ارزیابی و پهنه‌بندی مکانی – زمانی خطر خشکسالی آب‌های زیرزمینی در آبخوان هشتگرد توسط شاخص منبع آب زیرزمینی

محمد نخعی [۱]، امین محبی تفرشی [۲*]، توفیق سعدی [۳]

۱. استاد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۳. دبیر کمیته تحقیقات، گروه تحقیقات کاربردی، شرکت آب منطقه‌ای البرز، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

چکیده

افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در اثر استخراج بی‌رویه در درازمدت باعث خشک‌شدن جریان‌های آب زیرزمینی می‌شود که به آن پدیده خشکسالی آب‌های زیرزمینی می‌گویند. بر این مبنا هدف این تحقیق بررسی روند تغییرات و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی است که با پدیده خشکسالی آب‌های زیرزمینی مشخص می‌شود. در این راستا از شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) برای ارزیابی شرایط خشکسالی آب‌های زیرزمینی و همچنین تجزیه‌وتحلیل الگوهای مکانی و زمانی آن بر مبنای داده‌های سطح آب زیرزمینی ۲۱ چاه مشاهده‌ای در بازه سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. جهت تولید نقشه‌های پهنه‌بندی، نرم‌افزار ArcGIS مورداستفاده قرار گرفت. یافته‌های تحقیق خشکسالی متوسط تا شدید را در مناطق خاصی از منطقه موردمطالعه از سال ۲۰۰۱ نشان می‌دهد. علاوه بر این، همان‌طور که توسط نقشه‌های پهنه‌بندی GRI نشان داده شد، مناطق جنوبی و جنوب شرقی آبخوان حساسیت بیشتری نسبت به خشکسالی در مقایسه با سایر بخش‌های آن در طول بازه زمانی تعریف شده از خود نشان دادند. الگوی تغییرات مکانی - زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمینی در آبخوان نشان می‌دهد به دنبال یک دوره خشکسالی متوسط از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳، وضعیت آبخوان بهبود جزئی داشت و به‌طورکلی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ شرایط پایداری برقرار شد، اما از سال ۲۰۱۱، وقوع خشکسالی تشدید شد و آبخوان در شرایط خشکسالی شدید تا بسیار شدید قرار گرفت. این شرایط نیاز به توجه دقیق و اجرای اقدامات مدیریتی را برجسته می‌کند. یکی از توصیه‌های این مطالعه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سطح آب‌های زیرزمینی برای ارزیابی پیشرفت خشکسالی و مقایسه آن با یافته‌های این تحقیق است.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی، خشکسالی، GIS، GRI، چاه مشاهده‌ای.

مقدمه

خشکسالی یک پدیده متناوب طبیعی است که با کمبود منابع آبی در دسترس در یک منطقه جغرافیایی وسیع و برای یک دوره قابل‌توجه همراه است (Rossi et al., 2007; Ayugi et al., 2022; Abdela et al., 2023). ویژگی مشترک همه

* نویسنده مسئول: std_a.mohebbi63@khu.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.4.1019771

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

خشکسالی‌ها انحراف از حالت عادی است. شدت، مدت و میزان خشکسالی برای اعمال هر برنامه مدیریتی ضروری است و دانستن این ویژگی‌ها و تصمیم‌گیری برای توسعه هر منطقه باید متناسب با پتانسیل منابع موجود و دانستن شرایط حدی باشد (Weiskopf et al., 2020; Manous and Stakhiv, 2021; Szukits, 2022). مهم‌ترین جنبه خشکسالی شدت آن است. خشکسالی‌های متوالی علاوه بر ایجاد اثرات مخرب زیست‌محیطی، مضرتر از سایر بلایای طبیعی هستند؛ زیرا خشکسالی طیف وسیعی از زندگی را در بر می‌گیرد (Vicente-Serrano et al., 2020; Chamanpira, 2022; Padrón-Monedero et al., 2024)؛ بنابراین تعیین زمان و مکان دقیق وقوع خشکسالی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شناخت ماهیت و قدرت پیش‌بینی این پدیده می‌تواند گامی اساسی و تأثیرگذار در مدیریت و سازگاری با خشکسالی باشد. اکنون اکثر دولت‌ها به ناکارآمدی مدیریت بحران پی برده‌اند. آنها در تلاش‌اند تا اطلاعات بیشتری در مورد روش‌های صحیح مدیریت ریسک به دست آورند تا آسیب‌های ناشی از خشکسالی به جامعه را کاهش دهند و اثرات خشکسالی‌های آینده را به حداقل برسانند (Wilhite et al., 2000; Kim et al., 2024). امروزه در دنیا تصمیم‌گیرندگان روش‌های مختلفی را برای سازگاری و کاهش خسارات بلایای طبیعی از جمله خشکسالی دنبال می‌کنند و پیشنهاد می‌شود که مدیریت خشکسالی از منظر مدیریت ریسک همراه با ترکیبی از مدیریت بحران و ریسک موردتوجه قرار گیرد (Wilhite, 2009, 2019; Teutschbein et al., 2023) و این رویکرد به‌صورت ترکیبی در زمان‌های مختلف استفاده گردد (Wilhite, 2000; Abu Arra and Şişman, 2024). به‌طورکلی یک سیستم جامع مدیریت خشکسالی مستلزم اطلاعات کافی از بخش‌های مختلف در سطح منطقه و آگاهی کافی از خطرات و اثرات زیان‌بار خشکسالی و همچنین میزان آسیب‌پذیری منطقه موردمطالعه و خسارات ناشی از خشکسالی برای اتخاذ واکنش‌ها و تصمیم‌گیری‌های مناسب برای کاهش خطرات است (Fatehi marj and Hosseini Hosseinabadi, 2017; Jedd and Smith, 2023; Abu Arra and Şişman, 2024). در این راستا، پهنه‌بندی خطر خشکسالی و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری خشکسالی اولین گام در اجرای مدیریت جامع خشکسالی است (Ekrami et al., 2015; Krogulec, 2018; Patel and Patel, 2024).

تجزیه‌وتحلیل خشکسالی توصیفی است و برای تحلیل کمی آن، وجود یک شاخص دقیق ضروری است (da Silva, 2004; Zhang et al., 2022; Behfar et al., 2024). شاخص خشکسالی زمانی مفید است که بتوان آن را به‌صورت کمی ارزیابی کرد و ویژگی‌های اصلی آن، یعنی تداوم، شدت و سطح درگیر با خشکسالی، آشکار باشد (Abbasinia et al., 2021; Guo et al., 2023; Rossi et al., 2023). دانشمندان هیدرولوژی و هواشناسی چندین شاخص برای ارزیابی و پایش خشکسالی ارائه کرده‌اند. از میان شاخص‌های مختلف خشکسالی، شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی از اهمیت بیشتری برخوردارند، زیرا منشأ خشکسالی‌های دیگر از جمله خشکسالی‌های کشاورزی و اجتماعی - اقتصادی هستند. از مهم‌ترین شاخص‌های مورداستفاده در ارزیابی خشکسالی می‌توان به شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI؛ محاسبه شده بر اساس داده‌های بارش و دما) که توسط پالمر (Palmer,۱۹۶۵) تهیه شده است، شاخص بارش استاندارد شده (SPI؛ محاسبه شده بر اساس داده‌های بارش) ارائه شده توسط مک کی و همکاران (McKee et al., 1993)، شاخص خشکسالی مؤثر (EDI؛ محاسبه شده بر اساس داده‌های بارش مؤثر) ارائه شده توسط بایون و ویل‌هایت (Byun and Wilhite, 1999)، شاخص استاندارد تأمین مخزن (SRSI؛ محاسبه شده بر اساس جریان ورودی مخزن و داده‌های ذخیره متوسط مخزن) پیشنهاد شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

توسط شیو (Shiau, 2003)، شاخص استاندارد رواناب (SRI؛ محاسبه شده بر اساس داده‌های رواناب) توسعه‌یافته توسط شوکلا و وود (Shukla and Wood, 2008)، شاخص خشکسالی جریان (SDI؛ محاسبه شده بر اساس داده‌های جریان) ارائه شده توسط نلبانتیس و تساکیریس (Nalbantis and Tsakiris, 2009)، و شاخص تبخیر و تعرق - بارش استاندارد شده (SPEI؛ محاسبه شده بر اساس داده‌های بارش و دما) پیشنهاد شده توسط ویسنته سرانو و همکاران (Vicente-Serrano et al., 2010)، اشاره نمود.

