

بررسی تغییرات زمانی و اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از شاخص‌های بارش استاندارد (SPI) و منابع آب زیرزمینی (GRI)

صدیقه محمدی^{۱*}، فرزین ناصری^۲، حمید نظری پور^۳

۱ و ۲. استادیار گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و

فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۳. استادیار گروه محیط زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و

فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۳۰)

چکیده

با توجه به اهمیت فراسنج‌های اقلیمی، به‌ویژه بارندگی و تأثیر آن بر منابع آب، این تحقیق با هدف بررسی خشکسالی هواشناسی و تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی دشت کرمان طی دوره زمانی ۱۸ ساله (۱۳۷۵-۱۳۹۲) انجام شد و مقادیر شاخص بارش استاندارد در ایستگاه باران‌سنجی کرمان و شاخص منبع آب زیرزمینی دشت، در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) به‌دست آمد. نتایج آزمون همبستگی بین شاخص منبع آب زیرزمینی و شاخص بارش استاندارد طی دوره زمانی مطالعه‌شده بدون تأخیر زمانی و نیز با تأخیر زمانی یک تا ۱۲ ماهه نشان داد شاخص منبع آب زیرزمینی، شش و ۱۸ ماهه با بارش استاندارد، ۴۸ ماهه با ضریب همبستگی ۰/۶۲۸ و ۰/۶۳۱ بدون تأخیر زمانی و شاخص منبع آب زیرزمینی، ۴۸ ماهه با شاخص بارش استاندارد همین دوره با تأخیر زمانی شش‌ماهه ضریب همبستگی ۰/۶۸۶ دارد. بررسی مدل رگرسیونی نشان داد حداکثر ۵۷ درصد تغییرات شاخص منبع آب زیرزمینی (۴۸ ماهه) توسط شاخص بارش استاندارد (۴۸ ماهه با تأخیر زمانی شش‌ماهه) قابل تبیین و توجیه است. این مهم به تأثیر سایر عوامل از جمله برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی بر افت سفره آب زیرزمینی و میزان شاخص منبع آب زیرزمینی مرتبط است. نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی نشان‌دهنده افت سطح آب زیرزمینی در سطح دشت به‌طور متوسط ۲۰ متر و بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی در محدوده شهر کرمان به میزان ۱۴ متر در دوره آماری مطالعه‌شده است.

کلیدواژگان: آنالیز همبستگی و رگرسیون، دشت کرمان، شاخص بارش استانداردشده، شاخص منبع آب زیرزمینی.

مقدمه

خشکسالی یکی از بلاهای طبیعی است که تأثیر زیادی بر محیط زیست می‌گذارد. این تأثیرات از کاهش تولیدات کشاورزی تا محدودیت در میزان آب آشامیدنی را در بر می‌گیرند. خشکسالی‌های طولانی مدت یا شدید در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند حتی به پیامدهای ویرانگر مانند کمبود عرضه غذا و نیز پدیده بیابان‌زایی منجر شود [۱]. در بین بلاهای طبیعی تهدیدکننده انسان و محیط زیست، خشکسالی از نظر فراوانی رخداد و نیز از جنبه میزان زیان‌های وارد شده در صدر قرار دارد [۲]. بیش از ۱۱ درصد مخاطرات طبیعی در جهان، به‌ویژه در نواحی روستایی، با وقوع خشکسالی‌ها مرتبط‌اند [۳]. این پدیده فیزیکی در درازمدت موجب خشکسالی آب‌شناسی و آب و زمین‌شناسی می‌شود و کاهش منابع آب را از طریق خشکیدگی جریان‌های سطحی و زیرزمینی به دنبال دارد [۴]. خشکسالی آب زیرزمینی، شاخه‌ای مجزا از خشکسالی است که تأثیر زیادی بر اکوسیستم و عرضه آب آبیاری و آب شرب شهری دارد [۵ و ۱]. بر اثر خشکسالی در سیستم آب‌های زیرزمینی، ابتدا تجدید ذخیره آبخوان‌ها، سپس سطح آب زیرزمینی و در نهایت آبدهی آبخوان‌ها کاهش می‌یابد [۶]. این اتفاق در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب کم‌شدن کیفیت شیمیایی آبخوان (بر اثر افزایش غلظت املاح)، ایجاد شوری ثانویه خاک، شوری آب‌های سطحی، کاهش باروری خاک‌ها و... می‌شود [۷]. این پدیده‌ها که شوری منابع آب و خاک را در پی دارند، از عوامل مؤثر در بیابانی‌شدن مناطق مختلف جهان هستند [۸]. در حالت عادی آخرین واکنش به وضعیت خشکسالی در بخش آب‌های زیرزمینی دیده می‌شود، مگر اینکه جریان‌های سطحی از آب‌های زیرزمینی تغذیه کنند. بنابراین، تأخیر زمانی بین یک خشکسالی هواشناسی و خشکسالی آب زیرزمینی ممکن است ماه‌ها و حتی سال‌ها طول بکشد [۹]. با توجه به اهمیت فراسنج‌های اقلیمی به‌ویژه بارندگی و تأثیر آن بر منابع آب، لازم است ابتدا خشکسالی هواشناسی به‌وسیله یک شاخص مناسب بررسی و سپس تأثیر آن بر منابع آب منطقه مد نظر تعیین شود. تا کنون شاخص‌های متعددی برای پایش پدیده خشکسالی پیشنهاد شده است. مک کی و همکارانش

شاخص بارش استاندارد^۱ SPI را برای تعیین و پایش خشکسالی ارائه کرده‌اند [۱۰]. از بین شاخص‌های کمی در تحلیل خشکسالی هواشناسی، SPI به عنوان شاخصی مناسب برای تحلیل خشکسالی، مقبولیت جهانی یافته است [۱۱]. با توجه به این موضوع، مک کی و همکارانش [۱۰] مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه را برای شاخص بارندگی معیارشده پیشنهاد کرده‌اند. شاخص منبع آب زیرزمینی^۲ GRI نیز توسط مندیسینو و همکارانش [۱۲] به عنوان شاخصی مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی آب و زمین‌شناسی برای منطقه مدیترانه به کار برده شده است. ادھیکاری و همکارانش [۱۳] خشکسالی آب زیرزمینی در منطقه شمال غربی بنگلادش را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد خشکسالی شدیدی در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ اتفاق افتاده که موجب افت سریع سطح آب زیرزمینی شده است. سیونرنگ [۱۴] به ارزیابی اثر تغییر اقلیم و خشکسالی بر سطح آب زیرزمینی در ناحیه شرقی تایلند با هدف تعیین لکه‌های داغ و مناطق حساس به خشکسالی و تغییر اقلیم پرداخت و در نهایت شاخص آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از مدل DRASTIC ارزیابی شد. هاو و همکارانش [۱۵] خشکسالی در ایالت کالیفرنیا ایالات متحده آمریکا را با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی شامل شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص رواناب استاندارد (SRI)، شاخص رطوبت خاک استاندارد (SSI) و شاخص ترکیبی چندمتغیره خطی (LDI)، که حاصل ترکیبی از این شاخص‌ها بود، بررسی و طبقه‌بندی کردند. نتایج تحقیقات ایشان بیان‌کننده پیشنهاد رضایت‌بخش شاخص ترکیبی برای طبقه‌بندی خشکسالی است. سبنیک و همکارانش [۱۶] با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) روی پنج ایستگاه هواشناسی در حوضه آبخیز رودخانه Pesnica در شمال شرقی اسلوونی خشکسالی را تجزیه و تحلیل کردند. آنالیز همبستگی بین شاخص SPI سالانه و دبی استاندارد رودخانه بیان‌کننده وجود همبستگی قوی معنادار بین این دو شاخص است.

