

Study of Groundwater Table Variations and Drought Monitoring Using GRI Index in Shiraz Plain (Maharloo-Bakhtegan Watershed)

Iman Saleh^{1*}, Samira Zandifar² and Majid Khazaei¹

(Received: October 7-2024 ; Revised: November 17-2024 ; Accepted: December 29-2024)

1. Department of Forests, Rangelands and Watershed Management Research, Kohgiluyeh & Boyer-Ahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yasuj, Iran.

2. Department of Desert Research, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

*: Corresponding author Email: salehiman61@gmail.com

Abstract

Groundwater resources are affected by long-term drought conditions and have received less attention than other issues. The current research was carried out to investigate and zone the quantitative fluctuations of groundwater as well as the temporal analysis of groundwater drought using GRI in the study area of Shiraz in the Maharloo-Bakhtegan watershed. The zoning of groundwater table variations was done in the ArcGIS environment, and a representative hydrograph of the aquifer was prepared using 15-year data (2003-2018) of groundwater resources divided into three five-year periods. Also, the drought of the groundwater resources of the studied plain was investigated using the GRI index. According to the results, the highest level of the groundwater table is related to the northwestern area of the plain by 1810.1 m in October 2007, and the lowest water table was observed in the southern study area with the amount of 1423.6 m in October 2017. Also, the results showed that the groundwater table faced a drop of 6 m and an average annual drop of 0.5 m during the studied 15 years. The volume changes of the reservoir also indicated that, in addition to consuming the entire renewable reserve, a large part of the fixed reserve has also been exploited in the past years. The descending trend of GRI and its intensification in the last years of the studied period is one of the most important results of this research, which occurred due to population growth and increasing cultivated area, a decrease in precipitation, and climate change.

Keywords: Groundwater table, Reservoir volume, Representative hydrograph, GRI

How to cite this article: Saleh, I., Zandifar, S. and Khazaei, M. 2025. Study of Groundwater Table Variations and Drought Monitoring Using GRI Index in Shiraz Plain (Maharloo-Bakhtegan Watershed). *J. Water and Soil Sci.* 29(2):1-13. DOI: [10.47176/jwss.29.2.64691](https://doi.org/10.47176/jwss.29.2.64691)

Copyright © 2025 Saleh et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

مطالعه تغییرات سطح آب زیرزمینی و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص GRI در دشت شیراز (حوضه آبخیز مهارلو-بختگان)

ایمان صالح^{۱*}، سمیرا زندی^۲ فر^۱ و مجید خزایی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۹)

۱. بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یاسوج، ایران.
 ۲. بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- *: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: salehiman61@gmail.com

چکیده

منابع آب زیرزمینی یکی از بخش‌های متأثر از شرایط بلندمدت خشکسالی هستند که متأسفانه کمتر از سایر بخش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. پژوهش حاضر با هدف بررسی و پهنه‌بندی نوسانات کمی آب زیرزمینی و نیز تحلیل زمانی خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص GRI در محدوده مطالعاتی شیراز در حوزه آبخیز مهارلو - بختگان انجام شده است. بدین منظور با استفاده از آمار ۱۵ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۷) منابع آب زیرزمینی و تقسیم آن به سه دوره زمانی پنج‌ساله، پهنه‌بندی تغییرات سطح و تراز آب زیرزمینی در محیط ArcGIS انجام و آبنمود معرف آبخوان تهیه شد. همچنین خشکسالی منابع آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه با استفاده از شاخص GRI بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین تراز سطح آب زیرزمینی مربوط به ناحیه شمال غرب آبخوان و حدود ۱۸۱۰ متر در مهرماه سال ۱۳۸۷ و کمترین مقدار نیز مربوط به نواحی جنوبی آبخوان با میزان ۱۴۲۳ متر در مهرماه ۱۳۹۷ است. همچنین نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی در طول دوره ۱۵ ساله مورد مطالعه با افتی برابر شش متر و متوسط افت سالانه ۰/۵ متر روبرو بوده است. بررسی تغییرات حجم مخزن نیز حاکی از این نکته بود که در سال‌های گذشته علاوه بر مصرف کل ذخیره تجدیدشونده، بخش زیادی از ذخیره ثابت نیز بهره‌برداری شده است. روند نزولی شاخص خشکسالی منابع آب زیرزمینی (GRI) و شدت گرفتن آن در سال‌های پایانی بازه زمانی مورد مطالعه، از مهم‌ترین نتایج این پژوهش بوده که در پی افزایش جمعیت و سطح زیرکشت، کاهش نزولات جوی و تغییر اقلیم رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: تراز آب زیرزمینی، حجم مخزن، آبنمود معرف، GRI

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

افزایش دخالت‌های نابجای انسان در کره زمین و برهم‌زدن چرخه طبیعی محیط، موجب شده تا خشکسالی و بحران آب در دنیای امروز به شکل جدی مورد توجه قرار گیرد. در کشور ایران نیز با توجه به کم‌بودن رشد توسعه منابع کشور در مقایسه با رشد جمعیت و نیاز آبی، حفظ و ساماندهی منابع آب یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. همچنین به دلیل کمبود منابع آب سطحی دائمی (رودخانه‌ها) و عدم وقوع بارش‌های جوی مناسب، آب‌های زیرزمینی بهترین و در برخی موارد تنها راه‌حل مشکل تأمین آب شرب و کشاورزی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است. اما برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی پیامدهای ناگواری مانند تشدید آلودگی آن‌ها را به دنبال خواهد داشت (۵). خشکسالی پدیده‌ای اقلیمی است که تأثیرات محیطی، اجتماعی و اقتصادی چشمگیری دارد. خشکسالی با دیگر بلایای طبیعی از این جهت متفاوت است که تعیین دقیق شروع و پایان آن تا حدودی مشکل است. گسترش خشکسالی به آرامی صورت می‌گیرد و آثار آن ممکن است سال‌ها پس از پایان آن باقی بماند. سامانه‌های پایش در تدوین طرح‌های مقابله با خشکسالی و مدیریت آن از اهمیت زیادی برخوردار هستند (۱۹). یکی از بخش‌های متأثر از شرایط بلندمدت خشکسالی، منابع آب زیرزمینی هستند که متأسفانه کمتر از سایر بخش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند (۸). طبق گزارش وزارت نیرو، سالانه حدود ۷ میلیارد مترمکعب از مخازن آب زیرزمینی کشور کاسته می‌شود. همچنین از ۶۰۹ دشت کشور، حدود ۴۰۹ دشت به‌عنوان دشت ممنوعه شناخته شده‌اند و روند افزایش تعداد دشت‌های ممنوعه از تعداد ۱۵ دشت در سال ۱۳۴۷ به ۱۹۹ دشت در سال ۱۳۸۰ و ۳۵۰ دشت ممنوعه در سال ۱۳۹۴، نشان‌دهنده وضعیت نامناسب منابع آب کشور است (۶). در کشور ایران با توجه به شرایط آب‌وهوایی نیمه‌خشک حاکم در منطقه، استفاده بهینه از منابع محدود آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در اختیار داشتن آمار و اطلاعات کافی به‌عنوان مؤثرترین گام به‌منظور شناخت

