



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۲۶۱-۲۷۵

بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی چندلایه (مطالعه موردی: دشت گرگان)

ایمان کریمی‌راد^۱، کیومرث ابراهیمی^{۲*}، شهاب عراقی‌نژاد^۲

۱. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران
۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۳

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۲۴

چکیده

در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، تأمین آب موردنیاز بخش‌های مختلف، تنها از طریق منابع آب زیرزمینی امکان‌پذیر است. هدف مقاله حاضر، بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آزاد و تحت فشار هم‌مکان در یک سامانه آب زیرزمینی چندلایه است. برای این منظور، آبخوان دشت گرگان با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژی DI، PNI، SPI و GRI و روش تحلیل هم‌بستگی بررسی شد. در این بررسی از آمار ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی، ۱۹ چاه مشاهده‌ای و ۱۹ چاه پیزومتری به‌ترتیب با دوره‌های آماری ۳۸، ۳۸ و ۱۴ ساله بهره‌برده شد. نتایج نشان می‌دهد شاخص SPI عملکرد بهتری در منطقه دارد و برای بررسی رفتار آب زیرزمینی از مقایسه این شاخص با شاخص GRI استفاده شد. بر اساس نتایج، پاسخ سفره‌ها در برابر وقوع خشک‌سالی هواشناسی متفاوت است و SPI بلندمدت ۱۸ ماهه برای سفره آزاد و ۴۸ ماهه برای سفره تحت فشار، بیشترین ارتباط را با نوسانات آب زیرزمینی داشته است. در ضمن، تأثیر نوسانات بارندگی حداکثر تا ۱۵ و ۵ ماه، به‌ترتیب در سفره‌های آزاد و تحت فشار باقی می‌ماند. به بیان دیگر، سفره تحت فشار از اطمینان‌پذیری فراوانی برخوردار است و تنها وقتی شرایط خشک‌سالی یا ترسالی هواشناسی طولانی شود، بر این سفره تأثیر خواهد گذاشت.

کلیدواژه‌ها: تحلیل هم‌بستگی، سفره آزاد، سفره تحت فشار، شاخص بارش استاندارد شده، شاخص منبع آب زیرزمینی.

مقدمه

یکی از پیامدهای تغییر اقلیم، دگرگونی در توزیع مکانی و نوسانات زمانی وقوع نزولات جوی است. در این زمینه، نواحی خشک و نیمه‌خشک در معرض خطر بیشتری قرار دارند که از آن جمله می‌توان به شدت و تغییرپذیری بارش اشاره کرد که سبب افزایش خطر سیلاب و خشک‌سالی در این نواحی شده است (۲۸). ایران به علت داشتن شرایط جغرافیایی و میانگین بارش سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر، در طبقه‌بندی نواحی اقلیمی جهان، در محدوده خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد و وقوع خشک‌سالی از ویژگی‌های اصلی آب‌وهوایی آن محسوب می‌شود (۲۵). بررسی شدت و ضعف خشک‌سالی یا ترسالی با استفاده از شاخص‌های مناسب، ابزار مفیدی برای مطالعه نوسانات اقلیمی تأثیرگذار بر آب زیرزمینی است. از شاخص‌های بررسی وضعیت خشک‌سالی می‌توان به شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی دهک‌ها^۱ (DI) (۱۳)، درصد از نرمال^۲ (PNI) (۲۹)، بارندگی استاندارد شده^۳ (SPI) (۲۲) و شاخص منبع آب زیرزمینی^۴ (GRI) (۲۳) اشاره کرد.

در داخل و خارج از کشور، تحقیقات مربوط به کاربرد شاخص‌های خشک‌سالی به منظور بررسی نوسانات اقلیمی گسترده است و محققان از روش‌های مختلف برای پایش خشک‌سالی و اثر آن بر منابع آبی استفاده کرده‌اند. لشنی زند در مطالعه‌ای در شش حوضه واقع در غرب و شمال غرب کشور، با استفاده از سری‌های زمانی SPI نتیجه گرفت که وقوع خشک‌سالی با تداوم‌های سه‌ماهه، حتی در ایستگاه‌های واقع در مناطق نیمه‌مرطوب، پدیده‌ای معمول و تکرارشونده است (۱۹). میشرا و سینگ^۵ ضمن بررسی

شاخص‌های خشک‌سالی مختلف، SPI را مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل مکانی خشک‌سالی معرفی کردند (۲۴). سادات نوری و همکاران در تحقیقی به‌منظور پیش‌بینی تولید محصول با استفاده از شاخص خشک‌سالی بیان کردند که شاخص SPI به‌منظور بررسی پدیده خشک‌سالی در بازه‌های زمانی مختلف کاربرد گسترده‌ای دارد (۲۶).

ساکریس^۶ و همکاران نیز SPI را شاخصی معرفی کردند که توانایی پایش خشک‌سالی را در چند مقیاس زمانی دارد (۲۷). رضیئی و همکاران خشک‌سالی را با استفاده از شاخص SPI در حوضه مرکزی ایران بررسی کردند. در این بررسی مشخص شد که SPI با مقیاس زمانی کوتاه‌مدت برای پایش خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب نیست و SPI طولانی‌مدت (۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه) مناسب‌تر است (۲). مقدم و همکاران سه شاخص SPI، DI و PNI را برای تعیین خشک‌سالی در استان سیستان و بلوچستان ارزیابی کرده و SPI را به‌عنوان شاخص مناسب پیشنهاد کردند (۸). عیوضی و همکاران در مطالعه‌ای به‌منظور تعیین مناسب‌ترین شاخص خشک‌سالی در استان گلستان، با توجه به معیارهای هم‌بستگی، انحراف معیار و میزان تقارن با وقوع کمینه بارندگی، به ترتیب شاخص‌های DI، SPI، ZSI^۷ و PNI را مناسب ارزیابی کردند؛ ولی به دلیل تفاوت کم، معتقدند نمی‌توان به‌طور یقین برتری نمایه‌ای را تعیین کرد (۴).

درخصوص بررسی نوسانات اقلیمی و اثر آن بر منابع آب زیرزمینی نیز مندیسینو^۸ و همکاران در تحقیق خود برای پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی در مناطق مدیترانه‌ای، به بررسی شاخص‌های SPI و GRI از نظر ضریب

1. Deciles Index
2. Percent of Normal Index
3. Standardized Precipitation Index
4. Groundwater Resource Index
5. Mishra and Singh

6. Tsakiris
7. Z-Score Index
8. Mendicino

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی چندلایه (مطالعه موردی: دشت گرگان)

خشک‌سالی آب زیرزمینی GRI در آبخوان دشت فسا به این نتیجه دست یافتند که SPI با مقیاس زمانی ۴۸ ماهه، بیشترین هم‌بستگی را با GRI دارد که در سطح ۹۹ درصد معنی دار است و تأثیر خشک‌سالی اقلیمی تا ۹ ماه در آبخوان باقی می‌ماند (۳).