طی سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای نیز در داخل

1. Standardized Precipitation Index
2. Groundwater Resource Index

بررسی خشکسالی هواشناسی و تأثیر آن بر وقوع خشکسالی هیدروژئولوژیک و افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی دشت کرمان انجام شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی کرمان با کد ۴۹۰۶ بخشی از حوضه آبریز کویر درانجیر است که وسعتی حدود ۵۴۲۰ کیلومترمربع دارد. حدود ۳۲۰۰ کیلومترمربع آن را سطوح آبرفتی و دشتی و ۲۲۲۰ کیلومترمربع دیگر را نواحی کوهستانی و کوهپایه‌ای تشکیل می‌دهد. این محدوده در مختصات UTM بین طول ۳۲۹۴ هزار تا ۳۳۷۷۰۰ شرقی و عرض ۴۳۲۴۰۰ تا ۵۵۹۹۰۰ شمالی قرار دارد.

برای انجام این تحقیق از داده‌های سطح آب زیرزمینی مربوط به چاه‌های پیژومتری در محدوده دشت کرمان و داده‌های بارندگی ایستگاه باران‌سنجی کرمان از شرکت مطالعات آب منطقه‌ای استان کرمان استفاده شد. پس از تهیه بانک اطلاعاتی مورد نیاز، آماده‌سازی داده‌ها شامل انتخاب پایه زمانی مشترک، کنترل کیفیت، صحت و همگن بودن آمار و تطویل آمار و بازسازی نواقص آماری انجام شد [۲۲] و در نهایت پایه زمانی مشترک ۱۸ ساله (سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۲) و ۴۲ چاه پیژومتری برای انجام تحقیق انتخاب شد. پس از تهیه بانک اطلاعاتی، مقادیر شاخص SPI و شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) به دست آورده شد.

شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص SPI فقط بر مبنای استفاده از داده‌های بارندگی استوار است و می‌توان آن را برای مقیاس زمانی دلخواه محاسبه کرد. از نظر ریاضی، SPI بر مبنای احتمالات تجمعی بارندگی‌ها در یک ایستگاه استوار است و شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه معین است. در کل، می‌توان چنین بیان کرد که چنانچه سری‌های زمانی بارندگی ماهانه ایستگاه‌های منطقه به صورت P_{ij} معرفی شوند، که در آن اندیس i سال هیدرولوژیکی و اندیس j ماه مربوط به سال هیدرولوژیکی را مشخص کند ($j=1$ مهر و $j=12$ شهریور)، سری‌های زمانی بارندگی با مدت‌های مختلف R_{ik} را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ به دست آورد.

کشور در زمینه پایش خشکسالی و تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی صورت گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. صیف و همکارانش تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت فسا را بررسی کردند [۱۷]. با توجه به دستاوردهای آنها، شاخص SPI در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه با میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی، شاخص GRI و شاخص SECI رابطه معناداری را در سطح ۹۹ درصد نشان می‌دهد. چمن پیرا و همکارانش تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت الشتر را بررسی کردند [۱۸]. نتایج تحلیل‌های آماری آنها بیان‌کننده آن است که شاخص SPI در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه بدون تأخیر زمانی با میانگین تراز سطح سفره آب زیرزمینی و شاخص GRI در سطح ۰/۱ درصد معنادار است و بیشترین ضریب همبستگی را دارد. احمدی آخوومه و همکارانش خشکسالی آب زیرزمینی را با استفاده از شاخص‌های SWI و GRI در آبخوان محدوده مطالعاتی مرودشت خرامه استان فارس بررسی کردند [۱۹]. نتایج پژوهش ایشان بیان‌کننده آن است که در هر دو شاخص، زمان شروع خشکسالی از سال ۱۳۸۶ است و با افزایش مقیاس‌های زمانی، تداوم، شدت و فراوانی آن افزایش می‌یابد. بختیاری و همکارانش به آنالیز همبستگی پایه زمانی و تأخیر زمانی بین خشکسالی اقلیمی (شاخص SPI) و خشکسالی آب‌شناختی (شاخص GRI) دشت هشتگرد پرداختند [۲۰]. نتایج تحقیقات ایشان نشان‌دهنده آن است 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.

دشت کرمان جزء مناطق خشک و کویری ایران است و از لحاظ اقلیمی شرایط مطلوبی ندارد و نیز رودخانه و منابع آب سطحی درخور توجهی در آن وجود ندارد. بنابراین، تنها منبع آبی شایان توجه برای شرب و کشاورزی در این دشت سفره آب زیرزمینی است. در این دشت به سبب افت درخور توجه سالانه سطح آب آبخوان، کمبود متوسط بارندگی و خشک‌بودن اقلیم، برداشت بی‌رویه ناشی از افزایش جمعیت و در نتیجه توسعه مفرط و بیش از اندازه زمین‌های کشاورزی، بر میزان حلالیت املاح آن در نقاط خروجی و مناطقی که برداشت زیاد است، همواره افزوده می‌شود. به این ترتیب، منابع آب زیرزمینی دشت کرمان در حال انحطاط و نابودی است [۲۱]. بنابراین، تحقیق حاضر با هدف

تأخیر یک تا ۱۲ ماهه در تحقیق حاضر در نظر گرفته شد. سپس آنالیز زمین‌آماري در محیط نرم‌افزاری GS+ انجام و در نهایت نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در ابتدا و انتهای دوره آماری بررسی شد و نیز نقشه هم‌افت سفره در محیط نرم‌افزاری ArcGIS به‌دست آمد.

یافته‌ها

نتایج به‌دست‌آمده از تعیین شاخص‌های SPI به‌ترتیب در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در شکل ۱ و نمودار تغییرات شاخص SPI و بارندگی سالانه در دوره زمانی ۱۸ ساله در شکل ۲ نمایش داده شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از تعیین شاخص‌های GRI دشت به‌ترتیب در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در شکل ۳ نمایش داده شده است.