جامع این منابع و رسیدن به پایداری نسبی آن‌هاست. استان فارس یکی از استان‌هایی است که در مقایسه با سایر استان‌های کشور با مشکل بیلان منفی دشت‌ها روبرو است. این استان ۸۰ درصد آب مصرفی خود را از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌کند که بیشتر با بیلان منفی روبه‌رو هستند. در ۶۷ دشت از مجموع ۹۰ دشت کشاورزی استان فارس، بیلان آب زیرزمینی منفی است (۱۳). کاهش سطح سفره‌های زیرزمینی مشکلاتی همچون خشک‌شدن چاه‌های آب، کاهش دبی رودخانه و آب چاه‌ها، تنزیل کیفیت آب، افزایش هزینه پمپاژ و استحصال آب و نشست زمین را به دنبال دارد که این به نوبه خود منجر به کاهش دسترسی به آب و کاهش تولید برای کشاورزان می‌شود. از آنجایی که اقتصاد روستا بر پایه کشاورزی است و کشاورزی نیز وابسته به آب است، این آثار کاهش سطح آب‌های زیرزمینی رفاه کشاورزان را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

در این رابطه مطالعات متعددی انجام شده است. گرلس و همکاران (۷) به تحلیل نوسانات تراز سطحی آب زیرزمینی در کشور هلند پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تراز آب در مناطق وسیعی در نتیجه زهکشی آب زیرزمینی، خشکسالی و برداشت بی‌رویه توسط کشاورزان کاهش یافته است. اسکولون و همکاران (۱۷) بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان‌های کالیفرنیا و آثار ناشی از آن را بررسی کردند. بدین منظور، سطح آب در هزاران چاه پایش شد و کاهش شدید سطح آب زیرزمینی ناشی از تهی‌شدگی شدید آبخوان‌های منطقه دیده شد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که تهی‌شدگی آب زیرزمینی در منطقه در دوره‌های خشکسالی شدت یافته است و اگرچه در طول دوره‌های پربارش روند تهی‌شدگی کاهش یافته است؛ اما بازیابی نشده است. مطالعات متعدد دیگری در زمینه بررسی نوسانات آب زیرزمینی و خشکسالی مربوط به آن در کشورهایی مانند چین (۹)، کانادا (۲۲)، شیلی (۲۰)، بنگلادش (۱۸) و ایالات متحده آمریکا - کالیفرنیا (۲) به انجام رسیده است. در برخی دشت‌های ایران نیز نوسانات آب زیرزمینی مطالعه شده است. از میان آن‌ها می‌توان به مطالعه تغییرات آب زیرزمینی

در دشت سمنان (۱۲)، دشت قروه - دهگلان (۲۴)، دشت جیرفت (۱۴) و دشت عباس (۱۵) اشاره کرد.

در استان فارس نیز به صورت خاص، فشار بر منابع آب به ویژه منابع آب زیرزمینی در وضعیت هشدار قرار دارد. این وضعیت توسط تغییرات اقلیمی که بخش عمده آن نیز به نوبه خود معلول فعالیت های انسانی است، تشدید شده است. همچنین بر توانایی تأمین انرژی نیز تأثیرگذار بوده و تعادل آب و هوایی استان را بر هم زده است. با توجه به این واقعیت که استان فارس عموماً در بخش کشاورزی فعالیت دارد، کاهش کمیت و کیفیت آب، معاش بسیاری از کشاورزان را با خطر جدی مواجه کرده و امنیت غذایی را تهدید می کند. به همین دلیل آب زیرزمینی در این منطقه از اهمیت زیادی برای بحث کشاورزی و شرب برخوردار است. همچنین در سال های اخیر به علت کاهش منابع آب سطحی حوزه آبخیز مهارلو - بختگان، یک افزایش قابل توجه در استفاده از آب های زیرزمینی رخ داده است که به تبع آن سطح آب زیرزمینی در بیشتر نواحی آن به صورت چشمگیری افت پیدا کرده است؛ بنابراین، مطالعه تغییرات کمی آب زیرزمینی و نیز روند خشکسالی حوضه مورد اشاره ضروری به نظر می رسد.

تابه حال شاخص های خشکسالی متعددی برای پیش بینی و تعیین شدت خشکسالی ارائه شده است. اما شاخصی به منظور برآورد شدت خشکسالی آب های زیرزمینی در این حوضه ارائه نشده است. شاخص منبع آب زیرزمینی GRI (Groundwater Resource Index) برای بیان تغییرات بلندمدت عمق داده های پیژومتری و مشاهداتی آبخوان استفاده می شود. شاخص GRI در سال ۲۰۰۸ توسط مهندسین و همکاران (۱۱) به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای مدل سازی، پایش و پیش بینی وضعیت خشکسالی در منطقه مدیترانه پیشنهاد شد. در این شاخص وضعیت مختلف سنگ شناسی زمین، تأثیر مهمی بر واکنش آب های زیرزمینی حوضه در فصل تابستان نسبت به بارش های فصل زمستان دارد و به طور کلی مقادیر این شاخص تغییرات مکانی زیادی داشته و نسبت به خصوصیات

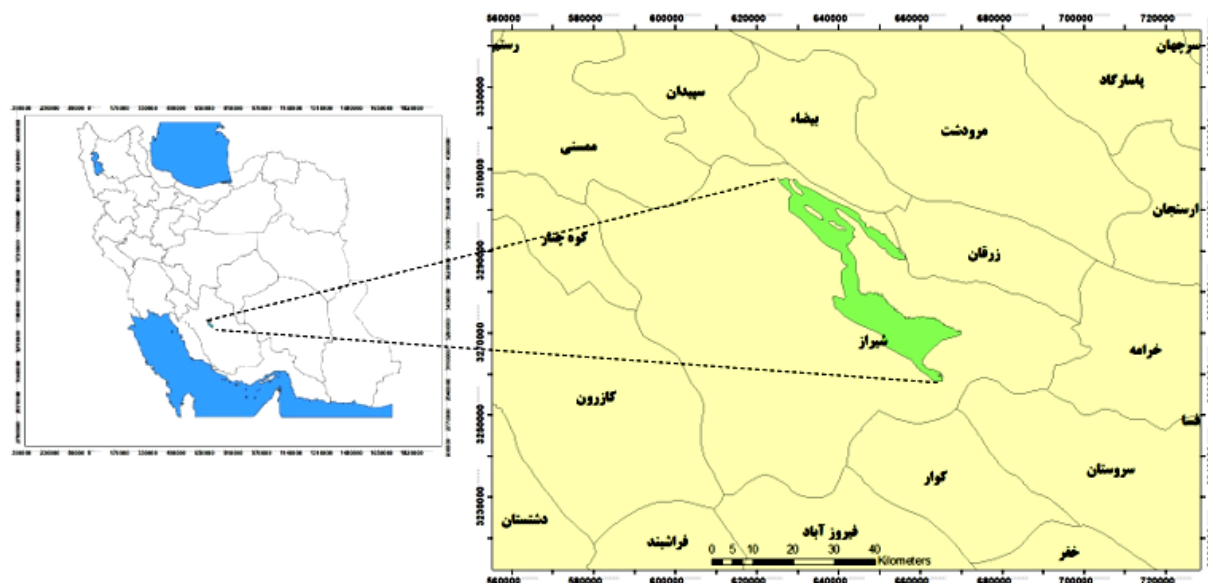
سنگ شناسی منطقه مورد مطالعه نیز حساس است. در اصل شاخص GRI اقتباس مفهومی شاخص تحلیل خشکسالی داده های اقلیمی با نام SPI است و در حیطه آب های زیرزمینی است. با استفاده از این شاخص می توان برای سری زمانی داده های عمق هر چاه، وقوع و عدم وقوع خشکسالی ها و ترسالی ها را بررسی کرد و مقدار شدت و ضعف آن را از روی ارقام کمی حاصله در هفت کلاس اصلی استاندارد GRI به دست آورد. مهم ترین قابلیت این شاخص همبستگی زیاد آن با متوسط رواناب در برخی از رودخانه های حوضه در پیش بینی خشکسالی های فصل تابستان است.

