



Investigation of the impact of climate fluctuations on the Chadegan plain aquifer, Iran

Seyedeh Saba Hashemi¹ | Kumars Ebrahimi^{2✉} | Seyed Javad Sadatinejad³ |
Alireza Moghaddamnia⁴

1. Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Saba.hashemi.19@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: EbrahimiK@ut.ac.ir
3. Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Jsadatinejad@ut.ac.ir
4. Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: A.moghaddamnia@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 26 January 2026

Received in revised form

25 April 2026

Accepted 25 May 2026

Published online 22 June 2026

Keywords:

GRI Index

Groundwater Level Fluctuations

Spearman Nonparametric Test

SPI

ABSTRACT

Climate fluctuations are a fundamental and unavoidable challenge in the present era, with widespread impacts on all aspects of the environment; aquifers, as vital resources, are affected by these changes. This study examines the impact of climate fluctuations on the Chadegan Plain aquifer of Iran. For this purpose, the groundwater level was examined as the main criterion of the GRI index. The years 2002-2023 were selected as the time period due to complete data and information, and the necessary calculations and evaluations were performed on the data. The drought status of two wells in western Chadegan and three wells in Se Rahe Ghorghor were investigated from the 12 piezometric wells in the region, and the highest rate of groundwater level drop occurred in these two wells during the time periods 2015-2018 with nine meters and 2006-2011 with 18 meters, respectively. Evaluation of the wells in the study area with the GRI index shows the good performance of this index in the Chadegan plain. The results showed a decreasing trend in the GRI index values during the time periods 2006-2011 and 2015-2018, and the highest degree of GRI drought in the wes of Chadegan well and Se Rahe Ghorghor well was recorded with values of -2.47 in 2018 and -2.54 in 2011, respectively. Also, the Spearman nonparametric test was used to evaluate the correlation between the meteorological drought index SPI and the hydrogeological drought index GRI. The results indicated no significant trend, and the main reason for the drop in groundwater level can be attributed to human factors.

Cite this article: Hashemi, S. S., Ebrahimi, K., Sadatinejad, S. J., & Moghaddamnia, A. (2026). Investigation of the impact of climate fluctuations on the Chadegan plain aquifer, Iran. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (1), 127-140. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.410098.1285>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.410098.1285>

Publisher: University of Tehran Press.



بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر آبخوان دشت چادگان

سیده صبا هاشمی^۱ | کیومرث ابراهیمی^۲ | سید جواد ساداتی نژاد^۳ | علیرضا مقدم نیا^۴

۱. گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Saba.hashemi.19@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: EbrahimiK@ut.ac.ir
۳. گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Jsadatinejad@ut.ac.ir
۴. گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: A.moghaddamia@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوسانات اقلیمی یکی از چالش‌های اساسی و اجتناب‌ناپذیر در عصر حاضر به‌شمار می‌آید که تأثیرات گسترده‌ای بر همه جنبه‌های محیط زیستی دارد. آبخوان‌ها به‌عنوان یکی از منابع حیاتی، تحت تأثیر این تغییرات قرار می‌گیرند. در این مطالعه، به بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر آبخوان دشت چادگان پرداخته شده است. برای این منظور، تراز آب زیرزمینی به‌عنوان معیار اصلی شاخص GRI مورد بررسی قرار گرفت. سال‌های ۱۳۸۱-۱۴۰۲ به‌دلیل کامل بودن داده و اطلاعات، به‌عنوان بازه زمانی انتخاب و محاسبات و ارزیابی‌های لازم انجام شد. از ۱۲ چاه پیزومتری موجود در منطقه، وضعیت خشک‌سالی دو چاه غرب چادگان و سه راه غرغر بررسی شد و بیش‌ترین میزان افت سطح آب زیرزمینی به‌ترتیب برای دوره زمانی ۱۳۹۶-۱۳۹۳ با ۱۸ متر و دوره زمانی ۱۳۸۹-۱۳۸۴ با ۱۸ متر در این دو چاه اتفاق افتاده است. ارزیابی چاه‌های منطقه مطالعاتی با شاخص GRI نشان‌دهنده کارایی خوب این شاخص در دشت چادگان می‌باشد. نتایج نشان داد که یک روند کاهشی در مقادیر شاخص GRI طی دوره‌های زمانی ۱۳۹۰-۱۳۸۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۴ وجود داشته و بالاترین درجه خشک‌سالی GRI در چاه غرب چادگان و سه راه غرغر به‌ترتیب با مقدار ۲/۴۷- در سال ۱۳۹۷ و ۲/۵۴- در سال ۱۳۹۰ به ثبت رسیده است. هم‌چنین از آزمون ناپارامتری اسپیرمن جهت ارزیابی نتایج همبستگی بین شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI با شاخص خشک‌سالی هیدروژئولوژیک GRI استفاده شد. نتایج بیانگر عدم روند معنی‌دار بود و می‌توان علت عمده افت سطح آب زیرزمینی را مربوط به عوامل انسانی دانست.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

آزمون ناپارامتری اسپیرمن

شاخص GRI

نوسانات آب زیرزمینی

SPI

استناد: هاشمی، سیده صبا؛ ابراهیمی، کیومرث؛ ساداتی نژاد، سید جواد و مقدم نیا، علیرضا (۱۴۰۵). بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر آبخوان دشت چادگان.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۶ (۱)، ۱۲۷-۱۴۰. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.410098.1285>

۱. مقدمه

نوسانات اقلیمی، تغییرات بلندمدت و کوتاه‌مدت در الگوهای آب‌وهوایی است که می‌تواند تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آبی؛ به‌ویژه آبخوان‌ها داشته باشد. آبخوان‌ها به‌عنوان ذخایر مهم آب شیرین، نقش بسیار مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت ایفا می‌کنند. با افزایش تغییرات اقلیمی، بررسی تأثیرات آن بر وضعیت آبخوان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نوسانات اقلیمی، به‌ویژه تغییرات دما و الگوهای بارش، می‌تواند به‌طور مستقیم بر مقدار آب در دسترس آبخوان‌ها تأثیر بگذارد. افزایش دما و تغییر در الگوهای جوی می‌تواند منجر به خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت و بارش‌های ناگهانی و شدید شود و تأثیرات ناگواری بر آبخوان‌ها بگذارد. افزایش دما نه‌تنها باعث کاهش بارندگی می‌شود، بلکه می‌تواند تبخیر آب را نیز افزایش دهد که در نتیجه باعث کاهش میزان آب نفوذی به آبخوان‌ها می‌شود (IPCC, 2021). از آنجایی که بسیاری از آبخوان‌ها به بارش‌های فصلی وابسته هستند، کاهش بارش در مناطق گرم و خشک به‌ویژه در فصول خاص می‌تواند سبب افت سطح آب زیرزمینی و در نتیجه بروز مشکلاتی همچون کمبود آب و افزایش نفوذ آب شور شود (Kundzewicz et al., 2017). علاوه بر این، ورود آب‌های سطحی آلوده به آبخوان‌ها می‌تواند باعث تنزل کیفیت آب زیرزمینی شود و مسائل و معضلاتی نظیر بیماری‌های آب‌زاد و کاهش کیفیت آب آشامیدنی را به‌همراه داشته باشد (UNEP, 2020).