نمودار شاخص GRI سالانه و سطح آب زیرزمینی سال‌های مختلف در دوره آماری مطالعه‌شده ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۲ در شکل ۴ ارائه شده است. این یافته‌ها بیان می‌کند که سطح آب زیرزمینی از ابتدای دوره مطالعه‌شده به انتهای دوره از یک روند نزولی در همه سال‌ها برخوردار است.

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون همبستگی دو به دو بین شاخص‌های SPI و GRI در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در جدول ۱ نمایش داده شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون همبستگی بین شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) با شاخص SPI دوره مطالعه‌شده به همراه تأخیر زمانی یک تا ۱۲ ماهه در جدول ۲ نمایش داده شده است.

پس از محاسبه میزان همبستگی بین شاخص‌های GRI و SPI در مواردی که میزان همبستگی بیش از ۰/۶ بود، از مدل رگرسیونی برای پیش‌گویی شاخص GRI (بدون تأخیر زمانی و با تأخیر زمانی) استفاده شد. نتایج مدل‌های رگرسیونی در جدول ۳ نمایش داده شده است.

$$R_{ik} = \sum_{j=1} P_{ij} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12 \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

در این رابطه P_{ij} سری‌های زمانی بارندگی ماهانه و R_{ik} ارتفاع بارش تجمعی برای دوره مینا (k) مربوط به (i) سال هیدرولوژیکی است و در نهایت شاخص بارش استاندارد (SPI) بر اساس رابطه ۲ به‌دست می‌آید.

$$SPI_{ik} = \frac{R_{ik} - \bar{R}_k}{S_k} \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2)$$

در این رابطه P_k و $\sum k$ به‌ترتیب میانگین ارتفاع بارش تجمعی و انحراف معیار ارتفاع بارش تجمعی برای دوره مینا (k) است.

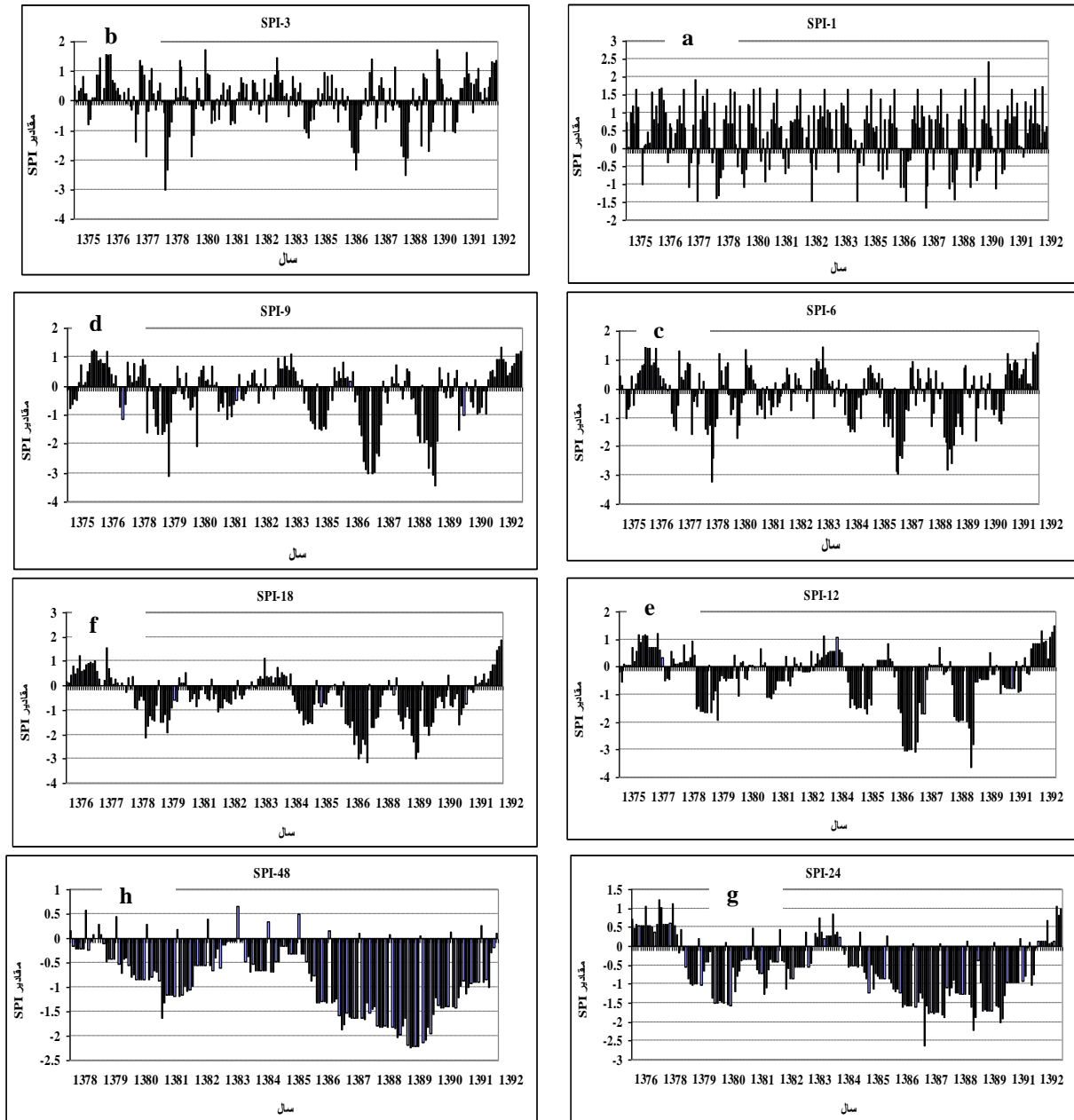
مقادیر $\sum \Pi$ بین +۲ و -۲ متغیر است. مقادیر مثبت $\sum \Pi$ بارش بیشتر از متوسط و دوره ترسالی را بیان می‌کند در حالی که مقادیر منفی $\sum \Pi$ بارش کمتر از متوسط و حادثه خشکسالی را نشان می‌دهد [۱۰].

