

## Assessment of groundwater resources vulnerability, reliability and resilience under drought condition (case study: Dehgolan plain, Kurdistan province)

Mahdieh Moradnia<sup>1</sup> , Mohsen Isari<sup>2\*</sup> , Davood Moshir Panahi<sup>3</sup> , Hamed Farooqi<sup>2</sup> , Seyed Dana Parizadi<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> M.Sc. Water Resources Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

<sup>2\*</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran.

<sup>3</sup> Ph.D. Graduate, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Ph.D. student, Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

### Extended Abstract [https:](#)

#### Introduction

Groundwater resources play a vital role in sustaining socio-economic development, particularly in arid and semi-arid regions where surface water is scarce. In recent decades, these resources have come under increasing stress due to climate change, prolonged droughts, and unsustainable abstraction. The vulnerability of aquifers to drought has therefore become a central issue in water resources management and policy-making. The resilience, reliability, and vulnerability (RRV) framework provide a robust means to assess the performance and sustainability of groundwater systems under hydrological stress. This study focuses on evaluating the groundwater resources of the Dehgolan plain, located in Kurdistan Province, Iran, to determine their vulnerability, reliability, and resilience in the face of recurrent droughts. The Dehgolan plain is one of the most important agricultural zones in the region, yet it has experienced significant groundwater decline over the past few decades. Continuous extraction for irrigation, coupled with reduced precipitation and recharge, has led to critical drops in groundwater levels and deterioration in aquifer storage. Using long-term hydrological and meteorological data, this research aims to (1) quantify the temporal and spatial variations of drought intensity and duration, (2) assess groundwater system behavior during drought events, and (3) evaluate overall aquifer performance through the RRV indices. The results provide a scientific foundation for improving groundwater management strategies in drought-prone regions.

#### Materials and Methods

The study area encompasses the Qorveh–Dehgolan plain in eastern Kurdistan Province, bounded by latitudes 34°56′ to 35°02′ N and longitudes 47°07′ to 47°24′ E. The region is characterized by a cold semi-arid climate with an average annual precipitation of approximately 350 mm and average temperatures ranging from −23°C to 41°C. The study utilized data from seven meteorological stations and 54 observation wells covering the 1977–2022 period. Drought assessment was performed using two major indicators: The Standardized Precipitation Index (SPI) for meteorological drought and the Groundwater Resource Index (GRI) for hydrogeological drought. SPI values were calculated for 6- and 12-month timescales using gamma probability distribution fitting. GRI was derived by standardizing deviations of monthly groundwater levels from their long-term means, thereby reflecting groundwater storage anomalies. Reliability (Rel) represents the probability of the system being in a satisfactory state, Resiliency (Res) measures the speed of recovery after a drought, and Vulnerability (Vul) quantifies the magnitude of failure when the system departs from acceptable conditions.

#### Results and Discussion

The SPI analysis revealed alternating wet and dry cycles, with severe droughts during 1977–1981, 1987–1992, and 1997–2001. SPI values ranged from −1.8 to +1.8, indicating alternating meteorological extremes and a general decline in precipitation after 1990. The GRI results showed continuous groundwater depletion, particularly in the central and eastern zones of the plain, where water-level declines exceeded 20 m. Average drought duration varied between 1.5 and 3.5 months, while 16–32% of the observation wells experienced recurrent droughts. RRV

indicators quantified system performance under drought stress. Reliability values ranged from 0.91 to 0.94 (mean 0.92), showing that the aquifer remained in a satisfactory state most of the time. Resilience ranged between 0.72 and 0.95 (mean 0.82), reflecting moderate recovery capacity after drought. Vulnerability values varied from 0.23 to 0.39 (mean 0.31), signifying moderate failure magnitude. The composite RRV index averaged 0.62 based on SPI data and 0.68 using GRI data, representing a moderately stable yet declining system. Spatially, higher RRV values occurred in northern sectors, while central and southern zones exhibited reduced resilience and higher vulnerability. Overall, the findings indicate that although the Dehgolan aquifer retains moderate reliability, its recovery capacity has weakened due to prolonged overexploitation and limited recharge. These results align with previous research in western Iran, confirming that unsustainable groundwater abstraction combined with persistent droughts is reducing aquifer stability and resilience.

### Conclusion

The integrated analysis of meteorological and groundwater droughts in the Dehgolan plain demonstrates that the aquifer system is under increasing pressure, primarily driven by climatic variability and excessive abstraction. The combined use of SPI, GRI, and RRV indices proved effective in identifying spatial and temporal patterns of groundwater vulnerability and in quantifying the system's performance under drought stress. The mean reliability value ( $\approx 0.92$ ) indicates that the groundwater system generally maintains acceptable performance, but the moderate resilience ( $\approx 0.82$ ) and vulnerability ( $\approx 0.31$ ) highlight limitations in recovery capacity and the potential for further degradation if current extraction rates persist. The RRV index values (0.62–0.68) collectively suggest a moderately stable yet increasingly fragile system. To enhance groundwater sustainability, it is essential to implement adaptive management strategies such as controlled abstraction, artificial recharge, improved irrigation efficiency, and continuous monitoring of groundwater levels. The results of this study provide a quantitative foundation for policymakers and regional planners to develop drought mitigation frameworks and long-term groundwater management plans aimed at preserving aquifer resilience and reliability under future climatic uncertainties.

**Keywords:** Groundwater, Drought, Sustainability, Surface water, Reliability index.

**Article Type:** Research Article

### Conflicts of interest

The author of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this paper.

### Data Availability Statement:

Some or all data, models, or code that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

### Authors' contribution

**Mahdieh Moradnia:** Methodology, Data analysis, Writing - original draft; **Mohsen Isari:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing; **Davood Moshir Panahi:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing; **Hamed Farooqi:** Writing - review & editing; **Seyed Dana Parizadi:** Writing - review & editing

\*Corresponding Author, E-mail: m.isari@uok.ac.ir

**Citation:** Moradnia, M., Isari, M., Moshir Panahi, D., Farooqi, H. & Parizadi, S. (2026). Assessment of groundwater resources vulnerability, reliability, and resilience under drought conditions (Case study: Dehgolan Plain, Kurdistan Province), *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 78-92.

doi: 10.22098/mmws.2026.18955.1742

Received: 02 December 2025, Received in revised form: 17 January 2026, Accepted: 22 February 2026, Published online: 27 August 2026.

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2026, Vol. 6, No. 3 pp. 78-92.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## بررسی آسیب پذیری، قابلیت اطمینان و تاب آوری منابع آب زیرزمینی در مواجهه با خشک سالی (مطالعه موردی: دشت دهگلان استان کردستان)

مهدیه مرادنیا<sup>۱</sup>، محسن ایثاری<sup>۲\*</sup>، داود مشیرپناهی<sup>۳</sup>، حامد فاروقی<sup>۴</sup>، سید دانا پریزادی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان، ایران

<sup>۳</sup> دانش آموخته مقطع دکتری، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری سازه، مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان، ایران