بر اساس مطالعات، SPI شاخصی معتبر است که در تحقیقات متعددی، از جمله این مقاله، استفاده شده است. مقادیر شاخص‌های DI و PNI نیز به دلیل سادگی محاسبات، سازگاری با داده‌های ماهانه مورد استفاده در این مقاله و سابقه قبلی استفاده در منطقه، با نتایج روش SPI مقایسه شده است. پس از تعیین مناسب‌ترین شاخص، به منظور بررسی تأثیر نوسانات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی، از GRI استفاده شد. ارزیابی این تأثیرات در دشتی صورت گرفت که سفره‌های آب زیرزمینی آزاد و تحت فشار دارد. وجود سفره‌های آب زیرزمینی آزاد و تحت فشار هم‌مکان، سبب پیچیدگی تأثیر تغذیه از طریق بارندگی بر آب زیرزمینی می‌شود؛ زیرا علاوه بر رژیم متفاوت تغذیه در هر سفره، فعالیت‌های انسانی نیز با تغییر کاربری اراضی و برداشت از سفره تحت فشار از طریق چاه‌های عمیق و تغذیه سفره آزاد با آب برگشتی مزارع و چاه‌های جذبی، سبب به وجود آمدن اندرکنش غیرمستقیم بین سفره‌ها شده است. گفتنی است مطالعه‌ای در زمینه بررسی تأثیر شرایط اقلیمی بر هر یک از سفره‌های آزاد و تحت فشار در یک سامانه آب زیرزمینی چندلایه یافت نشد. بنابراین، هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی آزاد و تحت فشار هم‌مکان در سامانه آب زیرزمینی چندلایه است.

مواد و روش‌ها

استان گلستان با مساحت ۲۲۵۱۰ کیلومتر مربع، دارای ۴۵۰ میلی‌متر بارندگی متوسط سالیانه است. این استان بر اساس

هم‌بستگی در ماه‌های مختلف پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هرچه مقیاس زمانی SPI بزرگ‌تر باشد، هم‌بستگی آن با شاخص GRI بیشتر است (۲۳). خان^۱ و همکاران با بررسی وضعیت خشک‌سالی در اراضی زراعی به این نتیجه رسیدند که در حالی که از منابع آب زیرزمینی در نواحی مختلف بهره‌برداری می‌شود، در موارد زیادی بین شاخص SPI و سطح آب زیرزمینی ارتباط قوی وجود دارد (۱۷). ایمانی و طالبی اسفندارانی با استفاده از شاخص‌های SPI و GRI به بررسی آثار خشک‌سالی بر سطح سفره آب زیرزمینی دشت بهاباد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده افت شدید سفره آب زیرزمینی به خصوص در دهه اخیر و رابطه شاخص SPI بلندمدت (در مقیاس ۴۸ ماهه) با سطح آب زیرزمینی است (۱). محمدی قلعه‌نی و همکاران به منظور بررسی رابطه بین خشک‌سالی و نوسانات آب زیرزمینی در آبخوان دشت ساوه، از شاخص SPI استفاده کردند. در این تحقیق، شاخص SPI با مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه با تراز سطح آب زیرزمینی با تأخیر زمانی ۵ ماهه، بیشترین هم‌بستگی را داشته است (۵). همچنین مقدسی و همکاران به منظور پایش خشک‌سالی استان تهران از DI، SPI و EDI^۲ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد DI نوسان شدیدی دارد و هماهنگی زمانی و مکانی مناسبی بین نتایج آن وجود ندارد. SPI نیز شروع خشک‌سالی را زودتر از سایر شاخص‌ها اعلام می‌کند؛ ولی در بیان شدت آن درست عمل نمی‌کند. در مقابل، EDI عملکرد مناسبی دارد؛ ولی نیاز به داده‌های پیوسته روزانه و مراحل محاسباتی طولانی از محدودیت‌های آن است (۷). صیف و همکاران با بررسی ارتباط بین شاخص خشک‌سالی اقلیمی SPI و شاخص

1. Khan
2. Effective Drought Index

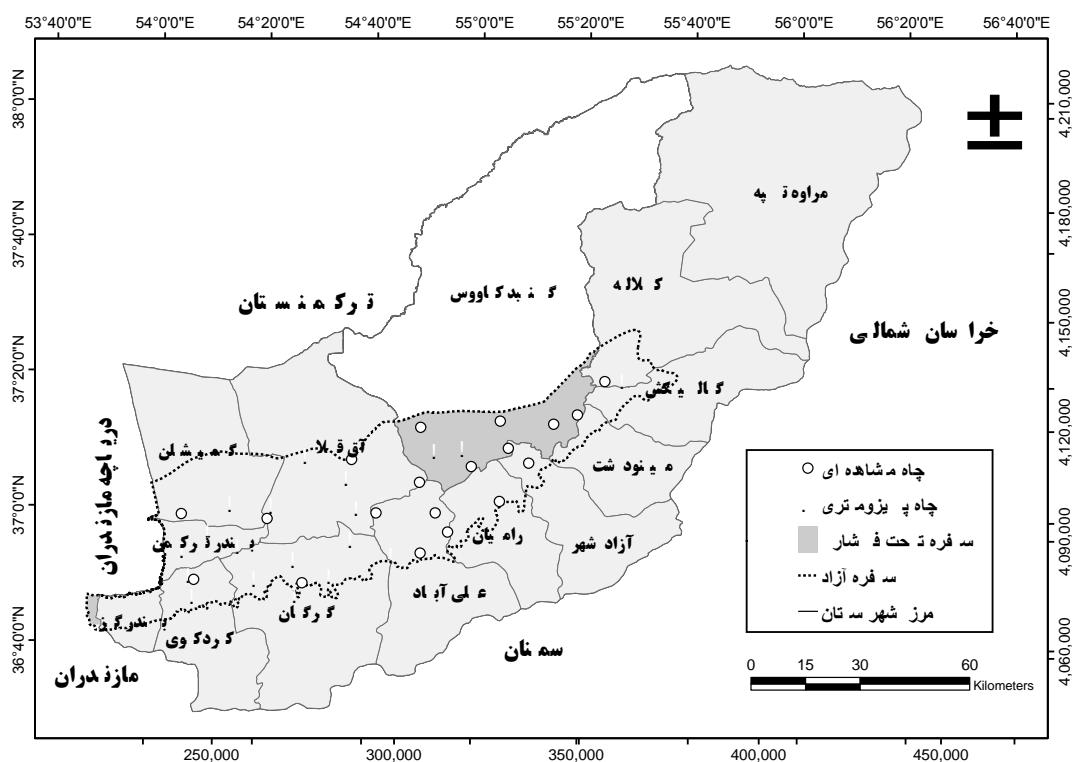
مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

ایمان کریمی راد، کیومرث ابراهیمی، شهاب عراقی نژاد

هیدرومتری وجود دارد و بیش از نیمی از این ایستگاه‌ها در دهه اخیر احداث شده‌اند؛ ضمن آنکه تعداد زیادی از آن‌ها نقص آماری دارند. در مقاله حاضر، از آمار بلندمدت بارندگی ماهانه ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی استفاده شده است که دارای دوره آماری مشترک در سال‌های آبی ۵۵-۱۳۵۴ تا ۹۲-۱۳۹۱ بوده و پراکنش مناسبی در سطح استان داشته‌اند (شکل ۱). همچنین از اطلاعات سطح آب زیرزمینی ۱۹ حلقه چاه مشاهده‌ای واقع در سفره آزاد با طول دوره آماری ۳۸ سال (مدت مشابه آمار بارندگی) و ۱۹ چاه پیزومتری حفر شده در سفره تحت فشار با ۱۴ سال آمار (از سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ تا ۹۲-۱۳۹۱) بهره گرفته شد (شکل ۱). این اطلاعات را دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای گلستان ثبت کرده است.

طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، در شمال دارای اقلیم نیمه‌خشک و در جنوب و جنوب غرب، معتدل نیمه‌مرطوب است (۶). وسعت آبخوان چندلایه آبرفتی دشت گرگان، در محدوده حوضه‌های آبریز گرگانرود، قره‌سو و خلیج، ۴۷۲۶/۵ کیلومتر مربع و دارای سفره‌های آزاد و تحت فشار است. سفره تحت فشار شامل تمام این سطح می‌شود؛ به غیر از نوار جنوبی آن که تک‌لایه است و مساحتی حدود ۴۰۰ کیلومتر مربع دارد. این آبخوان به صورت یکپارچه و پیوسته از دریای مازندران در غرب تا کلاله در شرق به طول حدود ۱۳۰ کیلومتر و عرض حدود ۳۵ کیلومتر از دامنه ارتفاعات جنوبی تا دیوار اسکندر در شمال امتداد دارد. این آبخوان قسمت اصلی نیازهای شرب و حدود ۶۵ درصد از مصارف کشاورزی محدوده را تأمین می‌کند (۹). در استان گلستان، بیش از ۳۰۰ ایستگاه هواشناسی و



شکل ۱. موقعیت آبخوان آبرفتی استان گلستان و ایستگاه‌های باران‌سنجی و چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومتری منتخب

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

برای برآورد میزان ماندگاری از نمای هرست^{۱۱} (H) استفاده می‌شود که بین ۰ تا ۱ متغیر است (۱۵). هرچه H به ۱ نزدیک‌تر باشد، درجهٔ تداوم یا حافظهٔ بلندمدت افزایش می‌یابد و مقادیر کمتر از ۰/۵ مربوط به ضدماندگاری می‌شود. سری زمانی ضدماندگار نوسان شدید دارد و هر مقدار در آن با گام زمانی قبل مخالفت می‌کند. به عبارت دیگر، در سری زمانی ماندگار در کوتاه‌مدت این تمایل وجود دارد که مقادیر بالا با مقادیر بالای دیگر و مقادیر پایین با مقادیر پایین دیگر ادامه یابند؛ ولی در حالت ضدماندگار مقادیر همواره تمایل دارند به میانگین بلندمدت خود نزدیک شوند. $H=0/5$ نیز نشان‌دهندهٔ نبود حافظهٔ بلندمدت است (۱۰). پس از تعیین مشخصات سری‌های زمانی که معرف بخشی از رفتار پدیده‌های بررسی شده است، به محاسبهٔ شاخص‌های خشک‌سالی اقلیمی و آب زیرزمینی مورد نظر پرداخته شد. شاخص دهک‌ها (DI) اساساً از تقسیم توزیع احتمال وقوع آمار ثبت شده بلندمدت بارش بر بخشی از هریک از ۱۰ درصد توزیع به دست می‌آید و هریک از بخش‌ها یک دهک نامیده می‌شوند. به‌منظور محاسبهٔ دهک‌ها، ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه یا سالانه به‌طور صعودی مرتب شده، سپس احتمال وقوع بارش یک ماه یا سال معین از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود (۱۳):

$$P_i = \frac{i}{N+1} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، P_i احتمال وقوع بارندگی در ردیف i ام برحسب درصد و N تعداد داده‌های بارندگی است. شاخص درصد نرمال (PNI) از تقسیم میزان بارندگی مشاهده‌ای بر میانگین بلند آن (رابطهٔ ۲) به دست می‌آید و برحسب درصد بیان می‌شود (۲۹):

در مقالهٔ حاضر، ابتدا با بررسی برخی از مشخصات آماری به تحلیل اجزای سری‌های زمانی بارندگی ماهانه، سطح آب سفرهٔ آزاد و سطح پیزومتريک سفرهٔ تحت فشار پرداخته شده است. به این منظور، باید به مؤلفه‌هایی مانند ایستایی^۱، توزیع داده‌ها، ماندگاری^۲، روند^۳ و تناوب^۴ توجه شود؛ زیرا این مؤلفه‌ها بیان‌کنندهٔ چگونگی تغییر سری‌های زمانی و رفتار اقلیم و آب زیرزمینی منطقه‌اند. سپس با تعیین شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیک مناسب برای منطقه، به بررسی ارتباط میان این دو در زمان وقوع خشک‌سالی و ترسالی پرداخته شد. روش‌های مختلفی برای آزمون ایستایی ارائه شده است که در این مقاله، از روش رایج ریشهٔ واحد دیکی - فولر^۵ (ADF) استفاده شد (۱۲). در مرحلهٔ بعد با استفاده از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف^۶ (۲۱) بهترین توزیع آماری داده‌ها مشخص شد. همچنین مؤلفهٔ روند معنی‌دار توسط آزمون من - کندال^۷ (۲۰) استخراج شد و بررسی وجود دوره یا تناوب در سری‌های زمانی با استفاده از تناوب‌نما^۸ و نرم‌افزار انکلیم^۹ (نسخهٔ ۵/۰۲۵) انجام گرفت (۱۱). سپس مؤلفهٔ ماندگاری سری زمانی با استفاده از کد نوشته‌شده در محیط نرم‌افزار MATLAB (نسخهٔ R2009a) بررسی شد (۱۸). ماندگاری به نرخ از بین رفتن حافظهٔ بلندمدت^{۱۰} در یک سری زمانی اطلاق می‌شود؛ به صورتی که هرچه ماندگاری بیشتر باشد، هر مقدار در سری زمانی، بیشتر تحت تأثیر مقادیر گام‌های زمانی قبل قرار دارد.

1. Stationarity
2. Persistence
3. Trend
4. Period
5. Augmented Dickey-Fuller test
6. Kolmogorov-Smirnov Test
7. Mann-Kendall
8. Periodogram
9. AnClim
10. Long-time memory

11. Hurst exponent

ایمان کریمی‌راد، کیومرث ابراهیمی، شهاب عراقی‌نژاد

بارش استاندارد شده (SPI)، برازش توزیع آماری مناسب بر روی اطلاعات بارندگی است که در مقاله حاضر شامل داده‌های ماهانه است.

(۲) $PNI = \frac{P_i}{P} \times 100$
 در این رابطه، P_i بارندگی ماه i و P میانگین بلندمدت بارندگی همان ماه است. مسئله اصلی در محاسبه شاخص

جدول ۱. حدود تغییرات شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی

شاخص SPI و GRI	ویژگی بارشی	شاخص DI	شاخص PNI	ویژگی بارشی
$2 <$	ترسالی شدید	۹۰ تا ۱۰۰	$160 <$	بسیار مرطوب
۱/۵ تا ۱/۹۹	خیلی مرطوب	۸۰ تا ۹۰	۱۴۵ تا ۱۶۰	مرطوب
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط	۷۰ تا ۸۰	۱۳۰ تا ۱۴۵	نسبتاً مرطوب
۰/۵ تا ۰/۹۹	ترسالی ضعیف	۶۰ تا ۷۰	۱۲۰ تا ۱۳۰	نیمه مرطوب
۰/۴۹ تا ۰/۴۹	تقریباً نرمال	۴۰ تا ۶۰	۸۰ تا ۱۲۰	نرمال
-۰/۵ تا -۰/۹۹	خشک‌سالی ضعیف	۳۰ تا ۴۰	۷۰ تا ۸۰	خشک‌سالی ضعیف
-۱ تا -۱/۴۹	خشک‌سالی متوسط	۲۰ تا ۳۰	۵۵ تا ۷۰	خشک‌سالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشک‌سالی شدید	۱۰ تا ۲۰	۴۰ تا ۵۵	خشک‌سالی شدید
$-2 >$	خشک‌سالی بسیار شدید	۰ تا ۱۰	$40 >$	خشک‌سالی بسیار شدید

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (3)$$

در این رابطه، $D_{y,m}$ 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 m است. حدود تغییرات شاخص‌های ذکر شده در جدول ۱ ارائه شده است.