خشک‌سالی یکی از تغییرات معمول اقلیمی می‌باشد که بسیاری از مناطق دنیا را با شدت‌های زیاد هر چند سال یک‌بار در بر می‌گیرد. از این‌رو، بررسی خشک‌سالی‌های هواشناسی و رفتارسنجی سطح آب زیرزمینی در راستای ارائه راه‌کارهای حفاظت و مدیریت منابع آبی مناطقی چون ایران که بخش اعظم آن را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. به نقل از کردوانی (۱۳۷۰)، از زمانی که در سده هفدهم میلادی پیرپرالت (۱۶۰۸-۱۶۸۰م) دانشمند فرانسوی منشأ آب زیرزمینی را به بارندگی نسبت داد، ارتباط بین بارش و سطح سفره‌های آب زیرزمینی مورد مطالعه قرار گرفت (Kordovani, 1991).

مایر و فارس به‌منظور ارزیابی رابطه زمانی- مکانی بین جریان سطحی، بارندگی و آب زیرزمینی از داده‌های تاریخی طولانی‌مدت با استفاده از روش من-کندال در حوضه‌هاوایی استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از کاهش معنی‌دار جریان پایه آب‌های سطحی از سال ۱۹۶۰ به بعد بود، درحالی‌که تغییرات بارندگی روند معنی‌داری را در این دوره نشان نداده است. همچنین پمپاژ از آب‌های زیرزمینی به‌طور معنی‌داری از سال ۱۹۶۰ به بعد افزایش یافته و نتایج نشانگر اثر معنی‌دار آن بر کاهش جریان پایه می‌باشد (Mair & Fares, 2010). زارعیان در پژوهشی به بررسی عوامل اصلی اثرگذار بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت نجف‌آباد در دوره زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۴ پرداخت و نوسانات دما، بارش، تغییرات جریان رودخانه بین دو مقطع ابتدا و انتهای محدوده مطالعاتی، تغییرات بهره‌برداری از آب زیرزمینی و تغییرات جریان آب در شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی را بررسی کرد (Zareian, 2021).

Hsu و همکاران (۲۰۰۷)، تأثیرات هیدرولوژیک ناشی از اقلیم بر سیستم آب زیرزمینی در دشت پینگتونگ تایوان را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از رابطه ساده تغذیه و بارندگی استفاده شد؛ نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد که کاهش سطح آب زیرزمینی باعث پیشروی آب شور و تنزل کیفیت آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه شده است. Davamani و همکاران (۲۰۲۴)، به مرور تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی پرداختند؛ در این پژوهش آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به تغییرات اقلیمی را ارزیابی و بر اهمیت ارزیابی‌های دقیق جهت مدیریت پایدار منابع آب تأکید کردند.

Behzadi و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی خشک‌سالی و تعیین تأثیر آن بر آبخوان دشت شهرکرد پرداختند. ابتدا متغیرهای اقلیمی نظیر بارندگی و دما را شبیه‌سازی نموده و وضعیت بارندگی در منطقه را تا سال ۲۱۰۰ تعیین کردند. در ادامه با استفاده از مدل ANFIS، عمق آب زیرزمینی را در سطح دشت تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی کردند. نتایج حاکی از

افزایش ۲۶ متری عمق آب زیرزمینی در برخی از نقاط دشت شهر کرد بود. Shakiba و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر خشک‌سالی را بر منابع آب زیرزمینی در شرق استان کرمانشاه با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان در رابطه با تأثیر خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی نشان داد که خشک‌سالی‌های رخ داده بر افت سطح آب‌های زیرزمینی تأثیر به‌سزایی داشته‌اند. همچنین ایشان با توجه به وجود ضریب همبستگی بین مقدار SPI و عمق آب زیرزمینی گزارش کردند که شاخص SPI شاخص تقریباً مناسبی جهت بررسی اثرات خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

Mendicino & Senatore (۲۰۰۸) در پژوهشی شاخص منبع آب زیرزمینی GRI^۱ را در منطقه کلابریا که دارای اقلیم مدیترانه‌ای است جهت پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی در طی دوره زمانی (۲۰۰۶-۱۹۵۹) محاسبه و سپس با شاخص SPI^۲ در مقیاس‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مقایسه کردند. آنان دریافتند که خصوصیات سنگ‌شناسی حوضه بر شاخص GRI مؤثر بوده و سبب تأخیر تأخیر فاز GRI نسبت به SPI می‌شود. Ahadi & Noshadi (۲۰۱۹) با تحلیل رفتار پیژومترها و تعیین تأخیر زمانی تأثیر بارندگی بر نوسانات عمق آب زیرزمینی آبرفت شیراز با استفاده از شاخص‌های SPI و GRI دریافتند که رفتار ۸۶/۲ درصد از پیژومترها شبیه یکدیگر است و در ۷۹/۳ درصد از پیژومترها، عمق آب زیرزمینی یک ماه پس از بارندگی کاهش نشان می‌دهد و حداکثر ضرایب همبستگی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه رخ می‌دهد. Jamshidi و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی اثر خشک‌سالی بر رفتار سفره آب زیرزمینی دشت قزوین با استفاده از شاخص GRI پرداختند و برای این منظور تراز آب زیرزمینی را به‌عنوان معیار اصلی مطالعه در چاه‌هایی با کم‌ترین، بیش‌ترین و مقادیر متوسط افت، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک روند کاهشی در مقادیر شاخص GRI طی دوره زمانی ۱۳۷۵-۱۳۸۰ وجود داشته و از طرف دیگر در همین محدوده زمانی، خشک‌سالی‌هایی با درجات بالا در سفره آب زیرزمینی مطالعاتی رخ داده است. همچنین نتایج بیانگر وجود همبستگی معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد شاخص خشک‌سالی هیدروژئولوژیک GRI با شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI در مقیاس ۴۸ ماهه و تأخیر زمانی سه ماهه بود. بارندگی مهم‌ترین متغیری است که تغییرات آن به‌طور مستقیم در رطوبت خاک و جریان‌های سطحی و تغییرات مخازن آب زیرزمینی اثر می‌گذارد. بر پایه مطالعات پیشین در بین شاخص‌های مبتنی بر بارش، شاخص SPI یکی از پرکاربردترین شاخص‌های بررسی خشک‌سالی هواشناسی در جهان و ایران محسوب می‌شود. براساس نتایج مطالعات ذکر شده، به‌دلیل پیچیدگی‌های سیستم‌های اقلیمی، استفاده ترکیبی از GRI با سایر شاخص‌ها مانند SPI می‌تواند دقت پیش‌بینی خشک‌سالی را بهبود بخشد. با توجه به این‌که تاکنون پژوهشی در خصوص همبستگی دو شاخص GRI و SPI در دشت چادگان صورت نگرفته است؛ در تحقیق حاضر با بررسی شاخص GRI در چاه‌های متفاوت به بررسی تأثیر نوسانات اقلیمی بر خشک‌سالی منابع آب زیرزمینی و در نهایت ارتباط دو شاخص GRI و SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف با تأخیر زمانی‌های گوناگون در دشت چادگان پرداخته شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

