



Analysis of groundwater drought in the Daranjir Watershed

Seyed Masoud Soleimanpour^{1*}, Samira Zandifar², Omid Rahmati³ and Mahboobeh Moatamednia⁴

¹Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

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

³Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran

⁴Ph.D., Natural Resources and Watershed Management Department, Bafgh County, Yazd Province, Iran

Received: 12 January 2024

Accepted: 07 April 2024

Extended abstract

Introduction

Currently, drought poses a significant threat to food security due to reduced rainfall and increased agricultural demand. Its impact is particularly severe in arid and semi-arid regions, where populations are more vulnerable. Drought affects groundwater systems by initially lowering water supply, followed by a decline in groundwater levels and discharge. Compared to other types of drought, characteristics such as duration, intensity, and frequency alter groundwater systems.

Materials and methods

Given the critical need for drought assessment and monitoring, this study investigated drought conditions in 12 areas within the Daranjir Watershed from 2002–2003 to 2017–2018. The watershed spans approximately 50,736.44 km² across Yazd and Kerman provinces, with elevations ranging up to 1,857.90 meters. Highlands cover 58.99% of the area, while plains cover 40.99%. Data on groundwater levels from observation wells were obtained from Iranian Water Resources Research Organization (Tamab) and regional water organizations in Yazd and Kerman provinces. Average monthly groundwater level values were then extracted from maps using inverse distance weighting interpolation in MATLAB. Groundwater drought conditions were subsequently calculated based on the Groundwater Resources Index (GRI) in MATLAB.

Results and discussion

The GRI index calculations revealed severe droughts in Daranjir, Bardsir, and Qaryeh al-Arab deserts, with deficits of 81.38, 77.75, and 75.66, respectively. Qaryeh al-Arab experienced the longest drought, spanning 121 months, indicating the area's high intensity and prolonged drought conditions compared to other study areas. Mild droughts were the most frequent after normal drought across all study areas based on GRI index class frequencies.

Conclusions

Due to insufficient and highly variable atmospheric precipitation, drought is inevitable, especially in arid and semi-arid climates. Understanding drought severity and its impact on ecosystems is crucial for effective watershed resource management and optimal resource utilization. Continuous monitoring of groundwater levels due to drought and preparation of a comprehensive atlas for other watersheds in the country are recommended. Additionally, comparing drought conditions using appropriate models is essential. Short and long-term strategies are advised to mitigate this natural phenomenon, such as expanding greenhouse crop cultivation, utilizing drought-resistant crop varieties with high water efficiency, adopting pressurized irrigation systems, and implementing infrastructure projects to enhance groundwater and surface water storage, such as cement dams, reservoirs, and floodwater spreading systems in the study area.

* Corresponding author: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

Keywords: Climate change, GRI index, Spatial distribution, Water extraction, Water resource management

Cite this article: Soleimanpour , S.M., Zandifar, S., Rahmati, O., Moatamednia, M., 2024. Analysis of groundwater drought in the Daranjir Watershed. *Watershed Engineering and Management* 16(2), 302-315.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



تحلیل وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی حوزه آبخیز درانجیر

سید مسعود سلیمان پور^{۱*}، سمیرا زندی فر^۲، امید رحمتی^۳ و محبوبه معتمدنیا^۴

^۱ دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

^۲ استادیار بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۳ استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

^۴ دکتری تخصصی، اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان بافق، استان یزد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۲

چکیده مبسوط

مقدمه

امروزه خشکسالی با توجه به کاهش میزان نزولات جوی و افزایش نیاز به محصولات کشاورزی به یک تهدید طبیعی برای امنیت غذایی تبدیل شده است. خشکسالی می‌تواند بخش قابل توجهی از کل جمعیت را تحت تأثیر قرار دهد، به ویژه ساکنان مناطق خشک و نیمه خشک بیشتر در معرض تهدید قرار دارند. هنگامی که سامانه‌های آب زیرزمینی تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرند، ابتدا تغذیه آب زیرزمینی و بعداً تراز آب زیرزمینی و میزان تخلیه آن کاهش می‌یابد. ویژگی‌های خشکسالی از جمله مدت، شدت و فراوانی در سفره آب زیرزمینی نسبت به سایر انواع خشکسالی‌ها تغییر می‌کند.

مواد و روش‌ها

با توجه به اهمیت ارزیابی و پایش خشکسالی، وضعیت خشکسالی ۱۲ محدوده مطالعاتی حوزه آبخیز درانجیر در سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ بررسی شد. این حوزه آبخیز در استان‌های یزد و کرمان با مساحت و ارتفاع متوسط به ترتیب ۱۸۵۷/۹۰ و ۵۰۷۳۶/۴۴ کیلومتر مربع و متر واقع شده است. مساحت ارتفاعات و دشت در این حوزه آبخیز به ترتیب ۵۸/۹۹ و ۴۰/۹۹ درصد است. آمار تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای در سطح حوضه با مراجعه به سازمان‌های ذی‌ربط اعم از سازمان تحقیقات منابع آب ایران (تماب)، سازمان آب منطقه‌ای استان‌های یزد و کرمان تهیه شد. سپس، با استفاده از روش میان‌یابی وزن فاصله معکوس مقادیر متوسط ماهانه تراز آب زیرزمینی از نقشه‌های مورد نظر استخراج شد. بر اساس رابطه شاخص GRI، در محیط برنامه MATLAB، مقادیر خشکسالی آب زیرزمینی محاسبه شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج محاسبه شاخص GRI مشخص شد که شدیدترین خشکسالی‌ها در محدوده‌های کویر درانجیر، بردسیر و قریه العرب وقوع یافته است که به ترتیب کمبودی برابر با ۸۱/۳۸، ۷۷/۷۵ و ۷۵/۶۶ دارند. همچنین، طولانی‌ترین خشکسالی‌ها در محدوده قریه‌العرب وقوع یافته است که تداومی برابر با ۱۲۱ ماه دارد. لذا، محدوده قریه‌العرب، با دارا بودن شدت و تداوم بالای خشکسالی، از شرایط بحرانی‌تر خشکسالی طی دوره آماری مذکور نسبت به دیگر محدوده‌های مطالعاتی برخوردار بوده است. مطابق نتایج فراوانی طبقات شاخص GRI، برای محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبخیز درانجیر مشخص شد که بعد از خشکسالی نرمال در تمام محدوده‌ها، خشکسالی ملایم، از بالاترین فراوانی برخوردار بوده است.