پس از محاسبه شاخص‌ها، با مقایسه نتایج به دست آمده و مقادیر بارندگی سالانه از نظر انطباق با کمینه‌ها و بیشینه‌ها، مناسب‌ترین شاخص تعیین شد. سپس با توجه به مقادیر شاخص اقلیمی منتخب و شاخص آب زیرزمینی محاسبه شده برای سفره‌های آزاد و تحت فشار و استفاده از روش تحلیل هم‌بستگی، میزان تداوم تأثیر وضعیت بارشی بر هریک از سفره‌ها مشخص گردید.

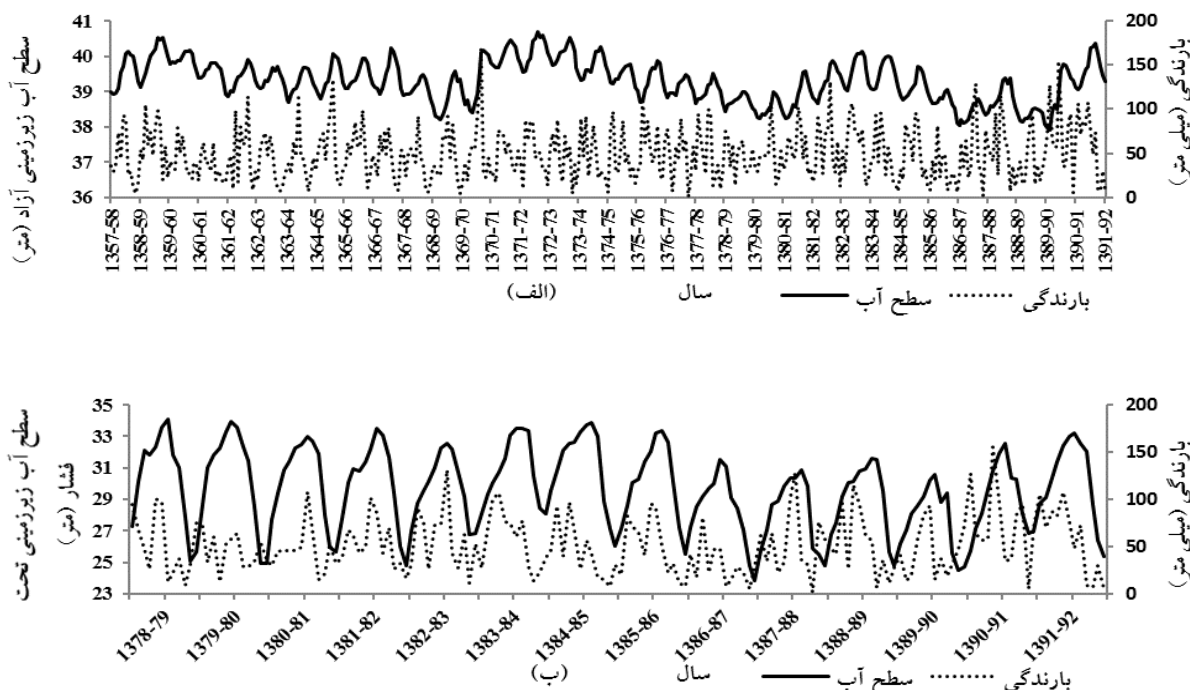
توزیع گاما به دلیل محدود شدن به صفر و نپذیرفتن مقادیر منفی، چولگی راست و انعطاف پذیری فراوان، تنها با داشتن دو پارامتر، توزیع مناسبی برای برازش روی داده‌های بارندگی است (۱۶). با فرض تبعیت بارندگی از توزیع گاما، تابع چگالی احتمال گاما محاسبه و با استفاده از توزیع احتمال تجمعی این تابع و انتقال آن به توزیع نرمال استاندارد تجمعی مقدار شاخص SPI برای سری زمانی بارندگی مورد نظر به دست می‌آید (۲۲). محاسبه SPI در این مقاله با استفاده از برنامه کدنویسی شده توسط مرکز ملی کاهش خشک‌سالی^۱ ایالات متحده انجام گرفت. مقدار شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۲۳):

1. The national drought mitigation center

نتایج و بحث

در هشت سال از دوره مورد مطالعه (سال‌های ۹۱-۹۲، ۹۱-۸۴، ۸۳-۹۰، ۸۳-۸۲، ۷۷-۸۲، ۷۶-۷۱، ۶۶-۷۰، ۶۵-۶۰، ۵۹-۶۰) مقادیر بیشینه بارش به میزان درخور ملاحظه‌ای بیشتر از میانگین بلندمدت بوده و در پنج سال نیز (سال‌های ۸۷-۸۶، ۶۹-۶۸، ۶۴-۶۳، ۶۲-۶۱، ۶۱-۶۰) کمینه‌های بارش رخ داده نسبت به میانگین افت داشته است. در این مدت، سطح آب سفره آزاد بین ۳۷/۹ و ۴۰/۷ متر از سطح دریا در نوسان بوده و تغییرات سطح پیژومتریک سفره تحت فشار نیز بین ۲۳/۸ و ۳۴/۱ بوده است.

نمودار سری‌های زمانی بارندگی ماهانه، سطح آب سفره آزاد و سطح پیژومتریک سفره تحت فشار در شکل ۲ نشان داده شده که هر نمودار میانگین ۱۹ سری داده ثبت شده در ایستگاه‌ها و چاه‌های مربوطه است. این داده‌ها برای اولین بار در مقاله حاضر منتشر می‌شوند و مطابق جست‌وجوهای انجام شده، طی مقاله حاضر مورد مشابهی یافت نشد. میانگین بارندگی ماهانه در دوره مورد بررسی ۵۰ میلی‌متر و بین ۰/۴ (تیر ۱۳۷۴) تا ۱۶۸ میلی‌متر (خرداد ۱۳۶۷) متغیر بوده است. نوسانات سالانه بارندگی به گونه‌ای است که



شکل ۲. نمودار تغییرات سطح آب (الف) سفره آزاد و (ب) سفره تحت فشار

سفره آزاد و تحت فشار ماندگار بوده و در سفره آزاد از درجه ماندگاری بیشتری برخوردار است. گاتمن (۱۴) نشان داد که فرض پیروی همیشگی داده‌های بارندگی از توزیع گاما صحیح نیست و باید توزیع احتمالاتی بهینه برای هر سری زمانی به صورت جداگانه تعیین گردد.