دشت چادگان واقع در جنوب غربی استان اصفهان، با مساحتی بالغ بر ۴۰۰ کیلومتر مربع و عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی، از دشت‌های وسیع این استان و یکی از نواحی طبیعی و ژئومورفولوژیک مهم ایران به‌ویژه از نظر منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود و با داشتن ویژگی‌های خاص خود، به یک منطقه مهم برای تأمین آب کشاورزی و شرب تبدیل شده است. آبخوان دشت چادگان از لایه‌های مختلف سنگی و خاکی تشکیل شده است.

این لایه‌ها شامل سنگ‌های رسوبی و آبرفتی می‌باشند که در برخی نواحی به صورت غیرمتراکم و در نواحی دیگر به صورت متراکم دیده می‌شوند. این ویژگی‌های زمین‌شناسی باعث شکل‌گیری و ذخیره آب در لایه‌های زیرزمینی می‌شود. این دشت یکی از زیر حوضه‌های رودخانه زاینده‌رود محسوب می‌شود و سد زاینده‌رود به‌عنوان سرچشمه زاینده‌رود در منطقه چادگان قرار دارد (Bagheri, 1395).

دشت چادگان منطقه‌ای کوهستانی است و از نظر جغرافیایی دارای موقعیت خاصی می‌باشد و به‌وسیله کوه‌های زاگرس احاطه شده است که باعث ایجاد یک اقلیم خاص و متأثر از رطوبت کوهستانی می‌شود. همچنین، وجود رودخانه‌های متعدد که از کوه‌ها سرچشمه می‌گیرند، سبب ایجاد زمین‌های حاصل‌خیز در این منطقه شده است. از نظر طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، آب و هوای شهرستان چادگان مرطوب و در طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، نیمه‌خشک سرد محاسبه شده است؛ بارندگی متوسط سالانه در این منطقه بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر متغیر است. این میزان بارندگی، به‌صورت نامنظم و با نوسانات سالیانه قابل‌توجهی همراه است، که خود یکی از چالش‌های مدیریت منابع آب در منطقه به‌حساب می‌آید (Bagheri, 1398). با وجود ظرفیت‌های بالای دشت چادگان، این منطقه با چالش‌ها و مشکلات متعددی تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی و کشاورزی ناپایدار از جمله کمبود منابع آبی، خشک‌سالی و فرسایش خاک مواجه است که این موضوع، تهدید جدی برای منابع طبیعی و معیشت مردم منطقه به‌شمار می‌آید.

۲.۲. داده‌ها

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی میزان انطباق شاخص GRI در خشک‌سالی منابع آب زیرزمینی و بررسی خشک‌سالی هواشناسی توسط شاخص SPI، به‌دلیل کامل و بی‌نقص بودن داده‌ها، دوره آماری از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ انتخاب و محاسبات انجام شد. علاوه بر این جهت بررسی رابطه شاخص GRI با شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف، ضریب همبستگی این دو شاخص نیز محاسبه شد.

از بین شش ایستگاه هواشناسی در شهر چادگان که شامل ایستگاه سینوپتیک چادگان، ایستگاه اقلیم‌شناسی زاینده‌رود و چهار ایستگاه باران‌سنجی کلبعلی، رزوه، دولت‌آباد گل‌سفید و فراموشجان می‌باشد؛ ایستگاه چادگان و کلبعلی با در نظر گرفتن موارد مختلفی از جمله نواقص آماری کم، داشتن آمار طولانی‌مدت و پراکنش مناسب در محدوده مطالعاتی دشت چادگان انتخاب شدند.

همچنین داده‌های تراز آب زیرزمینی در دوره آماری به‌عنوان ورودی اصلی شاخص GRI انتخاب شد و از ۱۲ حلقه چاه پیزومتری موجود در منطقه، جهت شبیه‌سازی رفتار آبخوان و تعیین اثر نوسانات اقلیمی، شش حلقه چاه در شمال، مرکز و جنوب دشت که معرف کل آبخوان باشد، انتخاب شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از دو چاه غرب چادگان و سه راه غرغر در ادامه پژوهش مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. شکل (۱) محدوده مورد مطالعه به‌همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و چاه‌های پیزومتری را در منطقه نشان می‌دهد. همچنین مشخصات ایستگاه‌ها و چاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

Table 1. Specifications of meteorological stations and piezometric wells

Type	Name	Code	Latitude	Longitude	Elevation sea level
Weather station	Chadegan	99452	32.757	50.65	2175
Weather station	Kalbali	131210	32.828	50.71	2350
Piezometric wells	Se rah Ghorghor	4211	32.86	50.59	2309
Piezometric wells	West of Chadegan	4211	32.78	50.61	2156