نتیجه‌گیری

کمبود و نوسانات شدید نزولات جوی، رخداد پدیده خشکسالی به‌ویژه در مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. از این‌رو، داشتن درک روشنی از اثر و شدت پدیده خشکسالی بر بوم‌سازگان، می‌تواند کمک شایانی به مدیران در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری بهتر مدیریت منابع حوضه و استفاده بهینه از شرایط برحسب پتانسیل موجود داشته باشد. پایش تغییرات وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی به‌دلیل خشکسالی و بهره‌برداری بیش از حد سایر حوزه‌های آبخیز کشور و تهیه اطلس نهایی آن توصیه می‌شود. همچنین، لازم و ضروری است که با استفاده از مدل‌های متناسب در این زمینه وضعیت خشکسالی با نتایج و یافته‌های حاصله مقایسه شود. در نهایت، برای مقابله با این پدیده طبیعی توصیه می‌شود برنامه‌های کوتاه و بلندمدت در قالب راهکارهای توسعه سطح زیر کشت محصولات گلخانه‌ای، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و با راندمان مصرف آب بالا، توسعه سامانه‌های تحت فشار در آبیاری به‌جای سامانه‌های سنتی در باغ‌ها و مزارع و اجرای پروژه‌های مؤثر در افزایش ذخیره منابع آب آبیاری زیرزمینی و سطحی نظیر بندهای سنگ سیمانی، خاکی، پخش سیلاب در منطقه مورد مطالعه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برداشت آب، تغییرات اقلیمی، توزیع مکانی، شاخص GRI، مدیریت منابع آب

مقدمه

بوم‌سازگان وابسته را تأمین کند اما با شدت خشکسالی، تغذیه مجدد سفره‌های آب زیرزمینی به زمان بیشتری نیاز دارد (Şen et al., 2019). مشخص کردن خشکسالی آب‌های زیرزمینی بر پایش مؤثر آب‌های زیرزمینی متکی است و روش پایش سنتی بیش‌تر بر اساس چاه‌های آب زیرزمینی است. با این وجود، اندازه‌گیری آب‌های زیرزمینی به‌دلیل هزینه‌های مرتبط با حفاری و نگهداری چاه‌ها نسبتاً دشوار است (Zhu & Zhang, 2022). در این خصوص باید توجه داشت که سامانه‌های آب زیرزمینی تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله ویژگی‌های هیدرولوژیکی منطقه تغذیه، ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان و متغیرهای اقلیمی قرار دارند (Leelaruban et al., 2019).

طیف وسیعی از شاخص‌ها برای شناسایی و توصیف رویدادهای خشکسالی توسعه‌یافته است که ابعاد خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی را مشخص می‌کند (Bloomfield and Marchant, 2013; Halwatura et al., 2017; Parente et al., 2019; Jiao et al., 2021; Mondal et al., 2023; 14. Kalehouei et al., 2018). شاخص‌های به‌کاررفته دیدگاه پیچیده‌ای را در مورد اجزای مختلف خشکسالی ارائه می‌دهند و کاربرد آن‌ها برای ارزیابی خشکسالی آب‌های زیرزمینی با چالش‌های ناشی از چندین عامل مرتبط با حوزه آبخیز و آبخوان همراه است. این در حالی است که

آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان بزرگ‌ترین ذخیره آب شیرین جهان شناخته‌شده و حدود ۳۰ درصد از کل منابع آب شیرین جهان را تشکیل می‌دهد (Han et al., 2020). با این‌حال، آب زیرزمینی یک منبع بی‌پایان و نامحدود نیست و به تجدید دوباره تغذیه آب زیرزمینی بستگی دارد، یعنی فرایندهایی که منجر به تغذیه مجدد منابع آب زیرزمینی می‌شود؛ بنابراین، تغذیه آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین فرایندهای مرتبط با پایداری منابع آب و انعطاف‌پذیری تأمین آب در برابر تغییر شرایط اقلیمی و تغییر تقاضای آب است (Barthel et al., 2021).

آب زیرزمینی ذخیره‌شده در آبخوان‌ها، به‌دلیل کاهش بارندگی و برداشت آب از این سفره‌ها کاهش می‌یابد (Peters et al., 2005). این کاهش تراز آب زیرزمینی خشکسالی آب زیرزمینی نامیده می‌شود و سیستم آب زیرزمینی را برای چندین ماه تا سال تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mishra & Singh, 2011). علاوه بر این، در زمان خشکسالی تقاضا برای آب‌های زیرزمینی به‌دلیل کمبود آب‌های سطحی به‌شدت افزایش می‌یابد و نگرانی‌های جدی در مورد مسائل آب برای انسان‌ها ایجاد می‌کند (Yun et al., 2023). تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، خشکسالی آب‌های زیرزمینی احتمالاً در دهه‌های اخیر بیشتر و تشدید خواهد شد (Song et al., 2024). منابع آب‌های زیرزمینی در مراحل اولیه رویداد خشکسالی می‌تواند جریان‌های سطحی و

شرقی و حدود ۱۵۳۱ بوده است. نتایج همبستگی پایین دو شاخص خشکسالی اقلیمی و آب‌های سطحی با آب‌های زیرزمینی نشان داد، عامل افت تراز آب در آبخوان‌های دشت بر اثر عدم مدیریت و برداشت‌های بی‌رویه است. سوابق پژوهش نشان می‌دهد که شاخص آب زیرزمینی (GRI) به‌عنوان الگوی معتبر و کاربردی، مورد استفاده قرار گرفته است. این شاخص به‌صورت نقطه‌ای محاسبه می‌شود و لازم است تا به‌صورت مکانی پردازش شده و نقشه‌های مربوط ارائه شوند (Mohebbi Tafreshi et al., 2017).

حوزه آبخیز درانجیر، از نظر اقلیمی همانند بقیه حوزه های آبخیز بخش‌های مرکزی کشور یک منطقه خشک محسوب می‌شود. کشاورزی و توسعه اقتصادی و اجتماعی این مناطق بر مبنای یک اقلیم خشک شکل گرفته است. بر همین اساس، با این‌که میزان آب موجود در منطقه نسبت به مساحت آن بسیار ناچیز است ولی خسارات ناشی از پدیده خشکسالی در این حوضه نسبت به حوضه‌های مناطق پرآب‌تر کشور بسیار کمتر گزارش شده است. دلیل این امر نیز سازگاری توسعه منطقه با این اقلیم است. ولی با افزایش جمعیت و بهره‌برداری بیش‌تر از آب رودخانه‌ها یک‌روند کاهشی را در آب‌دهی رودخانه‌ها در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند بیان‌گر آغاز خشکسالی‌های هیدرولوژیکی شدیدتر برای منطقه باشد، لذا، با توجه به این‌که در حوضه‌های مرکزی کشور هیچ‌گونه منابع آبی که امکان انتقال آن وجود داشته باشد، یافت نمی‌شود، بایستی در توسعه اقتصادی، اجتماعی و صنعتی این‌گونه مناطق کمبود آب به‌عنوان اصلی‌ترین چالش مدنظر قرار گیرد. از این‌رو، هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر بررسی وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی در حوزه آبخیز درانجیر با استفاده از شاخص GRI و ارائه اطلاعات کامل و جامعی از این حوضه برای مدیریت پایدار است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز کویر درانجیر با مساحت ۵۰۵۰۸ کیلومتر مربع از ۱۲ محدوده مطالعاتی و هفت زیر حوضه درجه چهار و در محدوده دو استان یزد و کرمان واقع شده است. ارتفاع منطقه از حدود ۹۲۵ متر در کویر درانجیر تا ۴۴۶۵ متر در کوه هزار متغیر است.