جدول ۲، الف، نتایج حاصل از آزمون ایستایی ADF را در سطح اطمینان ۹۵ درصد و ایستایی همه سری‌های زمانی را نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر، نمای هرست به دست آمده (جدول ۲، ب) سری زمانی بارندگی فاقد حافظه بلندمدت است. در مقابل سطح آب زیرزمینی در

مدیریت آب و آبیاری

ایمان کریمی‌راد، کیومرث ابراهیمی، شهاب عراقی‌نژاد

جدول ۲. نتایج آزمون‌های ایستایی و روند و بررسی ماندگاری

ب) بررسی ماندگاری			الف) آزمون ایستایی ADF			
نتیجه آزمون	نمای هرست	سری زمانی	نتیجه	حد آستانه	آماره	سری زمانی
ضد ماندگار	۰/۴۷۳۵	بارندگی	ایستا	-۳/۴۲	-۴/۴۱	بارندگی
ماندگار	۰/۸۷۳۱	سطح آب سفره آزاد	ایستا	-۳/۱۳	-۳/۲۶	سطح آب سفره آزاد
ماندگار	۰/۶۸۶۶	سطح پیژومتریک سفره تحت فشار	ایستا	-۳/۴۴	-۳/۷	سطح پیژومتریک سفره تحت فشار
شیب سن	نتیجه آزمون	P-Value	سری زمانی			
-	روند ندارد	۰/۱۹۸۲	بارندگی			پ) آزمون
-0.001	روند دارد	۰/۰۰۰۰	سطح آب سفره آزاد			من-کندال
-0.012	روند دارد	۰/۰۰۳	سطح پیژومتریک سفره تحت فشار			

تحت فشار (۱۴ سال اخیر) فاقد روند است. در مرحله بعد، به منظور بررسی تناوب، به رسم تناوب نما (شکل ۳) پرداخته‌ایم. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، هر سه سری زمانی دارای تناوب ۱۲ ماهه است (روی نمودارها با دایره مشخص شده است). این موضوع بیان‌کننده این مطلب است که عوامل انسانی مؤثر بر نوسانات سطح آب سفره‌های آب زیرزمینی نیز مانند شرایط اقلیمی، تناوب ۱۲ ماهه دارد. به عبارت دیگر، میزان برداشت بهره‌برداران از این سفره‌ها با میزان بارندگی هماهنگ است و در زمان کمبود بارندگی (فصل تابستان)، برداشت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، سطح ایستایی سفره آزاد، دارای تناوبی بلندمدت نیز است (شکل ۳، ب). این حالت نشان‌دهنده تأثیر عوامل دیگری است که سبب تغییرات بلندمدت در سطح سفره می‌شود. برای مثال، سفره آزاد در طول سال توسط چاه‌های جذبی و در زمان آبیاری به وسیله آب برگشتی مزارع در حال تغذیه است.

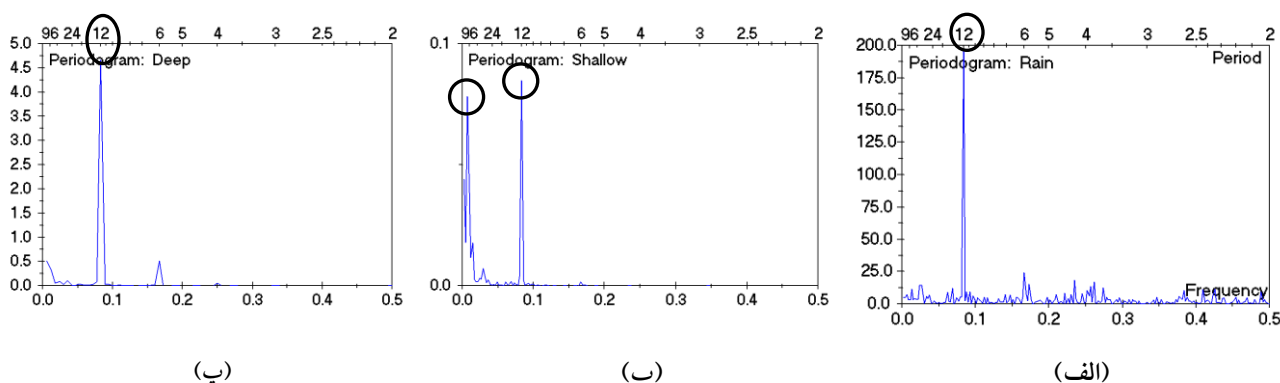
به همین دلیل، در این مقاله آماره آزمون نیکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف برای سری زمانی بارندگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر با ۰/۰۱۸ محاسبه و توزیع گاما به عنوان توزیع آماری منتخب توسط نرم‌افزار ایزیفیت^۱ (نسخه ۵/۵) تعیین شد. این نتیجه با فرض محاسبه SPI مطابقت دارد. همچنین نتایج آزمون من-کندال در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد و مقدار عددی شیب سن^۲ در جدول ۲، پ نشان داده شده است که در صورت معنادار بودن روند سری زمانی، نشان‌دهنده میزان و چگونگی (صعودی یا نزولی بودن) آن است. بر این اساس، بارندگی روند معنی‌دار ندارد و سطح پیژومتریک سفره تحت فشار با نرخ متوسط ۱۲ میلی‌متر بر ماه در حال افت است. این در حالی است که نرخ تغییرات سطح آب در سفره آزاد در کل دوره آماری (۳۸ سال) به طور متوسط تنها ۱ میلی‌متر بر ماه است و در طول دوره مشابه با سفره

1. Easyfit
2. Sen slope

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی چندلایه (مطالعه موردی: دشت گرگان)



شکل ۳. پریودوگرام سری زمانی (الف) بارندگی، (ب) سطح آب سفره آزاد و (پ) سطح آب سفره تحت فشار

تمامی وضعیت‌های خشک‌سالی و ترسالی را با همان شدت مورد انتظار بر اساس مقادیر بارندگی شناسایی کند. بنابراین، در ادامه از شاخص SPI به منظور بررسی ارتباط خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی استفاده شده است. شایان ذکر است شاخص منبع آب زیرزمینی در سفره آزاد و در مقیاس سالانه، هیچ مورد خشک‌سالی را نشان نداده و در شش سال (سال‌های ۸۴-۸۳، ۷۵-۸۳-۷۴، ۷۳-۷۲، ۷۲-۷۱، ۶۰-۵۹) با گذر شاخص از عدد ۱، ترسالی متوسط و در ۱۳ مورد نیز ترسالی ضعیف رخ داده است. در سفره تحت فشار، چهار سال ترسالی متوسط حاکم بوده است (سال‌های ۸۵-۸۴، ۸۴-۸۳، ۷۹-۸۳-۸۰، ۷۸-۷۹) و در شش سال از ۱۴ سال بررسی شده نیز وضعیت ترسالی ضعیف مشاهده می‌شود.