در این مطالعه به بررسی و پهنه بندی نوسانات کمی آب زیرزمینی و نیز تحلیل زمانی خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص GRI در محدوده مطالعاتی شیراز در حوزه آبخیز مهارلو - بختگان پرداخته شده است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دشت شیراز از شمال به ارتفاعات بابا کوهی و کفترک، از شمال غربی به ارتفاعات کوه دراک، از جنوب به ارتفاعات سبزپوشان و سلطان آباد و از شرق و جنوب شرقی به ارتفاعات پل فسا و دریاچه مهارلو محدود می شود. وسعت این دشت حدود ۵۱۵ کیلومتر مربع است که موقعیت آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. بررسی های انجام شده نشان داده است که آبرفت دشت شیراز به صورت لایه لایه بوده و لایه های رسی بین لایه های آبدار قرار گرفته اند؛ به نحوی که رسوبات آبرفتی دارای ضخامت یکنواختی نبوده و لایه های شنی در بین لایه های رسی و سیلتی قرار دارند. همچنین اکتشافات ژئوفیزیکی در دشت بیانگر آن است که لایه آبدار دشت شیراز تا عمق ۲۰۰ متر محدود می شود و در اعماق بیشتر در صورتی که لایه آبداری وجود داشته باشد، از کیفیت مناسبی برخوردار نیست (۶). علاوه بر این، بافت آبرفت در غرب دشت درشت دانه بوده و با نزدیک شدن به دریاچه مهارلو در شرق ریزدانه می شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

تقسیم شدند. براین اساس، اطلاعات مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای تهیه و آماده‌سازی شد. پس از کنترل کیفیت و صحت داده‌ها، آزمون همگنی با روش آزمون توالی و آزمون نرمالیت در محیط نرم‌افزار SPSS انجام شد. برای محاسبه میانگین داده‌های آب زیرزمینی دشت از روش میان‌یابی IDW که یکی از معمول‌ترین تکنیک‌های درون‌یابی نقاط پراکنده در مکان است، استفاده شد. اساس روش یادشده بر این فرضیه استوار است که در یک سطح درون‌یابی اثر یک پارامتر بر نقاط اطراف یکسان نبوده و نقاط نزدیک بیشتر و نقاط دور کمتر تحت تأثیر قرار گرفته و هرچه فاصله از مبدأ افزایش یابد، اثر پارامتر کمتر می‌شود. به‌منظور تهیه نقشه خطوط هم‌تراز و هم‌عمق آب زیرزمینی از داده‌های ماه حداقل سال آخر دوره آماری (سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۹۶) برای آبخوان‌های حوزه آبخیز استفاده شد و پهنه‌بندی‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد.

تراکم چاه‌های مشاهده‌ای در بیشتر دشت‌های دارای شبکه چندان مناسب نبوده؛ اما پاسخگوی نیازهای تهیه نقشه‌های تراز آب زیرزمینی است. نقشه‌های تراز آب زیرزمینی در دوره‌های آماری متفاوت و با استفاده از ارقام متوسط سطح آب زیرزمینی

بر اساس این مطالعات، سفره آب زیرزمینی دشت شیراز به دو سفره سطحی و عمقی تقسیم شده است. سفره سطحی از سطح آزاد آب زیرزمینی شروع شده و تا عمق حدود ۴۰ متری امتداد می‌یابد و سفره عمیق آب زیرزمینی از حدود عمق ۴۰ متری تا ۲۰۰ متری گسترش یافته است. ارتفاعات منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی جزء رشته‌کوه‌های زاگرس بوده و از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های کشیده با جهت شمال غربی - جنوب شرقی که در امتداد روند چین‌خوردگی زاگرس هستند، تشکیل شده است (۲۱).

مطالعه آبخوان

در این بخش به مطالعه و بررسی نقشه‌های هم‌تراز و هم‌عمق آب زیرزمینی، تغییرات سطح و تراز آب زیرزمینی و تهیه آب‌نمود معرف آبخوان پرداخته شد. داده‌های آب‌های زیرزمینی مربوط به یک دوره ۱۵ ساله (سال‌های آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۷) از شرکت آب منطقه‌ای استان فارس دریافت شد. به‌منظور بررسی و مقایسه دقیق سطح آب زیرزمینی در سال‌های مختلف و با توجه به داده‌های در دسترس، داده‌های مد نظر به سه دوره ۵ ساله شامل بازه‌های ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸-۱۳۸۷، ۱۳۹۳-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۳-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷

مقدار شاخص GRI با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (1)$$

که در آن $D_{y,m}$ مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی در سال y و ماه m ، $\mu_{D,m}$ و $\sigma_{D,m}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر تراز آب زیرزمینی در ماه m در طول دوره آماری هستند. طبقه‌بندی مقادیر شاخص GRI در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

تغییرات عمق و تراز آب زیرزمینی

نقشه پهنه‌بندی عمق آب زیرزمینی در مهرماه سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۷ در شکل ۲ برای محدوده مطالعاتی شیراز ارائه شده است. بر اساس نقشه‌های تهیه شده، بیشترین عمق آب زیرزمینی در آبخوان شیراز در حدود ۱۲۳ متر است که مربوط به مهر ۱۳۹۲ و در ناحیه شمال غرب آبخوان می‌باشد. همچنین کمترین عمق آب زیرزمینی (۰/۹۷۲ متر) در نواحی جنوب و جنوب شرق آبخوان در مهر ۱۳۸۷ دیده می‌شود. بر اساس داده‌های موجود، عمق سطح آب زیرزمینی در دوره‌های زمانی مورد مطالعه دارای یک روند سینوسی است که در انتهای دوره زمانی مورد مطالعه با افزایش مواجه است. نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی آبخوان در مهرماه سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۷ نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. بیشترین تراز سطح آب زیرزمینی مربوط ناحیه شمال غرب آبخوان و حدود ۱۸۱۰ متر در مهرماه سال ۱۳۸۷ است و کمترین مقدار نیز مربوط به نواحی جنوبی آبخوان با میزان ۱۴۲۳ متر در مهرماه ۱۳۹۷ است. تراز سطح آب زیرزمینی نیز در سه دوره زمانی مورد مطالعه دارای یک روند نوسانی است که در انتهای دوره زمانی مورد مطالعه با افت مواجه شده است که در ادامه و با بررسی شاخص خشکسالی می‌توان دریافت که دلیل این افت، وقوع خشکسالی‌های پیاپی در انتهای دوره زمانی مورد مطالعه است.