شاخص آب زیرزمینی^۱ GRI می‌تواند در میان شاخص‌های موجود به‌درستی اطلاعاتی از وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی را ارائه کند (Marchant and Bloomfield, 2018, Guo et al., 2021; Adib et al., 2023; Chamanpira et al., 2018; 23. Mirakbari et al., 2018; Behzadi et al., 2022). این شاخص نخستین بار توسط Mendicino et al., 2008 مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت.

(Lezzaik et al., 2018). به توسعه و کاربرد شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی برای منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا پرداختند. نتایج سالانه GRI نشان می‌دهد که خطر افت تراز آب زیرزمینی به شدت به حکمرانی و امنیت غذایی وابسته است و ذخایر آب زیرزمینی منطقه در معرض خطر خشکسالی آب زیرزمینی قرار گرفته است. (Sarkar and Chinnasamy, 2023). در ارزیابی تأثیر بارش بر سامانه آبخوان با استفاده از شاخص SPI و GRI در منطقه پورولیا، بنگال غربی، هند نشان دادند که حدود ۷۱ درصد آبخوان در وضعیت خشکسالی خیلی شدید به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی قرار گرفته است. (Roshun and Habibnejad Roshan, 2018). در پایش تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمین دشت ساری-نکا نشان دادند که مطابق شاخص GRI شدیدترین خشکسالی در مقیاس سه ماه در سال ۱۳۹۴ در بخش‌های شمالی منطقه رخ داده است.

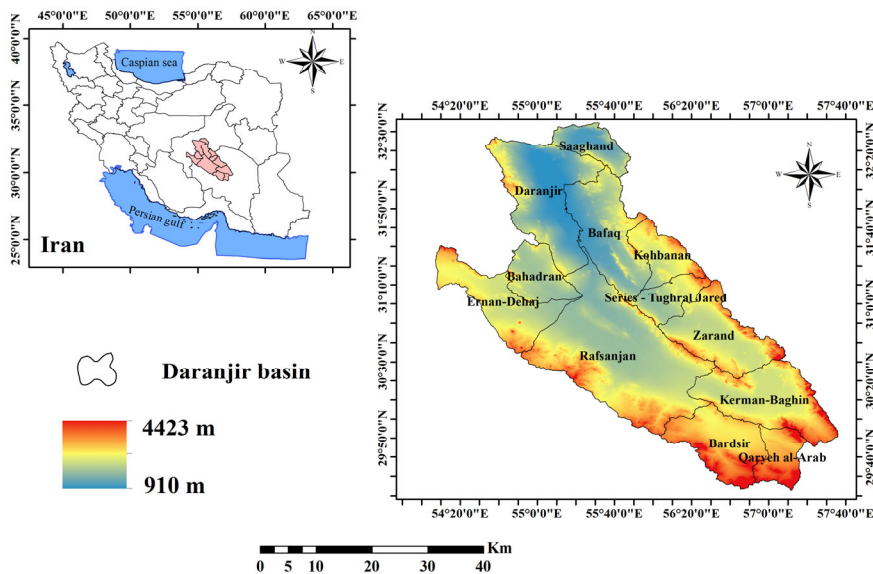
همچنین بیان داشتند که برداشت منابع آب زیرزمینی برای کشاورزی، بیشترین نقش را در خشکسالی منطقه داشته است. (Khosravi Dehkordi et al., 2019a). در بررسی وضعیت خشکسالی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص GRI و مدل زنجیره مارکوف در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه نشان دادند که زنجیره مارکوف دقت مناسبی برای پیش‌بینی شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، دو و سه ماه آینده داشته است و می‌تواند برای خشکسالی آب زیرزمینی دشت شهرکرد مورد استفاده قرار بگیرد. (Zandifar et al., 2022). در ارزیابی خشکسالی و دخالت‌های انسانی در کاهش ذخایر آب زیرزمینی منطقه ماهیدشت استان کرمانشاه با بهره‌گیری از چند شاخص PDSI، GRI و SDI نشان دادند که بیشترین تراز آب زیرزمینی با ارتفاع ۱۵۳۱ متر مربوط به نواحی جنوب

¹ Groundwater Resource Index

میزان بارندگی بر اساس نقشه همباران از حدود ۵۰ میلی‌متر در دشت‌ها و قسمت‌های مرکزی ساغند تا ۲۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات جنوبی و جنوب غرب تغییر می‌یابد. متوسط بارش در حدود ۱۲۵ میلی‌متر است. کمبود بارش و برف باعث شده که در منطقه رودهای پرآبی وجود نداشته باشد و تنها رودخانه‌های فصلی و مسیل‌های خشک در این منطقه وجود داشته باشند. نمودار جریانی پژوهش حاضر در شکل ۲، ارائه شده است.

حوضه مذکور جزئی از فلات مرکزی ایران بوده که از شمال و شرق به زیرحوضه کویر لوت، از غرب با حوضه آبخیز کویر سیرجان و ریگ زرین، از جنوب به حوضه آبخیز هامون-جازموریان محصور شده است (شکل ۱).

نام و وسعت محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبخیز کویر درانجیر در جدول ۱، ارائه شده است. حدود ۲۲۹۷۶ کیلومترمربع آن را مناطق کوهستانی و ۲۷۵۳۲ کیلومترمربع آن را کوه‌پایه‌ها، دشت‌ها و کویرها تشکیل داده است. حوضه از نظر اقلیمی همانند بقیه حوضه‌های آبخیز بخش‌های مرکزی کشور یک منطقه خشک محسوب می‌شود.