### چکیده

در سال های اخیر، پدیده خشکسالی باعث کاهش شدید آب های سطحی در دشت قروه-دهگلان شده است. این امر موجب افزایش بهره برداری از منابع آب زیرزمینی و تشدید افت تراز سفره های این دشت شده است. هدف از این پژوهش بررسی تاب آوری منابع آب زیرزمینی در مواجهه با خشک سالی است. برای برآورد تاب آوری منابع آب در این منطقه، در این پژوهش از دو مفهوم دیگر یعنی قابلیت اطمینان و آسیب پذیری نیز استفاده شد، که به چارچوب RRV معروف هستند. بر اساس داده های دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۲ با استفاده از شاخص های SPI و GRI و اطلاعات ایستگاه های هواشناسی و چاه های پیزومتری دشت قروه-دهگلان مورد ارزیابی قرار گرفتند. از منظر منابع آب زیرزمینی و شاخص GRI، میانگین قابلیت اطمینان، تاب آوری و آسیب پذیری به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۷۱ و ۰/۰۶ به دست آمد. این نتایج نشان می دهد شاخص های قابلیت اطمینان و تاب آوری بر اساس داده های هیدروژئولوژیکی نسبت به شاخص های هواشناسی کاهش و شاخص آسیب پذیری افزایش داشته است، که روند نزولی و افت منابع آب زیرزمینی را تأیید می کند. با این حال، شاخص RRV بر اساس SPI با میانگین ۰/۶۲ و بر اساس GRI با میانگین ۰/۶۸ نشان می دهد که امکان بازگشت منابع آب زیرزمینی به شرایط پایدار همچنان وجود دارد. نتایج کلی پژوهش بیانگر این است که با وجود کاهش برخی شاخص ها، مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی و توجه به تاب آوری می تواند اثرات خشکسالی بر منابع آب دشت قروه-دهگلان را کاهش دهد و پایداری آن ها را تضمین کند.

**واژه های کلیدی:** آب زیرزمینی، خشکسالی، پایداری، آب های سطحی، شاخص قابلیت اعتماد.

**نوع مقاله:** پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.isari@uok.ac.ir

**استناد:** مرادنیا، مهدیه، ایثاری، محسن، مشیرپناهی، داود، فاروقی، حامد، و پریزادی، سیددانا (۱۴۰۵). بررسی آسیب پذیری، قابلیت اطمینان و تاب آوری منابع آب زیرزمینی در مواجهه با خشک سالی (مطالعه موردی: دشت دهگلان استان کردستان). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۳)، ۷۸-۹۲.

doi: 10.22098/mmws.2026.18955.1742

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

*مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۷۸ تا ۹۲.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

آب زیرزمینی یک منبع حیاتی و ضروری برای میلیاردها نفر در سراسر جهان است. اهمیت این منبع در مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل دسترسی کم به منبع آب های سطحی بیشتر است، در نتیجه این منبع آب در مناطق خشک و نیمه خشک نقش بسیار مهمی در تأمین امنیت و رفاه روزانه مردم و تعادل در محیط زیست ایفا می کند (Vrba and Verhagen, 2011). شناخت صحیح و بهره برداری اصولی از این منبع آب می تواند در توسعه پایدار فعالیت های اقتصادی - اجتماعی یک منطقه نقش مؤثری داشته باشد (Izady et al., 2013). با وجود اهمیت بسیار زیاد این منابع، در بیشتر موارد منابع آب زیرزمینی به صورت بهینه مدیریت نشده اند و در معرض استفاده بیش از حد یا به طور مداوم آلودگی آن ها شدت می گیرد (World Water Assessment Programme, 2009). با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی که در بالا ذکر شد، نحوه ارزیابی و پایش سیستم های منابع آب زیرزمینی و معیارهای مربوط به آن از دغدغه های تصمیم گیرندگان و پژوهشگران در سه دهه اخیر بوده است (Booysen, 2002). تا به امروز شاخص های متعددی برای فرایندهای محیط زیستی از جمله شاخص محیط زیستی، شاخص محیط زیستی چند معیاره، شاخص تنش محیط زیستی و غیره گسترش یافته است، اما بهره برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی یک چالش میان رشته ای مهم است و تنها آثار محیط زیستی ندارد (Booysen, 2002). هر قدر میزان بهره برداری از آب زیرزمینی، سیستم آب زیرزمینی و عوامل اقتصادی، محیط زیستی، اجتماعی و سیاسی را تغییر دهد، نرخ قابل قبول برداشت را تعیین می کند؛ بنابراین لازم است شاخصی معرفی شود که همزمان شرایط محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی را در برگیرد. در این راستا یکی از اساسی ترین شاخص هایی که بررسی این اهداف را ممکن می کند، تاب آوری است. تاب آوری (برگشت پذیری) توانایی سیستم در تغییر شرایط خود هست. درواقع این شاخص برای دستگاه های منابع آب به این صورت تعریف می شود که احتمال این که سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برگردد، چه میزان است. پایداری و تاب آوری منابع آب در ایران بیشتر از هر چیزی تحت تأثیر بهره برداری از منابع آب کشاورزی قرار می گیرد (Lu et al., 2019). از آنجایی که منابع آب زیرزمینی یکی از اصلی ترین منابع آب در بخش کشاورزی می باشد، وقوع خشک سالی تهدیدی جدی برای تولید این بخش محسوب می شود (Lu et al., 2019). برای همین در سطح جهانی تغییرات عمده ای نسبت به حوادث طبیعی دیده می شود؛ به گونه ای که نگرش ها از تمرکز بر کاهش آسیب پذیری به افزایش سازگاری و تاب آوری در مقابله با حوادث تغییر کرده است (Cutter et al., 2008). به طوری که تاب آوری

به طور صریح در محدوده اهداف توسعه پایدار سازمان ملل برای افق ۲۰۳۰ تعریف شده است (Nasrnia and Ashktorab, 2021). از گذشته تا اکنون مطالعات فراوانی در زمینه نحوه ارزیابی و پایش دستگاه های منابع آب و معیارهای مربوط به آن با استفاده از شاخص تاب آوری که همزمان شرایط محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی را در برمی گیرد، انجام شده است. Keys et al. (2019)، در پژوهشی امنیت آب را عاملی برای تاب آوری جهانی جامعه انسانی معرفی کردند. آن ها در این پژوهش خود مشخص کردند که علاوه بر جریان قابل مشاهده در رودخانه ها که در کشاورزی، خانگی و صنعت استفاده می شود، اجزاء پنهان آب از جمله بارش و تبخیر - تعرق از طریق تغییر کاربری اراضی و مشخص کردن پوشش گیاهی بر تاب آوری منابع آب مؤثر هستند (Keys et al., 2019). (Scanlon et al., 2023). تاب آوری منابع آب را به کمک استراتژی های مدیریت افزایش دادند. آن ها برای این کار یک ارزیابی جامع از منابع آب شیرین فعلی با در نظر گرفتن آب های سطحی و زیرزمینی به عنوان یک منبع واحد انجام دادند. همچنین داده های ماهواره ای را برای ارزیابی منابع آب تجزیه و تحلیل کردند. در نهایت راه حل های افزایش تاب آوری شامل افزایش ذخیره سازی در مخازن سطحی و سفره های زیرزمینی تخلیه شده، انتقال آب، راه حل های سبز مانند حفاظت از جنگل ها و تالاب ها و راه حل های خاکستری مانند افزایش منابع (استفاده مجدد از فاضلاب) بودند. Faragher and Carden. (2023)، پژوهشی جهت بهبود تاب آوری آب شهری به کمک مدیریت آب های زیرزمینی در کیپ تاون آفریقای جنوبی انجام دادند. آن ها برای این کار از مقالات و پژوهش ها، اسناد و گزارش های دولتی، منابع آنلاین و مصاحبه با کارشناسان مربوطه استفاده کردند. این کار برای خانوارها و مصرف کنندگان عمده آب از جمله: شرکت ها، حکمرانی و مدیریت آب نقش مهمی دارد. مدیریت آب زیرزمینی به کمک برنامه ریزی فضایی، خدمات آب و فاضلاب و مدیریت کاربری اراضی و مدیریت محیط زیستی میسر می شود. (Torabinezhad et al., 2023). در پژوهشی مشخصه های خشک سالی و انواع آن با استفاده از شاخص بارش، تبخیر - تعرق (SPEI) در ایران طی چهار دهه گذشته را بررسی کردند. آن ها از داده های ۴۹ ایستگاه هواشناسی طی دوره آماری (۱۹۸۱-۲۰۲۰) و از شاخص SPEI در چهار مقیاس ۱۲، ۳، ۶ و ۲۴ ماهه بهره گرفتند. مطابق نتایج به دست آمده، فراوانی رخ داده خشک سالی در دوره چهل ساله از ۱۲/۳۱ درصد تا ۱۸/۱۳ درصد در مناطق مختلف کشور در کل ماه ها تکرار می شود. طول دوره خشک سالی برای SPEI-3 از ۳ ماه و برای SPEI-24 از ۸ ماه متغیر است. در مناطق شرقی و داخلی شدت خشک سالی بیشتر از مناطق شمال غربی و غربی است. در پژوهشی Yousefi and