شاخص خشکسالی منابع آب زیرزمینی (GRI)

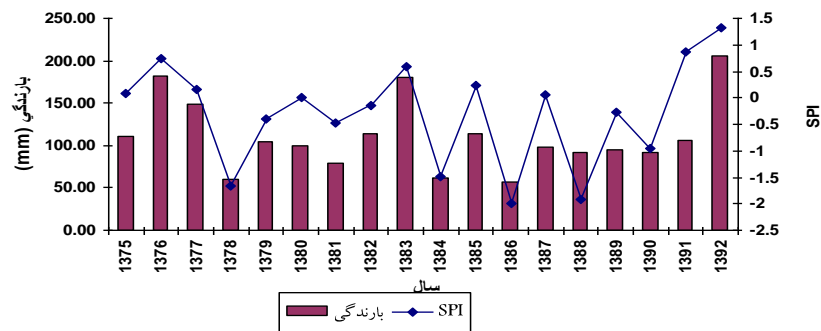
این شاخص توسط مندیسینو و همکارانش برای ارزیابی وضعیت مخزن سفره آب زیرزمینی و محاسبه دوره‌های خشکسالی آب زیرزمینی ارائه شد. این شاخص از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$SPI_{ik} = \frac{R_{ik} - \bar{R}_k}{S_k} \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (3)$$

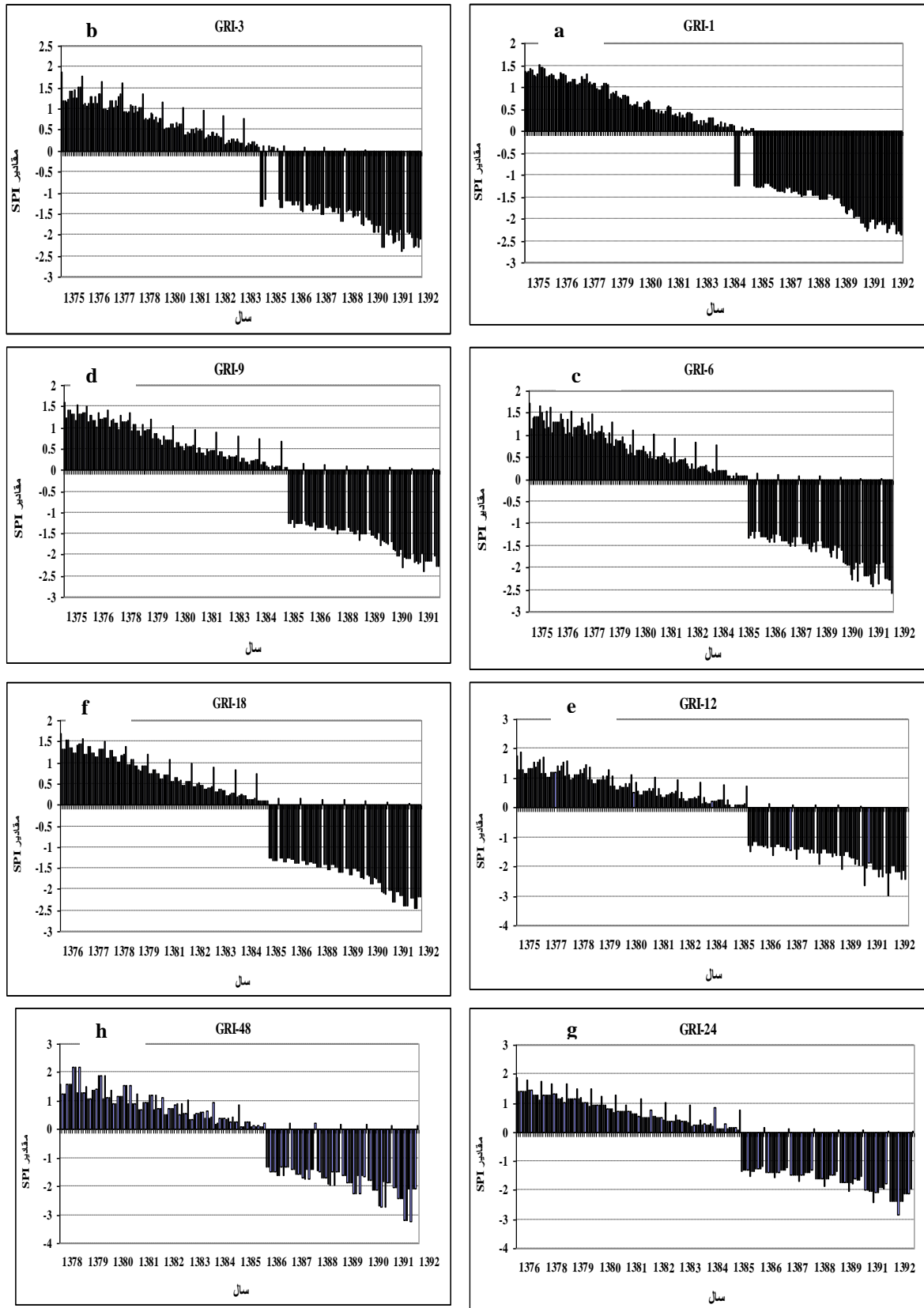
که در این رابطه $D_{y,m}$ مقادیر آب زیرزمینی در سال y و ماه m میانگین مقادیر آب زیرزمینی در ماه m و σ انحراف معیار مقادیر آب زیرزمینی در ماه m است. طبقات مختلف در شاخص GRI مانند شاخص SPI است. هرچه مقادیر آن از +۲ بیشتر باشد، ترسالی شدیدتر و هرچه این مقادیر از -۲ کمتر باشد، خشکسالی شدیدتر خواهد بود [۱۲]. این شاخص نیز مانند شاخص بارش استاندارد برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه برای تعداد ۴۲ چاه مشاهده‌ای در محدوده دشت کرمان محاسبه شد. پس از تعیین مقادیر شاخص‌های SPI و GRI آنالیز آماری همبستگی و رگرسیون [۱۸] با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. شایان یادآوری است که در محاسبه همبستگی میان شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف با تراز آب زیرزمینی، تأثیر میزان بارش بر تغییرات سطح ایستابی به‌طور معمول با تأخیر همراه است [۲۳]، بنابراین دوره‌های



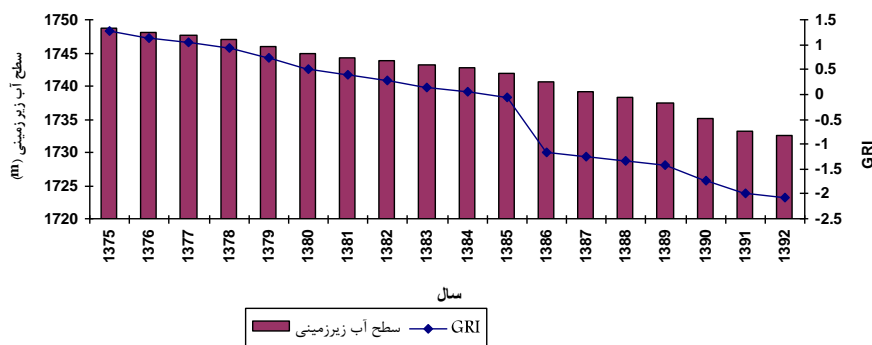
شکل ۱. نمودار تغییرات شاخص SPI دشت کرمان در مقیاس زمانی (a) ماهانه؛ (b) سه ماهه؛ (c) شش ماهه؛ (d) نه ماهه؛ (d) ۱۲ ماهه؛ (e) ۱۸ ماهه؛ (f) ۲۴ ماهه و (g) ۴۸ ماهه



شکل ۲. نمودار خشکسالی ها و ترسالی های دشت کرمان طی دوره زمانی ۱۸ ساله (۱۳۷۵-۱۳۹۲)