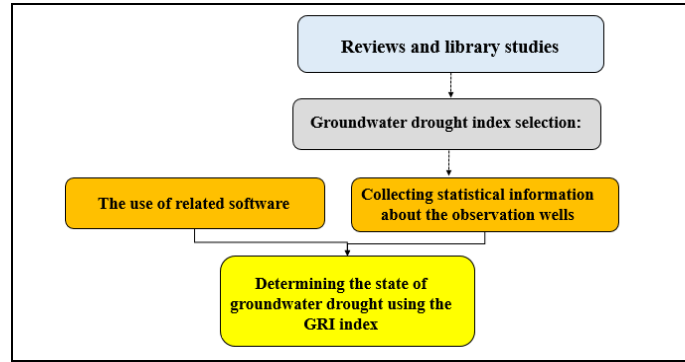


شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز درانجیر در کشور
 Fig. 1. Location of Daranjir watershed in the Iran

جدول ۱- نام و مساحت هر یک از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبخیز درانجیر

Table 1. The name and area of each of the study areas of Daranjir watershed

No	Name	Code	Area (K ²)	Height area (%)	Plain area (%)	Average height (m)
1	Daranjir	4901	6233.07	50.83	49.16	1316.56
2	Rafsanjan	4902	12513.69	53.88	46.11	1789.80
3	Bahadran	4903	2284.75	44.81	55.18	1602.80
4	Ernan-Dehaj	4904	3984.93	72.65	27.34	1909.99
5	Bardsir	4905	3945.48	66.51	33.48	2452.72
6	Kerman-Baghin	4906	5403.68	53.83	46.16	2072.07
7	Qaryeh al-Arab	4907	1763.95	67.59	32.40	2650.96
8	Bafaq	4908	4793.65	61.26	38.73	1437.94
9	Kohbanan	4909	2036.51	50.24	49.75	2004.55
10	Series - Tughral Jared	4910	1715.78	64.79	35.20	1751.92
11	Zarand	4911	4398.17	56.30	43.69	1973.27
12	Saaghand	4912	1662.76	65.27	34.72	1332.78
	Total		50736.44	58.99	40.99	1857.90



شکل ۲- نمودار جریان‌ی پژوهش حاضر

Fig. 2. The flow diagram of the current research

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی توسط مهندسینو و همکاران (۲۰۰۸)

Table 2. Classification of groundwater drought index by Mendicino et al. (2008)

Drought class	GRI index values
No drought	<0
Mild drought	(-0.99)- 0
Moderate drought	(-1.49)-(-1)
Severe drought	(-1.99)-(-1.5)
Very severe drought	>-2

نتایج و بحث

نتایج حاصل از محاسبه شاخص GRI در جدول ۳، برای محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبخیز درانجیر ارائه شده است. بر اساس این نتایج، شدیدترین خشکسالی‌ها در محدوده‌های کویر درانجیر، بردسیر و قریه‌العرب وقوع یافته است که به ترتیب کمبودی برابر با ۸۱/۳۸، ۷۷/۷۵ و ۷۵/۶۶ دارند. همچنین طولانی‌ترین خشکسالی‌ها در محدوده قریه‌العرب وقوع یافته است که تداومی برابر با ۱۲۱ ماه دارد؛ لذا، محدوده‌ی قریه‌العرب، با دارا بودن شدت و تداوم بالای خشکسالی، از شرایط بحرانی‌تر خشکسالی طی دوره آماری مذکور نسبت به دیگر محدوده‌های مطالعاتی برخوردار بوده است.

بررسی خشکسالی‌ها از لحاظ زمانی نشان داد، در اکثر محدوده‌های مطالعاتی از سال ۹۱-۱۳۹۰، خشکسالی‌ها از شدت بالاتری برخوردار هستند. شکل ۳، مقادیر شاخص GRI را در محدوده‌های مطالعاتی نشان می‌دهند. همان طور که از این نمودارها قابل تشخیص است، در اکثر موارد، خشکسالی‌های ممتد از سال آبی ۹۸-۱۳۸۸ در

جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز: به منظور بررسی و تحلیل

خشکسالی آب زیرزمینی، به عنوان معیار خشکسالی هیدرولوژیکی، آمار تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای در سطح حوضه در سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا ۹۸-۱۳۹۷ با مراجعه به سازمان‌های ذی‌ربط اعم از سازمان تحقیقات منابع آب ایران (تماب)، سازمان آب منطقه‌ای استان‌های یزد و کرمان تهیه شد. نرمال بودن داده‌ها نیز با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف بررسی شد.

بررسی شاخص خشکسالی: در پژوهش حاضر، از شاخص GRI به عنوان شاخصی مناسب و قابل اعتماد برای مدل‌سازی و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی توسط Mendicino et al., (2008) ارائه شده است. برای انجام پژوهش، نخست تراز متوسط آب زیرزمینی در محدوده‌های مطالعاتی با استفاده از روش درون‌یابی معکوس فاصله تبیین شد و مقادیر متوسط ماهانه تراز آب زیرزمینی از نقشه‌های حاصل استخراج شد. سپس، این مقادیر در رابطه شاخص GRI جایگزین و در محیط برنامه MATLAB با استفاده از کدنویسی مقادیر خشکسالی آب زیرزمینی برای دوره‌های زمانی مختلف محاسبه شد. شاخص GRI به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

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

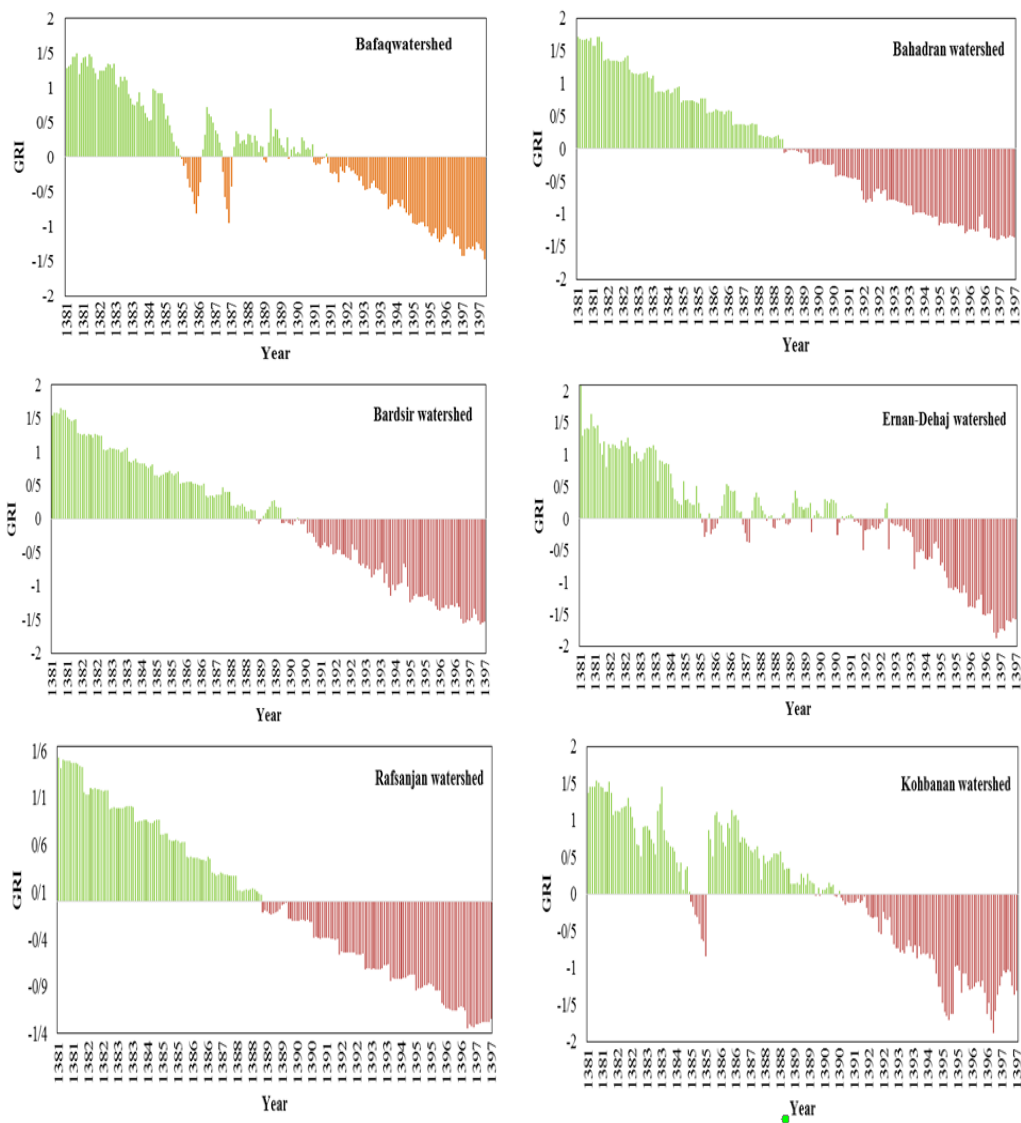
در این رابطه، $GRI_{y,m}$ مقدار شاخص در ماه m از سال y ، $D_{y,m}$ ارتفاع سطح ایستابی در ماه m از سال y ، $\mu_{D,m}$ میانگین داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال و $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال هستند. طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی با توجه به مقادیر GRI در جدول ۱، ارائه شده است (Khosravi Dehkordi et al., 2019b).