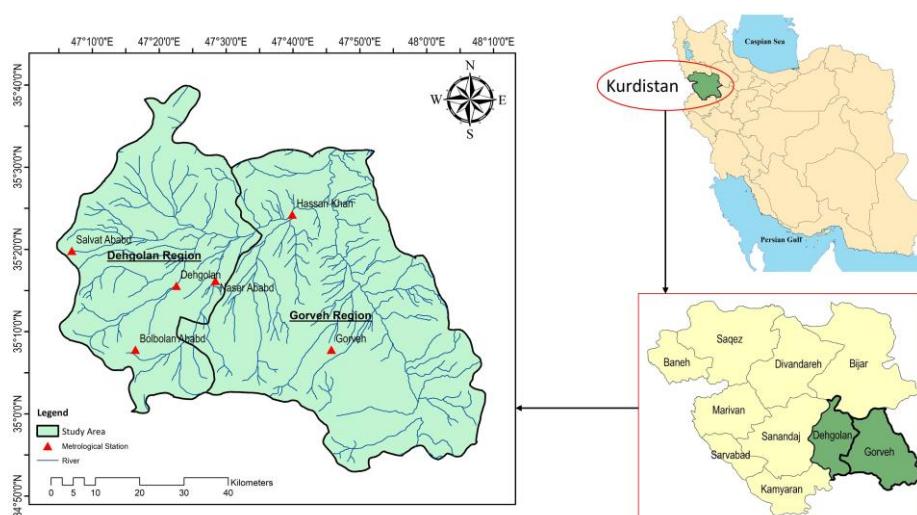
ارزیابی تاب‌آوری امکان شناخت مناطق آسیب‌پذیر و اتخاذ تصمیم‌های درست جهت برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب آب را فراهم می‌کند. در این پژوهش، استفاده از چارچوب سه‌گانه RRV (قابلیت اطمینان، تاب‌آوری، آسیب‌پذیری) در تحلیل منابع آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان، مهم‌ترین وجه تمایز و نوآوری مطالعه محسوب می‌شود. قابلیت اطمینان به این معناست که چه سهمی از منابع آب زیرزمینی قادر به تأمین نیازها هستند، تاب‌آوری نمایانگر سرعت بازگشت سیستم به وضعیت پایدار پس از خشکسالی است و آسیب‌پذیری میزان انحراف یا کاهش منابع در مقابل شرایط کم‌آبی را نشان می‌دهد. نوآوری این پژوهش بیش‌تر در کاربرد همزمان چارچوب RRV برای ارزیابی یکپارچه منابع آب زیرزمینی نهفته است، که امکان سنجش هم‌زمان قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری را فراهم کرده و فهم جامع‌تری از رفتار سیستم در شرایط خشکسالی ارائه می‌دهد.

## ۲- مواد و روش‌ها

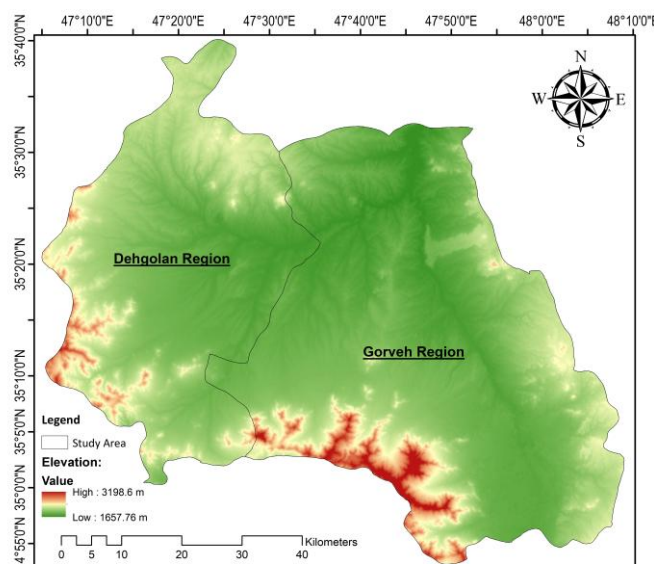
### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت قروه-دهگلان بین عرض جغرافیایی  $34^{\circ}56'$  تا  $35^{\circ}20'$  شمالی و طول جغرافیایی  $47^{\circ}07'$  تا  $47^{\circ}24'$  شرقی استان کردستان واقع شده است. این دشت از زمان‌های قدیم منطقه‌ای سرسبز با گیاهان علوفه‌ای معطر و مراتع غنی بوده و اهمیت ویژه‌ای در دامداری و کشاورزی کشور داشته است. محدوده دشت قروه-دهگلان با کد اختصاصی ۱۳۰۸ در قسمت شرقی استان کردستان قرار دارد. این دشت یکی از ۱۱ دشت حوزه آبریز سفیدرود است که با میانگین بارندگی سالانه ۳۵۲ میلی‌متر و اقلیم سرد و نیمه خشک در شمال غرب همدان و شرق شهرستان سنندج جای دارد. حداقل و حداکثر دمای آن به ترتیب ۲۳- و ۴۱ درجه سانتی‌گراد است، همچنین حداکثر تبخیر در تیر به بیش‌تر از ۳۵۰ میلی‌متر و میانگین رطوبت نسبی سالانه ۴۵ درصد می‌رسد (عباسی و همکاران، ۲۰۱۶). اراضی دشت جز اراضی قابل کشت است که خاک آن از نظر زراعت و آبیاری دارای قابلیت بالایی بوده و کشت گیاهان بومی و زراعی با هزینه پایین عملکرد موفقی دارند. این اراضی دارای خاک‌های عمیق با قدرت نگهداری آب زیاد با بافت سنگین و متوسط هستند. موقعیت منطقه مدنظر و نقشه رقوم ارتفاعی در شکل ۱ نشان داده شده است.