چاه‌های مشاهده‌ای تهیه شده است. مناسب‌ترین دوره آماری برای بررسی داده‌های مربوط به اندازه‌گیری‌های ماهانه تغییرات سطح آب زیرزمینی به گونه‌ای انتخاب شد که دربرگیرنده بیشترین تعداد چاه اندازه‌گیری‌شده در ماه کم‌آب باشد.

بررسی تغییرات درازمدت و نوسانات سطح آب زیرزمینی

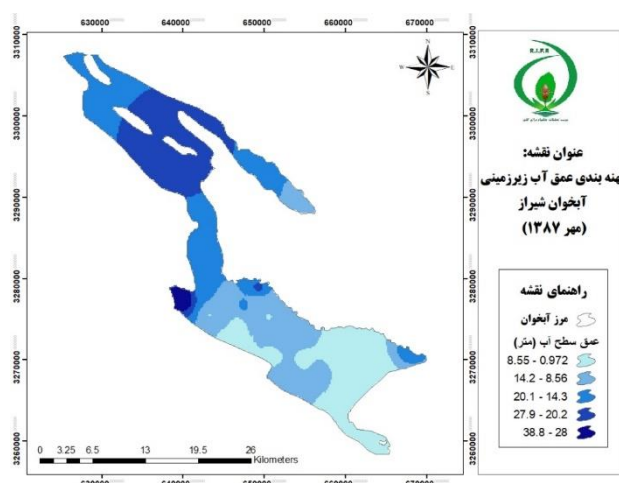
به منظور بررسی تغییرات درازمدت و نوسانات سطح آب زیرزمینی و نیز تشخیص دوره‌های افزایش و کاهش سطح آب، آبنمود معرف در طول دوره آماری با استفاده از نقشه تیسن کمی برای دشت مورد مطالعه تهیه شده است. هیدروگراف واحد یا آبنمود معرف، هیدروگراف متوسطی است که معرف آبخوان‌های منطقه است و از طریق آن، تغییرات سطح آب در طول دوره‌های مختلف چندین ساله و بالارفتن و پایین آمدن سطح آب آبخوان مشخص می‌شود. با توجه به هیدروگراف واحد می‌توان دوره‌های بیشینه و کمینه سطح آب در آبخوان را تعیین کرد (۲۴). آبنمود واحد نیز به روش تیسن تهیه شد.

بررسی شاخص خشکسالی

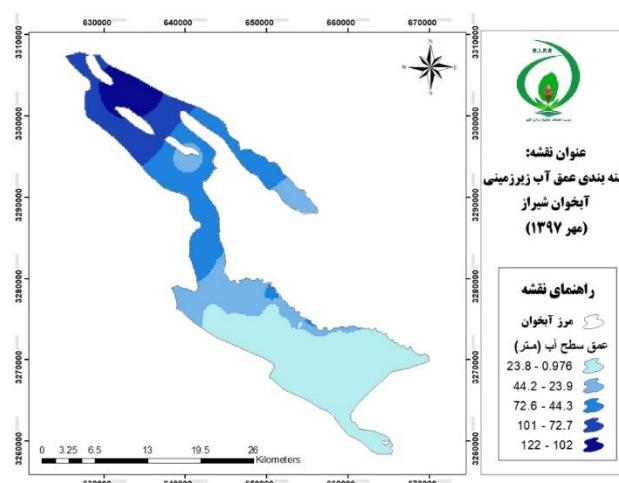
همان‌طور که اشاره شد، خشکسالی یکی از زیان‌بارترین مخاطرات طبیعی به شمار می‌رود. این پدیده در درازمدت موجب کاهش منابع آب، از طریق خشکیدگی جریان‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. از این‌رو در پژوهش حاضر از شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)، به عنوان الگوی معتبر و کاربردی برای بیان کمی وضعیت خشکسالی استفاده قرار گرفته است. مهم‌ترین قابلیت این شاخص همبستگی زیاد آن با متوسط رواناب در برخی از رودخانه‌های حوضه در پیش‌بینی خشکسالی‌های فصل تابستان است. اما شاخص GRI به مانند دیگر شاخص‌ها و روش‌ها دارای محدودیت نیز است. برای نمونه این شاخص برخی از عوامل دیگر را که می‌توانند منابع آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار دهند (به‌ویژه عوامل انسانی)، نادیده می‌گیرد (۲۳).

جدول ۱. طبقه‌بندی شدت خشکسالی با توجه به مقادیر شاخص GRI

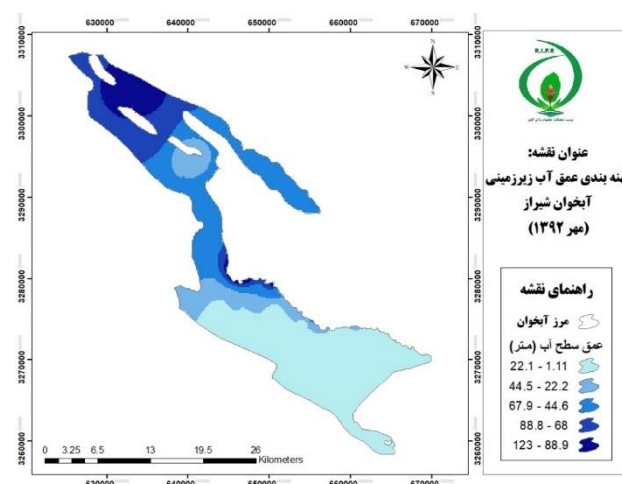
GRI	طبقات خشکسالی
≤ -2	ترسالی بسیار شدید
$-2 - 1/5$	ترسالی شدید
$-1/5 - 1$	ترسالی متوسط
$1 - 0/5$	ترسالی ملایم
$-0/5 - 0/5$	نرمال
$-0/5 - -1$	خشکسالی ملایم
$-1 - -1/5$	خشکسالی متوسط
$-1/5 - -2$	خشکسالی شدید
≥ -2	خشکسالی بسیار شدید



(ب)