حوزه آبخیز درانجیر شروع شده است؛ به طوری که تا انتهای دوره مطالعاتی، خشکسالی تداوم داشته است.

جدول ۳- مشخصات دوره‌های خشکسالی آب زیرزمینی در محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبخیز درانجیر

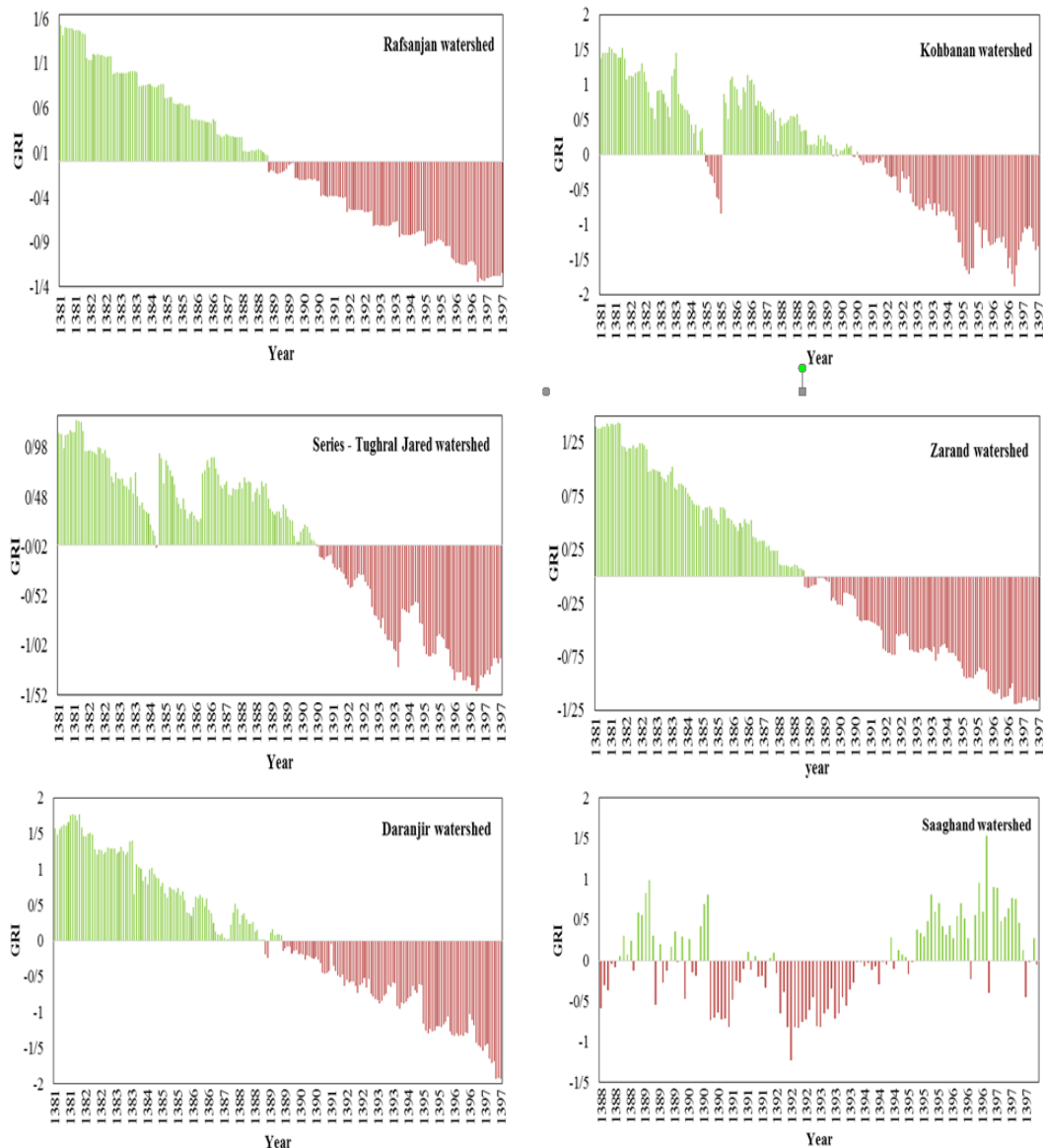
Table 3. Characteristics of groundwater drought periods in the study areas of Daranjir watershed

Case study	Code	Maximum duration (months)	Maximum shortage of water resources	Statistical period
Rafsanjan	4902	108	-72.16	1389-1397
Bahadran	4903	108	-82.61	1389-1397
Ernan-Dehaj	4904	60	-56.79	1393-1397
Bardsir	4905	95	-77.75	1390-1397
Kerman-Baghin	4906	108	-55.66	1389-1397
Qaryeh al-Arab	4907	121	-75.66	1388-1397
Bafaq	4908	84	-59.24	1391-1397
Kohbanan	4909	84	-71.91	1391-1397
Series - Tughral Jared	4910	85	-69.15	1391-1397
Zarand	4911	108	-69.82	1389-1397
Daranjir	4901	100	-81.38	1389-1397
Saaghand	4903	49	-20.1	1390-1394



شکل ۳- مقادیر شاخص GRI در محدوده‌های مختلف حوزه آبخیز درانجیر طی دوره آماری ۹۷-۱۳۸۱

Fig. 3. GRI index values in different areas of the Daranjir watershed during 2002–2018