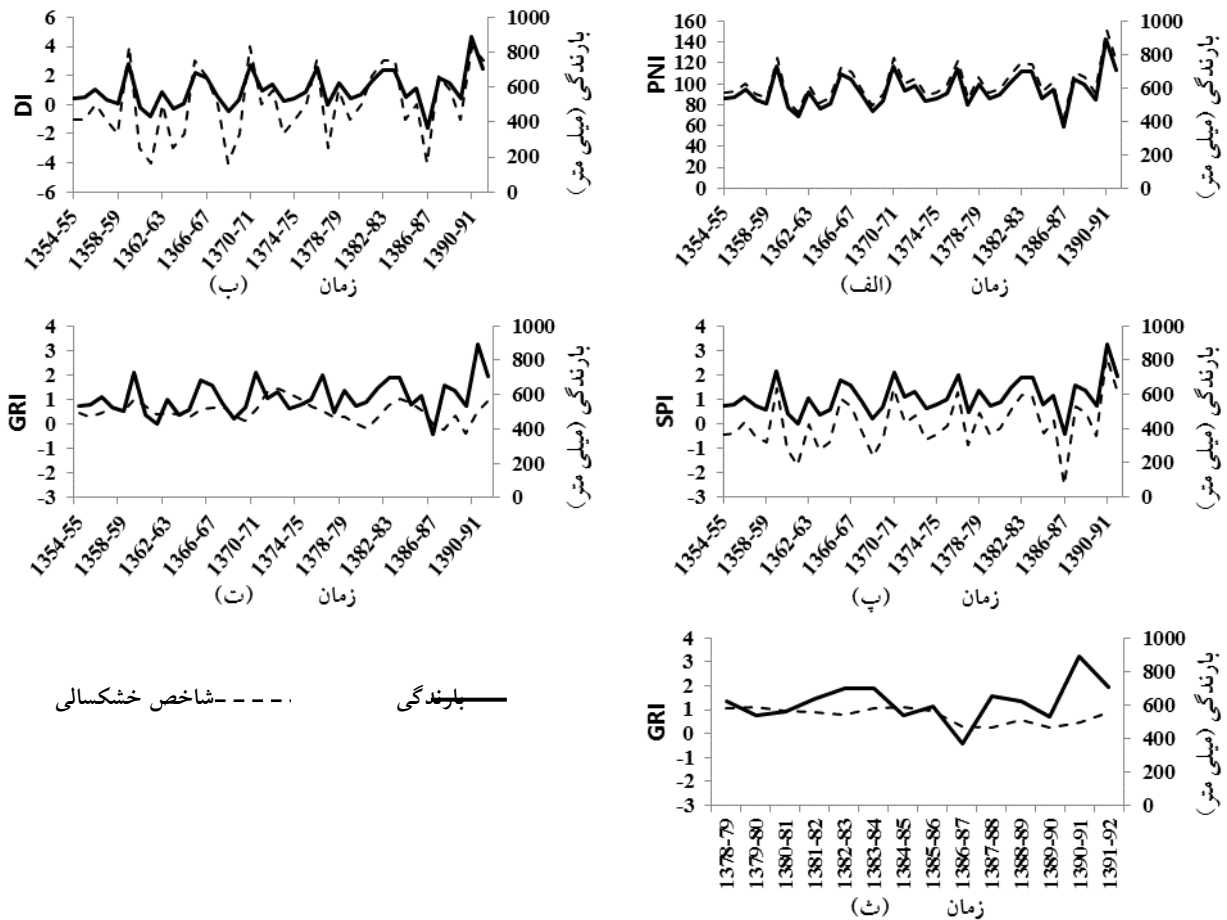
با بررسی تطابق بین شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI و شاخص هیدرولوژی منبع آب زیرزمینی GRI در سفره آزاد، این نتیجه به دست آمد که شاخص SPI در مقیاس ۱۸ ماهه (SPI-18) بیشترین هم‌بستگی را با GRI دارد (جدول ۳). همچنین با استفاده از SPI-18 و به ازای مقادیر تأخیر زمانی تا ۱۵ ماه در شاخص GRI هم‌بستگی بسیاری با اطمینان ۹۹ درصد مشاهده شد (جدول ۴).

شاخص‌های مورد نظر برای خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی در مقیاس زمانی سالانه برای منطقه محاسبه شد (شکل ۴). همان طور که مشاهده می‌شود، شاخص PNI نتوانست سال‌هایی را شناسایی کند که با توجه به مقادیر بارندگی، ترسالی در آن‌ها رخ داده است و تنها سه مورد از ترسالی‌ها در سال‌های ۸۷-۸۶، ۶۹-۶۸، ۶۱-۶۰-۶۸ تشخیص داده شده است. در مجموع، این شاخص به دلیل اینکه حدود تعیین‌شده برای وقوع سطوح مختلف خشک‌سالی و ترسالی در آن (جدول ۱)، تنها از میانگین مقادیر بارندگی تأثیر می‌پذیرد، چگونگی توزیع مقادیر بارندگی را در منطقه لحاظ نکرده و با قضاوتی سخت‌گیرانه، شدت وضعیت‌های به وقوع پیوسته را به درستی منعکس نمی‌کند. در مقابل، شاخص DI به دلیل کوچک در نظر گرفته شدن فاصله حدود مختلف خشک‌سالی و ترسالی، حساسیت بسیاری به مقادیر بارندگی دارد و به سرعت تغییر وضعیت را گزارش می‌کند که بعضاً سبب بیان غیرواقعی موارد خشک‌سالی و ترسالی شده است (خشک‌سالی در سال‌های آبی ۷۸-۷۷، ۷۴-۷۳، ۷۰-۶۵، ۶۹-۶۸، ۶۴-۵۸ و ترسالی در سال‌های آبی ۸۸-۸۷، ۸۲-۸۱، ۶۷-۶۶)؛ ولی شاخص SPI توانست

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

ایمان کریمی راد، کیومرث ابراهیمی، شهاب عراقی نژاد



شکل ۴. نمودار تغییرات شاخص DI، PNI، SPI (الف، ب و پ) و GRI سفره آزاد (ت) و تحت فشار (ث) در برابر متوسط بارندگی سالانه

جدول ۳. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین SPI در مقیاس زمانی مختلف (N) با GRI در سفره آزاد

۴۸	۲۴	۱۸	۱۲	۹	۶	۳	۱	N
+۰/۳۷	+۰/۴۳	+۰/۴۴	+۰/۴۲	+۰/۴۱	+۰/۳۶	+۰/۲۲	۰/۰۶	ضریب همبستگی

† اطمینان ۹۹ درصد

جدول ۴. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون به ازای تأخیرهای مختلف زمانی در سفره آزاد

۶	۵	۴	۳	۲	۱	صفر	تعداد ماه‌های تأخیر
+۰/۳۲	+۰/۳۶	+۰/۳۸	+۰/۴۰	+۰/۴۲	+۰/۴۴	+۰/۴۴	ضریب همبستگی
۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	تعداد ماه‌های تأخیر
+۰/۱۶	+۰/۱۸	+۰/۲۰	+۰/۲۲	+۰/۲۴	+۰/۲۷	+۰/۳۰	ضریب همبستگی
۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	تعداد ماه‌های تأخیر
++۰/۱۰	++۰/۱۰	++۰/۱۱	++۰/۱۱	++۰/۱۲	+۰/۱۳	+۰/۱۴	ضریب همبستگی

† اطمینان ۹۹ درصد؛ ++ اطمینان ۹۵ درصد

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی چندلایه (مطالعه موردی: دشت گرگان)

در سفره تحت فشار، شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه بیشترین همبستگی را با شاخص آب زیرزمینی (SPI-48) دارد (جدول ۵). همچنین این شاخص به ازای مقادیر تأخیر زمانی تا ۵ ماه با اطمینان ۹۹ درصد، با شاخص GRI همبستگی دارد (جدول ۶).