(Zandifar, 2023) روند تغییرات افت سطح آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان را با استفاده از آمار ۱۰۴ حلقه چاه مشاهده‌ای در طی سه دوره زمانی (۸۷-۸۰، ۹۲-۸۷، ۹۲-۹۷) را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نقشه‌های خطوط هم‌عمق، هم‌تراز و پهنه‌بندی تغییرات افت سطح آب زیرزمینی را با روش درون‌یابی و در محیط نرم‌افزار GIS به‌دست آوردند. هیدروگراف‌های تراز آب زیرزمینی نشان داد که در دشت قروه طی مدت ۲۰ سال افت سطح آب ۱۳/۸ متر است، همچنین تغییرات حجم مخزن ۵۶/۲ میلیون مترمکعب کسری داشت. (Behboudian et al. 2023). به ارزیابی تاب‌آوری زمانی و مکانی در برابر خشک‌سالی در حوزه آبخیز زرينه رود پرداختند. در این پژوهش ارزیابی با اصول هفت‌گانه تاب‌آوری (RP7) انجام شد. برای کمی‌سازی هر یک از این اصل، معیارها و زیر معیارهایی تعریف شد و وزن دهی به این معیارها و زیر معیارها از مدل‌های SWAT و MODSIM به تفکیک هر زیر حوزه انجام شد. سری زمانی ماهانه تاب‌آوری هر زیر حوزه با استفاده از نظریه استنتاج شهودی، تحت سه سناریوی تغییر اقلیم RCP4.5، RCP8.5 و RCP6 و ۱۲۸ سناریوی مدیریتی برای دو دوره بلندمدت (۲۰۹۸-۲۰۲۰) و کوتاه‌مدت (۲۰۴۹-۲۰۲۰) به دست آمد. در همه زیر حوزه‌ها مقدار تاب‌آوری در سناریوی مدیریتی پایه بین ۰/۵۳ تا ۰/۶ است، که نشان‌دهنده وضعیت متوسط تمام زیر حوزه‌ها و نیاز به اجرای سناریوهای مدیریتی برای افزایش تاب‌آوری حوزه مدنظر است. Ismayilov and Suleymanov (2024) از روش‌های کمی و کیفی برای رسیدگی به ابعاد مختلف کمبود آب در کشور آذربایجان پرداختند. میزان برداشت آب از منابع طی دوره آماری ۲۲ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۲) را تجزیه و تحلیل کردند. کم‌ترین میزان برداشت در سال ۲۰۰۲ و بیش‌ترین میزان برداشت در سال ۲۰۲۲ بود. همچنین میزان برداشت آب در این مدت بین ۹/۹۱ تا ۱۳/۰۳ کیلومترمکعب متغیر بوده است. آن‌ها پیش‌بینی کرده‌اند که در صورت ادامه برداشت آب با همین نرخ، میزان مصرف سالانه منابع آب در آذربایجان به حدود ۱۳/۸ کیلومترمکعب در سال ۲۰۳۰، ۱۴/۸ کیلومترمکعب در سال ۲۰۴۰ و ۱۵/۸ کیلومترمکعب در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید (Babaousmail et al. 2024). به کمی‌سازی اثرات خشکسالی در شرق آفریقا بر اساس چارچوب قابلیت اطمینان-تاب‌آوری-آسیب‌پذیری (RRV) پرداختند. آن‌ها از دو مجموعه داده SPEI برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های خشکسالی (فراوانی، مدت و شدت) از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۱ استفاده کردند. دامنه متوسط RRV از ۰/۶۱ تا ۰/۸ نشان‌دهنده وضعیت پایدار منابع آب در طول مطالعه بود. در سال‌های اخیر، ارزیابی تاب‌آوری منابع آب، به‌خصوص در شرایط بحرانی، مورد توجه پژوهشگران بوده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- موقعیت دشت قروه دهگلان: (الف) موقعیت جغرافیایی، (ب) نقشه رقوم ارتفاعی دیجیتال.

Figure 1. Location of the Qorveh-Dehgolan Plain: (a) geographic setting; (b) digital elevation model (DEM)

## ۲-۲- بارندگی

کاهش یافته است. متوسط بارندگی سالانه ۳۵۲ میلی متر و بیشترین و کمترین نرخ میانگین بارندگی به کمک ایستگاههای باران سنجی به ترتیب در صلوات آباد با مقدار ۴۳۸/۵۶ و ناصرآباد با مقدار ۲۵۴/۹۷ میلی متر به دست آمد. در نهایت با استفاده از این ایستگاه ها نمودار توزیع بارش (شکل ۲) تهیه شد.

با توجه به این که ایستگاههای قروه-دهگلان در محدوده ۱۳۰۸ واقع شده اند، ایستگاههای تحت نظارت وزارت نیرو و هواشناسی در فاصله ای نزدیک از آبخوان قروه و دهگلان قرار دارند. در مدت ۲۶ سال (از سال آبی ۱۳۷۷-۷۸ تا ۱۴۰۱-۰۲) بررسی مقدار بارندگی نشان داد که بارندگی روند ثابتی نداشته و

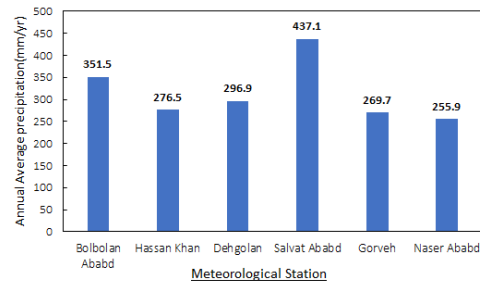
## ۲-۴- روش RRV (Reliability- Resiliency- Vulnerability)

برای نظارت در عملکرد منابع آب و سلامت آن استفاده از شاخص‌های گوناگون ضروری و مهم است. به همین جهت، چارچوب قابلیت اطمینان (پایایی)، تاب‌آوری (برگشت‌پذیری) و آسیب‌پذیری (RRV) توسط هاشیموتو در سال ۱۹۸۲ ارائه شد. زمانی که یک سیستم نیاز مخزنی را که برای آن طراحی شده است برآورد می‌کند، در این حالت وضعیت رضایت بخش است، در غیر این صورت سیستم در حالت خرابی قرار دارد. با ادغام کردن معیارهای قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری در افزایش ارزیابی و تحلیل خطر خشکسالی یک روش جامع ارائه می‌شود (Hasimoto et al., 1982). برای تجزیه و تحلیل خشکسالی با رویکرد قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری، ابتدا لازم است شاخص‌های خشکسالی GRI و SPI محاسبه شوند.

## ۲-۵- شاخص استاندارد شده بارش (SPI)

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) یکی از شاخص‌های پرکاربرد در پژوهش‌های خشکسالی هواشناسی است و اخیراً توجه زیادی به آن شده است. مهم‌ترین مزیت SPI توانایی محاسبه آن در مقیاس‌های زمانی متفاوت است، که امکان پایش تغییرات خشکسالی هواشناسی را فراهم می‌کند. با این حال، این شاخص صرفاً بر اساس مقادیر بارندگی محاسبه می‌شود و به تنهایی نمی‌تواند وضعیت منابع آب سطحی و زیرزمینی یا مدیریت کشاورزی را ارزیابی کند (Mishra and Singh, 2010). این شاخص برای اولین بار توسط McKee et al. 1993 ارائه شد که بر اساس توزیع احتمال بارش طولانی مدت با استفاده از تابع گاما طراحی شده است. شاخص بارش استاندارد شده تنها از مقدار بارش روزانه یا ماهانه را به کار می‌گیرد زیرا این شاخص بر اساس دو فرضیه پایدار است: ۱- به جز بارش دیگر متغیرهای اقلیمی دارای روند زمانی نیستند. ۲- تغییرات بارش بیش‌تر از دیگر متغیرهای اقلیمی از جمله تبخیر و ترق و دما است. این شاخص از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (1)$$

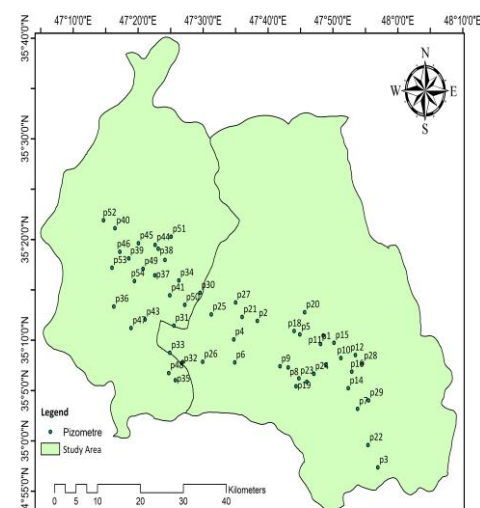


شکل ۲: نحوه توزیع بارندگی در دشت قروه- دهگلان در دوره آماری ۱۳۷۷-۱۴۰۲.