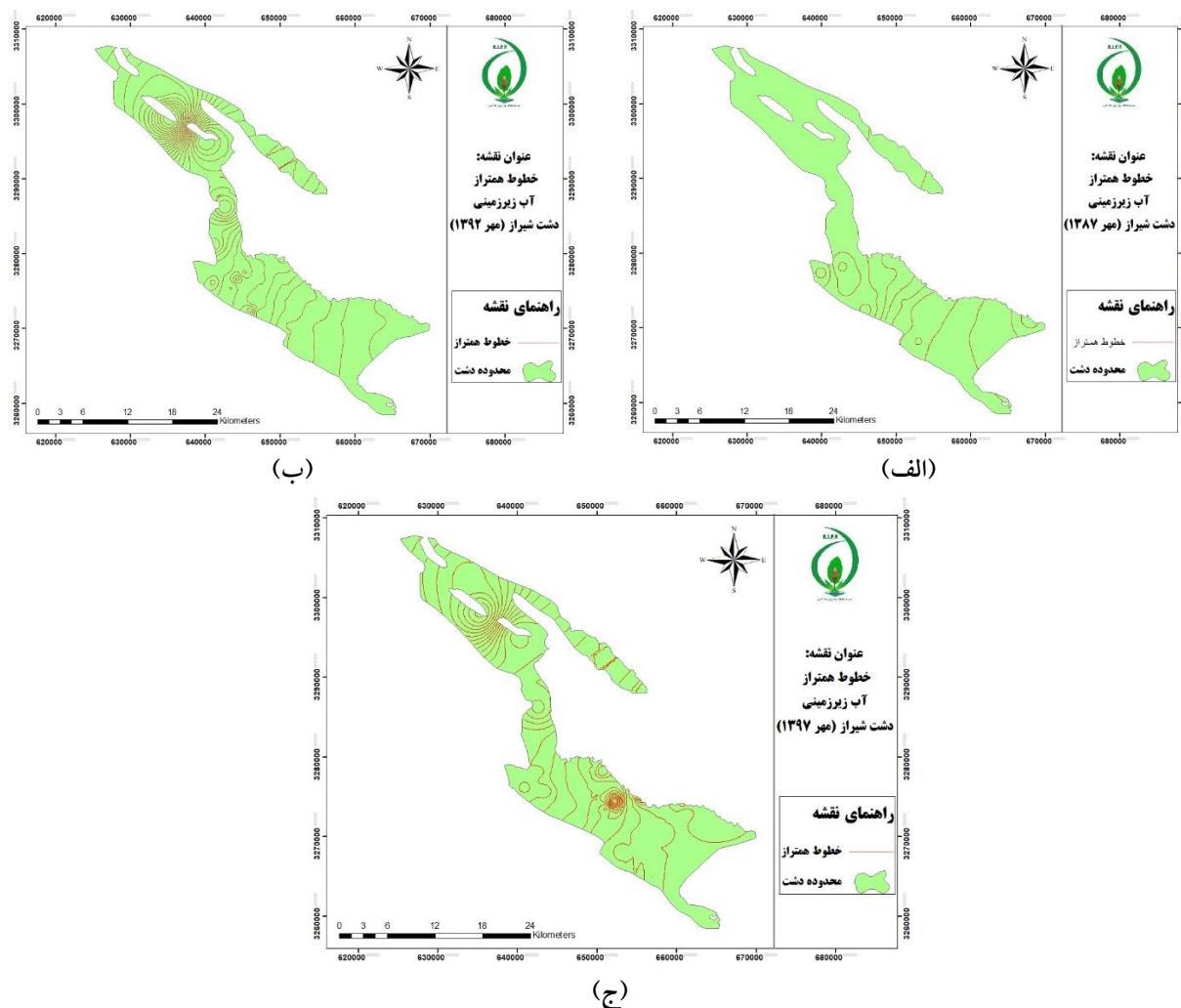


(الف)



(ج)

شکل ۲. پهنه بندی عمق آب زیرزمینی آبخوان شیراز در مهرماه سال ۱۳۸۷ (الف)، ۱۳۹۲ (ب) و ۱۳۹۷ (ج)



شکل ۳. نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی دشت شیراز در مهرماه سال ۱۳۸۷ (الف)، ۱۳۹۲ (ب) و ۱۳۹۷ (ج)

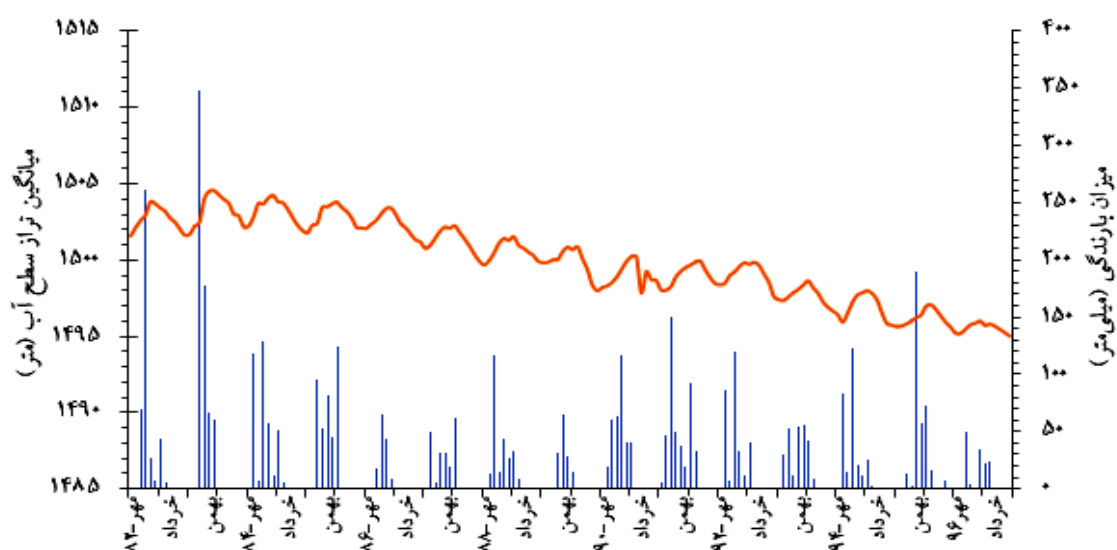
سال قبل خود (دو متر) بهبود داشته است؛ بنابراین با توجه به میزان بارندگی سال قبل می‌توان یک همبستگی بین میزان بارندگی و تراز آب زیرزمینی متصور شد. این نتیجه با نتایج به‌دست‌آمده توسط مردانه و همکاران (۱۰) همسو است. روند کلی تراز سطح آب زیرزمینی در دشت شیراز نشان‌دهنده روند افزایشی برداشت از منابع آب زیرزمینی در پی کاهش میزان بارندگی و افزایش سطح زیر کشت در منطقه است.

تغییرات حجم مخزن

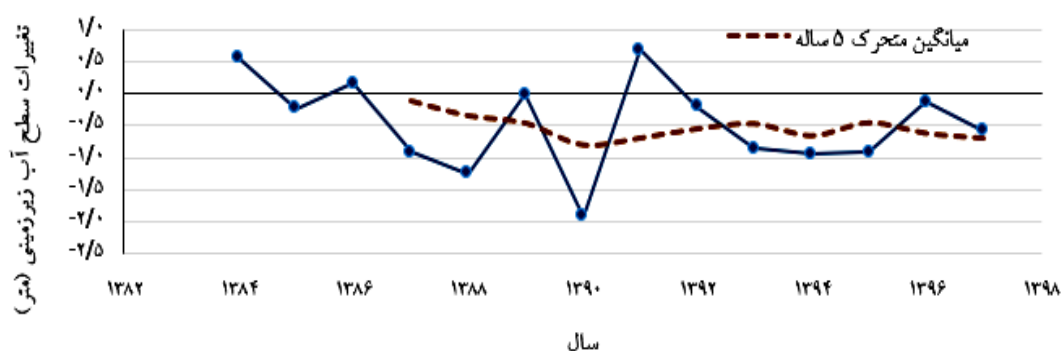
شکل ۶ روند تغییرات سالانه و تجمعی حجم مخزن آبرفتی را نشان می‌دهد. روند تغییرات در بازه زمانی ۱۵ ساله، کاهشی است؛