شکل ۳. نمودار تغییرات شاخص GRI دشت در مقیاس زمانی (a) یک ماهه؛ (b) سه ماهه؛ (c) شش ماهه؛ (d) نه ماهه؛ (e) ۱۲ ماهه؛ (f) ۱۸ ماهه؛ (g) ۲۴ ماهه و (h) ۴۸ ماهه



شکل ۴. نمودار شاخص GRI و سطح آب زیرزمینی دشت کرمان در مقیاس زمانی سالانه

جدول ۱. همبستگی شاخص‌های GRI و SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف (بدون تأخیر زمانی)

SPI48	SPI24	SPI18	SPI12	SPI9	SPI6	SPI3	SPI1	
۰/۵۰۴**	۰/۱۷۴*	۰/۰۵۷	-۰/۰۲۱	-۰/۰۱۶	۰/۰۰۲	-۰/۰۲۱	-۰/۱۱	GRI1
۰/۴۶۴**	۰/۱۵۹*	۰/۰۳۵	-۰/۰۱۸	۰/۰۷۴	-۰/۰۲۷	-۰/۰۵۴	۰/۰۴	GRI3
۰/۶۲۸**	۰/۲۸۲**	۰/۰۴۴	۰/۰۴۶	-۰/۰۴۴	-۰/۰۳۵	۰/۰۱	۰/۱۰۶	GRI6
۰/۴۷۲**	۰/۱۵۸*	۰/۰۶۱	-۰/۰۴۲	-۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۴۷	-۰/۰۳۶	GRI9
۰/۴۹۴**	۰/۱۸۰*	۰/۱۶۸*	-۰/۰۲۱	-۰/۰۰۸	۰/۰۷۰	-۰/۰۵۹	-۰/۰۸۶	GRI12
۰/۶۳۱**	۰/۲۷۷**	۰/۰۴۶	۰/۰۴۲	-۰/۰۵۳	-۰/۰۳۰	۰/۰۱۲	۰/۱۰۳	GRI18
۰/۴۹۵**	۰/۱۷۵*	۰/۱۶۷*	-۰/۰۲۵	-۰/۰۱۰	۰/۰۷۰	-۰/۰۴۸	-۰/۰۹۸	GRI2424
۰/۵۴۵**	۰/۱۷۶*	۰/۱۶۴*	۰/۰۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۵۴	-۰/۰۵۲	-۰/۰۷۹	GRI48

جدول ۲. همبستگی بین شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) و SPI دوره همراه با تأخیر

	تأخیر زمانی (ماه)											SPI دوره	
	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲		
۰/۰۸۷	۰/۰۵۷	۰/۰۴۴	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۰/۰۴۷	۰/۰۴۸	۰/۰۴۹	۰/۰۶۶	۰/۰۷۳	۰/۰۶۶	۰/۰۵۱	۰/۰۳۶	GRI1
۰/۱۱۹	۰/۱۰۸	۰/۱۳۱	۰/۱۵۷*	۰/۱۰۰	۰/۱۰۶	۰/۱۵۸*	۰/۰۶۸	۰/۰۹۷	۰/۰۸۸	۰/۰۹۱	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵	GRI3
۰/۲۰۲**	۰/۱۷۷*	۰/۲۰۰**	۰/۲۰۰**	۰/۱۶۵*	۰/۱۷۶*	۰/۲۱۰**	۰/۱۲۴	۰/۱۱۰	۰/۱۰۷	۰/۱۰۲	۰/۰۶۹	۰/۰۷۴	GRI6
۰/۲۹۵**	۰/۲۶۶**	۰/۲۸۳**	۰/۲۵۶**	۰/۲۳۶**	۰/۲۰۰**	۰/۲۶۷**	۰/۱۶۶*	۰/۱۵۳*	۰/۱۳۶	۰/۱۲۳	۰/۰۹۶	۰/۱۱۱	GRI9
۰/۳۷۰**	۰/۳۵۳**	۰/۳۳۱**	۰/۳۰۴**	۰/۲۷۴**	۰/۲۶۱**	۰/۳۳۲**	۰/۲۲۵**	۰/۱۹۹**	۰/۱۸۴*	۰/۱۶۹*	۰/۱۴۷*	۰/۱۲۴	GRI12
۰/۴۵۶**	۰/۴۴۶**	۰/۴۴۰**	۰/۴۲۷**	۰/۴۰۲**	۰/۳۹۴**	۰/۴۵۵**	۰/۳۲۵**	۰/۲۹۳**	۰/۲۶۲**	۰/۲۴۰**	۰/۱۹۲**	۰/۱۸۰*	GRI18
۰/۵۴۸**	۰/۵۲۰**	۰/۵۱۰**	۰/۴۹۱**	۰/۴۷۱**	۰/۴۵۱**	۰/۵۵۸**	۰/۴۲۵**	۰/۳۹۷**	۰/۳۷۹**	۰/۳۵۵**	۰/۳۲۰**	۰/۲۹۶**	GRI24
۰/۵۵۶**	۰/۵۵۹**	۰/۵۵۱**	۰/۵۴۳**	۰/۵۵۱**	۰/۵۳۹**	۰/۶۸۶**	۰/۵۴**	۰/۵۳۶**	۰/۵۱۹**	۰/۵۳۶**	۰/۵۰۱**	۰/۴۸۷**	GRI48

جدول ۳. مدل رگرسیونی بین شاخص‌های آب زیرزمینی (GRI) و خشکسالی هواشناسی (SPI) با تأخیر زمانی و بدون تأخیر زمانی

معناداری	میزان F	ضریب تبیین مدل	مدل رگرسیونی بهینه	نوع مدل
۰/۰۰	۱۰۸/۶۹	۰/۴۹	GRI6=1.013 SPI48+0.318	بدون تأخیر
۰/۰۰	۱۱۰/۷۳	۰/۵۰	GRI18=1.059 SPI48+0.403	SPI
۰/۰۰	۱۳۷/۶۶	۰/۵۷	GRI48=1.339SPI48 _m +0.786	SPI با تأخیر

GRI6 - شاخص GRI شش ماهه؛ SPI48 - شاخص SPI ۴۸ ماهه؛ GRI18 - شاخص GRI ۱۸ ماهه؛ SPI48 - شاخص SPI ۴۸ ماهه؛ GRI48 - شاخص SPI ۴۸ ماهه