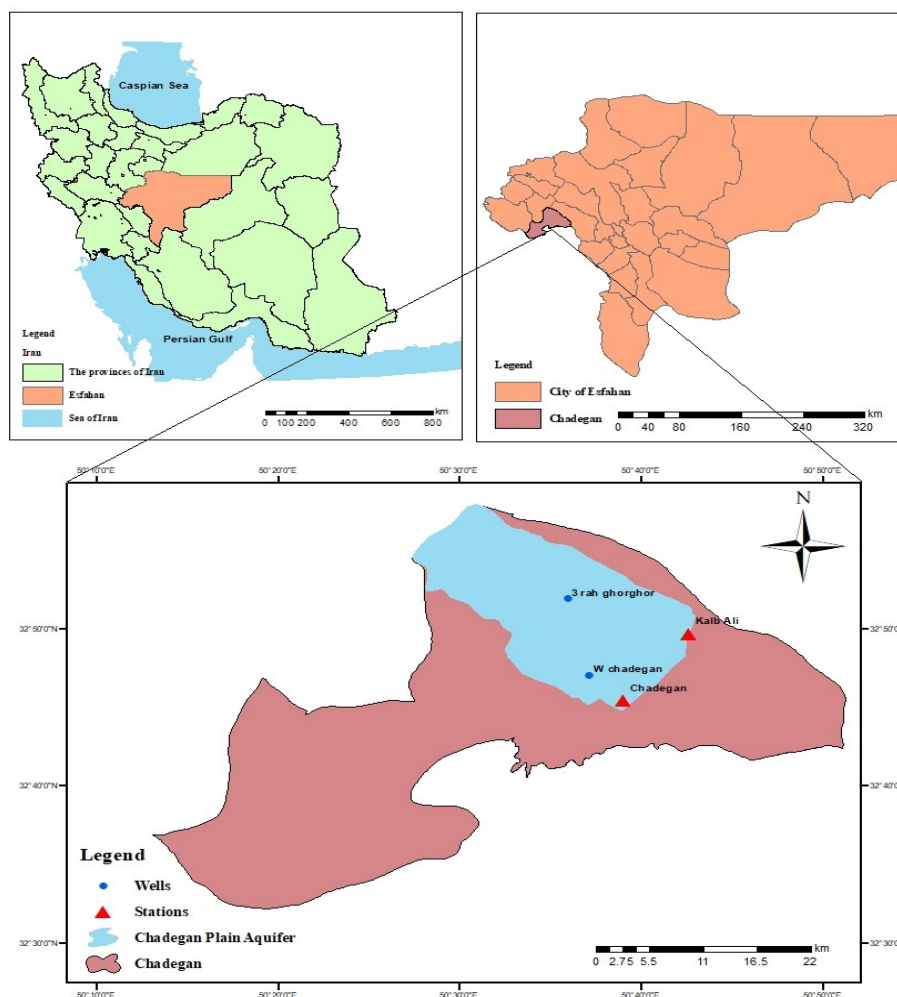


Figure 1. Geographic location of the Chadegan Plain with stations and wells

۳.۲. شاخص خشک‌سالی منبع آب زیرزمینی (GRI)

شاخص خشک‌سالی منبع آب زیرزمینی توسط Mendicino & Senatore (۲۰۰۸) به‌عنوان شاخصی مفید و قابل اعتماد جهت پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شد. شاخص GRI به‌عنوان یک سیستم اندازه‌گیری، به ارزیابی وضعیت خشک‌سالی و کمبود آب در نواحی مختلف می‌پردازد. این شاخص به‌ویژه در زمینه آب زیرزمینی کاربرد دارد و می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره تنش آبی و خشک‌سالی ارائه دهد. شاخص GRI یک معیار جامع برای ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی است که به‌دلیل ساده‌بودن، قابلیت دسترسی و کارایی بالا، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شاخص وضعیت‌های مختلف سنگ‌شناسی منطقه مطالعاتی تأثیر مهمی بر واکنش هیدروژئولوژیک حوضه در فصل تابستان نسبت به بارش‌های فصل زمستان دارند. تحلیل خصوصیات شاخص GRI بیانگر تغییرات مکانی زیاد این شاخص و حساسیت زیاد آن نسبت به خصوصیات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. شاخص GRI در ماه‌های تابستان از خود همبستگی بالایی برخوردار است و این قابلیت برای برخی از اهداف پیش‌بینی مناسب است.

این شاخص بدون بعد بوده و با توجه به آمار بلندمدت تراز آب زیرزمینی با استفاده از رابطه (۱) برای هر یک از چاه‌های منتخب محاسبه شد:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه، $D_{y,m}$ تراز آب زیرزمینی در سال y و ماه m ، $\mu_{D,m}$ میانگین تراز آب زیرزمینی در ماه m و $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار تراز آب زیرزمینی در ماه m می‌باشد (Chenari, 2006).

در شاخص GRI هرچه مقادیر از مثبت دو بیش‌تر باشد، تر سالی بسیار شدید و هرچه این مقادیر از منفی دو کم‌تر باشد، خشک‌سالی بسیار شدید خواهد بود. طبقات مختلف رطوبتی شاخص‌های GRI در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 2. Classification of drought and wetness based on GRI and SPI values

Classes	Precipitation characteristics	GRI index values	SPI index values
1	Severe Wetness	≥ 2	≥ 2
2	Very Humid	1.5 to 1.99	1.5 to 1.99
3	Moderate Wetness	1 to 1.49	1 to 1.49
4	Weak Wetness	0.5 to 0.99	0.5 to 0.99
5	Normal	0.49 to -0.49	0.49 to -0.49
6	Weak Drought	-0.5 to -0.99	-0.5 to -0.99
7	Moderate Drought	-1 to -1.49	-1 to -1.49
8	Severe Drought	-1.5 to -1.99	-1.5 to -1.99
9	Very Severe Drought	$-2 \leq$	$-2 \leq$

۴.۲. شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

McKee و همکاران (۱۹۹۳) شاخص SPI را به‌طور رسمی در سال ۱۹۹۳ معرفی کردند. این شاخص براساس نرمال‌سازی داده‌های بارش طراحی شده و این امکان را به محققان می‌دهد که الگوهای بارش را بدون توجه به توزیع‌های نرمال بررسی کنند. محاسبه شاخص SPI شامل چند مرحله کلیدی است. در ابتدا، داده‌های بارش برای دوره آماری جمع‌آوری می‌شود. سپس، این داده‌ها براساس توزیع نرمال، نرمال‌سازی می‌شوند. در این مرحله، برای هر مقدار بارش، نمره Z یا همان شاخص SPI محاسبه می‌شود که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است؛ به این ترتیب می‌توان شدت و فراوانی بارش‌ها را سنجید (Stagge et al., 2017).

شاخص SPI برای تشخیص کمبود میزان بارندگی در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه طراحی شده است. این مقیاس‌های زمانی اثرات خشک‌سالی را بر منابع آب قابل‌دسترس نشان می‌دهند. شرایط رطوبتی خاک، عکس‌العملی در برابر ناهنجاری‌های بارندگی در مقیاس‌های نسبتاً کوتاه هستند، درحالی‌که جریان‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و مقدار ذخایر پشت سدها، اثر ناهنجاری‌های دراز مدت بارندگی را نمایان می‌کنند.

در این پژوهش جهت محاسبه SPI ابتدا داده‌های ماهانه بارندگی استخراج و سری‌های زمانی در مقیاس‌های نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه تهیه شد؛ هنگامی که رابطه احتمال داده‌های بارندگی موجود به‌دست آمد، احتمال نقطه‌ای هر یک از داده‌های بارندگی مشاهداتی برآورد شده و برای محاسبه انحراف بارندگی در تابع چگالی احتمال گاما که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت و توزیع تجمعی گاما به‌روش مک‌کی محاسبه شد. تابع احتمال توزیع تجمعی گاما برآزش خوبی بر سری زمانی اقلیمی بارندگی دارد و به‌صورت تابع چگالی احتمال یا تابع فراوانی براساس رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta} \quad \text{رابطه (۲) برای } X > 0$$