جدول ۵. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین SPI در مقیاس زمانی مختلف (N) با GRI در سفره تحت فشار

N	۱	۳	۶	۹	۱۲	۱۸	۲۴	۴۸
ضریب همبستگی	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۴

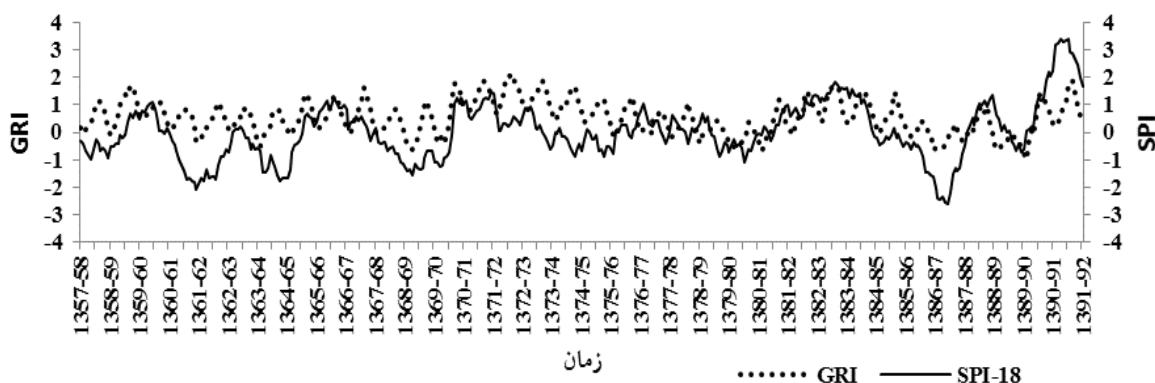
† اطمینان ۹۹ درصد؛ †† اطمینان ۹۵ درصد

جدول ۶. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون به ازای تأخیرهای مختلف زمانی در سفره تحت فشار

تعداد ماه‌های تأخیر	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ضریب همبستگی	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۱۹
تعداد ماه‌های تأخیر	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
ضریب همبستگی	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶

† اطمینان ۹۹ درصد؛ †† اطمینان ۹۵ درصد

شکل ۵ تغییرات شاخص‌های SPI-18 و GRI را برای سفره آزاد در برابر هم نشان می‌دهد. شکل ۶ نیز تغییرات SPI-48 را در برابر GRI سفره تحت فشار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین تغییرات مقادیر هماهنگی وجود دارد و در ضمن، کاهش شدت نوسانات شاخص آب زیرزمینی در مقایسه با نوسانات اقلیمی روی داده که البته، مورد انتظار بوده است.

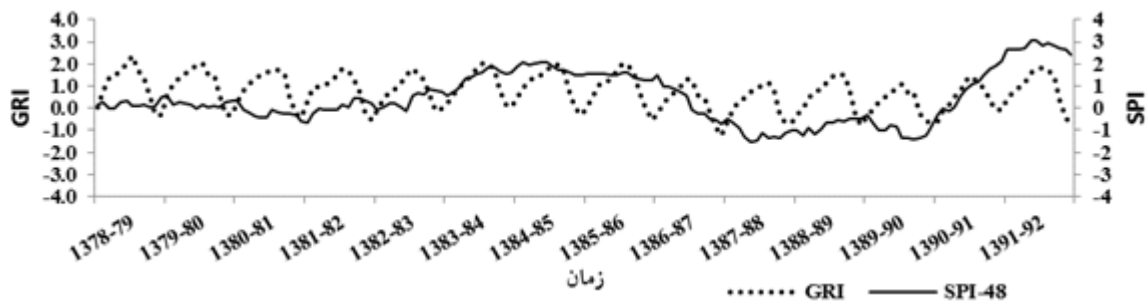


شکل ۵. نمودار تغییرات شاخص‌های SPI-18 و GRI در سفره آزاد

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

ایمان کریمی‌راد، کیومرث ابراهیمی، شهاب عراقی‌نژاد



شکل ۶: نمودار تغییرات شاخص‌های GRI و SPI-48 در سفره تحت فشار

که میزان دخالت عوامل انسانی در این سفره (از نظر تغذیه و تخلیه) به حدی است که تأثیر بلندمدتی به همراه دارد. همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی در سفره آزاد ماندگار است و حافظه طولانی مدت دارد که بیان‌کننده تبعیت نکردن صرف آن از نوسانات کوتاه مدت فصلی و تأثیرپذیری از مجموعه‌ای از عوامل (اقليمی و انسانی) در بلندمدت است. نتایج نشان‌دهنده تفاوت واکنش سفره آب زیرزمینی آزاد و تحت فشار در برابر وقوع خشک‌سالی هواشناسی است. در سفره تحت فشار در مقایسه با سفره آزاد، شاخص SPI بلندمدت‌تری به‌عنوان بهترین شاخص انتخاب شد (۴۸ ماهه در برابر ۱۸ ماهه). این سفره تنها در زمانی به شرایط اقلیمی واکنش نشان می‌دهد که شرایط خشک‌سالی یا ترسالی هواشناسی با در نظر گرفتن بازه زمانی طولانی‌تری رخ داده باشد. این موضوع به ارتباط نوسانات اقلیمی و نوسانات سطح سفره تحت فشار اشاره دارد و میزان تأثیرپذیری کمتر سفره تحت فشار از عوامل طبیعی را نشان می‌دهد. روند کاهشی سطح این سفره احتمالاً ناشی از عوامل انسانی است.

در مقاله حاضر در بررسی میزان تأخیر و تداوم خشک‌سالی هیدرولوژیکی در هریک از سفره‌های آزاد و تحت فشار، به‌عنوان موضوعاتی که تاکنون به آن پرداخته نشده است، با استفاده از تحلیل هم‌بستگی مشخص شد که طول مدت تأثیر وضعیت خشک‌سالی یا ترسالی بر آبخوان

بر اساس نتایج، شاخص SPI بهترین کارایی را در بیان وضعیت بارش دارد. تعیین این شاخص به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص با نتایج میثرا و سینگ (۲۴)، سادات نوری و همکاران (۲۶)، ساکرین و همکاران (۲۷) و مقدم و همکاران (۸) مطابقت دارد؛ ولی با عیوضی و همکاران (۴) که در استان گلستان و البته با مجموعه ایستگاه‌های متفاوت مطالعه خود را به انجام رسانده‌اند، مطابقت ندارد. در سفره‌های آزاد و تحت فشار، به ترتیب شاخص‌های SPI با مقیاس زمانی ۱۸ و ۴۸ ماهه بهترین نتایج را داشته‌اند. این با نتایج ایمانی و طالبی اسفندارانی (۱) و محمدی قلعه‌نی و همکاران (۵) از نظر بلندمدت بودن شاخص مؤثر بر سفره آب زیرزمینی مطابقت دارد.

با توجه به نبود روند در سری زمانی بارندگی و سطح سفره آزاد در ۱۴ سال اخیر، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که احتمالاً عوامل انسانی باعث بروز روند منفی و افت سطح آبخوان تحت فشار با نرخ متوسط ۱۲ میلی‌متر در ماه شده است. به عبارت دیگر، سطح آبخوان تحت فشار طی دوره ۱۴ ساله بررسی شده، بیش از ۲ متر افت کرده است که به‌منظور جلوگیری از وقوع شرایط بحرانی و بی‌بازگشت، مانند نشست دشت، مدیریت برداشت از این بخش ضروری است.