اگرچه آب‌های زیرزمینی یکی از بحرانی‌ترین منابع آبی در جهان هستند و به‌شدت تحت‌تأثیر خشکسالی قرار گرفته‌اند (Kheirkhah Zarkesh et al., 2012; Chamanpira et al., 2014; Kang and Sridhar, 2019; Abduljaleel et al., 2024)، در بسیاری از بررسی‌های مربوط به خشکسالی موردتوجه قرار نگرفته‌اند (Thomas and Duraisamy, 2018; Al Adaileh et al., 2019; Nygren et al., 2022; Dost and Kasiviswanathan, 2023). استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان باعث افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی شده است (Peters et al., 2006; Mohebbi Tafreshi et al., 2022; Kaznowska et al., 2024). این افت در درازمدت باعث خشک‌شدن جریان‌های آب زیرزمینی می‌شود که به آن پدیده خشکسالی آب‌های زیرزمینی می‌گویند (Li and Rodell, 2015; El Bouazzaoui et al., 2024). خشکسالی آب‌های زیرزمینی زمانی رخ می‌دهد که آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان منبع مهم تأمین آب، تحت‌تأثیر یک تنش خشکی طولانی‌مدت قرار گیرند (Huang et al., 2021; Petersen-Perlman et al., 2022; Chung et al., 2023). در این نوع خشکسالی، تغذیه، سپس سطح مخزن و در نهایت میزان تخلیه سیستم آب زیرزمینی تحت‌تأثیر خشکسالی کاهش می‌یابد (Sadeghfam et al., 2018; Balacco et al., 2022; Machairas and van de Ven, 2023).

جدیدترین شاخص خشکسالی مربوط به داده‌های آب زیرزمینی، شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) است که توسط مندیسینو و همکاران (Mendicino et al., 2008) معرفی شده است. این شاخص از داده‌های سطح آب زیرزمینی استفاده می‌کند. از زمان توسعه این شاخص، مطالعات مختلفی در سطح جهان برای ارزیابی وضعیت خشکسالی آب‌های زیرزمینی انجام شده است که از جمله آنها می‌توان به پژوهش محبی تفرشی و همکاران (Mohebbi Tafreshi et al., 2017) اشاره نمود. این تحقیق از سطح آب زیرزمینی ۱۹ حلقه چاه طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ برای ارزیابی خشکسالی مکانی و زمانی و محاسبه GRI در دشت تربت‌جام فریمان استفاده کرد. نتایج نشان داد که مقادیر GRI از سال ۲۰۰۸ در سراسر دشت منفی بوده است. فرزین و همکاران (Farzin et al., 2022) یک راهبُرد جدید پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی ترکیبی و تحلیل خشکسالی در استان چهارمحال‌وبختیاری ارائه کردند. برای این منظور از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، میانگین‌های متحرک یکپارچه خود همبسته فصلی (SARIMA) و میانگین‌های متحرک یکپارچه خود همبسته (ARIMA) به‌عنوان الگوریتم‌های شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی استفاده شد. در نهایت از GRI برای تجزیه‌وتحلیل خشکسالی استفاده کردند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی می‌شود خشکسالی تا پنج سال آینده با شدت فزاینده ادامه یابد. کمالی و اصغری (Kamali and Asghari, 2023) یک مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) را برای بررسی اثر خشکسالی بر ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد ایران توسعه دادند. از شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌عنوان ورودی استفاده شد. نتایج نشان داد که GRI و شاخص خشکسالی RDI مؤثرترین شاخص‌ها در مدل‌سازی آبخوان‌ها بودند. سرکار و چیناسامی (Sarkar and

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

Chinnasamy, 2023) از SPI و GRI برای سیستم آبخوان بنگال غربی در هند استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در طول دوره موردمطالعه (۲۰۲۰-۱۹۹۶)، بیش از ۸۵ درصد از چاه‌ها در برابر خشکسالی شدید آسیب‌پذیر بودند.

هدف این مطالعه بررسی روند خشکسالی آب‌های زیرزمینی در یک منطقه کوچک با کمبود آب زیرزمینی است. بخش نوآورانه این تحقیق استفاده از GIS برای بررسی روند مکانی - زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمینی و ارتباط آن با عمق چاه‌های مشاهده‌ای است.

مواد و روش‌ها

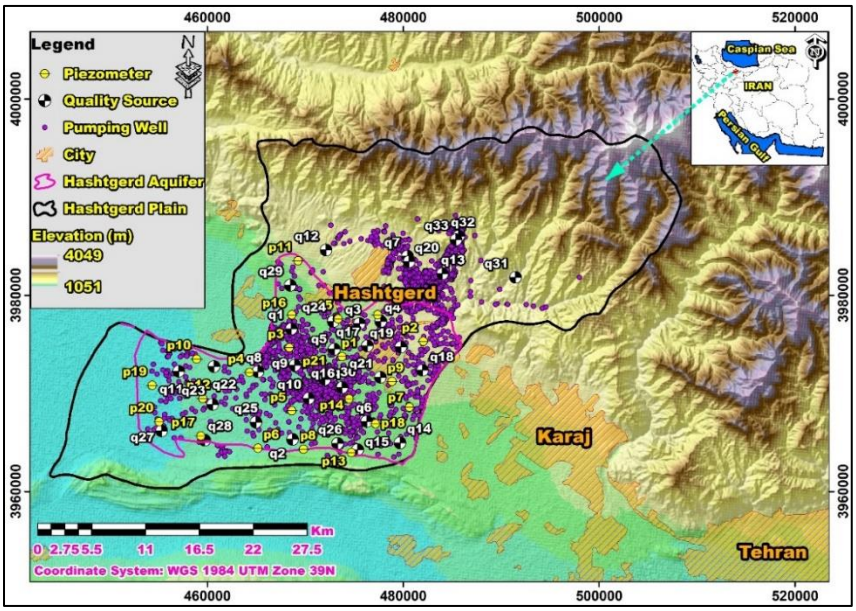
مشخصات منطقه موردمطالعه

آبخوان هشتگرد در مرکز دشت هشتگرد با مختصات جغرافیایی ۴۵۲۵۱۶-۴۸۵۲۰۸ و ۳۹۶۲۵۸۷-۳۹۸۴۲۵۲ متر طبق سیستم مختصات UTM Zone 39N و مساحتی بالغ بر ۴۱۱ کیلومترمربع در استان البرز قرار دارد. میانگین سالانه بارش آبخوان هشتگرد ۲۵۰ میلی‌متر است (Nakhaei et al., 2024). شیب آبخوان از شمال به جنوب کاهش می‌یابد و جهت جریان‌های سطحی و زیرزمینی از روند شمال شرقی به جنوب غربی پیروی می‌کنند (Bakhtiare Enayat et al., 2015; Nakhaei et al., 2023). هرچه از قسمت‌های شمالی به سمت جنوب حرکت می‌کنیم، رسوبات ریزتر می‌شوند و عمق آبخوان کاهش می‌یابد (Sharifi et al., 2009; Rajaeian et al., 2024). همچنین در نیمه جنوبی آبخوان به دلیل رسوبات ریزدانه نسبت به نیمه شمالی، چاه‌ها کمتر از قسمت‌های شمالی و شرقی عملکرد دارند (Shemshaki et al., 2011; Shahbazi et al., 2020). قابلیت انتقال محدوده موردمطالعه بین حدود ۱۰۰ تا بیش از ۳۰۰۰ مترمربع در روز متغیر است (Qasemi and Balorchi, 2015; Ghodrati and Saeedpanah, 2019). آبخوان آبرفتی منطقه هشتگرد در اراضی مخروط‌افکنه‌ای، آبخوانی آزاد است که به سمت جنوب به یک آبخوان چندلایه محصور تبدیل می‌شود و کیفیت آب زیرزمینی در لایه‌های محصور تحتانی بهتر از لایه آزاد است (Shemshaki et al., 2011; Karimian et al., 2022). به دلیل رخنمون رسوبات تبخیری میوسن در اراضی جنوبی (Khoshlahjeh Azar et al., 2022)، کیفیت آب در لایه سطحی به‌شدت کاهش‌یافته و برای کشاورزی و شرب غیرقابل‌استفاده است. ۱۹۰۷ حلقه چاه عمیق و ۴۷۵۴ حلقه چاه نیمه‌عمیق در آبخوان هشتگرد وجود دارد. ۲۰۴ چشمه در ارتفاعات منطقه موردمطالعه قرار دارد (پورتال ارائه آمار پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۸). سازمان آب منطقه‌ای البرز (ALBRW) سطح آب زیرزمینی را به طور منظم و ماهانه از طریق شبکه‌ای از ۲۱ حلقه چاه مشاهده‌ای اندازه‌گیری می‌کند که در شکل ۱ با p1 تا p21 نشان‌داده‌شده است. همچنین، ALBRW از ۳۳ منبع معرف کیفیت آب زیرزمینی برای تعیین کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی نمونه‌برداری کرده است. منابع معرف کیفیت آب زیرزمینی شامل ۲۴ حلقه چاه عمیق، چهار حلقه چاه نیمه‌عمیق، دو چشمه و سه قنات است. بیشتر آنها آبرفتی بوده و در ناحیه دشتی این منطقه قرار دارند.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، عمق چاه‌های بهره‌برداری از کمتر از ۱۰ متر تا بیش از ۲۰۰ متر متغیر است. بر اساس این شکل، فراوانی چاه‌های کم‌عمق در مرکز آبخوان مشهود است. این قسمت از دشت منطقه‌ای است که آبخوان دارای دو یا چندلایه است و عمق آب زیرزمینی آن حدود ۸ متر است. باتوجه‌به فعال‌بودن بیشتر چاه‌های کم‌عمق این منطقه و تغییرات عمقی آب‌های زیرزمینی بسیار اندک می‌توان نتیجه گرفت که سفره‌های زیرزمینی این منطقه کاملاً از یکدیگر جدا