آب‌نمود معرف و تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی

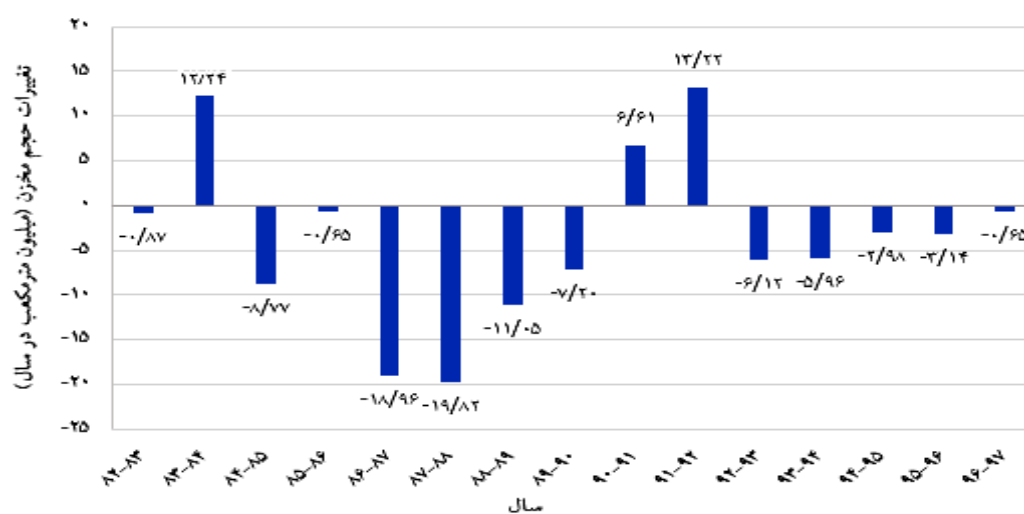
شکل ۴ آب‌نمود معرف و شکل ۵ تغییرات تراز سطح آبخوان برای یک دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۷) را نشان می‌دهند. بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در طول دوره آماری یادشده حاکی از آن است که تراز آب زیرزمینی به‌طور کلی روندی نزولی دارد و سطح آب زیرزمینی در طول این دوره با افتی برابر شش متر روبرو بوده است؛ بنابراین متوسط افت سالیانه تراز آب زیرزمینی برابر ۰/۵ متر محاسبه می‌شود. با توجه به ارقام آب‌نمود معرف در سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ به میزان ۴۴ سانتی‌متر کاهش داشته که نسبت به افت



شکل ۴. آبنمود معرف و میانگین بارش سالانه در محدوده مطالعاتی شیراز



شکل ۵. نمودار تغییرات سطح آب زیرزمینی در دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۳۹۷ در محدوده مطالعاتی شیراز



شکل ۶. نمودار تغییرات سالانه حجم مخزن آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی شیراز

تعداد روزهای یخبندان مثبت بوده و اختلاف کمینه و بیشینه دما افزایش یافته است. میزان افزایش میانگین دهساله بیشینه مطلق دما حدود ۰/۶ درجه سانتیگراد بوده و تعداد روزهای یخبندان افزایش چشمگیری داشته است. این نتیجه با نتایج احراری رودی (۳) و خسروی فرد و همکاران (۸) نیز همخوانی دارد. یادآوری می‌شود که شاخص GRI تنها به بررسی خشکسالی آب زیرزمینی می‌پردازد و برای تحلیل کلی و جامع خشکسالی نیازمند استفاده از دیگر شاخص‌های سنجش خشکسالی در کنار GRI است.

شکل ۸ تغییرات بارش و شاخص GRI را در دوره ۱۵ساله پژوهش حاضر نشان می‌دهد. مطابق این شکل، به‌طورکلی همبستگی قابل‌توجهی بین میزان بارندگی و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی (GRI) وجود ندارد. اما ملاحظه می‌شود که میزان بارش از سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۴ با افت مواجه شده است؛ اما این افت برای شاخص GRI از سال ۱۳۸۸-۱۳۸۷ نمایان شده و در واقع می‌توان گفت که اثر تغییرات میزان بارندگی بر شاخص GRI با یک تأخیر سه ساله رخ داده است. از طرف دیگر دیده می‌شود که در ادامه، شاخص GRI یک روند نزولی با شیب تقریباً زیاد به خود گرفته و با نوسانات میزان بارندگی نیز دچار تغییر قابل‌توجهی نشده است. دلیل این موضوع می‌تواند برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی دشت مورد مطالعه باشد که این نتیجه با نتایج به‌دست آمده توسط چمن‌پیرا (۴) مطابقت دارد.

به‌طورکلی مطالعه منابع آب زیرزمینی در دشت‌های حوضه‌های آبخیز، به‌دلیل عدم وجود و یا نقص در شبکه نمونه‌برداری در بیشتر دشت‌ها و عدم تداوم برداشت اطلاعات دچار چالش جدی است.

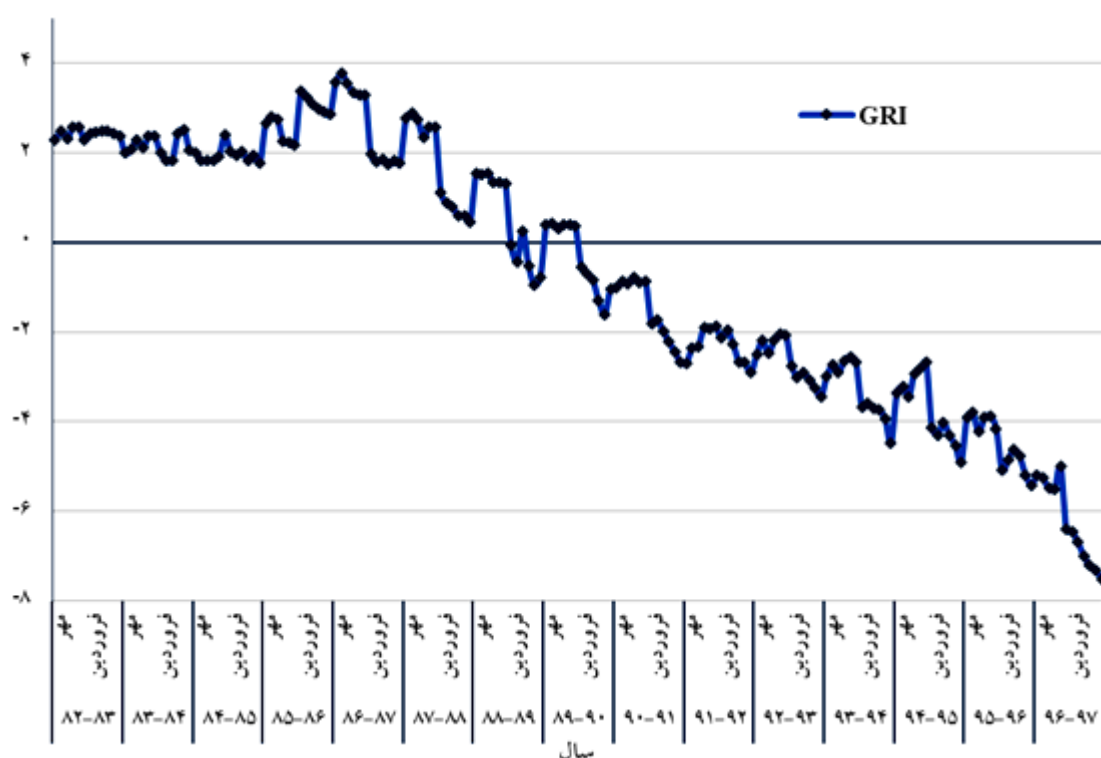
نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی و پهنه‌بندی نوسانات کمی آب زیرزمینی و نیز تحلیل زمانی خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص GRI در محدوده مطالعاتی شیراز در حوزه آبخیز مهارلو - بختگان انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد

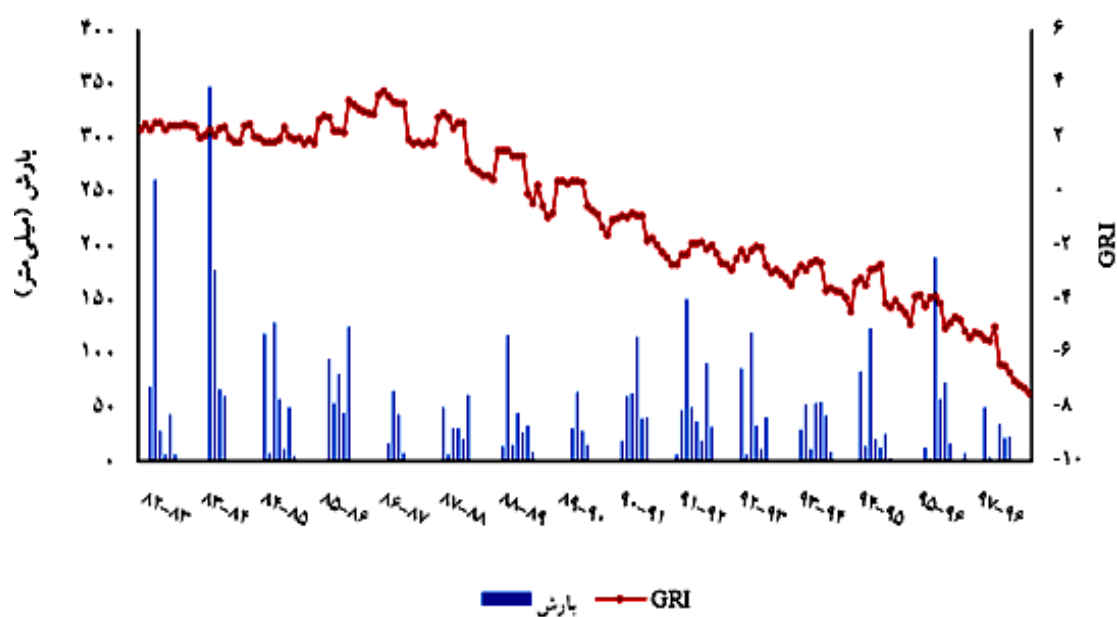
بنابراین می‌توان گفت که در سال‌های گذشته علاوه بر مصرف کل ذخیره تجدیدشونده، بخش زیادی از ذخیره ثابت نیز بهره‌برداری شده است. این نتیجه توسط نتایج به‌دست آمده توسط یوسفی مبرهن و زندی‌فر (۲۴) نیز تأیید می‌شود. در سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ بیشترین کسری حجم مخزن (۱۹/۸۲ میلیون مترمکعب) دیده شده و با توجه به ارقام نمودارها در سال آبی انتهای دوره (۱۳۹۷-۱۳۹۶)، حجم ذخیره در سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶، ۲/۴۹ میلیون متر مکعب افزایش داشته است. افزایش چشمگیر بارندگی در سال‌های آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ و ۱۳۹۴-۱۳۹۵ (شکل ۴) دلیل اصلی این رخداد است.

پایش زمانی خشکسالی منابع آب زیرزمینی دشت شیراز

تابه‌حال شاخص‌های متعددی برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی ارائه شده است که در این مطالعه به‌منظور برآورد و تعیین وضعیت خشکسالی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی شیراز از شاخص GRI استفاده شد. شکل ۷ نشان می‌دهد که شاخص GRI در طول دوره آماری مورد مطالعه دارای یک روند نزولی است که این روند از سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ شدت گرفته است. همچنین وضعیت خشکسالی تا سال ۱۳۸۹-۱۳۸۸ در حد نرمال بوده و پس از آن شدید شده تا انتهای دوره آماری مورد مطالعه به وضعیت خشکسالی بسیار شدید رسیده است. شدیدترین خشکسالی در سال ۱۳۹۷ ($GRI = -7/5$) دیده شد. با توجه به روند نزولی میزان بارش در بازه زمانی مورد مطالعه (شکل ۴)، می‌توان کاهش نزولات جوی و تغییر اقلیم را از دلایل رخداد خشکسالی منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه دانست. چنانچه سالاری و همکاران (۱۶) با بررسی روند کلی تغییرات اقلیمی شیراز طی بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۶۳ گزارش کردند که روند تغییرات بارش کل سالانه، بیشینه شدت بارش و کمینه دما منفی بوده و میزان میانگین بارش حدود ۵۰ میلی‌متر نسبت به دهه‌های گذشته کاهش یافته است. همچنین شدت بیشینه بارش روزانه ۲۰ درصد و میانگین کمینه مطلق دما حدود ۲ درجه کاهش یافته است. روند تغییرات بیشینه مطلق دما و



شکل ۷. تغییرات شاخص GRI در آبخوان شیراز برای دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۷)



شکل ۸. تغییرات بارش و شاخص GRI در دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۷)

کمترین مقدار نیز مربوط به نواحی جنوبی آبخوان با میزان ۱۴۲۳ متر در مهرماه ۱۳۹۷ است. تراز سطح آب زیرزمینی نیز

که بیشترین تراز سطح آب زیرزمینی مربوط ناحیه شمال غرب آبخوان و حدود ۱۸۱۰ متر در مهرماه سال ۱۳۸۷ است و

کشت در مناطق کم آب، رعایت الگوی مصرف خانواده‌ها، آموزش بهینه‌سازی مصرف آب در مدارس، توجه به رسانه و بهره‌گیری از این ظرفیت، نیاز جدی بخش آب کشور است. همچنین توجه ویژه به اجرای پروژه‌های بیولوژیک آبخیزداری در بالادست حوزه‌های آبخیز و نیز پخش سیلاب در دشت‌های کشور می‌تواند گام مهمی به منظور رفع یا کاهش افت سطح آب‌های زیرزمینی باشد. علاوه بر توصیه‌های ارائه شده، پیشنهاد می‌شود با توجه به گستردگی سازندهای سخت در منطقه مورد مطالعه، ارزیابی خواص هیدرودینامیکی این سازندها و محاسبه بیلان منابع آب در اولویت مطالعات وزارت نیرو قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی از ترکیبی از شاخص‌های خشکسالی مانند SPI و PDSI در کنار GRI استفاده شود تا تحلیل جامعی از وضعیت خشکسالی منطقه ارائه شود.

سپاسگزاری

اثر حاضر برگرفته از بخشی از نتایج پروژه پژوهشی با کد مصوب ۹۹۰۵۴۱-۹۹۰۲۵-۹۹۰۳۰-۰۹-۰۹-۰۱ در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (تات) است. نویسندگان این مقاله بر خود فرض می‌دانند که از مسئولین محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کهگیلویه و بویراحمد، سرکار خانم‌ها دکتر مریم نعیمی و سکینه لطفی نسب و جناب آقای دکتر عادل جلیلی قدردانی به عمل آورند.