از وجود تناوب بلندمدت در سری زمانی سطح سفره آزاد، علاوه بر تناوب طبیعی ۱۲ ماهه می‌توان نتیجه گرفت

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی چندلایه (مطالعه موردی: دشت گرگان)

۳. صیفم، محمدزاده ح. و مساعدی ا (۲۰۱۲) ارزیابی تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت فسا با استفاده از شاخص‌های بارندگی معیار شده، منابع آب زیرزمینی و قابلیت هدایت الکتریکی معیار شده. مهندسی منابع آب. ۵: ۴۵-۵۹.
۴. عیوضیم، مساعدی ا. و مصباح س (۱۳۹۱) بررسی و تعیین مناسب‌ترین نمایه خشکسالی اقلیمی در سطح استان گلستان. مجموعه مقالات سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری: ۱-۷.
۵. محمدی قلعه‌نی م، ابراهیمی ک. و عراقینژاد ش (۱۳۹۱) ارزیابی تأثیر عوامل اقلیمی بر افت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دشت ساوه. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۹(۴): ۱۸۹-۲۰۰.
۶. مصطفی‌زاده ر. و شیخ و (۱۳۹۰) ارزیابی تراکم شبکه باران سنجی استان گلستان با استفاده از روش همبستگی مکانی. پژوهش‌های آبخیزداری. (۹۳): ۷۹-۸۷.
۷. مقدسیم، پایمزد ش. و مرید س (۲۰۱۰) پایش مکانی خشکسالی سالهای ۱۳۷۷-۱۳۷۸ تا ۱۳۷۹-۱۳۸۰ استان تهران با استفاده از شاخصهای EDI، SPI، DI و سیستم اطلاعات جغرافیایی. مدرس علوم انسانی برنامه‌ریزی و آمایش فضا. ۹(۱): ۱۹۷-۲۱۵.
۸. مقدم و، جمالی ج، جوانمرد س، مهدیان ع. و خزانه‌داری ل (۱۳۸۰) پایش خشکسالی بر اساس نمایه SPI، دهک‌ها و نرمال در استان سیستان و بلوچستان. مجموعه مقالات اولین کنفرانس بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، دانشگاه زابل، ایران: ۶۹-۸۰.
- از همان ماه اول آغاز می‌شود و تا ۱۵ ماه در بخش آزاد آبخوان باقی خواهد ماند. این در حالی است که در سفره تحت فشار، تأثیر نوسانات بارندگی حداکثر تا ۵ ماه در آبخوان وجود دارد و اثر آن زودتر محو می‌شود.
- بر پایه نتایج این مقاله، سفره آزاد در آبخوان آبرفتی چندلایه استان گلستان پایدار است و شرایط اقلیمی از جمله خشکسالی‌ها، تاکنون تأثیر چندانی بر سطح ایستابی آن نداشته است. البته سطح پیرومتری سفره تحت فشار تا اندازه‌ای روند کاهشی دارد که ممکن است هشداردهنده باشد. این شرایط می‌تواند بیان‌کننده تغذیه سفره آزاد با بخشی از آب برداشت شده از سفره تحت فشار، در قالب آب برگشتی مزارع و نفوذ از چاه‌های جذبی فاضلاب باشد. در صورت ادامه این روند، ضمن ایجاد اثرهای منفی در سفره تحت فشار، امکان تأثیرپذیرفتن سفره آزاد نیز وجود دارد.

قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه تهران و شرکت آب منطقه‌ای گلستان تشکر می‌شود که امکانات و داده‌های لازم را برای انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه تأمین کردند.

منابع

۱. ایمانیم، و طالبی اسفندارانی ع (۱۳۹۰) بررسی آثار خشکسالی بر تغییرات سطح سفره آب زیرزمینی دشت بهاباد یزد با استفاده از شاخصهای SPI و GRI. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ایران: ۱-۸.
۲. رضیئی ط، شکوهی ع، ثقفیان ب. و دانش کار پ (۱۳۸۲) پایش پدیده خشکسالی در ایران مرکزی با استفاده از شاخص SPI. مجموعه مقالات سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، دانشگاه اصفهان، ایران: ۲۰۴-۲۱۳.

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

- toolkit for computation of multiple measures on time series data bases. *Statistical Software*. 33: 1-30.
19. Lashnizand M (2004) Climatic drought zonation using statistical indexes in Lorestan province. *Proceeding of the First International Conference of Opposition with Water Storage and Drought*, Kerman:115-120.
 20. Mann H B (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. The Econometric Society. 245-259.
 21. Massey Jr F J (1951) The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *The American statistical Association*. 46(253): 68-78.
 22. Mckee T B, Doesken N J and Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology. Pp. 179-184.
 23. Mendicino G, Senatore A and Versace P (2008) A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology*. 357: 282-302.
 24. Mishra A K and Singh V P (2010) A review of drought concepts. *Hydrology*. 391: 202-216.
 25. Rahimi J, Ebrahimpour M and Khalili A (2013) Spatial changes of Extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and applied climatology*. 112(3-4): 409-418.
 26. Sadat Noori S M, Liaghat A M and Ebrahimi K (2011) Prediction of Crop Production Using Drought Indices at Different Time Scales and Climatic Factors to Manage Drought Risk. *The American Water Resources Association (JAWRA)*. 48(1): 1-9.
 ۹. مهندسین مشاور کنکاش عمران (۱۳۸۸) گزارش بهنگام‌سازی تلفیق مطالعات منابع آب حوزه آبریز رودخانه‌های قره سو و گرگان. دفتر مطالعات پایه منابع آب: ۱۰، ۱۷، ۲۹، ۴۰ و ۱۷۸.
 10. Beran J (1994) *Statistics for Long-Memory Processes*. CRC Press: p. 53.
 11. Brázdil R (1986) Variation of atmospheric precipitation in the C.S.S.R. with respect to precipitation changes in the European region. *Universita J. E. Purkyně, Brno*: p. 169.
 12. Dickey D A and Fuller W A (1979) Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Am Statis Assoc*, 74: 423-431.
 13. Gibbs W J and Maher J V (1967) Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin, Melbourne*, 48: 34-41.
 14. Guttman N B (1999) Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. *The American Water Resources Association*. 35(2): 311-322.
 15. Hurst H E (1951) Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 116: 770-808.
 16. Husak G J, Michaelsen J and Funk C (2007) Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. *International Journal of Climatology*. 27(7): 935-944.
 17. Khan S, Gabriel H F and Rana T (2008) Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrigation and Drainage Systems*. 22(2): 159-177.
 18. Kugiumtzis D and Tsimpiris A (2010) Measures of analysis of time series (mats): A Matlab

بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی چندلایه (مطالعه موردی: دشت گرگان)

27. Tsakiris G, Nalbantis I, Vangelis H, Verbeiren B, Huysmans M, Tychon, B and Batelaan O (2013) A system-based paradigm of drought analysis for operational management. Water resources management. 27(15): 5281-5297.
28. Wetherald R T and Manabe S (2002) Simulation of hydrologic changes associated with global warming. Geophysical Research. 107(D19): 4379.
29. Willeke K, Lin X J and Grinshpun S A (1998) Improved aerosol collection by combined impaction and centrifugal motion. Aerosol Science and Technology. 28(5): 439-456.