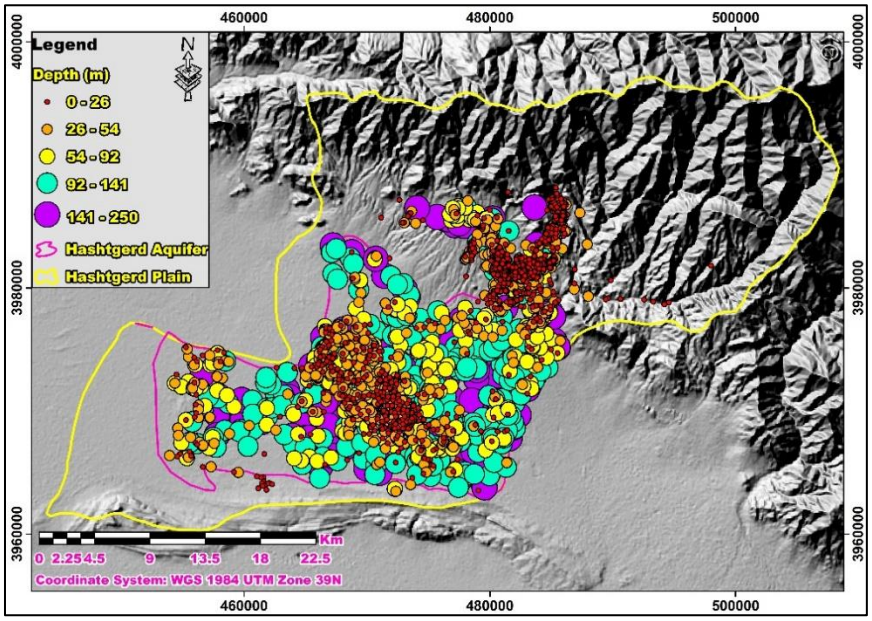
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

نبوده و نیمه‌محصور هستند. این نتیجه باتوجه‌به مطالعه شمشکی و همکاران (Shemshaki et al., 2011) تأیید شده است. در ادامه شکل ۳ تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری در دشت را نشان می‌دهد. باتوجه‌به شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که دبی‌های زیاد مربوط به چاه‌های عمیق است.



شکل ۱. موقعیت دشت و آبخوان هشتگرد و چاه‌های مشاهده‌ای، منابع کیفی و چاه‌های پمپاژ آن

Fig. 1. The location of Hashtgerd Plain and aquifer and its observation wells, quality sources, and pumping wells

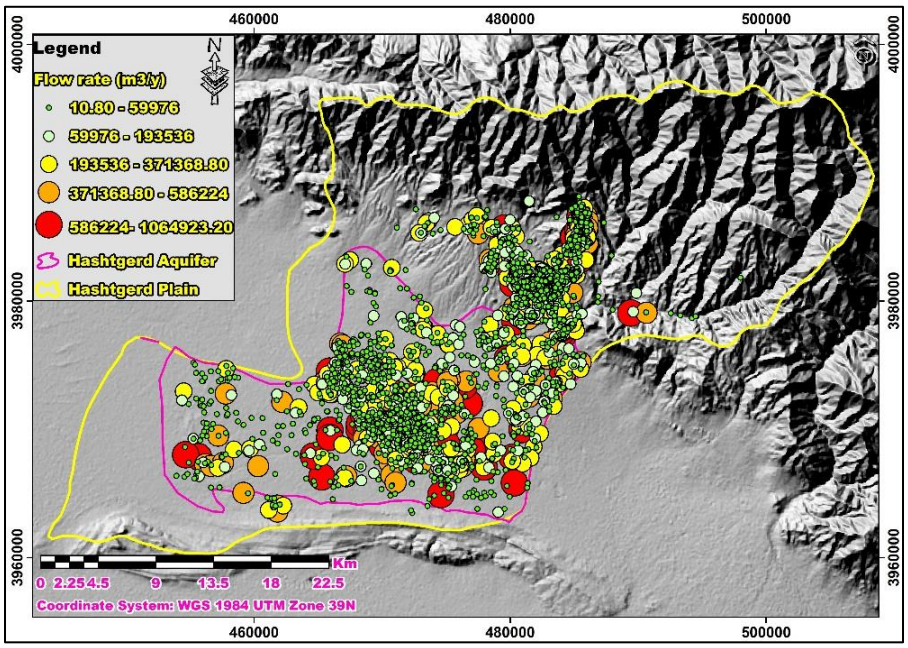


شکل ۲. عمق چاه‌های بهره‌برداری

Fig. 2. Depth of pumping wells

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]



شکل ۳. تغییرات توزیع نرخ جریان در چاه‌های بهره‌برداری
Fig. 3. The distribution changes of flow rate in the pumping wells

داده‌های مورداستفاده

همان‌طور که در بخش "منطقه مطالعه" ذکر شد، میانگین سطح آب زیرزمینی ماهانه به مدت ۲۷ سال (۲۰۱۹-۱۹۹۳) در ۲۱ حلقه چاه مشاهده‌ای برای ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی آبخوان استفاده شد.

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

روش GRI توسعه‌یافته توسط مندیسینو و همکاران (Mendicino et al., 2008) می‌تواند خشکسالی آب‌های زیرزمینی را تشخیص داده و شدت طبقات مختلف آن را ارزیابی کند (Azimi et al., 2019; Mobarhan and zandifar, 2023). در این راستا، باتوجه‌به معادله ۱، ابتدا میانگین سطح آب زیرزمینی در طول دوره موردمطالعه از سطح آب زیرزمینی در یک‌زمان خاص کم می‌شود. سپس عدد به‌دست‌آمده بر انحراف معیار داده‌های سطح آب زیرزمینی در طول دوره موردمطالعه تقسیم می‌شود. در نهایت شاخص منبع آب زیرزمینی برای آن زمان مشخص به دست می‌آید. این شاخص نیز مانند شاخص SPI دارای هفت دسته یا کلاس ریسک است و بین ۲+ و ۲- متغیر است. مقادیر GRI با گرایش به سمت ۲+ نشان‌دهنده رطوبت شدید و مقادیر GRI با تمایل به سمت ۲- نشان‌دهنده خشکسالی شدید است. مرکز این طبقه‌بندی صفر است که نشان‌دهنده حالت عادی است.

$$\mathrm{GRI} = \frac{D_i - \mu}{\delta} \qquad (۱)$$

در معادله ۱، D_i سطح تراز آب زیرزمینی در i مین چاه در تاریخ مورد نظر است، و δ و μ نیز به ترتیب انحراف معیار و میانگین سطح سطح آب زیرزمینی در کل دوره آماری مورد مطالعه هستند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

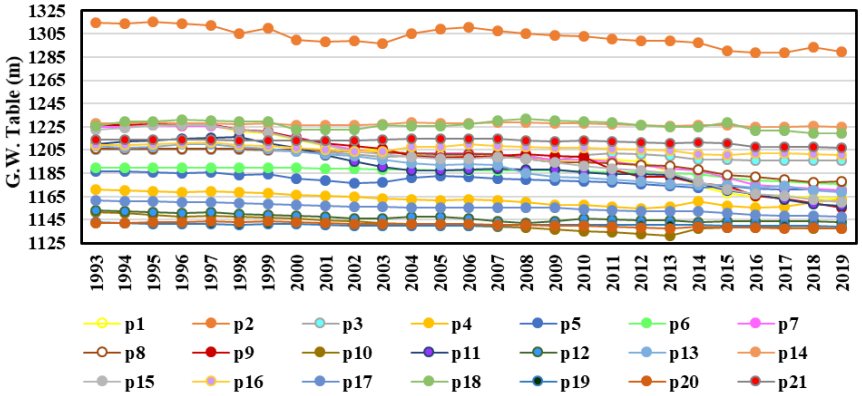
جدول ۱. طبقات خشکسالی آب‌های زیرزمینی بر اساس GRI (Mendicino et al., 2008)

Table 1. Groundwater drought classes based on GRI (Mendicino et al., 2008)

Index Value	Drought condition
GRI ≥ 2	Extreme wet
1.5 ≤ GRI < 2	Sever wet
1 ≤ GRI < 1.5	Slight wat
-0.99 ≤ GRI < 0.99	Normal
-1.5 ≤ GRI < -1	Slight dry
-2 ≤ GRI < -1.5	Sever dry
GRI ≤ -2	Extreme dry

نتایج و بحث

در اولین قدم جهت ارزیابی و پهنه‌بندی مکانی - زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمینی، وضعیت چاه‌های مشاهده‌ای برای تهیه نقشه GRI مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، برخی از چاه‌های مشاهده‌ای واقع در دامنه ارتفاعات شمالی دچار افت سطح آب زیرزمینی بیشتری شده‌اند. براین‌اساس چاه‌های مشاهده‌ای p1، p2، p7، p11 و p15 از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۹ بیش از ۲۰ متر افت سطح را نشان می‌دهند که یکی از دلایل آن را می‌توان به عمق زیاد آنها نسبت داد (Lachassagne et al., 2011; Addisie, 2022). شکل ۵ عمق چاه‌های مشاهده‌ای واقع در آبخوان هشتگرد را نشان می‌دهد.