در سه دوره زمانی مورد مطالعه دارای یک روند نوسانی است که در انتهای دوره زمانی مورد مطالعه با افت مواجه شده است که دلیل این افت، وقوع خشکسالی‌های پیاپی در انتهای دوره زمانی مورد مطالعه است. همچنین نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی در طول دوره ۱۵ ساله مورد مطالعه با افتی برابر شش متر و متوسط افت سالیانه ۰/۵ متر روبرو بوده است. بررسی تغییرات حجم مخزن نیز حاکی از این نکته بود که در سال‌های گذشته علاوه بر مصرف کل ذخیره تجدیدشونده، بخش زیادی از ذخیره ثابت نیز بهره‌برداری شده است و وقوع بارندگی‌ها فقط بخشی از آن را جبران کرده است. روند نزولی شاخص خشکسالی منابع آب زیرزمینی (GRI) و شدت گرفتن آن در سال‌های پایانی بازه زمانی مورد مطالعه، از مهم‌ترین نتایج این پژوهش است که در پی افزایش سطح زیرکشت، کاهش نزولات جوی و تغییر اقلیم رخ داده است. افزایش بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم موازنه میان کل برداشت و تغذیه منجر به افت سطح آب‌های زیرزمینی با نرخ سریع‌تر می‌شود. به منظور برقراری تعادل بین برداشت و تغذیه، راهکارهای عمده مشتمل بر تقویت مدیریت بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی، به‌کارگیری سیاست‌های مدیریت تقاضا، بهبود راندمان آبیاری که در حال حاضر از ۲۲/۵ تا ۸۵/۵ درصد متغیر و میانگین آن ۵۶ درصد است (۱) و افزایش عرضه آب است. با توجه به این که بخش عمده (۹۴/۵ درصد) آب استحصال شده از منابع زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (۲۵) در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، برای نجات دشت‌ها، مصرف آب کشاورزی را باید کنترل کرد. برای جبران کسری آب به‌ناچار از سهم دشت‌های ممنوعه کشور برداشت می‌شود. اما تغییر الگوی

References

1. Abbasi, F., F. Sohrab and N. Abbasi. 2017. Evaluation of Irrigation Efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 17(67): 113-120 (in Farsi).
2. Agarwal, V., Q. Akyilmaz, C.K. Shum, W. Feng, T.-Y. Yang, E. Forootan, T.H. Syed, U.K. Haritashya and M. Uz., 2022. Machine learning based downscaling of GRACE-estimated groundwater in Central Valley, California. *Science of the Total Environment* 865: 161138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161138>.
3. Ahrariroudi, M. 2018. Assessment the effects of drought on groundwater quantity and quality of Sistan and Baluchistan Province. *New Findings in Applied Geology* 12(23): 104-113 (in Farsi)

منابع مورد استفاده

4. Chamanpira, R. 2022. Evaluation of the Effect of Meteorological Drought on Groundwater of Koohdasht Aquifer in Lorestan Province. *Iran-Water Resources Research* 18(1): 166-179.
5. Emadi, A., R. Fazloulou, S. Zamanzad-Ghavidel, R. Sobhani and S. Nosrat-Akhtar. Temporal and Spatial Estimation of Quality Variables of Groundwater Resources Based on Intelligent Methods. *Journal of Water and Soil Science* 27(3) :77-93 (in Farsi).
6. Fars Regional Water Organization. 1996. Reports on Shiraz plain, studies, Shiraz (in Farsi).
7. Gehreles, J.C., F.C. Van Geer and J.J. De Vries., 1994. Decomposition of groundwater level fluctuations using transfer modeling in an area with shallow to deep unsaturated zones. *Journal of Hydrology* 157(1-4): 105-138.
8. Khosravi Fard, A., G. Vahabzadeh and L. Gholami. 2017. The Study and Classification of Water Quality of Ghorbaghestan and Doab Merk Stations in Gharasoo River Basin. *Journal of Research in Environmental Health* 2(4): 299-310 (in Farsi).
9. Ling, Z., L. Shu, D. Wang, X. Yin, C. Lu and B. Liu. 2024. Characteristics of groundwater drought and its propagation dynamics with meteorological drought in the Sanjiang Plain, China: Irrigated versus nonirrigated areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 54 (101911): 1-18.
10. Mardaneh, M., M. Aflatooni and F. Boostani. 2012. Evaluation of the Correlation Between Rainfall and Groundwater Level in Shiraz Plain. *Water Engineering* 5(13): 87-96.
11. Mendicino, G., A. Senatore and P. Versace. 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology* 357(3-4): 282-302.
12. Mohammady, M., A.H. Dustmohammadian, M. Amiri and M.K. Kianian. 2020. Investigating Quantitative Changes of Groundwater in the Semnan Plain. *Water Resources Engineering* 13(47): 61-70 (in Farsi).
13. Mohsenpour, R. 2017. Examining the consequences of drought at the farm level, a case study: Marvdasht region. Master of Thesis. Shiraz University, Shiraz, I.R. Iran.
14. Naderianfar, M., A. Faryabi, S. Kouhestani and M. Safavi Gardini. 2021. Investigating the Groundwater Fluctuations Level in Basin of Halil River, Jiroft. *Irrigation and Water Engineering* 11(4): 141-159 (in Farsi).
15. Paimozd, S., M.R. Rezaei, M.J. Rezaei and J. Rezaei. 2019. Modeling Groundwater Changes Using Four Different Techniques of Evolutionary Neural Network and Climatic Data (Case Study of Dasht-Abbas Plain, Ilam Province). *Desert Ecosystem Engineering* 8(22) :43-58 (in Farsi).
16. Salari, A., M. Tavakolsadrabadi, A.R. Zarei and M. Bahrami. 2016. Evaluation of Elimate Indices and the General Trend of Climate Changes (Case study: Shiraz synoptic station). *Irrigation and Water Engineering* 6(2): 138-150 (in Farsi).
17. Scanlon, B. R., L. Longuevergne and D. Long. 2012. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research* 48(4): W04520. doi:10.1029/2011WR011312.
18. Shahid, S. and M.K. Hazarika. 2010. Groundwater drought in the northwestern districts of Bangladesh. *Water Resources Management* 24(10): 1989-2006.
19. Solgi, A., F. Radmanesh and B. Falamarzi. 2015. Drought assessment and monitoring of Nahavand City based on drought indices. *Water Engineering* 8(26): 35-49.
20. Taucare, M., B. Viguier, R. Figueroa and L. Daniele. 2024. The alarming state of Central Chile's groundwater resources: a paradigmatic case of a lasting overexploitation. *Science of The Total Environment* 906: 167723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167723>.
21. Tehran, K. and H. Nabavi. 1985. Brochures for stratigraphic geology and Zagros geological reports, Iran Surviving Organization, Tehran (in Farsi).
22. Tremblay, L., M. Larocque, F. Anctil and C. Rivard. 2011. Teleconnections and interannual variability in Canadian groundwater levels. *Journal of Hydrology* 410 (3-4): 178-188.
23. Van Loon, A.F. and H.A.J. Van Lanen. 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research* 49(3): 1483-1502, doi:10.1002/wrcr.20147.
24. Yousefi Mobarhan, E. and S. Zandifar. 2023. Zoning of changes in the decreasing groundwater table and temporal monitoring of drought in the Ghorove-Dehgolan plain. *Journal of Rainwater Catchment Systems* 11(1) :17-35 (in Farsi)
25. Zandifar, S. 2023. Quantitative studies of groundwater in Iran. Final Report, Research Institute of Forests and Rangelands, Iran (in Farsi).