Figure 2. Spatial distribution of precipitation over the Qorveh-Dehgolan Plain during the 1377-1402

## ۲-۳- مشخصات هیدرولیکی

محدوده مطالعاتی دشت قروه- دهگلان به هفت قسمت دشت‌های چهاردولی، قروه و دهگلان و ارتفاعات مشرف بر دشت‌های چهاردولی، قروه و دهگلان و ارتفاعات شمالی تقسیم می‌شود. دشت قروه- دهگلان از دشت‌های زراعی استان کردستان بوده و دارای منابع آب زیرزمینی متعدد و خوبی هستند که از طریق چشمه‌ها، قنات، چاه نیمه عمیق و چاه عمیق استخراج می‌شوند. در این مطالعه از ۵۴ چاه مشاهده ای واقع در دشت قروه- دهگلان (از P1 تا P29 چاه‌های مشاهده‌ای دشت قروه و از P30 تا P54 چاه‌های مشاهده‌ای دشت دهگلان) طی دوره آماری ۱۳۷۷-۷۸ تا ۱۴۰۱-۰۲ برای انجام پژوهش بهره گرفته شد. موقعیت مکانی چاه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نقشه پراکندگی و موقعیت مکانی چاه‌های پیزومتری دشت قروه- دهگلان.

Figure 3. Distribution map and spatial locations of piezometric wells across the Qorveh-Dehgolan Plain.

جدول ۱: طبقه بندی شدت خشکسالی ها و ترسالی ها بر حسب مقادیر SPI و GRI (Hashimoto et al., 1982)

| GRI        | SPI        | Class                |
|------------|------------|----------------------|
| 2 <        | 2 <        | Very intense wetness |
| 1.5 to 2   | 1.5 to 2   | Intense wetness      |
| 1 to 1.5   | 1 to 1.5   | Moderate wetness     |
| -1 to 0.99 | -1 to 0.99 | Normal               |
| -1.5 to -1 | -1.5 to -1 | Moderate drought     |
| -2 to -1.5 | -2 to -1.5 | Intense drought      |
| -2 >       | -2 >       | Very intense drought |

## ۷-۲- محاسبه شاخص قابلیت اطمینان

پراکاربردترین و قدیمی ترین معیار عملکرد سیستم های منابع آب، قابلیت اطمینان است که این گونه توسط Hashimoto et al. (1982) تعریف شده است. رابطه ۳ نشان دهنده احتمال عدم وقوع شکست (خشکسالی) در مدت زمان معین است.

$$Rel = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (3)$$

که در آن  $d(j)$  مدت زمان زامین رویداد شکست (مدت خشکسالی های فردی)،  $M$  تعداد رویداد های شکست (تعداد خشکسالی ها) و  $T$  تعداد کل فواصل زمانی (تعداد بازه های زمانی) است.

## ۸-۲- محاسبه شاخص تاب آوری

تاب آوری به ظرفیت منطقه برای بازیابی نیاز آب از اثرات خشکسالی بعد از یک دوره طولانی گفته می شود. هرچه تاب آوری بیشتر باشد، پایداری آب بیشتر است. هر قدر خشکسالی بیش تر طول بکشد، سیستم آب مقاومت پایین تری دارد. طبق تعریف هاشیموتو تاب آوری مساوی است با معکوس مقدار میانگین زمانی که سیستم در حالت نامطلوب می گذراند. رابطه ۴ برای محاسبه شاخص تاب آوری نشان داده شده است.

$$Res = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (4)$$

که در آن  $X_i$  بارش مشاهده ای،  $X$  میانگین بارش و  $\sigma$  انحراف معیار دوره بارندگی است.

## ۶-۲- شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

خشکسالی در منابع آب زیرزمینی زمانی اتفاق می افتد که سطح تراز آب از سطح معمول پایین تر باشد. وجود انحراف از حالت نرمال وجه اشتراک تمام خشکسالی ها است. زمانی که مقدار بارندگی در یک دوره کم تر از متوسط بلند مدت باشد، معمولاً خشکسالی آب های زیرزمینی رخ می دهد (Peters et al., 2003). تا به امروز شاخص های بسیاری برای پایش و ارزیابی خشکسالی ارائه شده است ولی بعضی از آنها به دلیل قابل اجرا بودن و سادگی بیش تر مورد استفاده قرار می گیرند.

شاخص GRI یا شاخص منبع آب زیرزمینی برای پیش بینی خشکسالی منابع آب زیرزمینی توسط مندیسینو در سال ۲۰۰۸ در کالابریای ایتالیا آزمایش شد. شاخص GRI یک معیار غیر مستقیم از مقدار تغذیه سفره و کاهش سطح آب و یک منبع غیر مستقیم از خشکسالی است. مقادیر به دست آمده از این شاخص تغییرات مکانی زیادی دارد و حساس به خصوصیات سنگ شناسی منطقه مورد مطالعه است (Mendicino et al., 2008). این شاخص با استاندارد کردن سطح سفره آب زیرزمینی از طریق محاسبه اختلاف میان تراز سطح آب و میانگین بلند مدت آن و تقسیم بر انحراف معیار سطح ۹۹ درصد (رابطه ۲)، شاخص سطح آب استاندارد حاصل می شود.

$$GRI = \frac{DY, m - \mu D, m}{\sigma D, m} \quad (2)$$

در این رابطه  $DY, m$  مقدار تراز سطح آب زیرزمینی در سال  $y$  و ماه  $m$ ،  $\mu D, m$  میانگین مقدار تراز آب زیرزمینی در ماه  $m$  در طول دوره آماری و  $\sigma D, m$  انحراف معیار مقدار تراز آب زیرزمینی در ماه  $m$  در طول دوره آماری است. جدول ۱ شروع و پایان خشکسالی و طبقه بندی این شاخص را نشان می دهد.

## ۹-۲- محاسبه شاخص آسیب‌پذیری

آسیب‌پذیری عدم موفقیت یک منطقه در بازیابی از اثرات خشکسالی را نشان می‌دهد. بنابراین، چیزی که به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد، در دسترس بودن آب است. رابطه ۵ آسیب‌پذیری شکست را عنوان می‌کند که این گونه توسط Hasimoto et al (1982) تعریف شده است: مجموع کسری تقسیم بر تعداد رویدادهای کسری.

$$Vul = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j) \quad (5)$$

که در آن  $v(j)$  میانگین رویداد های کسری یا مجموع مقادیر شاخص خشکسالی در کل دوره های خشکسالی است.

## ۱۰-۲- محاسبه شاخص بهینه سازی RRV

بنابراین شاخص بهینه سازی RRV با ترکیب قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای تخمین کلی شرایط خشکسالی و ارزیابی پایداری سیستم منابع آبی در نظر محاسبه می‌شود. RRV نشان دهنده پایداری منابع آب است، مقادیر آن بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. مقادیر RRV را می‌توان به ۵ کلاس دسته‌بندی کرد: خیلی زیاد (۰/۸۱ تا ۱)، زیاد (۰/۶۱ تا ۰/۸)، متوسط (۰/۴۱ تا ۰/۶)، کم (۰/۲۱ تا ۰/۴) و در نهایت خیلی کم (۰ تا ۰/۲) که با نزدیک شدن RRV به ۱ سیستم منابع آب به پایداری بیشتر و با نزدیک شدن به ۰ به پایداری کمتر دست می‌یابد (عباسی و همکاران، ۲۰۱۶). رابطه ۶ برای محاسبه شاخص بهینه سازی کاربرد دارد.