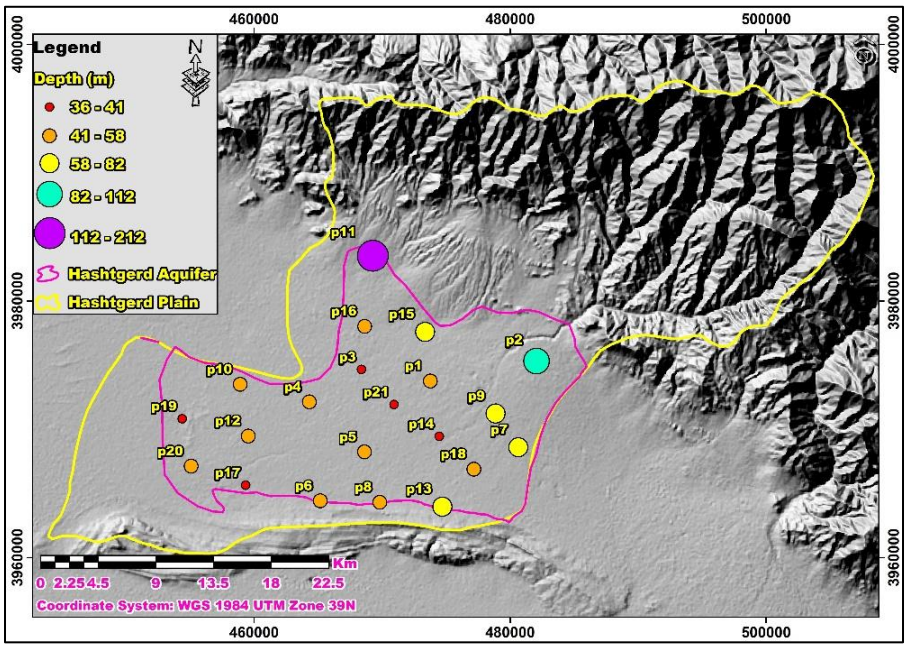


شکل ۴. متوسط سالانه تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای

Fig. 4. Average annual time changes of groundwater level in observation wells

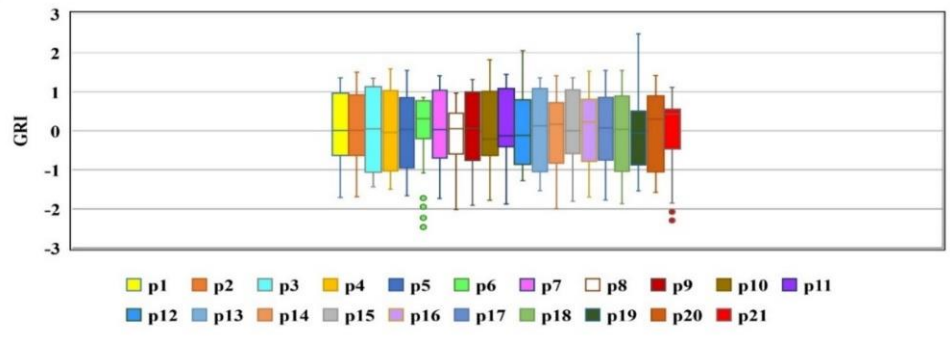
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]



شکل ۵. عمق چاه‌های مشاهده‌ای
Fig. 5. Depth of observation wells

پس از جمع‌آوری و ارزیابی داده‌های سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای، مقادیر شاخص GRI برای هر چاه مشاهده‌ای با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد. شکل ۶ محدوده GRI را در هر چاه مشاهده‌ای در طول دوره مطالعه با استفاده از نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهد. در این نمودارها، خط افقی مرکزی کادر، میانه داده‌ها را نشان می‌دهد، درحالی‌که نیمه‌های بالایی و پایینی میله، حد بالا و پایین داده‌ها را نشان می‌دهند. باتوجه‌به این نمودارها، مشاهده می‌شود که p6 با ۲/۴۷- و p19 با ۲/۴۹+ به ترتیب دارای مقادیر GRI کمتر و بالاتر در بین تمام چاه‌های مشاهده‌ای در طول دوره موردمطالعه هستند.

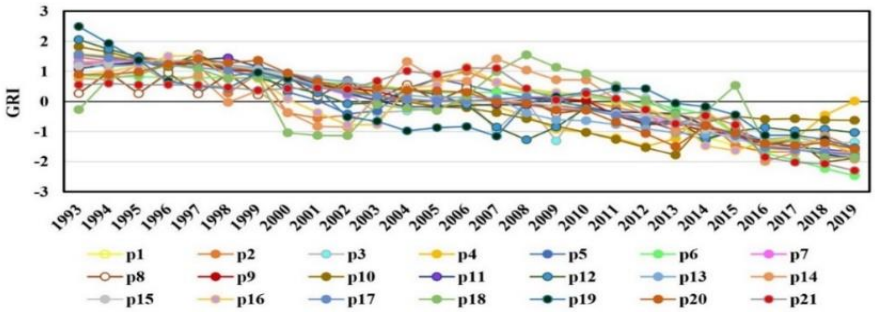


شکل ۶. نمودار جعبه خشکسالی آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای در طول دوره موردمطالعه
Fig. 6. Box plot of groundwater drought in each observation well during the study period

در همین راستا، شکل ۷ تغییرات زمانی خشکسالی آب زیرزمینی را در چاه‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند کلی مقادیر GRI در تمامی چاه‌ها نزولی بوده که نشان‌دهنده حرکت به سمت خشکسالی آب‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

زیرزمینی است. بر اساس این نمودار، از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۰، همه چاه‌های مشاهده‌ای در درجاتی از ترسالی تا حالت نرمال قرار داشتند. درحالی‌که، از سال ۲۰۱۳، همه چاه‌های مشاهده‌ای شرایط خشکسالی خفیف تا شدید را تجربه کرده‌اند. براین‌اساس و به طور جزئی‌تر، p6 در سال ۲۰۱۹ و p19 (به‌عنوان آخرین چاه مشاهده‌ای واقع در خروجی آبخوان) در سال ۱۹۹۳ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقادیر GRI در بین تمام چاه‌های مشاهده‌ای هستند.



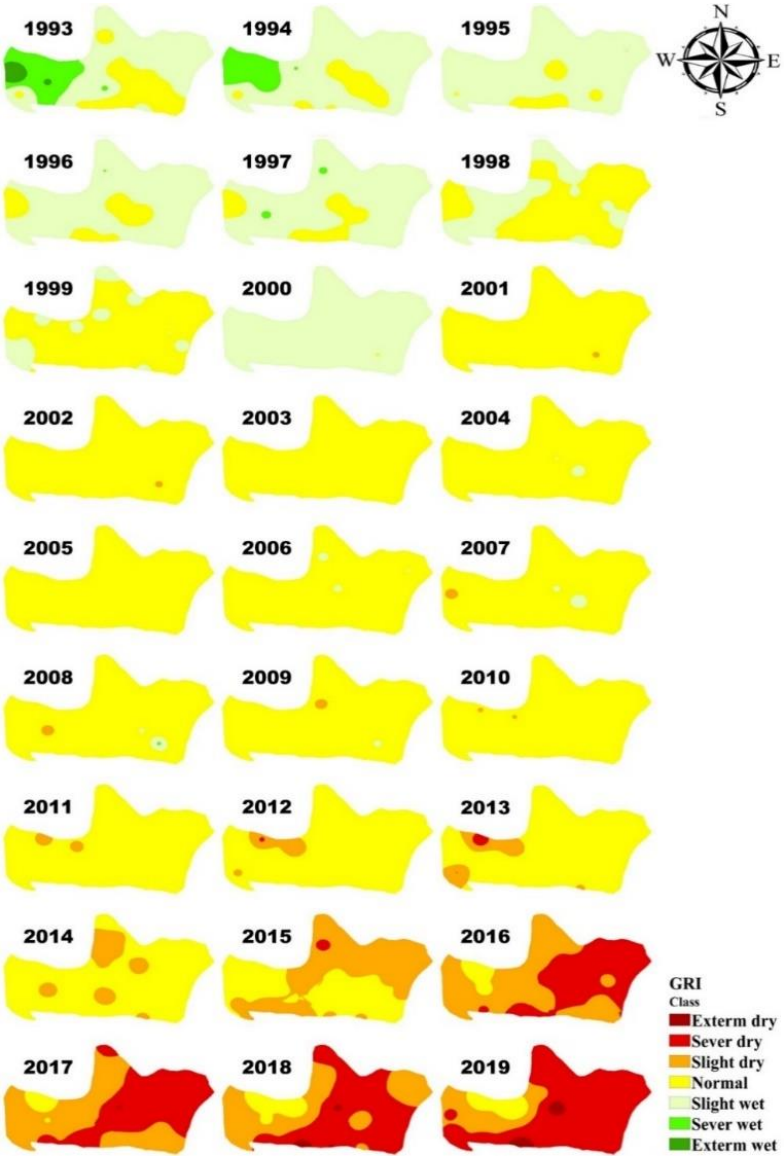
شکل ۷. تغییرات زمانی خشکسالی آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای