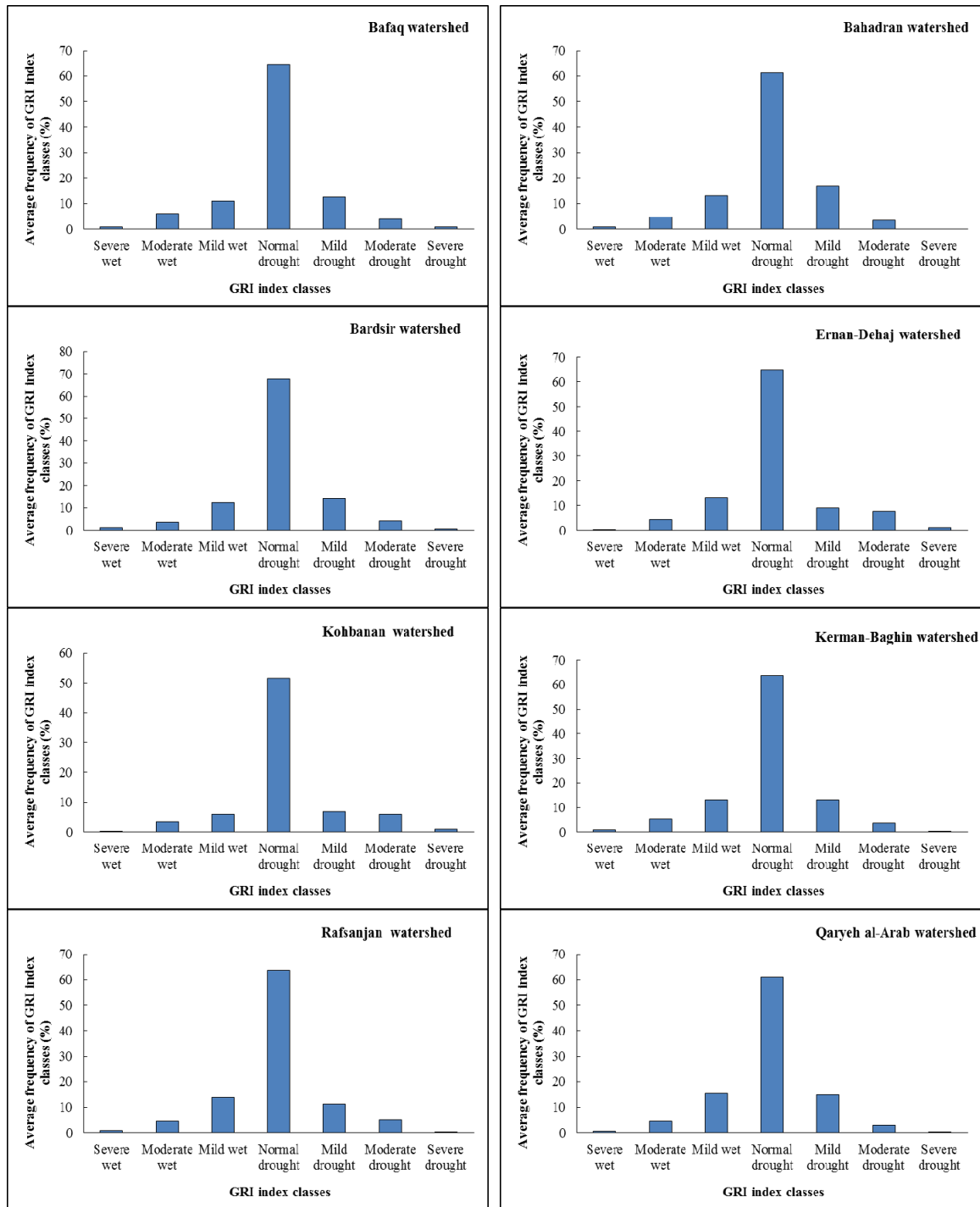


ادامه شکل ۳

Fig. 3. Continued

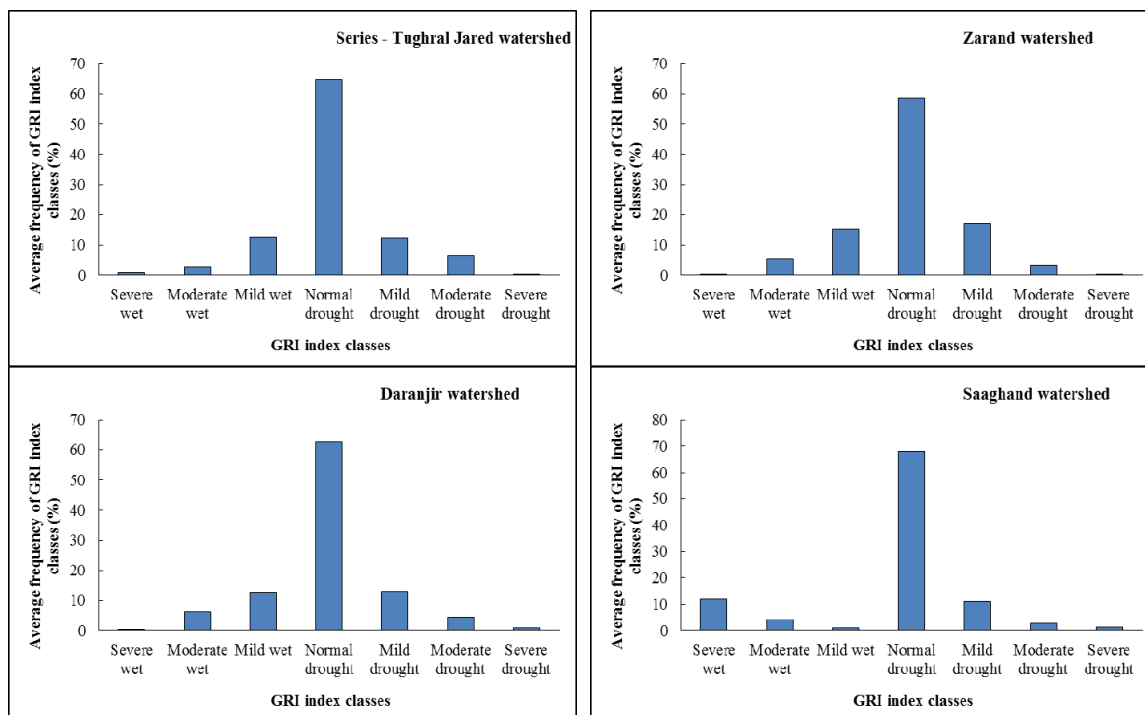
مطالعاتی حوزه آبخیز تقسیم بندی شد. بر اساس نتایج حاصل، بعد از خشکسالی نرمال در تمام محدوده‌ها، خشکسالی ملایم، از بالاترین فراوانی برخوردار است. شکل ۴، فراوانی طبقات مختلف شاخص GRI را در محدوده‌های مطالعاتی نشان می‌دهد.