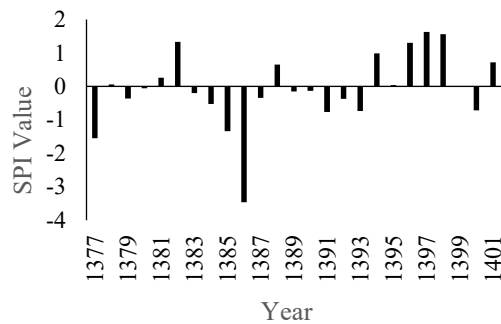
$$RRV = [Rel \times Res \times Vul]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

## ۳- نتایج و بحث

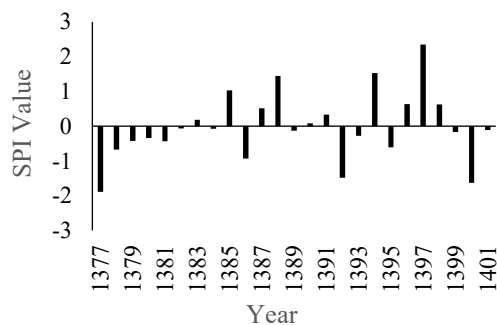
در این بخش ابتدا، نتایج به دست آمده از شاخص های خشکسالی SPI و GRI در گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه مورد ارائه شده است. سپس نتایج ویژگی‌های خشکسالی یعنی شدت خشکسالی، مدت زمان خشکسالی و فراوانی خشکسالی بر اساس شاخص های SPI-01 و GRI-01 ارائه می‌شود. در گام بعد نتایج به دست آمده برای معیارهای قابلیت اطمینان-تاب‌آوری و آسیب‌پذیری و شاخص RRV به کمک شاخص های SPI-01 و GRI-01 ارائه شد.

## ۱-۳- شاخص بارش استاندارد شده SPI

این شاخص برای دشت قروه- دهگلان برای هفت ایستگاه هواشناسی در دوره آماری ۱۴۰۱-۰۲ تا ۱۳۷۷-۷۸ در گام های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه تعیین شد. نتایج برای بازه زمانی ۱۲ ماهه در شکل ۴ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- SPI-12 مربوط به ایستگاه‌های دشت قروه-دهگلان سال های ۱۳۷۷-۷۸ تا ۱۴۰۱-۰۲: (الف) دهگلان و (ب) صلوات آباد.

Figure 4. SPI-12 time series for stations in the Qorveh-Dehgolan Plain over the 1377-1401 period: (a) Dehgolan; (b) Salavat Abad.

نتایج شاخص SPI در گام زمانی ۱۲ ماهه برای دشت قروه- دهگلان (شکل ۴) نشان داد که ایستگاه دهگلان با مقدار ۳/۴۵- و ایستگاه صلوات‌آباد با مقدار ۲/۳۴- به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار SPI را داشته‌اند. سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۶ و ۱۴۰۰ به ترتیب با مقادیر ۱/۶۲-، ۱/۵۵- و ۱/۳۷- به‌عنوان سال‌های خشکسالی شناسایی شدند، به‌ویژه سال ۱۳۷۷ که در تمام ایستگاه‌ها خشکسالی رخ داده و یکی از خشک‌ترین سال‌های منطقه محسوب می‌شود. در سال ۱۴۰۰ نیز تقریباً در تمام ایستگاه‌ها خشکسالی گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهد

خشکسالی‌ها اغلب متوسط تا شدید هستند. بیش‌ترین شدت خشکسالی مربوط به پیزومترهای گنجی ۶/۱۱-، حسن‌آباد ۵/۶- و شمال شرقی حاجی پموق ۵/۳- و کم‌ترین شدت مربوط به پیزومترهای سرنجیانه ۰/۶۵- و تازه‌آباد قروچای ۰/۷۸- است. مدت خشکسالی‌ها معمولاً بین ۱/۵ تا ۳/۵ ماه است. الگوی کوتاه‌مدت اما مکرر خشکسالی در برخی چاه‌ها نشان می‌دهد که حتی دوره‌های کوتاه کم‌آبی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی داشته باشد. بیشترین مدت خشکسالی در پیزومترهای عالی‌آباد ۳/۵۷، آب باریک ۳/۳۱، شه‌بیه ۳، حسن‌آباد ۲/۸۸ و گنجی ۲/۸۵ مشاهده شد و کم‌ترین مدت در پیزومترهای سرنجیانه ۰/۳۵ و تازه‌آباد قروچای ۰/۴۸ ثبت شد. درصد وقوع خشکسالی‌ها از حدود ۱۶٪ تا ۳۲٪ متغیر است و در تمام پیزومترها بیشترین درصد فراوانی مربوط به وضعیت نرمال بوده و ترسالی بسیار شدید کم‌ترین درصد فراوانی را داشته است. بیشترین فراوانی خشکسالی در پیزومترهای عالی‌آباد، آب باریک، حسن‌آباد، گنجی، شه‌بیه و شمال شرقی حاجی پموق و کم‌ترین آن در سرنجیانه ۳/۵۳ درصد، تازه‌آباد قروچای ۵/۷ درصد و برمه‌تپه ۱۰/۹ درصد مشاهده شد. این نتایج با پژوهش Yousefi Zandifar and (۲۰۲۳) مطابقت دارد، که نشان می‌دهد منابع آب زیرزمینی دشت قروه-دهگلان در طول دوره آماری بیست ساله روندی نزولی به سمت خشکسالی داشته و کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه را تایید می‌کند. علاوه بر عوامل اقلیمی، تغییرات انسانی مانند برداشت آب و مدیریت منابع نیز بر شدت و مدت خشکسالی و شاخص‌های تاب‌آوری، آسیب‌پذیری و قابلیت اطمینان تأثیرگذار است و در صورت کاهش برداشت‌ها، اثرات انسانی تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

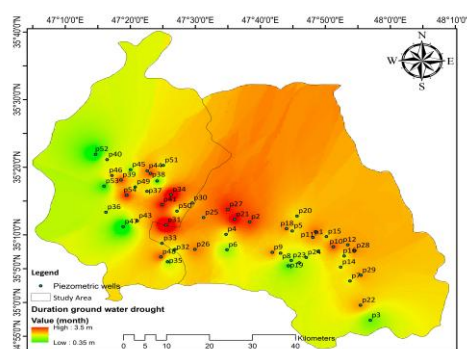
### ۳-۳- نتایج معیارهای قابلیت اطمینان- تاب‌آوری- آسیب‌پذیری بر اساس شاخص SPI

با استفاده از شاخص SPI-1 معیارهای قابلیت اطمینان- تاب‌آوری- آسیب‌پذیری و شاخص RRV برای دوره آماری ۲۶ ساله در هفت ایستگاه هواشناسی در دشت قروه-دهگلان تعیین شد. نتایج در جدول ۲ و شکل ۶ نشان داده شده است.

