زمین‌شناسی در این منطقه دانه‌ریز است. همچنین، عمق رسوبات کم است، به طوری که نواحی سطحی از رس و ماسه تشکیل شده است و نواحی عمقی دارای مقداری شن نیز دارد (Shemshaki et al., Spring 2011).



شکل ۸. انطباق شاخص خشکسالی هواشناختی با شاخص منابع آب زیرزمینی در پیرومتر سه‌راه زکی

با توجه به پژوهش صورت گرفته، مشخص شد که SPI روش مناسبی برای بررسی آثار زمانی و مکانی خشکسالی اقلیمی بر خشکسالی آب‌شناختی آب زیرزمینی است (که با نتایج Khan et al. (2008) مطابقت دارد) منتهی باید از SPI با پایه‌های زمانی مختلف استفاده شود. با توجه به اینکه بخشی از محدوده دشت نقش تغذیه دشت را بر عهده دارد و عملاً جهت جریان آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، انتخاب چند نقطه محدود برای بررسی آثار بارش بر سطح آب زیرزمینی نتایج قابل قبولی ندارد و تا حد امکان باید واحدهای کوچک در دشت مطالعه شود که در مطالعات قبلی توجه نشده است (Hoseinzade and Nohegar, 2011; Naderianfar et al., 2013; Ekrami et al., 2010). همچنین، در برخی پژوهش‌ها از

## REFERENCES

- Azizi, G. (2004). Relationship of Last Drought and Ground Water Resource in Qazvin Plain. *Geographical Research*. 46, 131-143.
- Ekrami, M., M. R. Ekhtesasi., and H. Malekinezhad. (2013a). The Effects and Consequences of Climatic Drought on Time Delay and the Change in Water Discharge of Springs and Qanats (Yazd-Ardakan Plain). *Iranian-Water Resources Research*. 9 (2), 19-26.
- Ekrami, M., H. Malekinezhad., and M. R. Ekhtesasi. (2013b). Evaluation of Meteorological droust and Hydrological Drought Impacts on Ground Water Resource. *Iran-Watershed Management Scince & Engineering*. 7 (20).
- Hayes, M. J., M. D. Svoboda, D. A. Wilhite., and O. V. Vanyarkho. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 80 (3), 429-438.
- Hoseinzade, M. M., A. Nohegar. (2011). Effects of Last Two-decade on Ground Water Resource of Minab Plain and Subsidence Occurens. *Environmental Erosion*. 9 (1), 75-97.
- 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. *Irrigation & Drainage Systems*. 22 (2), 159-177.
- Lloyd-Hughes, B., and M. A. Saunders. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of climatology*. 22 (13), 1571-1592.
- McKee, T. B., N. J. Doesken., and J. Kleist. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Paper read at Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology.
- 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), 282-302.
- Naderianfar, M., and H. Ansari. (2011). Effects of Drought Rate-Duration in Multi-Time Scale on Ground Water Levels Change (Neyshabor Plain). *Water Resource Engineering*. (4), 1-15.
- Naderianfar, M., H. Ansari, A. Ziaie., and K. Davari. (2010). Evaluating the Ground Water Level Fluctuations under Different Climatic Condition in the Basin Neyshabour. *Irrigation & Water Engineering*. (3), 21-37
- Shemshaki, A., Y. Mohammadi., and M. J. Bolourchi. Spring. (2011). Investigation on Confined Aquifer & its Role on Subsidence Occurrence in Hashtgerd Plain. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*. 20 (79), 137-142.
- Vicente-Serrano, S. M., and J. I. López-Moreno. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 9 (5), 523-533.
- Wilhite, D. A., and M. H. Glantz. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*. 10 (3), 111-120.