Fig. 7. Temporal variations of groundwater drought in observation wells

روش کریجینگ در نرم‌افزار ArcGIS10.8 برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی فضایی GRI استفاده شد (شکل ۸). همان‌طور که مشاهده می‌شود روند شرایط مرطوب در سال‌های اولیه دوره موردمطالعه بیشتر در نواحی جنوب غربی متمرکز بوده و این مناطق نسبت به سایر مناطق آبخوان دارای شرایط بهتری هستند. از سال ۲۰۰۱ روند GRI به‌تدریج از شرایط نرمال به شرایط خشکسالی حرکت کرده، هرچند شتاب این تغییرات روند در دو پیک سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ در مناطق مرکزی و به‌ویژه شرقی بیشتر محسوس است. این بدان معناست که از سال ۲۰۱۱، روند خشکسالی با سرعت بیشتری به سمت درجات بالای خشکسالی پیش رفته است. افزایش سرعت تغییرات روند را می‌توان به تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی در این مدت نسبت داد. نتایج نخعی و همکاران (Nakhaei et al., 2024) نیز این استدلال را تأیید می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]



شکل ۸. تغییرات مکانی - زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمینی در منطقه موردمطالعه

Fig. 8. Spatio-temporal changes of groundwater drought in the study area

در ادامه و در جدول ۲، مساحت هریک از طبقه‌های خشکسالی و تغییرات آن در طول دوره موردمطالعه ارائه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدای دوره آماری، بیشترین مساحت طبقه‌های شاخص خشکسالی آب زیرزمینی متعلق به طبقه ترسال خفیف است و پس از آن طبقه‌های نرمال، خیلی ترسال و به‌شدت ترسال در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. این روند تا سال ۱۹۹۶ با افزایش مساحت طبقه ترسال خفیف و کاهش در مساحت طبقه‌های نرمال، خیلی ترسال و به‌شدت ترسال ادامه پیدا کرده است. از سال ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۹ روند تغییر در مساحت طبقه‌ها با کاهش مساحت طبقه ترسال خفیف و افزایش مساحت طبقه نرمال در آبخوان اتفاق افتاده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همچنان شرایط آبخوان از نظر شاخص خشکسالی آب زیرزمینی در وضعیت ترسال خفیف تا نرمال قرار دارد و اثری از درجات مختلف خشکسالی دیده نمی‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

سال ۲۰۰۱ شروع ورود به شرایط خشکسالی با درجات خفیف است. البته فراوانی مساحت طبقه نرمال بسیار بیشتر از سایر طبقه‌های شاخص خشکسالی است و در واقع از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ آبخوان بیشتر در حالت نرمال قرار داشته است. هرچند طبقه‌های دیگر شاخص از جمله طبقه‌های ترسال خفیف و خشکسال خفیف نیز به‌تناوب و با فراوانی بسیار کمتر نسبت به حالت نرمال پدیدار شده‌اند. از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹ کاهش مساحت طبقه نرمال و افزایش مساحت طبقه‌های مختلف خشکسالی با روندی سریع‌تر نسبت به بازه‌های قبلی دوره موردمطالعه اتفاق افتاده است. البته این روند از سال ۲۰۱۴ با کاهش شدید مساحت طبقه نرمال و افزایش بسیار محسوس طبقه‌های خشکسال خفیف و خیلی خشکسال بسیار ملموس‌تر است. به‌طوری که افزایش سریع مساحت طبقه به‌شدت خشکسال بخصوص از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ بسیار واضح است.

جدول ۲. مساحت هریک از طبقه‌های خشکسالی آب زیرزمینی و تغییرات آن در طول دوره موردمطالعه

Table 2. The area of each of the groundwater drought classes and its changes during the study period

Year/Class	Exterm dry (km^2)	Sever dry (km^2)	Slight dry (km^2)	Normal (km^2)	Slight wet (km^2)	Sever wet (km^2)	Exterm wet (km^2)
1993	0.00	0.00	0.00	99.68	226.05	72.37	12.54
1994	0.00	0.00	0.00	52.44	302.21	56.03	0.00
1995	0.00	0.00	0.00	37.41	373.28	0.00	0.00
1996	0.00	0.00	0.00	65.40	345.30	0.00	0.00
1997	0.00	0.00	0.00	65.29	342.55	2.84	0.00
1998	0.00	0.00	0.00	268.09	142.60	0.00	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	354.10	56.58	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.30	410.41	0.00	0.00
2001	0.00	0.00	0.95	409.75	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	1.14	409.55	0.00	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	0.00	410.66	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	407.12	3.52	0.00	0.00
2005	0.00	0.00	0.00	410.64	0.00	0.00	0.00
2006	0.00	0.00	0.00	407.18	3.45	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	3.13	401.26	6.18	0.00	0.00
2008	0.00	0.00	3.10	401.22	6.02	0.31	0.00
2009	0.00	0.00	2.95	406.49	1.25	0.00	0.00
2010	0.00	0.00	1.05	409.47	0.00	0.00	0.00
2011	0.00	0.00	8.55	402.08	0.00	0.00	0.00
2012	0.00	0.49	25.21	384.93	0.00	0.00	0.00
2013	0.00	4.50	39.44	366.72	0.00	0.00	0.00
2014	0.00	0.00	59.23	351.42	0.00	0.00	0.00
2015	0.00	3.84	226.23	180.51	0.00	0.00	0.00
2016	0.00	177.66	210.85	22.15	0.00	0.00	0.00
2017	0.34	198.06	197.39	14.88	0.00	0.00	0.00
2018	4.74	213.62	157.58	34.66	0.00	0.00	0.00
2019	11.56	297.58	70.47	30.93	0.00	0.00	0.00

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

نتیجه‌گیری

نتایج در دشت موردمطالعه حاکی از وقوع خشکسالی خفیف آب زیرزمینی از سال ۲۰۰۱ در بخش‌های محدود منطقه موردمطالعه است. به‌تدریج خشکسالی با شدت بیشتر به سایر مناطق نیز کشیده شد و از سال ۲۰۱۳ مقدار GRI در سراسر دشت منفی شد که نشان‌دهنده وقوع خشکسالی آب زیرزمینی در سراسر منطقه موردمطالعه است. علاوه بر این، باتوجه‌به نقشه‌های پهنه‌بندی GRI، نواحی جنوبی و جنوب شرقی دشت در دوره مشخص شده نسبت به سایر مناطق دشت از نظر خشک‌سالی آسیب‌پذیرتر بودند.

وقوع چنین شرایطی در اقلیم‌های خشک نشان‌دهنده خطر جدی خشکسالی است و در صورت عدم اتخاذ تدابیر مدیریتی مناسب، مناطق هدف دیگر قادر به بازگشت به شرایط اولیه نخواهند بود و ممکن است حادتر شوند. نمونه بارز آن وضعیت موجود در دشت موردمطالعه است. در این منطقه پس از یک دوره خشکسالی ملایم از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳، وضعیت دشت نسبت به خشکسالی کمی بهبود یافت و شرایط نسبتاً پایداری بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ ایجاد شد. اما از سال ۲۰۱۱ روند خشکسالی بسیار بیشتر شد و دشت در شرایط بدتر خشکسالی قرار گرفت. این امر ضرورت توجه ویژه به این منطقه و اتخاذ راهبردهای مدیریتی مانند اصلاح بهره‌برداری از چاه‌ها در مناطقی مانند منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد.

یکی از راهبردهای مدیریتی می‌تواند استفاده از مدل‌سازی ریاضی آب‌های زیرزمینی منطقه موردمطالعه برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در ۱۰ سال آینده باشد. براین‌اساس، با درنظرگرفتن سناریوهای مختلف، استفاده از GRI را برای مطالعه و پیش‌بینی خشکسالی پیشنهاد می‌کنیم. از دیگر پیشنهادها می‌توان به استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سطح آب زیرزمینی جهت ارزیابی روند خشکسالی و مقایسه نتایج آن با نتایج این تحقیق، اشاره نمود.

قدردانی

این تحقیق بخشی از قرارداد منعقده بین معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه خوارزمی و شرکت آب منطقه‌ای البرز به شماره قرارداد ۰۰۶-۰۰۲-۰۹-۰۱ است که توسط این شرکت تحت حمایت‌های مالی و اطلاعاتی قرار گرفته است. بدین‌وسیله نگارندگان مراتب امتنان خود را از دانشگاه خوارزمی و شرکت آب منطقه‌ای البرز ابراز می‌دارند.