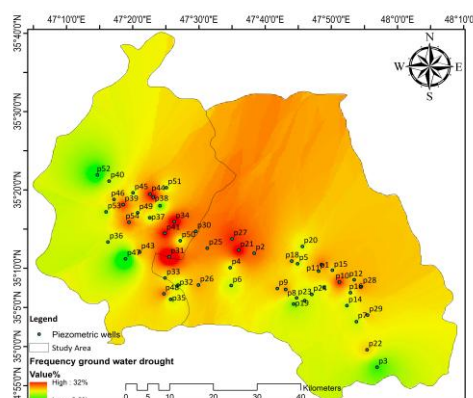
که کاهش گسترده بارش در مقیاس منطقه‌ای و تداوم دوره‌های کم‌بارشی، نقش مهمی در وقوع خشکسالی‌های شدید و مکرر داشته است. علاوه بر آن، این تغییرات، تحت تأثیر عوامل انسانی مانند برداشت آب و تغییر کاربری اراضی نیز می‌تواند تشدید شود، که بر شاخص‌های تاب‌آوری، آسیب‌پذیری و قابلیت اطمینان منابع آب زیرزمینی اثرگذار است.

### ۳-۲- نتایج ویژگی‌های خشکسالی بر اساس شاخص GRI

با استفاده از شاخص GRI-1 ویژگی‌های خشکسالی یعنی میانگین میانگین مدت و میانگین فراوانی خشکسالی در دوره آماری ۲۶ ساله (۱۳۷۷-۱۴۰۲) برای ۵۴ چاه پیزومتری مشخص شد و در شکل ۵ نشان داده شده است.



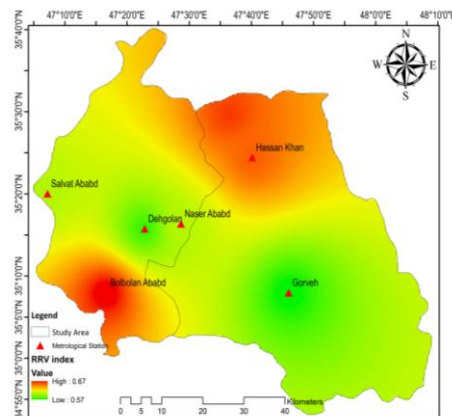
(الف)



(ب)

شکل ۵- خشک‌سالی چاه‌های پیزومتری دشت قروه-دهگلان طی سال‌های ۱۳۷۷-۱۴۰۲: (الف) مدت زمان، (ب) فراوانی.  
Figure 5. Drought characteristics of piezometric wells in the Qorveh-Dehgolan Plain during the 1377-1402 period: (a) duration; (b) frequency.

طبق شکل ۵، شدت خشکسالی در دشت قروه-دهگلان به طور متوسط در محدوده ۳- تا ۵- قرار دارد، که نشان می‌دهد



شکل ۶- شاخص RRV ایستگاه‌های هواشناسی دشت قروه- دهگلان در دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۲.

Figure 6. RRV index at meteorological stations across the Qorveh-Dehgolan Plain over the 1377-1402 statistical period.

شاخص RRV باید بین عدد ۰ تا ۱ قرار بگیرد. مقدار آن برای ایستگاه‌های خسروآباد و دهگلان ۰/۶۶، صلوات آباد ۰/۶۴، بلبان آباد ۰/۶۳، حسن خان و ناصرآباد ۰/۵۹ و قروه ۰/۵۷ به دست آمد. ایستگاه‌های بلبان آباد، دهگلان، خسروآباد و صلوات آباد دارای بالاترین مقادیر RRV هستند که نشان دهنده شرایط نسبتاً بهتر در برابر خشکسالی است. ایستگاه‌های حسن خان، قروه و ناصرآباد در سطح متوسط قرار گرفته و الگوی پایدار اما نه چندان مقاوم در برابر خشکسالی را نشان می‌دهند. مقدار RRV بین ۰/۵۷ تا ۰/۶۶ تغییر می‌کند و میانگین آن ۰/۶۲ است. این شاخص بر اساس سه معیار قبلی محاسبه شده و وضعیت کلی سیستم را نشان می‌دهد. در کل، شاخص RRV وابستگی بیش‌تری به ترکیب تاب‌آوری و آسیب‌پذیری دارد و کم‌تر از قابلیت اطمینان به تنهایی تأثیر می‌گیرد. همچنین بیانگر نقش تعیین‌کننده توان بازیابی سیستم و میزان افت منابع در شکل‌گیری وضعیت کلی خشکسالی ایستگاه‌ها است.

### ۳-۴- نتایج معیارهای قابلیت اطمینان- تاب‌آوری- آسیب‌پذیری بر اساس شاخص GRI

با استفاده از شاخص GRI-1 معیارهای قابلیت اطمینان- تاب‌آوری - آسیب‌پذیری و شاخص RRV برای ۵۴ چاه پیژومتری مشخص شد و نتایج در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نمایش داده شده است.

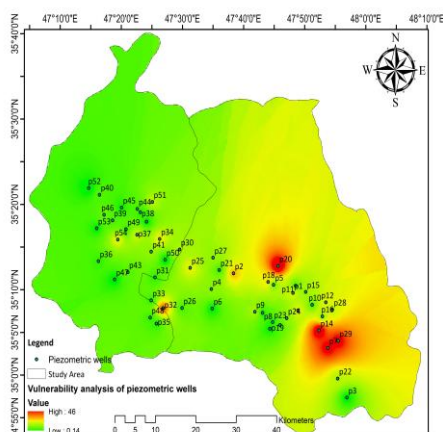
جدول ۲ نتایج RRV برای ایستگاه‌های هواشناسی دشت قروه- دهگلان در سال‌های ۱۳۷۷-۱۴۰۲

Table 2. Results of the RRV analysis for meteorological stations in the Qorveh-Dehgolan Plain over the 1377-1402 period.

| RRV  | Vulnerability | Resiliency | Reliability | Stations    |
|------|---------------|------------|-------------|-------------|
| ۰/۶۳ | ۰/۲۸          | ۰/۹۵       | ۰/۹۳        | Bolban Abad |
| ۰/۵۹ | ۰/۲۶          | ۰/۸۲       | ۰/۹۴        | Hassan Khan |
| ۰/۶۶ | ۰/۳۵          | ۰/۸۷       | ۰/۹۲        | Khosroabad  |
| ۰/۶۶ | ۰/۳۹          | ۰/۷۸       | ۰/۹۳        | Dehgolan    |
| ۰/۶۴ | ۰/۳۹          | ۰/۷۲       | ۰/۹۱        | Salwatabad  |
| ۰/۵۷ | ۰/۲۳          | ۰/۸۵       | ۰/۹۳        | Qorveh      |
| ۰/۵۹ | ۰/۲۸          | ۰/۷۸       | ۰/۹۱        | Naserabad   |

طبق نتایج جدول ۲، میانگین شاخص قابلیت اطمینان برای ایستگاه‌های دشت قروه- دهگلان ۰/۹۲ به دست آمد که نشان می‌دهد احتمال وقوع خشکسالی شدید نسبتاً پایین است. بیشترین مقدار قابلیت اطمینان در ایستگاه حسن خان ۰/۹۴ و کمترین در ایستگاه‌های صلوات‌آباد و ناصرآباد ۰/۹۱ ثبت شد. شاخص قابلیت اطمینان نشان می‌دهد چه درصدی از سیستم منابع آب قادر به عملکرد مطلوب هستند و هر چه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، سیستم قابل اعتمادتر است. شاخص تاب‌آوری بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۵ متغیر بود و میانگین آن ۰/۸۲۴ به دست آمد، که نشان می‌دهد توانایی ایستگاه‌ها در بازگشت به شرایط نرمال پس از خشکسالی یکسان نیست. بیشترین تاب‌آوری در ایستگاه بلبان‌آباد ۰/۹۵ و کمترین در صلوات‌آباد ۰/۷۲ مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد برخی مناطق مانند بلبان‌آباد توان بازسازی سریع‌تر پس از خشکسالی دارند، در حالی که ایستگاه‌هایی مانند دهگلان و صلوات‌آباد تاب‌آوری کم‌تری دارند و بازگشت آن‌ها به شرایط نرمال دشوارتر است. شاخص آسیب‌پذیری نیز بین ۰/۲۳ تا ۰/۳۹ متغیر بود و میانگین آن ۰/۳۱ است. کم‌ترین آسیب‌پذیری در ایستگاه‌های قروه و حسن خان و بیشترین در ایستگاه‌های دهگلان و صلوات‌آباد مشاهده شد. کاهش شاخص آسیب‌پذیری به معنای مقاومت بیشتر در برابر خشکسالی و تاب‌آوری بالاتر است. بنابراین، ایستگاه‌هایی مانند قروه و حسن خان در مقابل خشکسالی مقاوم‌تر هستند، در حالی که دهگلان و صلوات‌آباد حساسیت بالاتری نسبت به کم‌آبی نشان می‌دهند.