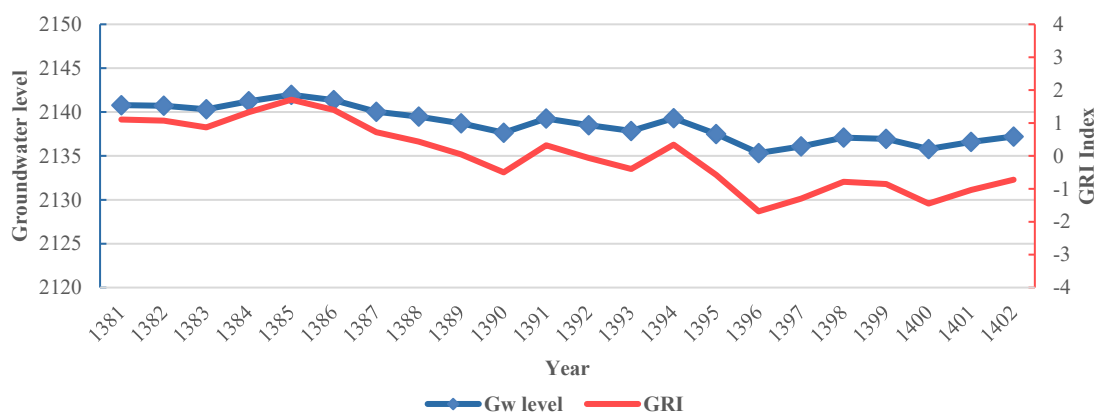
که در آن، $\alpha > 0$ و $\beta > 0$ به‌ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس هستند، $X > 0$ مقدار بارندگی ماهانه بر حسب میلی‌متر و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما می‌باشد که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{رابطه ۳}$$

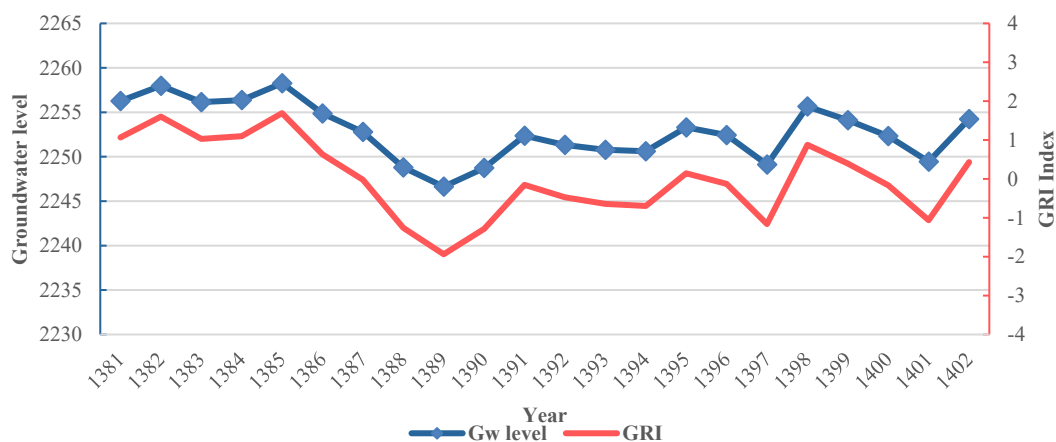
طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی یا ترسالی در یک دوره زمانی مشخص براساس مقادیر SPI به‌دست‌آمده، همانند شاخص GRI می‌باشد (جدول ۲).

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

در شکل (۲) تغییرات تراز آب زیر زمینی و وضعیت خشک‌سالی در دو چاه غرب چادگان و سه راه غرغر مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، رفتار هر دو چاه مشابه یکدیگر بوده و دارای روند مشابه می‌باشند. در شکل (۲-ا)، روند افت طبق نمودار طی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۸۵ تقریباً ثابت بوده، اما بعد از سال ۱۳۸۵ روند نزولی به خود گرفته است و بیش‌ترین افت در دوره زمانی ۱۳۹۰-۱۳۸۵ که معادل ۷ متر می‌باشد، اتفاق افتاده است. چاه سه راه غرغر (شکل ۲-ب) نیز همین روند را داشته است، به‌گونه‌ای که دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۸۵ روند تقریباً ثابت بوده، در حالی که افت ۱۰ متری در دوره زمانی ۱۳۹۰-۱۳۸۵ به ثبت رسیده است.



a) Correlation of the GRI index and groundwater level of west of Chadegan well- March



b) Correlation of the GRI index and groundwater level of Se rah Ghorghor well- March

Figure 2. Correlation of the GRI index and groundwater level in two wells

شکل (۳) تطابق بین مجموع بارندگی سالانه با تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت در هر دو چاه تغذیه سفره، تنها ناشی از بارندگی نبوده و سایر عوامل بر تراز آب زیرزمینی اثرگذار هستند. در شکل (۳) از سال ۱۳۸۳ به بعد با کاهش میزان بارندگی، سطح آب زیرزمینی پایین آمده، اما با افزایش بارندگی در چند سال بعد همچنان سطح آب زیرزمینی روند نزولی خود را حفظ کرده است. در سال ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ با افزایش قابل توجه بارندگی‌ها، مقداری از افت سطح آب زیرزمینی جبران شده؛ در غرب چادگان حدود ۲ متر و در سه راه غرغر حدود ۵ متر افزایش یافته است، اما در سال‌های بعد دوباره روند نزولی بروز پیدا کرده است.