با هدف ارزیابی تعداد وقایع خشکسالی و ترسالی در دوره آماری مورد مطالعه، فراوانی طبقات شاخص GRI، به صورت خشکسالی شدید، خشکسالی متوسط، خشکسالی ملایم، خشکسالی نرمال، ترسالی ملایم، ترسالی متوسط و ترسالی شدید برای محدوده‌های



شکل ۴- متوسط فراوانی طبقات شاخص GRI طی دوره آماری ۹۷-۱۳۸۱ در حوزه آبخیز درانجیر

Fig. 4. The average frequency of GRI index classes in the Daranjir watershed during the statistical period 2002–2018



ادامه شکل ۴

Fig. 4. Continued

دیگر محدوده‌ها برخوردار است. وجود خشکسالی در منطقه با شدت و فراوانی بالا می‌تواند نقش قابل توجهی بر تولید کشاورزی، حفاظت از محیط‌زیست و توسعه پایدار اجتماعی-اقتصادی بوم‌سازگان داشته باشد. علاوه بر آن، درک تعامل و تمایز بین خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و آب‌های زیرزمینی در حوضه‌های با شرایط اقلیمی متفاوت برای هشدار و پیشگیری مؤثر خشکسالی مهم است. بررسی خشکسالی‌ها از لحاظ زمانی نشان داد، در اکثر محدوده‌های مطالعاتی از سال ۹۱-۱۳۹۰، خشکسالی‌ها از شدت بالاتری برخوردار هستند. همچنین، خشکسالی‌های پیوسته و ممتد از سال آبی ۹۸-۱۳۸۸، شروع شده و تا انتهای دوره مطالعاتی (سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷) تداوم داشته است.

نتایج منتج از پژوهش حاضر با یافته‌های سایر پژوهشگران، به‌عنوان مثال Javadinejad et al., (2020)، Rahimabadi et al., (2022)، Gullacher et al., (2023) و Kamali and Asghari (2023) همخوانی و تطابق دارد. همچنین، Ebrahimi-Khusfi et al., (2022)، گزارش دادند که تغییرات خشکسالی در

نتیجه‌گیری

کشور ایران و به‌ویژه استان‌های یزد و کرمان به سبب موقعیت جغرافیایی و قرار گرفتن روی کمربند خشک کره زمین و پراکنش نامناسب بارش همواره با کمبود بارش مواجه بوده است. کمبود و نوسانات شدید نزولات جوی، رخداد پدیده خشکسالی به‌ویژه در مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. منابع آب در این مناطق به‌صورت سطحی و زیرزمینی قابل بررسی است. از این‌رو، درک عمیق تغییرات مکانی-زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمینی و سازوکار احتمالی آن به‌منظور بررسی تغییرات خشکسالی آب‌های زیرزمینی از جمله حوزه آبخیز درانجیر با استفاده از شاخص‌های موجود لازم و ضروری است.

نتایج حاصل از ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی توسط شاخص GRI در محدوده‌های مطالعاتی کویر درانجیر نشان داد که منطقه‌های بردسیر و قریه‌العرب، شدیدترین خشکسالی را طی دوره مطالعاتی تجربه کرده‌اند که در این میان خشکسالی‌های محدوده قریه‌العرب از شدت و تداوم (۱۲۱ ماه) بالاتری نسبت به

به خشکی و سازگار با اقلیم منطقه با نیاز آبی کم است. این پژوهش، نتایج قابل قبولی از وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی ارائه کرده است. در نهایت، برای مقابله با این پدیده طبیعی توصیه می‌شود برنامه‌های کوتاه و بلندمدت در قالب راهکارهای توسعه سطح زیر کشت محصولات گلخانه‌ای، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و با راندمان مصرف آب بالا، توسعه سامانه‌های تحت فشار در آبیاری به‌جای سامانه‌های سنتی در باغ‌ها و مزارع و اجرای پروژه‌های مؤثر در افزایش ذخیره منابع آب آبیاری زیرزمینی و سطحی نظیر بندهای سنگ سیمانی، خاکی، پخش سیلاب در منطقه مورد مطالعه، بیش از پیش، اجرا شود.

تشکر و قدردانی

این اثر بر گرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی با عنوان "مطالعات ارزیابی و پهنه‌بندی کمی منابع آب زیرزمینی در دشت‌های ایران (مطالعه موردی: حوزه آبریز درانجیر)"، با کد ۹۹۰۵۴۱-۹۹۰۲۵-۹۹۰۲۸-۰۹-۰۹-۰۱، مصوب در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور است. نویسندگان این مقاله بر خود فرض می‌دانند از همکاری و پشتیبانی آن مؤسسه سپاسگزاری و قدردانی نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان این اثر است.

استان کرمان شیب منفی داشته، در حالی که پدیده گرد و غبار به‌علت کاهش نزولات جوی از روند افزایشی برخوردار بوده است. به این سبب، خشکسالی می‌تواند باعث تهدید تولید و امنیت غذایی، آلودگی مخازن آب‌ها، قحطی، افزایش مهاجرت، ناآرامی و آسیب‌های اجتماعی و جنگ منطقه‌ای شود. ورود آب‌های شور به داخل منابع آب زیرزمینی شیرین با برداشت بی‌رویه و افت تراز ایستایی چاه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی، سبب شور شدن اراضی حاصلخیز و لم‌پزرع شدن خاک حوزه آبخیز درانجیر خواهد شد.

با توجه به این‌که شدت آسیب و انعطاف‌پذیری هر یک از حوزه‌های آبخیز کشور از جمله محدوده مطالعاتی درانجیر، نسبت به وقوع پدیده خشکسالی متفاوت است و عمدتاً به برخی از ویژگی‌های مهم رفاهی، اقتصادی و اجتماعی ذی‌نفعان منطقه بستگی دارد؛ از جمله مهم‌ترین راهکار و تدبیر سازگاری با خشکسالی می‌توان به تغییر در دانش و نگرش افراد و مسئولان جامعه اشاره کرد.