منابع

پورتال ارائه آمار پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۸. https://stu.wrm.ir/login.asp

Abbasinia, A., morshedi, j., Zohoriyan, M., Ghorbaniyan, J., 2021. Analysis and Comparison of SPI and GRI Indices in Assessing Meteorological Drought and Groundwater, Case Study: Mehran Plain, Ilam Province. Physical Geography Quarterly, 14(Physical Geography Quarterly), 95-114. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1400.14.51.6.3.

Abdela, K.A., Fantabil, A., Muleta, D., Yohannes, T., Jonah, K., 2023. Bibliographic review on drought and water level articles. Discover Water, 3(1), 17. https://doi.org/10.1007/s43832-023-00038-w.

Abduljaleel, Y., Amiri, M., Amen, E.M., Salem, A., Ali, Z.F., Awd, A., et al., 2024. Enhancing groundwater vulnerability assessment for improved environmental management: addressing a critical environmental concern. Environmental Science and Pollution Research, 31(13), 19185-19205. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32305-1.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

Abu Arra, A., Şişman, E., 2024. Innovative Drought Classification Matrix and Acceptable Time Period for Temporal Drought Evaluation. Water Resources Management. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03793-0.

Addisie, M.B., 2022. Groundwater recharge estimation using water table fluctuation and empirical methods. H2Open Journal, 5(3), 457-468. https://doi.org/10.2166/h2oj.2022.026.

Al Adaileh, H., Al Qinna, M., Barta, K., Al-Karablieh, E., Rakonczai, J., Alobeiaat, A., 2019. A Drought Adaptation Management System for Groundwater Resources Based on Combined Drought Index and Vulnerability Analysis. Earth Systems and Environment, 3(3), 445-461. https://doi.org/10.1007/s41748-019-00118-9.

Ayugi, B., Eresanya, E.O., Onyango, A.O., Ogou, F.K., Okoro, E.C., Okoye, C.O., et al., 2022. Review of Meteorological Drought in Africa: Historical Trends, Impacts, Mitigation Measures, and Prospects. Pure and Applied Geophysics, 179(4), 1365-1386. https://doi.org/10.1007/s00024-022-02988-z.

Azimi, S., Azhdary Moghaddam, M., Hashemi Monfared, S.A., 2019. Prediction of annual drinking water quality reduction based on Groundwater Resource Index using the artificial neural network and fuzzy clustering. Journal of Contaminant Hydrology, 220, 6-17. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.10.010.

Balacco, G., Alfio, M. R., Fidelibus, M.D., 2022. Groundwater Drought Analysis under Data Scarcity: The Case of the Salento Aquifer (Italy). Sustainability, 14(2), 707. https://doi.org/10.3390/su14020707.

Bakhtiare Enayat, B., Malekian, A., Salajegheh, A., 2015. Time and Lag Correlation Analysis between Climate Drought and Hydrological Drought in Hashtgerd Plain. Iranian Journal of Soil and Water Research, 46(4), 609-616. https://doi.org/10.22059/ijswr.2015.56785.

Behfar, N., Sharghi, E., Nourani, V., Booij, M.J., 2024. Drought index downscaling using AI-based ensemble technique and satellite data. Theoretical and Applied Climatology, 155(3), 2379-2397. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04822-5.

Byun, H.-R., Wilhite, D.A., 1999. Objective Quantification of Drought Severity and Duration. Journal of Climate, 12(9), 2747-2756. https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2.

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 Engineering and Management, 6(1), 10-20. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2014.101733.

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. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1401.18.1.11.9.

Chung, S.Y., Kim, G.-B., Senapathi, V., 2023. Drought and Groundwater Development. Water, 15(10), 1908. https://doi.org/10.3390/w15101908.

da Silva, V. d. P. R., 2004. On climate variability in Northeast of Brazil. Journal of Arid Environments, 58(4), 575-596. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.12.002.

Dost, R., Kasiviswanathan, K.S., 2023. Quantification of Water Resource Sustainability in Response to Drought Risk Assessment for Afghanistan River Basins. Natural Resources Research, 32(1), 235-256. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10129-5.

Ekrami, M., Fathimarj, A., Barkhordaeu, J., 2015. Assessment Agricultural Drought Vulnerability in Arid and S-arid climates using GIS and AHP, A Case Study for Taft Township, Yazd province, Iran. Irrigation and Water Engineering, 5(4), 107-117. https://www.waterjournal.ir/article_73802.html?lang=en.

El Bouazzaoui, I., Lamhour, O., Ait Brahim, Y., Najmi, A., Bougadir, B., 2024. Three Decades of Groundwater Drought Research: Evolution and Trends. Water, 16(5), 743. https://doi.org/10.3390/w16050743.

Fatehi marj, A., Hosseini Hosseinabadi, F., 2017. Agricultural drought risk management, case study: Alamot Gazvin catchment. Watershed Engineering and Management, 9(2), 155-165. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109722.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

Farzin, S., Anaraki, M.V., Naeimi, M., Zandifar, S., 2022. Prediction of groundwater table and drought analysis; a new hybridization strategy based on bi-directional long short-term model and the Harris hawk optimization algorithm. Journal of Water and Climate Change, 13(5), 2233-2254. https://doi.org/10.2166/wcc.2022.066.

Ghodrati, M., Saeedpanah, I., 2019. Ge of the Hashtgerd Aquifer by Fuzzy Logic-GIS Based Approaches. Irrigation and Water Engineering, 10(2), 163-177. https://doi.org/10.22125/iwe.2019.100748.

Guo, H., Huang, W., Xie, T., Ma, S., 2023. Evaluation of the applicability of multiple drought indices in the core zone of "westerlies-dominated climatic regime". Science China Earth Sciences, 66(7), 1504-1520. https://doi.org/10.1007/s11430-022-1097-0.

Huang, J., Cao, L., Yu, F., Liu, X., Wang, L., 2021. Groundwater Drought and Cycles in Xuchang City, China (Original Research). Frontiers in Earth Science, 9. https://doi.org/10.3389/feart.2021.736305.

Jedd, T., Smith, K.H., 2023. Drought-Stricken U.S. States Have More Comprehensive Water-Related Hazard Planning. Water Resources Management, 37(2), 601-617. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03390-z.

Kamali, S., Asghari, K., 2023. The Effect of Meteorological and Hydrological Drought on Groundwater Storage Under Climate Change Scenarios. Water Resources Management, 37(8), 2925-2943. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03268-0.

Kang, H., Sridhar, V., 2019. Drought assessment with a surface-groundwater coupled model in the Chesapeake Bay watershed. Environmental Modelling and Software, 119, 379-389. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.002.

Karimian, P., Shourian, M., Kardan Moghaddam, H., 2022. Assessment of the Groundwater Resources Balancing Using Sustainability Indicators. Water and Irrigation Management, 12(2), 213-229. https://doi.org/10.22059/jwim.2022.332573.931.

Kaznowska, E., Wasilewicz, M., Hejduk, L., Krajewski, A., Hejduk, A., 2024. The Groundwater Resources in the Mazovian Lowland in Central Poland during the Dry Decade of 2011–2020. Water, 16(2), 201. https://doi.org/10.3390/w16020201.

Kim, G.J., Kim, D.H., Kim, Y.-O., 2024. Improving the probabilistic drought prediction with soil moisture information under the ensemble streamflow prediction framework. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. https://doi.org/10.1007/s00477-024-02710-6.

Kheirkhah Zarkesh, M., Mohebbi Tafreshi, G., Majidi, A., Asadian, F., Mohebbi Tafreshi, A., 2012. Estimated volume of storable groundwater in underground dams storage with using GIS and RS (a case study of Qazvin Province). Earth and Resources 4(4), 19-26.https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=269426

Khoshlahjeh Azar, M., Shami, S., Nilfouroushan, F., Salimi, M., Ghayoor Bolorfroshan, M., Reshadi, M.A.M., 2022. Integrated analysis of Hashtgerd plain deformation, using Sentinel-1 SAR, geological and hydrological data. Scientific Reports, 12(1), 21522. https://doi.org/10.1038/s41598-022-25659-4.

Krogulec, E., 2018. Evaluating the risk of groundwater drought in groundwater-dependent ecosystems in the central part of the Vistula River Valley, Poland. Ecohydrology and Hydrobiology, 18(1), 82-91. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.11.003.

Lachassagne, P., Léonardi, V., Vittecoq, B., Henriot, A., 2011. Interpretation of the piezometric fluctuations and precursors associated with the November 29, 2007, magnitude 7.4 earthquake in Martinique (Lesser Antilles). Comptes Rendus Geoscience, 343(11), 760-776. https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.09.002.

Li, B., Rodell, M., 2015. Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous U.S. Journal of Hydrology, 526, 78-88. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.027.

Machairas, I., van de Ven, F.H.M., 2023. An urban drought categorization framework and the vulnerability of a lowland city to groundwater urban droughts. Natural Hazards, 116(2), 1403-1431. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05767-0.

Manous, J., Stakhiv, E.Z., 2021. Climate risk-informed decision analysis (CRIDA): 'top-down' vs 'bottom-up' decision making for planning water resources infrastructure. Water Policy, 23(S1), 54-76. https://doi.org/10.2166/wp.2021.243.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. (Paper presented at the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, USA).