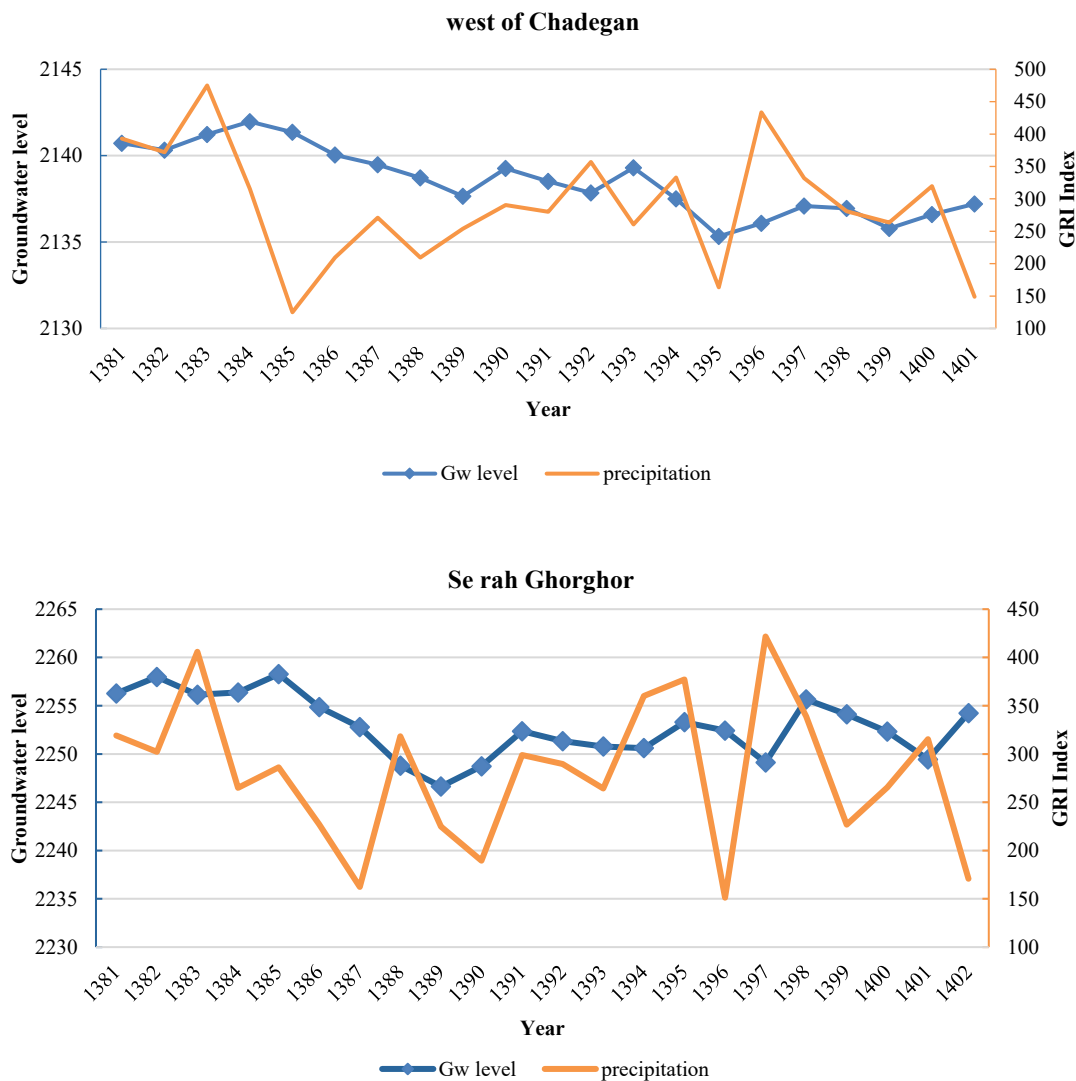


Figure 3. Correlation of groundwater level in March and total annual precipitation

طبق شکل (۴) بررسی تغییرات شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف، بیانگر این است که در فروردین‌ماه سال ۱۳۸۷ تا مهرماه سال ۱۳۹۱ و سال ۱۳۹۷ خشک‌سالی هواشناسی رخ داده است، بیش‌ترین شدت خشک‌سالی این شاخص در مقیاس زمانی ۱۲، ۲۴ و ۴۸ به‌ترتیب مربوط به نیمه اول سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ بوده است.

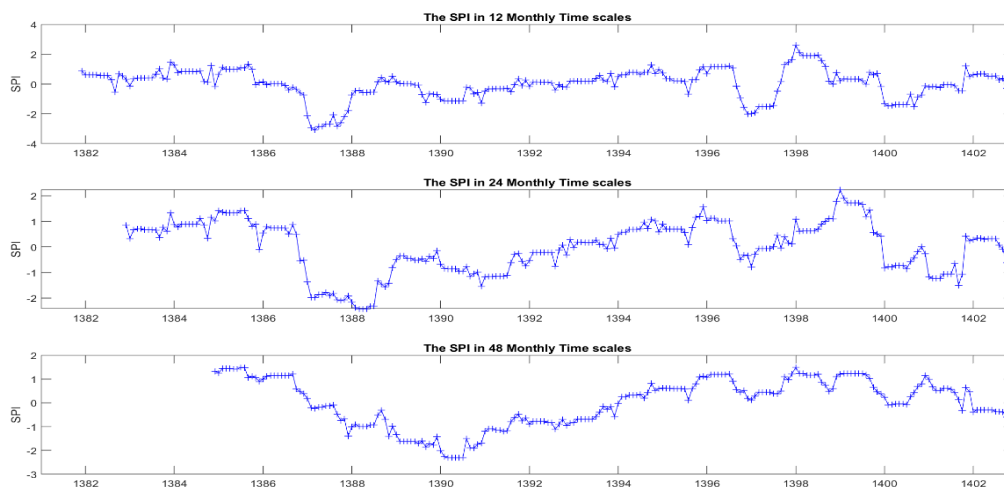


Figure 4. Changes in the SPI index over 12, 24, and 48-month timescales - Kalbali Station

در شکل (۵) تطابق دو شاخص GRI و SPI و وضعیت خشک‌سالی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی روند شاخص GRI در این شکل، ورود به آستانه خشک‌سالی ضعیف را از سال ۱۳۸۷ نشان می‌دهد که این روند با شیب تندی ادامه پیدا کرده، در سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۰ به خشک‌سالی متوسط رسیده و از اواسط سال ۱۳۹۰ تا اواخر ۱۳۹۱ به خشک‌سالی بسیار شدید رسیده است که این موضوع از افت ۱۵ متری سطح ایستابی در شکل (۲-b) نمایان است. روند شاخص SPI هم با توجه به بازه‌های شاخص از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ خشک‌سالی شدید را نشان می‌دهد.

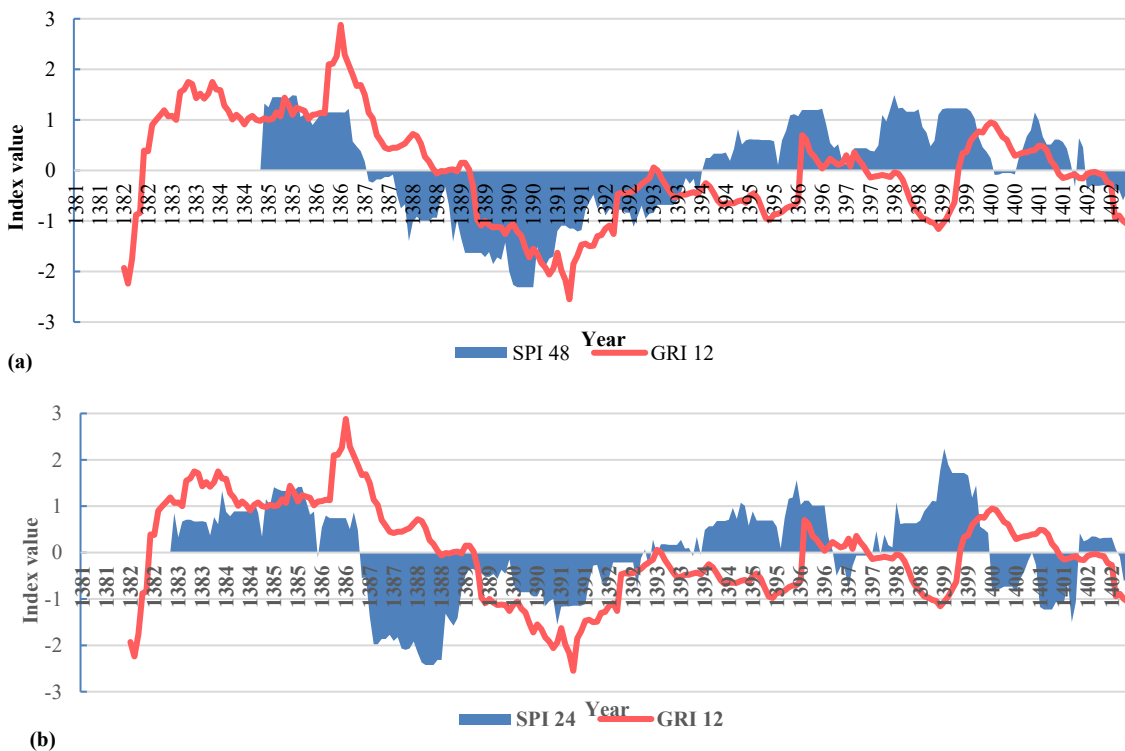


Figure 5. Correlation of GRI and SPI indices with different time scales - Se rah Ghorghor well