به‌عبارتی دیگر، باید سیاست‌ها و راهکارهای مقابله با خشکسالی مبتنی بر باور به واقعیت کم‌آبی و وجود بحران در منطقه باشد. این سیاست‌ها باید منجر به اتخاذ یکسری راهبردهای نوین از جمله ایجاد صنایع کم‌آبخواه، مدیریت استفاده صحیح از آب و پساب در صنایع موجود، به‌کارگیری روش‌های جدید تأمین آب، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری در بخش کشاورزی و افزایش بهره‌وری در این بخش، کشت گیاهان مقاوم

منابع مورد استفاده

- Adib, A., Moradi, A., Lotfirad, M., Azizipour, M., Liaghat, A., 2023. Investigating the relationship between meteorological, hydrological and groundwater resource droughts under the influence of upstream dam reservoir effects. *Model. Earth Syst. Environ.* 1-11.
- Barthel, R., Stangefelt, M., Giese, M., Nygren, M., Seftigen, K., Chen, D., 2021. Current understanding of groundwater recharge and groundwater drought in Sweden compared to countries with similar geology and climate. *Geografiska Annaler: Series A Physic. Geogr.* 103(4), 323-345.
- 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 Irriga. Manage.* 12(2), 327-348 (in Persian).
- Bloomfield, J.P., Marchant, B.P., 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17(12), 4769-4787.
- Chamanpira, G., Zehtabian, G., Ahmadi, H., Malekian, A., 2014. Effect of drought on groundwater resources in order to optimize utilization management, case study: Plain Alashtar. *Watershed Engin. Manage.* 6(1), 10-20 (in Persian).
- Dehghan Rahimabadi, P., Azarnivand, H., Malekiyan, A., 2022. Investigation of hydrogeological drought and groundwater quality changes using GRI and GQI in Semnan and Damghan Plains, Iran. *Ecopersia* 10(2), 95-108.

- Ebrahimi-Khusfi, Z., Ebrahimi-Khusfi, M., Mirakbari, M., Soleimani-Sardoo, M., 2022. Investigating the impact of drought on dust events in Kerman Province using meteorological and satellite data. *J. Arid Biome* 11(2), 133-151 (in Persian).
- Gullacher, A., Allen, D.M., Goetz, J.D., 2023. Early Warning Indicators of groundwater drought in mountainous regions. *Water Resou. Res.* 59(8), e2022WR033399.
- Guo, M., Yue, W., Wang, T., Zheng, N., Wu, L., 2021. Assessing the use of standardized groundwater index for quantifying groundwater drought over the conterminous US. *J. Hydrol.* 598, 126227.
- Halwatura, D., McIntyre, N., Lechner, A.M., Arnold, S., 2017. Capability of meteorological drought indices for detecting soil moisture droughts. *J. Hydrol.: Regional Studies.* 12, 396-412.
- Han, Z., Huang, S., Huang, Q., Bai, Q., Leng, G., Wang, H., Zhao, J., Wei, X., Zheng, X., 2020. Effects of vegetation restoration on groundwater drought in the loess plateau, China. *J. Hydrol.* 591, 125566.
- Javadinejad, S., Dara, R., Jafary, F., 2020. Evaluation of hydro-meteorological drought indices for characterizing historical and future droughts and their impact on groundwater. *Resour. Environ. Info. Engin.* 2(1), 71-83.
- Jiao, W., Wang, L., McCabe, M.F., 2021. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sens. Environ.* 256, 112313.
- Kalehhouei, M., Kaviani, A., Shahedi, K., Soltani, M., 2018. Droughts zoning Caspian Plain with using SPI and CZI indices. *Extension Develop. Watershed Manage.* 6(20), 45-54 (in Persian).
- Kamali, S., Asghari, K., 2023. The effect of meteorological and hydrological drought on groundwater storage under climate change scenarios. *Water Resour. Manage.* 37(8), 2925-2943.
- Khosravi Dehkordi, A., Mirabbasi, R., Samadi Boroujeni, H., Ghasemi Dastgerdi, A.R., 2019. Monitoring and forecasting of groundwater drought in Shahrekord Plain using Groundwater Resource Index (GRI) and Markov chain model. *Hydrogeol.* 4(1), 111-125 (in Persian).
- Khosravi, A., Mirabbasi, R., Samadi Boroujeni, H., Ghasemi Dastgerdi, A.R., 2019. Monitoring and forecasting of groundwater drought using Groundwater Resource Index (GRI) and first to third-order markov chain models, case study: Boroujen Plain. *J. Water Soil Conserv.* 26(2), 117-136 (in Persian).
- Leelaruban, N., Padmanabhan, G., Oduor, P., 2017. Examining the relationship between drought indices and groundwater levels. *Water* 9(2), 82.
- Lezzaik, K., Milewski, A., Mullen, J., 2018. The groundwater risk index: development and application in the Middle East and North Africa region. *Sci. Total Environ.* 628, 1149-1164.
- Marchant, B.P., Bloomfield, J.P., 2018. Spatio-temporal modelling of the status of groundwater droughts. *J. Hydrol.* 564, 397-413.
- Mendicino, G., Senatore, A., Versace, P., 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *J. Hydrol.* 357(3-4) 282-302.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2011. Drought modeling-a review. *J. Hydrol.* 403(1-2), 157-175.
- Mirakbari, M., Mortezaei, G., Mohseni, M., 2018. Investigation of effect meteorological drought on surface and ground water resources by indices SPI, SPEI, SDI and GRI. *Iran. J. Watershed Manage. Sci. Engin.* 12(42), 70-80 (in Persian).
- Mohebbi Tafreshi, A., Asadian, F., Mohebbi Tafreshi, G., Keshavarzi, M.H.B., 2017. Evaluation of the hydrogeological drought using groundwater resource index based on GIS. *Agricul. Conspectus Scientificus* 82(4), 321-329.
- Mondal, S.K., Mishra, A., Leung, R., Cook, B., 2023. Global droughts connected by linkages between drought hubs. *Nat. Communi.* 14(1), 144.
- Parente, J., Amraoui, M., Menezes, I., Pereira, M.G., 2019. Drought in Portugal: current regime, comparison of indices and impacts on extreme wildfires. *Sci. Total Environ.* 685, 150-173.
- Peters, E., Van Lanen, H.A.J., Torfs, P.J.J.F., Bier, G., 2005. Drought in groundwater-drought distribution and performance indicators. *J. Hydrol.* 306(1-4), 302-317.
- Roshun, S.H., Habibnejad Roshan, M., 2018. Monitoring of temporal and spatial variation of groundwater drought using GRI and SWI indices, case study: Sari-Neka Plain. *J. Watershed Manage. Res.* 9(17), 269-279 (in Persian).
- Sarkar, M., Chinnasamy, P., 2023. Assessing the impact of precipitation on hardrock aquifer system using standard precipitation index and groundwater resilience index: a case study of Purulia, West Bengal, India. *Environ. Sci. Pollu. Res.* 1-16.
- Şen, Z., 2019. Groundwater recharge level estimation from rainfall record probability match methodology. *Earth Syst. Environ.* 3(3), 603-612.
- Song, X., Chen, H., Chen, T., Qin, Z., Chen, S., Yang, N., Deng, S., 2024. GRACE-based groundwater drought in the indochina Peninsula during 1979–2020: Changing properties and possible teleconnection mechanisms. *Sci. Total Environ.* 908, 168423.

- Yun, S.M., Jeong, J.H., Jeon, H.T., Cheong, J.Y., Hamm, S.Y., 2023. Determining groundwater drought relative to the opening of a River Barrage in Korea. *Water* 15(14), 2658.
- Zhu, Q., Zhang, H., 2022. Groundwater drought characteristics and its influencing factors with corresponding quantitative contribution over the two largest catchments in China. *J. Hydrol.* 609, 127759.