Mendicino, G., Senatore, A., Versace, P., 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate. Journal of Hydrology., 357(3–4), 282-302. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.005.

Mobarhan, E.Y., Zandifar, S., 2023. Investigating and Temporal Monitoring of GRI Index on the Fluctuations of Groundwater Table (Case Study: Zanjan Plain). Journal of Water and Soil Resources Conservation, 4(12), 87-99. https://doi.org/10.30495/wsrcj.2023.72140.11361.

Mohebbi Tafreshi, A., Asadian, F., Mohebbi Tafreshi, G., Bijeh Keshavarzi, M.H., 2017. Evaluation of the Hydrogeological Drought Using Groundwater Resource Index Based on GIS (Geographic information system (GIS); Groundwater Resource Index (GRI); Groundwater level; Hydrogeological drought; Monitoring). Agriculturae Conspectus Scientificus, 82, 321-329. http://acs.agr.hr/acs/index.php/acs/article/view/1313.

Mohebbi Tafreshi, G., Nakhaei, M., Lak, R., 2022. Subsidence risk assessment based on a novel hybrid form of a tree-based machine learning algorithm and an index model of vulnerability. Geocarto International 37(10), 2842-2870. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1841835

Nakhaei, M., Mohebbi Tafreshi, A., Saadi, T., 2023. An evaluation of satellite precipitation downscaling models using machine learning algorithms in Hashtgerd Plain, Iran. Modeling Earth Systems and Environment. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01678-y.

Nakhaei, M., Mohebbi Tafreshi, A., Saadi, T., 2024. Machine learning-based estimation of meteorological drought time series in small-scale areas using downscaled satellite precipitation data. Advances in Space Research. Under review.

Nalbantis, I., Tsakiris, G., 2009. Assessment of Hydrological Drought Revisited. Water Resources Management, 23(5), 881-897. https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1.

Nygren, M., Barthel, R., Allen, D.M., Giese, M., 2022. Exploring groundwater drought responsiveness in lowland post-glacial environments. Hydrogeology Journal, 30(7), 1937-1961. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02521-5.

Padrón-Monedero, A., Linares, C., Díaz, J., Noguer-Zambrano, I., 2024. Impact of drought on mental and behavioral disorders, contributions of research in a climate change context. A narrative review. International Journal of Biometeorology. https://doi.org/10.1007/s00484-024-02657-x.

Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. Research Paper No. 45. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D.C.

Patel, R., Patel, A., 2024. Evaluating the impact of climate change on drought risk in semi-arid region using GIS technique. Results in Engineering, 21, 101957. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101957.

Peters, E., Bier, G., van Lanen, H.A.J., Torfs, P.J.J.F., 2006. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. Journal of Hydrology, 321(1), 257-275. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.08.004.

Petersen-Perlman, J.D., Aguilar-Barajas, I., Megdal, S.B., 2022. Drought and groundwater management: Interconnections, challenges, and policyresponses. Current Opinion in Environmental Science and Health, 28, 100364. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100364.

Qasemi, M.R., Balorchi, M.J., 2015. The report on the investigation of the hazards caused by land subsidence in Tehran province, Geological water report, Volume II - Hashtgerd Plain. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, p. 338. Available at: https://www.ngdir.ir/contents/462/

Rajaeian, S., Ketabchi, H., Ebadi, T., 2024. Investigation on quantitative and qualitative changes of groundwater resources using MODFLOW and MT3DMS: a case study of Hashtgerd aquifer, Iran. Environment, Development and Sustainability, 26(2), 4679-4704. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02904-4.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

Rossi, L., Naumann, G., Gabellani, S., Cammalleri, C., 2023. A combined index to characterize agricultural drought in Italy at municipality scale. Journal of Hydrology: Regional Studies, 47, 101404. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101404.

Rossi, G., Vega, T., Bonaccorso, B. 2007., Methods and tools for drought analysis and management. Netherlands: Springer.

Sadeghfam, S., Ehsanitabar, A., Khatibi, R., Daneshfaraz, R., 2018. Investigating 'risk' of groundwater drought occurrences by using reliability analysis. Ecological Indicators, 94, 170-184. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.055.

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. Environmental Science and Pollution Research, 30(52), 112548-112563. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30158-8.

Shahbazi, A., Safari, F., Ketabchi, H., 2020. Modeling of management measures taken to control groundwater level depletion (Hashtgerd Plain-Alborz province). Iran-Water Resources Research, 16(1), 116-134. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.1.9.3.

Sharifi, F., Mahdian, M., Saadati, H., Garshasbi, P., Ghafoori, M., Emamjomeh, R., et al., 2009. Investigating the relationship of hydrological processes with the feeding of underground aquifers by means of chemical and isotopic tracers, case study: Hashtgerd watershed'. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran, p. 242 41178. Available at: http://fipak.areeo.ac.ir/faces/search/fulltext/fulltextFullView.jspx?_afPfm=-jaj54popu.

Shemshaki, A., Mohammadi, Y., Bolourchi, M.J., 2011. Investigation on Confined Aquifer and amp; its Role on Subsidence Occurrence in Hashtgerd Plain. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 20(79), 137-142. https://doi.org/10.22071/gsj.2011.55058.

Shiau, J.T., 2003. Water Release Policy Effects on the Shortage Characteristics for the Shihmen Reservoir System during Droughts. Water Resources Management, 17(6), 463-480. https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000004958.93250.8a.

Shukla, S., Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical Research Letters, 35(2). https://doi.org/10.1029/2007GL032487.

Szukits, Á., 2022. The illusion of data-driven decision making – The mediating effect of digital orientation and controllers' added value in explaining organizational implications of advanced analytics. Journal of Management Control, 33(3), 403-446. https://doi.org/10.1007/s00187-022-00343-w.

Teutschbein, C., Albrecht, F., Blicharska, M., Tootoonchi, F., Stenfors, E., Grabs, T., 2023. Drought hazards and stakeholder perception: Unraveling the interlinkages between drought severity, perceived impacts, preparedness, and management. Ambio, 52(7), 1262-1281. https://doi.org/10.1007/s13280-023-01849-w.

Thomas, R., Duraisamy, V., 2018. Hydrogeological delineation of groundwater vulnerability to droughts in semi-arid areas of western Ahmednagar district. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21(2), 121-137. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.11.008.

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 23(7), 1696-1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1.

Vicente-Serrano, S.M., Quiring, S.M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., Domínguez-Castro, F., 2020. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? Earth-Science Reviews, 201, 102953. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953.

Weiskopf, S.R., Rubenstein, M.A., Crozier, L.G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J.E., et al., 2020. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. Science of The Total Environment, 733, 137782. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

Wilhite, D.A., 2000. Droughts: A Global Assesment London: Routledge.

Wilhite, D.A., 2009. Drought Monitoring as a Component of Drought Preparedness Planning. In A. Iglesias, A., Cancelliere, D.A., Wilhite, L., Garrote, and Cubillo, F., (Eds.) , Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems: Drought Management and Policy Development in the Mediterranean (pp. 3-19). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9045-5_1.

Wilhite, D.A., 2019. Integrated drought management: moving from managing disasters to managing risk in the Mediterranean region. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 4(1), 42. https://doi.org/10.1007/s41207-019-0131-z.

Wilhite, D.A., Hayes, M.J., Knutson, C., Smith, K.H., 2000. Planning for drought: moving from CRISIS to risk management. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 36(4), 697-710. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04299.x.

Zhang, X., Duan, Y., Duan, J., Jian, D., Ma, Z., 2022. A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analyses. Science China Earth Sciences, 65(2), 317-336. https://doi.org/10.1007/s11430-021-9822-y

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

Assessment and spatio-temporal zoning of groundwater drought risk in Hashtgerd aquifer by groundwater resource index

Mohammad Nakhaei [1], Amin Mohebbi Tafreshi [2*], Tofigh Saadi [3]

1. Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, Tehran, Iran
2. Ph.D. student, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, Tehran, Iran
3. Ph.D., Secretary of the Research Committee, Department of Applied Research, Alborz Regional Water Authority, Karaj, Iran

Received: 20 Sep 2023 Accepted: 04 Dec 2023

Abstract

A sharp drop in groundwater level as a result of indiscriminate extraction over a long period of time leads to the drying up of groundwater flows, which is called the phenomenon of groundwater drought. In this regard, this research aims to investigate the process of change and reduction of groundwater level, which is characterised by the phenomenon of groundwater drought. Based on this, the Groundwater Resource Index (GRI) was used to evaluate the drought condition of groundwater and analyse its spatial and temporal patterns based on groundwater level data of 21 observation wells between 1993 and 2019. ArcGIS software was used to create zone maps. The results of the research show that certain areas of the study area have experienced moderate to severe drought since 2001. In addition, the GRI zonation maps show that the southern and south-eastern regions of the aquifer have been more sensitive to drought than other parts of the aquifer during the defined period. The spatio-temporal pattern of groundwater drought in the aquifer shows that after a period of moderate drought from 2001 to 2003, the condition of the aquifer improved slightly, and generally stable conditions were established from 2001 to 2010, but since 2011, the occurrence of drought has intensified and the aquifer has been in severe to very severe drought conditions. These conditions highlight the need for careful attention and implementation of management measures. One of the study's recommendations is to use satellite data on groundwater levels to assess the progress of the drought, and compare it with the findings of this study.