به دلیل تأثیرپذیری آب زیرزمینی از بارندگی با تأخیر زمانی چند ماه تا چند سال، در شکل (۵-ا) شاخص SPI ۴۸ ماهه و شاخص GRI ۱۲ ماهه باهم انطباق داده شده است. از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۲ دو شاخص با یکدیگر تطابق دارند و تأخیر زمانی یکساله بین دو نمودار مشاهده می‌شود. به نحوی که دوره ترسالی و خشک‌سالی به ثبت رسیده براساس شاخص SPI پس از چند ماه توسط شاخص GRI هم نیز به ثبت رسیده است، اما از سال ۱۳۹۴ با وجود افزایش بارندگی و نمایش دوره ترسالی توسط شاخص SPI، سطح آب زیرزمینی نزولی بوده و شاخص GRI دوره خشک‌سالی را ثبت کرده است؛ همین نتیجه در نمودار شکل (۵-ب) هم مشخص است. علت تفاوت این تأخیرهای زمانی به دلیل تفاوت در شرایط هر دشت است که به عواملی از جمله عمق سطح آب زیرزمینی، خصوصیات سنگ‌شناسی و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان آن منطقه بستگی دارد.

جدول‌های (۳) و (۴) به ترتیب مقادیر همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI در مقیاس‌های سالانه و ماهانه را طی دوره زمانی ۱۴۰۲-۱۳۸۱ نشان می‌دهد.

Table 3. Correlation of GRI and SPI indices on an annual time scale in west of Chadegan

2002-2023						
Spi-9	Spi-12	Spi-18	Spi-24	Spi-48		
0.26	0.34	0.34	0.39	0.29	no lag	
0.21	0.26	0.31	0.39**	0.32**	lag 6	
0.26	0.25	0.27	0.39**	0.36**	lag 12	
0.14	0.17	0.18	0.23	0.31	lag 18	
0.1	0.06	0.13	0.14	0.25	lag 24	
0.09	0.05	0.07	0.08	0.22	lag 30	
0.06	0.03	0.07	0.003	0.15	lag 36	

Table 4. Correlation of GRI and SPI indices on a monthly time scale in west of Chadegan

2002-2023						
Spi-9	Spi-12	Spi-18	Spi-24	Spi-48		
0.26	0.34	0.34	0.39	0.29	no lag	
0.23	0.31	0.33	0.37	0.28	lag 1	
0.22	0.30	0.32	0.35	0.28	lag 2	
0.21	0.29	0.31	0.36	0.29	lag 3	
0.21	0.28	0.31	0.37	0.30	lag 4	
0.20	0.27	0.31	0.38	0.31	lag 5	
0.21	0.26	0.31	0.39**	0.32**	lag 6	
0.22	0.25	0.31	0.40**	0.33**	lag 7	
0.21	0.24	0.30	0.40**	0.34**	lag 8	
0.23	0.24	0.29	0.39**	0.35**	lag 9	
0.24	0.24	0.29	0.39**	0.35**	lag 10	
0.25	0.25	0.28	0.39**	0.36**	lag 11	
0.26	0.25	0.27	0.39**	0.36**	lag 12	

** : Correlation is significant at the 0.01 level.

برای تعیین اثر تأخیر زمانی خشک‌سالی هواشناسی بر خشک‌سالی هیدروژئولوژیک، ضریب همبستگی بین شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه با شاخص GRI در فواصل زمانی سالانه و ماهانه بررسی شد که با توجه به جدول‌ها، در دشت چادگان بیش‌ترین همبستگی بین شاخص‌های GRI و SPI، ۲۴ و ۴۸ ماهه مشاهده می‌شود. نتایج همبستگی بین شاخص GRI با شاخص خشک‌سالی SPI نشان می‌دهد که وضعیت منابع آب زیرزمینی در این منطقه تنها تحت تأثیر پدیده‌های ترسالی و خشک‌سالی هواشناسی نبوده است و پایین بودن مقادیر همبستگی حاکی از آن است که سایر عوامل اقلیمی و انسانی از قبیل افزایش برداشت‌های بی‌رویه و چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در این منطقه در کاهش مقادیر GRI تأثیر گذار است و با نتایج پژوهش‌های Jamshidi و همکاران (۲۰۲۵) که به بررسی

همبستگی شاخص GRI و SPI در دشت قزوین پرداختند مطابقت دارد. هم‌چنین Viseyazdi و همکاران (۲۰۱۷) از نتایج همبستگی بین این دو شاخص در دشت مشهد دریافتند عوامل مهم‌تری غیر از عوامل آب‌وهوایی بر سطح آب زیرزمینی متأثر هستند که بررسی تأثیر عوامل انسانی بر مقادیر GRI مطالعات جداگانه‌ای نیاز دارد. در جدول (۵) میزان افت سطح آب در آبخوان دشت چادگان ارائه شده است.

Table 5. Decline Rate of Selected Wells in the Chadegan Aquifer

Well	Statistical Period	Years	Years	Years
		2006-2011	2015-2018	2019-2022
Se rah Ghorghor		18 meters	7 meters	9 meters
West of Chadegan		6 meters	9 meters	5 meters

در سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹۰ با کاهش بارندگی هر دو چاه با افت شدید آب روبه‌رو بوده‌اند و در سال‌های بعد تا پایان دوره آماری با وجود افزایش بارندگی تأثیر چندانی در سطح آب زیرزمینی مشاهده نشده است که مطابق با نتایج جدول‌های (۳) و (۴) نشان‌دهنده نقش عوامل انسانی در تشدید خشک‌سالی آب زیرزمینی می‌باشد. توسعه مناطق شهرنشینی، افزایش تقاضای آب برای مصرف‌کنندگان بخش کشاورزی (چاه‌های غیرمجاز و برداشت غیرمجاز از چاه‌های دارای مجوز) و هم‌چنین افزایش واحدهای صنعتی موجود در دشت، نمونه‌ای از عوامل انسانی می‌باشد که سبب بحرانی شدن دشت چادگان و آبخوان موجود در آن شده است.