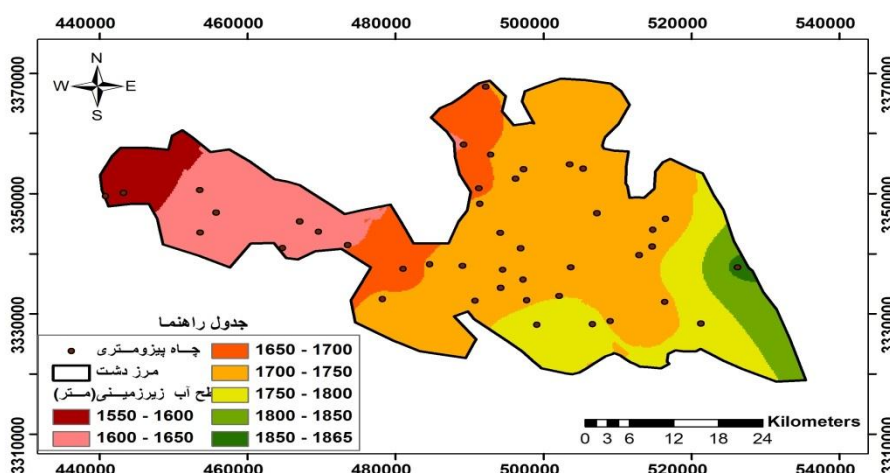
۴۸ ماهه و SPI48_{6m} - شاخص SPI ۴۸ ماهه با تأخیر شش ماهه

نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی سال‌های ۱۳۷۵ (ابتدای دوره آماری مطالعه‌شده)، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۲ (انتهای دوره آماری مطالعه‌شده) که با روش زمین‌آماري کريجینگ تهیه شده، به ترتیب در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ ارائه شده‌اند. به منظور محاسبه نقشه هم‌افت آب زیرزمینی، دو نقشه یادشده از یکدیگر تفاضل شده و نتیجه نقشه پهنه‌بندی هم‌افت در شکل ۸ ارائه شده است.

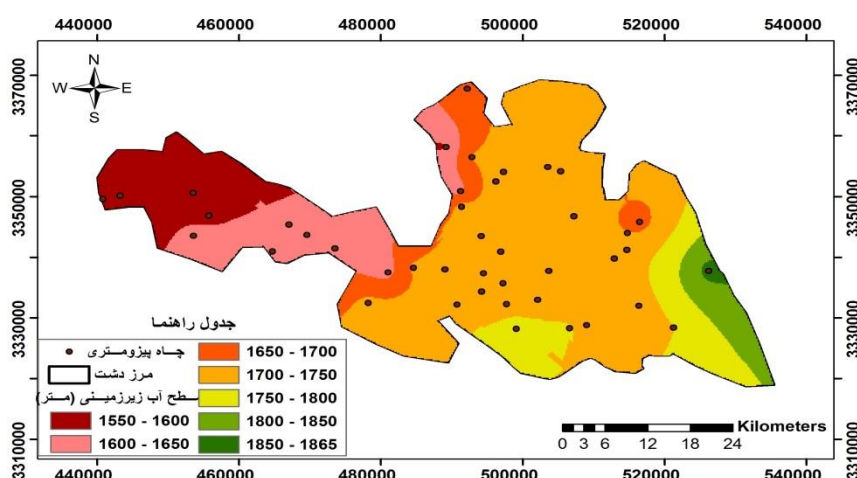
نتایج آنالیز زمین‌آماري در جدول ۴ نشان می‌دهد در ابتدای دوره مطالعاتی (۱۳۷۵) و همچنین انتهای دوره مطالعه‌شده (۱۳۹۲) مدل واریوگرامی بهینه برازش داده‌شده به داده‌ها از نوع کروی است. همچنین، با توجه به افت شدید سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۶ (شکل ۴) این آنالیز در آن سال نیز انجام شد که واریوگرام بهینه آن از مدل گوسی تبعیت می‌کند. این مدل ضریب تبیین زیادی (بیش از ۰/۹) دارد.

جدول ۴. مشخصات مدل واریوگرام برازش داده‌شده به داده‌ها

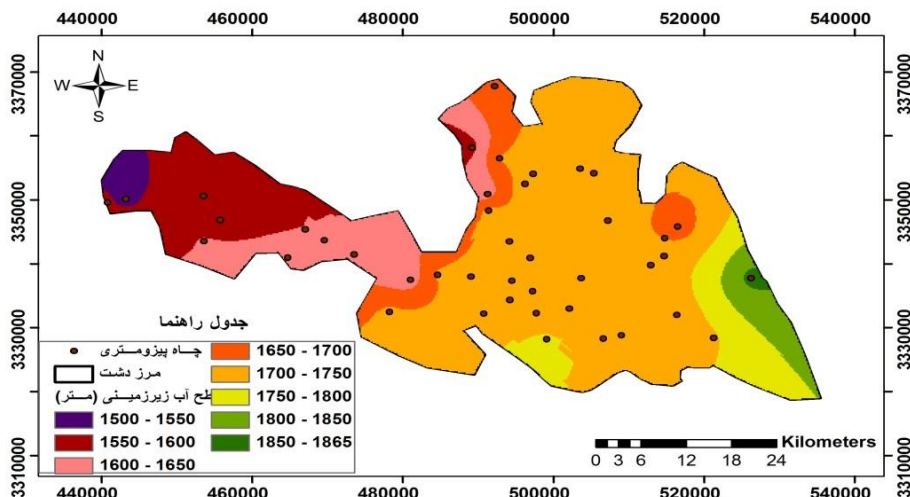
سال	Model	C ₀	C ₀ +C	A0	Effective Range	C/C ₀ +C	R ²
۱۳۷۵	کروی	۱۰	۲۰۳۲۰	۲۱۱۰۰۰	۱۱۰۰۰	۱	۰/۹۲۷
۱۳۸۶	گوسی	۹۰	۲۱۲۸۰	۶۴۰۰۰	۱۰۸۵۱	۰/۹۹	۰/۹۸
۱۳۹۲	کروی	۱۰	۲۱۱۲۰	۱۶۴۷۰۰	۶۴۷۰۰	۱	۰/۹۲۶



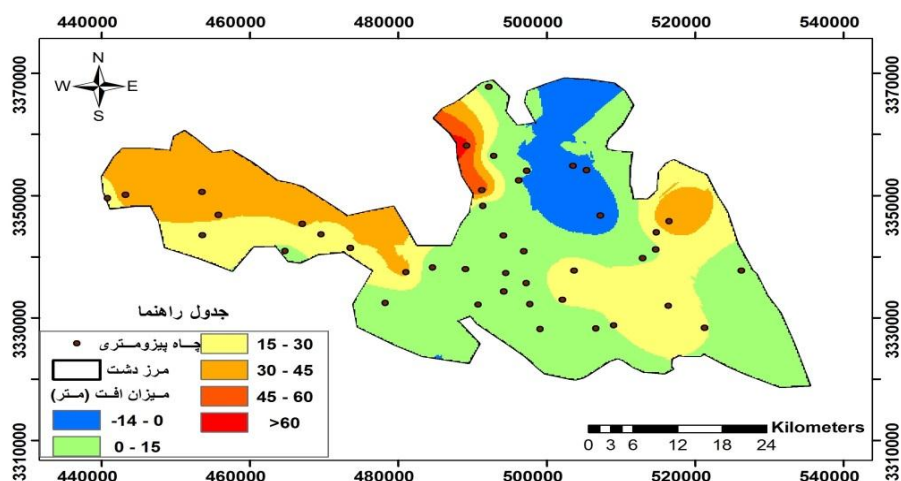
شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی (متر) دشت کرمان در سال ۱۳۷۵