Keywords: Zoning, Drought, GIS, GRI, Observation well

Introduction

Natural intermittent droughts are caused by water shortages over a large area and period of time. All droughts are abnormal. Any management plan must take into account the severity, duration and quantity of the drought, and the development of each area must be proportionate to its resources and limitations. The intensity of the drought is the most important factor. Because of their widespread effects, successive droughts are worse than other natural disasters (Vicente-Serrano et al., 2020; Chamanpira, 2022; Padrón-Monedero, 2024). Thus, the timing and location of droughts are important. Understanding and predicting this can aid drought management. Most governments

*Corresponding author: std_a.mohebbi63@khu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.4.1019771

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

recognise that crisis management is pointless. Risk management is being studied to reduce drought damage to society and future droughts (Wilhite et al., 2000; Kim et al., 2024). World leaders are adapting to and mitigating natural disasters such as drought. Crisis and risk management should be combined to address drought. Combine this method at different times (Wilhite, 2000; Abu Arra and Şişman, 2024). Comprehensive drought management requires regional information from many sectors, understanding of drought risks and adverse effects, sensitivity of the area under study, and drought damage to take appropriate actions and decisions to mitigate risks. (Fatehi). Marj and Hosseini Hosseinabadi (2017); Jedd and Smith (2023); Abu Arra and Şişman (2024). Drought risk zoning and vulnerability maps are needed for comprehensive drought management. Quantitative descriptive drought analysis requires precise indicators (da Silva, 2004; Zhang et al., 2022; Behfar, 2024). A quantifiable indicator that clearly shows the duration, severity and extent of drought is useful. Hydrologists and meteorologists have developed drought indicators. Hydrological and meteorological drought indicators are more important because they cause agricultural and socio-economic drought. Vicente-Serrano et al. (2010) recommend Palmer's Drought Intensity Index (PDSI; calculated from precipitation and temperature data), McKee et al.'s Standardised Precipitation Index (SPI), Byun and Wilhite's Effective Drought Index (EDI) and Standard Reservoir Supply Index (SRSI) as important indices for drought assessment. Groundwater is one of the most important water resources in the world and is severely affected by drought (Chamanpira et al., 2014; Kang and Sridhar, 2019; Abduljaleel, 2024), yet it has been ignored in many drought studies. Indiscriminate groundwater extraction in various countries has drastically lowered groundwater levels (Peters et al., 2006; Kaznowska, 2024). This decline is causing long-term groundwater deficits (Li and Rodell, 2015; El Bouazzaoui et al., 2024). Groundwater drought occurs when prolonged drought stress damages this vital water supply (Huang et al., 2021; Petersen-Perlman, 2022; Chung, 2023). Groundwater recharge, reservoir levels and groundwater discharge all decline during drought. The most recent groundwater drought indicator is the GRI by Mendicino et al. (2008). This index uses groundwater. Since the creation of this indicator, other studies have assessed groundwater deficits, including Mohebbi Tafreshi et al. (2017). Spatial and temporal aridity and GRI of the Torbet Jam Freeman Plain were determined using groundwater levels from 19 wells from 1995 to 2010. GRI has been negative across the plain since 2008. Farzin et al. (2022) proposed to merge drought and groundwater projections in Chaharmahal and Bakhtiari. Groundwater levels were simulated using ANN, SARIMA and ARIMA. Finally, GRI was used to assess the drought. Over five years, the drought would worsen, according to the statistics. In the Najaf Abad aquifer in Iran, Kamali and Asghari (2023) used an SVM model to study the impact of drought on groundwater storage. Meteorological and hydrological drought indices were used. The best indicators for aquifer modelling were GRI and RDI drought index. SPI and GRI were used by Sarkar and Chinnasamy (2023) for the West Bengal aquifer in India. Over 85% of the wells were vulnerable to severe drought between 1996 and 2020.

Groundwater drought in a tiny low groundwater zone is studied here. Newly, GIS is used to study the spatio-temporal trend of groundwater drought and the depth of monitoring wells.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

Materials and Methods

study area

The Hashtgerd aquifer is located in the middle of the Hashtgerd Plain in Alborz Province with UTM zone 39N coordinates 452516-485208 north and 3984252-3962587 east with an area of 410 square kilometres. The Hashtgerd aquifer receives 250 mm of precipitation annually (Nakhaei et al., 2024). The gradient of the aquifer decreases from north to south, while surface and subsurface flows trend from northeast to southwest (Bakhtiare Enayat et al., 2015; Nakhaei, 2023). From north to south, sediments become finer and aquifer depths decrease (Sharifi et al., 2009; Rajaeian, 2024). Wells in the southern aquifer are less efficient than those in the northern and eastern aquifers due to fine-grained sediments (Shemshaki et al., 2011; Shahbazi, 2020). The study area is transferable from 100 to 3000 square metres per day (Qasemi and Balorchi, 2015; Ghodrati and Saeedpanah, 2019). The Hashtgerd alluvial aquifer in the alluvial cone area is a free aquifer, which becomes a closed multilayer aquifer towards the south. The lower confining layers have better groundwater quality than the free layer. Miocene evaporite deposits in the southern plains have degraded surface water quality, making it unsuitable for cultivation and drinking (Khoshlahjeh Azar et al., 2022). Hashtgerd has 1907 deep and 4754 semi-deep wells. 204 highland springs are studied. Figure 1 shows 21 observation wells used by the Alborz Regional Water Organisation (ALBRW) to record groundwater levels on a monthly basis. ALBRW also investigated 33 typical groundwater quality sources to assess chemical quality. 24 deep wells, four semi-deep wells, two springs and three aqueducts are indicative of groundwater quality. Most are alluvial and located on the plains of the region.

Input Data

As mentioned in the Study Area section, the average monthly groundwater level for 27 years (1993-2019) in 21 observation wells was used to assess the groundwater drought of the aquifer.

Groundwater Resource Index (GRI)

The GRI technique of Mendicino et al. (Mendicino et al., 2008) can identify groundwater droughts and assess their severity (Azimi et al., 2019; Mobarhan and Zandifar, 2023). In equation 1, the average groundwater level for the analysed period is subtracted from the groundwater level at a given time. This number is then divided by the standard deviation of the groundwater level data throughout the study period. Finally, the time-specific groundwater source index is calculated. Like the SPI index, it has seven risk classifications and ranges from +2 to -2. High GRI values indicate excessive moisture, while low GRI values indicate severe drought. This categorisation is centred on zero, the normal condition.

Results and Discussion

The observation wells were examined to produce the GRI map for groundwater drought assessment and spatio-temporal zoning. The variation of piezometers in the northern highlands is shown in Figures 2 and 3. From 1993 to 2019, observation wells P1, P2, P7, P11 and P15 showed a decline of almost 20 metres due to their depth (Lachassagne et al., 2011; Addisie, 2022). The piezometer depth of the Hashtgerd aquifer is shown in Figure 3. After analysing the groundwater level data, the GRI index of each piezometer was calculated using equation 1. Figure 4 shows the GRI range of each piezometer throughout the investigation using box plots. These plots show the median as the centre horizontal line of the box and the upper and lower limits as the halves of the bars. During the

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]

investigation, p6 with -2.47 and p19 with +2.49 had the lowest and highest GRI values of all the monitoring wells. The piezometric groundwater drought variations are shown in Figure 5. All wells have decreasing GRI values, indicating groundwater scarcity. This figure shows all observation wells from 1993-2000 as damaged to normal. Since 2013, all observation wells have experienced moderate to severe drought. This and more shows that p6 in 2019 and p19 (the last piezometer at the aquifer outflow) in 1993 had the lowest and highest GRI values of all observation wells. ArcGIS 10.8 was used to create spatial zoning maps of GRI using kriging (Figure 6). The southern regions of the aquifer have better early wet conditions than other locations. Since 2001, the GRI trend has gradually shifted from normal to drought, although it accelerated in the central and mostly eastern peak years of 2011-2013 and 2014-2019. The drought has accelerated since 2011. Climate change and reduced rainfall have accelerated the change. Nakhaei et al. (2024) confirm this.

Conclusions

Some areas of the aquifer have experienced moderate groundwater difficulties since 2001. Since 2013, the GRI of the plain has been negative due to drought. The GRI zone maps show that drought risk is increasing in the southern and south-eastern parts of the plain. This suggests that drought risk is significant in the arid regions, and without good management, the target areas may not recover or may deteriorate. Example: Reviewing the basics. After the 2001-2003 drought, the plains stabilised between 2001 and 2010. Dryer plains since 2011. The study area needs to effectively conserve and use this region. This 10-year management plan predicts groundwater levels in the study area using mathematical modelling. GRI should study and anticipate droughts. Others advise the use of satellite groundwater data to analyse drought.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019771]