۴. نتیجه‌گیری

شاخص GRI جهت بررسی و ارزیابی خشک‌سالی آب زیرزمینی در منطقه دشت چادگان از کارایی خوبی برخوردار است، به‌گونه‌ای که سال‌های تر و خشک را به‌خوبی نشان داده و انطباق مناسبی با رفتار سفره آب زیرزمینی دارد. نتایج پژوهش حاضر در مورد خشک‌سالی نشان داد که میزان شاخص GRI در هر دو چاه پیرومتری در دوره زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۰ به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است و این کاهش تا سال ۱۳۹۰ ادامه داشته و روند کاهشی تغییر نکرده است، هم‌چنین این روند در دوره زمانی ۱۳۹۷-۱۳۹۴ نیز تکرار شده است. درجات شدید خشک‌سالی در این سال‌ها نشان‌دهنده خطر و تهدید منابع آب زیرزمینی دشت چادگان است، لذا برای ترمیم و برگشت سفره آب زیرزمینی به وضع نرمال علاوه بر بارش و یا تغذیه مصنوعی کافی، اعمال راه‌کارهای مدیریتی مناسبی نیاز است تا در آینده سطح ایستابی به حالت نرمال برگردد. سطح آب زیرزمینی در دشت چادگان از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ روند به نسبت افزایشی داشته است که ناشی از افزایش مقدار بارندگی در این بازه زمانی می‌باشد. سپس سطح آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ کاهش یافته و از آن پس با شیب ملایم‌تری تا به حال کاهش پیدا کرده است. Ghafari و همکاران (۲۰۲۷) نیز در پژوهش‌های خود این روند را گزارش کردند. منابع آب زیرزمینی دشت چادگان از نظر رفتار سالانه تنها تحت تأثیر چرخه و رژیم بارش منطقه نمی‌باشد. نتایج حاکی از آن بود که تغییرات سطح آب زیرزمینی متأثر از عواملی غیر از بارندگی از جمله افزایش برداشت‌ها و چاه‌ها می‌باشد. جهت کاهش اثرات منفی نوسانات اقلیمی و عوامل انسانی بر آبخوان‌ها، لازم است که راه‌کارهای مدیریتی و سیاست‌گذاری مناسبی تدوین شود. استفاده از فناوری‌های نوین برای مدیریت منابع آب، تغییر الگوهای کشت و اجرای برنامه‌های حفاظت از آبخوان‌ها می‌تواند به حفظ و بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی کمک کند. هم‌چنین، آگاهی‌بخشی به جامعه محلی در مورد اهمیت منابع آبی و نحوه مدیریت آن‌ها نیز در این راستا ضروری است (World Bank, 2018).

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Ground water resource index
2. Standardized Precipitation Index

۶. تشکر و قدردانی

از دانشگاه تهران، شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، به‌ویژه سرکار خانم مهندس زهرا مردانی و سازمان هواشناسی کشور به‌دلیل تأمین امکانات و داده‌های لازم جهت انجام این پژوهش و تهیه مقالات مربوطه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Bagheri, S. (2016). Climate profile of Chadegan County. Isfahan Meteorological Administration. (In Persian)
- Bagheri, S. (2019). Revealing climate change in Chadegan. Isfahan Meteorological Administration. (In Persian)
- Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., & Moridi, A. (2022). Investigation and analysis the effect of drought on groundwater aquifers in Iran (Case study: Shahrekord plain). *Water and Irrigation Management*, 12(2), 327-348. doi: 10.22059/jwim.2022.341590.982. (In Persian)
- Chenari, M. (2006). Analysis of changes in various drought indices using the Markov chain; in the climatic samples of Southern Alborz. Tehran: Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran. (In Persian)
- Davamani, V., John, J. E., Poornachandhra, C., Gopalakrishnan, B., Arulmani, S., Parameswari, E., Santhosh, A., Srinivasulu, A., Lal, A., & Naidu, R. (2024). A Critical Review of Climate Change Impacts on Groundwater Resources: A Focus on the Current Status, Future Possibilities, and Role of Simulation Models. *Atmosphere*, 15(1), 122. <https://doi.org/10.3390/atmos15010122>
- Ghafari, S., Moradi, H., & Modares, R. (2018). Comparison of Temporal and Spatial Changes of Groundwater Level in Isfahan-Borkhar, Najafabad and Chadegan Plains. *Physical Geography Research*, 50(1), 141-160. doi: 10.22059/jphgr.2018.226430.1006999 (In Persian)
- Hsu, K. C., Wang, C. H., Chen, K. C., Chen, C. T., & Ma, K. W. (2007). Climate induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeology Journal*, (5), 903-913.
- Jamshidi Avanaki, M., Ebrahimi, K., & Hashemi, S. (2025). Assessment of the GRI Index Compliance in Groundwater Drought in the Qazvin Plain, Iran. *Water and Soil*, 39(1), 16-1. doi: 10.22067/jsw.2025.90890.1447. (In Persian)
- Kordovani, P. (1991). Geohydrology. University of Tehran Publications.
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Benestad, R. E., Hov, Ö., Piniewski, M., & Otto, I. M. (2017). Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 79, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>
- Mair, A., & Fares, A. (2010). Influence of groundwater pumping and rainfall spatio-temporal variation on stream flow. *Journal of Hydrology*, 393, 287-308.
- McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology**, (pp. 179-184). Boston, Massachusetts: American Meteorological Society.
- Mendicino, G., & Senatore, A. (2008). A Ground water resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology*, (357), 282-302.
- Noshadi, M., & Ahadi, A. (2020). 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. *Journal of water and soil science*, 23(4), 299-312. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3831-en.html> (In Persian)

- Shakiba, A., Mirbagheri, B., & Kheiri, A. (2010). Drought analysis using SPI index and its effects on groundwater resources in East of Kermanshah. *Iran Geography Journal*, 25, 105-124. (In Persian)
- Stage, J., Hayes, M., & Svoboda, M. (2017). Drought Monitoring: The Standardized Precipitation Index. Klüver Academic Publishers.
- Visayazdi, S., Faridhosseini, A., & Mosaedi, A. (2017). Correlation analysis of meteorological and groundwater droughts in the Mashhad Plain. *16th Iranian Hydraulics Conference*. <https://civilica.com/doc/727525> (In Persian)
- Zareian, M. J. (2021). Sensitivity analysis of the effect of climatic and non-climatic factors on groundwater level fluctuations (Case study: Najafabad plain). *Water and Irrigation Management*, 11(3), 473-484. doi: 10.22059/jwim.2021.325230.882. (In Persian)
- (2021). Climate change and water. Intergovernmental panel on climate change. Retrieved from <https://www.ipcc.ch>
- (2020). Global environment outlook: Assessment of global water resources. United nations environment programme. Retrieved from <https://www.unep.org/geo>
- (2018). Water resources management: A policy perspective. World bank. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/topic/waterresourcesmanagement> (Last access Oct 05, 2022)