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی (متر) دشت کرمان در سال ۱۳۸۶



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی (متر) دشت کرمان در سال ۱۳۹۲



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی هم‌افت آب زیرزمینی (متر) دشت کرمان در دوره آماری مطالعه‌شده

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بررسی شاخص خشکسالی هواشناسی SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه در دشت کرمان بیان‌کننده وجود روند تغییرات نامنظم در بازه زمانی مطالعه‌شده (۱۳۷۵-۱۳۹۲) است. البته، شروع خشکسالی‌ها از سال ۱۳۷۸ در نمودار تغییرات زمانی شاخص SPI کاملاً مشهود است. در حالی که شاخص GRI دشت در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه از ابتدا به سمت انتهای دوره آماری مطالعه‌شده شیب نزولی (به‌خصوص در سال‌های اخیر) به‌ویژه افت ملموس سطح آب زیرزمینی در انتهای سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ دارد که این میزان افت شدید احتمالاً مربوط به افت زیاد میزان بارندگی و خشکسالی شدید هواشناسی در این سال است. نقشه هم‌افت

سفره نیز بیان‌کننده افت سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت به طور متوسط ۲۰ متر است. در این زمینه بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی دشت طی دوره آماری مطالعه‌شده به خروجی شمالی دشت اختصاص دارد که به بیش از ۶۰ متر رسیده است. همچنین، پایین‌ترین میزان سطح آب زیرزمینی دشت در ابتدای دوره واقع در بخش غربی دشت در دامنه ۱۵۵۰-۱۶۰۰ متر است که در انتهای دوره بررسی‌شده، به دامنه ۱۵۰۰-۱۵۵۰ متر کاهش یافته است. منطبق‌بودن این دو بخش نقشه (شمال و غرب دشت) با خروجی‌های دشت می‌تواند دلیل اصلی و مهم نمایان‌شدن آثار زیان‌بار عوامل طبیعی مانند خشکسالی هواشناسی و نیز عوامل انسانی، به دلیل تأثیرات تجمعی این عوامل [۲۴] باشد. در این زمینه عوامل انسانی مواردی مانند روند رو به رشد

سبب بهبود عملکرد این شاخص در پیش‌بینی شاخص منبع آب زیرزمینی GRI خواهد شد. بنابراین، در مطالعات با هدف مشابه این تحقیق، به‌منظور بررسی آثار خشکسالی بر آب زیرزمینی بهتر است به شاخص خشکسالی SPI بررسی‌شده، تأخیر زمانی داده شود تا نتایج مطلوب‌تری به دست آید. نتایج بررسی‌ها درباره رابطه شاخص GRI و شاخص SPI نشان داد شاخص‌های GRI شش‌ماهه و نیز شاخص GRI ۱۸ ماهه با شاخص SPI ۴۸ ماهه همبستگی بیشتری در مقایسه با سایر دوره‌های زمانی برقرار کرده است. بررسی‌ها در خصوص ارتباط شاخص‌های GRI و SPI نشان داد تأخیر در شاخص SPI در بیشتر دوره‌های زمانی مطالعه‌شده سبب افزایش همبستگی شده است. نتایج این بخش با یافته‌های ویلهیت [۲۳] و بختیاری و همکارانش [۲۰] هم‌خوانی داشت. در این خصوص بیشترین همبستگی بین شاخص GRI ۴۸ ماهه و SPI ۴۸ ماهه با شش ماه تأخیر (معادل ۰/۶۸۶) برقرار شده است. با توجه به مشاهده بیشترین همبستگی بین شاخص GRI ۴۸ ماهه و SPI ۴۸ ماهه با شش ماه تأخیر می‌توان چنین استنباط کرد که اثر خشکسالی بر سطح آب زیرزمینی با تأخیر زمانی مشهودتر می‌شود. به‌بیان دیگر، به محض وقوع خشکسالی هواشناسی، اثر آن بر افت سطح آب زیرزمینی قابل مشاهده نیست بلکه این اثر منفی و زیان‌بار بر منابع آب زیرزمینی با تأخیر زمانی (در منطقه مطالعاتی حاضر شش‌ماهه)، ملموس و معنادار است.

هرچند در تحقیق حاضر ارتباط بین شاخص آب زیرزمینی GRI و شاخص خشکسالی هواشناسی SPI از نظر آماری معنادار بود، ولی بررسی‌های مدل رگرسیونی تحقیق حاضر نشان داد حداکثر ۵۷ درصد تغییرات شاخص GRI (۴۸ ماهه) توسط شاخص خشکسالی SPI (۴۸ ماهه) با تأخیر زمانی شش‌ماهه قابل تبیین و توجیه است. این مهم به تأثیر سایر عوامل مؤثر بر افت سفره آب زیرزمینی و شاخص آب زیرزمینی GRI اشاره دارد. به نظر می‌رسد سهم عمده کاهش ذخایر آبی دشت در درجه نخست به عوامل انسانی مربوط است. اضافه برداشت و افت سطح آب زیرزمینی، روند رو به رشد تعداد چاه‌های بهره‌برداری و به دنبال آن افزایش برداشت و تخلیه از سفره آب زیرزمینی از یک سو (به عنوان عامل نخست تأثیرگذار) [۲۵] و وجود خشکسالی‌های پیاپی از سوی دیگر سبب افت مستمر سطح آب زیرزمینی دشت کرمان در دوره آماری مطالعه‌شده شده است. به طوری که

تعداد چاه‌های بهره‌برداری و به دنبال آن افزایش برداشت و تخلیه از سفره آب زیرزمینی را شامل می‌شوند و عوامل طبیعی خشکسالی‌های اخیر هواشناسی هستند که سبب کاهش میزان تغذیه منابع آب زیرزمینی از منابع آب سطحی شده و از سوی دیگر وابستگی بیشتر انسان به منابع آب زیرزمینی (به‌خصوص در بخش‌های خروجی دشت) شده است. این نتایج با مطالعات چمن پیرا و همکارانش [۱۸]، محمدی و همکارانش [۲۱] و احمدی آخوومه و همکارانش [۱۹] مطابقت داشت. نتایج تحقیق حاضر بیان‌کننده افت سطح آب زیرزمینی در کل سطح دشت و جهت پیشروی این افت از سمت شرق به شمال و غرب و آسیب‌پذیری آبخوان در این بخش‌ها است که با نتایج تحقیقات شاهی دشت و عباس‌نژاد [۲۵] هم‌سو بود. بنابراین، توجه مستمر و مداوم مسئولان و دستگاه‌های اجرایی به کاهش آثار عوامل انسانی مانند جلوگیری از حفر بی‌رویه چاه‌ها، افزایش دادن کارایی استفاده از آب در آگرواکوسیستم‌ها از طریق انتخاب گونه مناسب، اصلاح سیستم آبیاری و عملیات خاک‌ورزی به‌عنوان راهکارهای پیشنهادی اجرایی تحقیق حاضر است. همچنین، بررسی نقش هم‌افت آب زیرزمینی نشان می‌دهد که در محدوده شهر کرمان روند تغییرات سطح آب به‌عکس سایر چاه‌های مشاهده‌ای بوده است به طوری که نه‌تنها افت سطح آب مشاهده نمی‌شود، بلکه به‌عکس سطح آب این چاه‌ها طی دوره آماری مطالعه‌شده، به میزان ۱۴ متر بالاتر از سطح آب در دوره آماری مطالعه‌شده در زون آب برگشت شهری و فاضلاب شهر کرمان دلیل این بالاتر آمدگی است که توصیه طرحی جامع برای سازمان‌دهی و مدیریت رواناب‌ها و فاضلاب‌های شهری به مسئولان و دست‌اندرکاران از پیشنهادها اجرایی پژوهش حاضر به شمار می‌رود. همچنین، لازم است در شعاعی از مرکز شهر کرمان تعدادی چاه برای اندازه‌گیری سطح آب در نظر گرفته شود.

نتایج به‌دست‌آمده از آنالیزهای آماری نشان‌دهنده آن است که با طولانی‌تر شدن مقیاس زمانی شاخص SPI، میزان همبستگی آن با شاخص GRI قوی‌تر می‌شود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات خشکسالی هواشناسی، افزایش دادن دوره شاخص SPI برای بهتر دیدن آثار سوء و زیان‌بار آن بر پدیده‌هایی مانند افت آب زیرزمینی باید مد نظر پژوهشگران قرار گیرد. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد انجام تأخیر زمانی در شرایط مشابه دوره مطالعه شاخص SPI،

- Tabriz university; 2009. [Persian]
- [12]. Mendicino G, Senatore A, Versace P. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *J. Hydrol.* 2008; 357(1-2): 282-302.
- [13]. Adhikary SK, Das SK, Saha GC, Chaki, T. Groundwater drought assessment for barind irrigation project in northwestern Bangladesh. 20th International Congress on Modelling and Simulation. Adelaide: Australia; 2013.
- [14]. Seeboonruang U. Impact assessment of climate change on groundwater and vulnerability to drought of areas in Eastern Thailand. *Environ. Earth Sci.* 2015; 75(1):42-62.
- [15]. Hao Z, Hao F, Singh V, Xia Y, Ouyang W, Shen X. A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices. *Adv. Water Resour.* 2016; 92(4): 240-247.
- [16]. Šebenik U, Brilly M, Šraj M. Drought Analysis using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Acta Geogr Slov.* 2017; 57(1): 31-49.
- [17]. Seyf M, Mohamadzade H, Mosaedi A. Evaluating the impacts of drought on groundwater resources in Fasa aquifer using SPI, GRI and SECI. *Water Resources Engineering.* 2013; 5(13): 45-59. [Persian]
- [18]. Chaman pira GH, Zehtabian Gh, Ahmadi H, Malekian A. Research in to drought effects on groundwater resources for optimized Utilization management, case study: Plain Alashtar. *Watershed Engineering and Management.* 2015; 6(1): 10-20. [Persian]
- [19]. Ahmadi Akhoorme M, Nohegar A, Soleimani Motlagh M, Taie Semiromi, M. Groundwater drought investigating using SWI and GRI indices (Case study: Marvdasht Kharameh Aquifer). *Journal of irrigation and water engineering.* 2015; 6(21): 105-118. [Persian]
- [20]. Bakhtiare Enayat B, Malekian A, Salajegheh A. Time and Lag Correlation Analysis between Climate Drought and Hydrological Drought in Hashtgerd Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research.* 2016; 46(4):609-616. [Persian]
- [21]. Mahdavi M. *Applied Hydrology.* Vol. 1. 4nd ed. Tehran: University of Tehran Press; 2003.
- [22]. Mohamadi S, Salajegheh A, Mahdavi M, Bagheri R. An investigation on spatial and temporal variations of groundwater level in Kerman plain using suitable geostatistical method (During a 10-year period), *Iranian Journal of Range and Desert Reseach.* 2012; 19 (1): 60-71. [Persian]
- خشکسالی‌های اخیر به این منظور مزید بر علت شده و از یک سو سبب کاهش میزان تغذیه منابع آب زیرزمینی از منابع آب سطحی و از سوی دیگر موجب هجوم انسان به بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شده است.
- سپاسگزاری**
- بدینوسیله از حمایت مالی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته و پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی در انجام طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۷/۳۹۳۶ تقدیر و تشکر می‌گردد.
- منابع**
- [1]. Mishra AK, Singh VP. A review of drought concepts. *J Hydrol.* 2010; 391(1-2): 202-216.
- [2]. Keneth HF. *Climate Variation Drought and Desertification.* W. M. O. Annual Report. Jevnva; 2003.
- [3]. Karang Li. *Drought early Warning and Impact Assessment in China.* Proceeding of an Export Group meeting; 2004.
- [4]. Kordavani P. *Drought and ways to cope with it in Iran.* 1nd ed. Tehran. Tehran University Press; 2001. [Persian]
- [5]. Li Bailing, Rodell M. Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous U.S. *J. Hydrol.* 2015; 526(1-2): 78-88.
- [6]. Peters E, Bier G, Van Lanen HAJ, Torfs PJJF. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *J. Hydrol.* 2006; 321(1-4): 257-275.
- [7]. Malins D, Metternicht G. Assessing the spatial extent of dry land salinity through fuzzy modeling. *Ecol. Modell.* 2006; 193(3-4): 387-411.
- [8]. Abdinejad GhA. Research in to Effective Factors on Desertification and Drought. *Jungle and Range.* 2009; 78(1): 8-10. [Persian]
- [9]. Tallaksen LM, Van Lanen HAJ. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater.* 1nd ed. Netherlands. Elsevier Press; 2004.
- [10]. Mckee T B, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proprints.* 8th Conference of Applied Climatology. California: Anaheim; 1993.
- [11]. Ghare Sheykhloo AH, Khosravani Shiri Z, Arabali A. Monitoring and zonation of drought for optimized water resources management. *Third Confrence of water resources management.* Tabriz:

- [23]. Wilhite DA, Glantz MH. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water Int.* 1985;10: 111-120.
- [24]. Tabatabaei, S.M.F. *Living things*. 384 pp. Enteshar Sahami. 2006.

- [25]. Shahidasht AR, Abbasnejhad, A. Survey of groundwater resources in Kerman province plain. *Journal of applied geology*, 2011; 7 (2): 131-146.