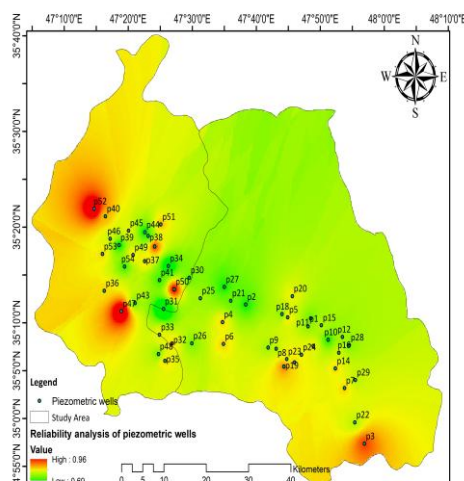
با توجه به شکل ۸، تاب آوری چاه های پیزومتری طی دوره ۲۶ ساله به طور متوسط از ۰/۱ تا ۰/۴۷ متفاوت بود. میانگین تاب آوری کل دشت ۰/۱ بود که نشان دهنده تاب آوری بسیار پایین در بیشتر دشت قروه-دهگلان، به خصوص در دشت قروه بود. بیشترین تاب آوری مربوط به پیزومترهای سرنجیانه، تازه آباد قروچای، خلیل آباد پیر بابا علی و زاغه بود. این نتایج می تواند بیانگر سرعت بالاتر بازیابی سطح آب زیرزمینی در این مناطق پس از دوره های خشکسالی نسبت به سایر بخش های دشت باشد.



شکل ۹- آسیب پذیری چاه های پیزومتری دشت قروه-دهگلان در دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۲.

Figure 9. Vulnerability analysis of piezometric wells across the Qorveh-Dehgolan Plain over the 1377-1402 statistical period.

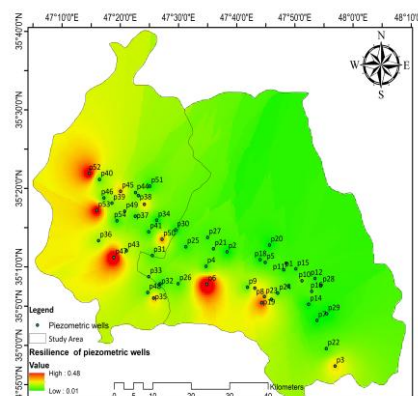
همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده، آسیب پذیری در دشت قروه-دهگلان به طور میانگین از ۰/۱ تا ۰/۴۶ طی سالهای ۱۴۰۲-۱۳۷۷ متفاوت بود. برای کل دشت میانگین آسیب پذیری ۰/۶ به دست آمد که عددی بزرگ است. بیشترین آسیب پذیری در دشت قروه و مربوط به پیزومترهای سریش آباد، روستای شکوه آباد، روستای مظفرآباد و دزج بود. کمترین آسیب پذیری در دشت دهگلان و مربوط به پیزومترهای طهماسب قلی، تازه آباد قروچای، حسینی و سرنجیانه بود. این اختلافات عمدتاً ناشی از تفاوت در شرایط هیدروژئولوژیکی و شدت بهره برداری از منابع آب زیرزمینی در بخش های مختلف دشت است.



شکل ۷- قابلیت اطمینان چاه های پیزومتری دشت قروه-دهگلان در دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۲.

Figure 7. Reliability analysis of piezometric wells across the Qorveh-Dehgolan Plain over the 1377-1402.

طبق شکل ۷، میانگین قابلیت اطمینان در دوره ۲۶ ساله دشت قروه-دهگلان از ۰/۶۹ تا ۰/۹۶ متغیر است. میانگین به دست آمده برای کل دشت عدد ۰/۸۱ است که به معنای قابل اعتماد بودن منابع آب زیرزمینی است. کمترین قابلیت اطمینان در دشت قروه اتفاق افتاده است. بیشترین قابلیت اطمینان در پیزومترهای سرنجیانه، تازه آباد قروچای، طهماسب قلی، برمه تپه و حسینی و کمترین مقدار مربوط به پیزومترهای عالی آباد، آب باریک، شمال شرقی حاجی پموق و گنجی. این اختلاف می تواند ناشی از تفاوت در شدت برداشت آب زیرزمینی، شرایط محلی آبخوان و میزان تغذیه طبیعی در بخش های مختلف دشت باشد.



شکل ۸- تاب آوری چاه های پیزومتری دشت قروه-دهگلان در دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۲.

Figure 8. Resilience analysis of piezometric wells in the Qorveh-Dehgolan Plain over the 1377-1402

است. شاخص تاب‌آوری بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۵ قرار دارد و میانگین آن ۰/۸۲ است، که نشان می‌دهد توانایی دشت در بازگشت به شرایط نرمال پس از خشکسالی یکسان نیست. مقایسه دوره اول (۱۳۷۷-۱۳۸۹) و دوم (۱۳۹۰-۱۴۰۲) نشان می‌دهد برخی ایستگاه‌ها کاهش و برخی افزایش تاب‌آوری داشته‌اند.

- بر اساس شاخص GRI، قابلیت اطمینان در دوره ۲۶ ساله از ۰/۶۹ تا ۰/۹۶ متغیر است و میانگین آن ۰/۸۲ است. بیشترین فراوانی مربوط به وضعیت نرمال بوده و پایایی در دوره دوم بهبود یافته است. کم‌ترین قابلیت اطمینان به برخی پیزومترها محدود است. کم‌ترین مقدار قابلیت اطمینان مربوط به پیزومترهای عالی آباد، آب باریک، شمال شرقی حاجی پموق و گنجی بود.

- RRV برای کل دشت بین ۰/۲۹ تا ۰/۹۱ متغیر بوده و میانگین آن ۰/۶۸ است. کاهش تاب‌آوری در دوره دوم باعث افت کلی RRV شده است، حتی با وجود بهبود قابلیت اطمینان و کاهش آسیب‌پذیری، که نشان می‌دهد مدیریت منابع آب باید بر افزایش تاب‌آوری تمرکز کند. - پژوهش‌های آینده می‌توانند با یکپارچه‌سازی داده‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی همراه با شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی و مدیریتی، چارچوبی جامع و بین‌رشته‌ای برای تحلیل تاب‌آوری دشت ارائه کنند و همزمان با بهره‌گیری از داده‌های روزانه یا هفتگی، مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی پیشرفته و سناریوهای اقلیمی آینده، دقت محاسبات RRV و پیش‌بینی تأثیر خشکسالی‌ها بر تاب‌آوری منابع آب زیرزمینی را بهبود بخشند.

### تضاد منافع نویسندگان

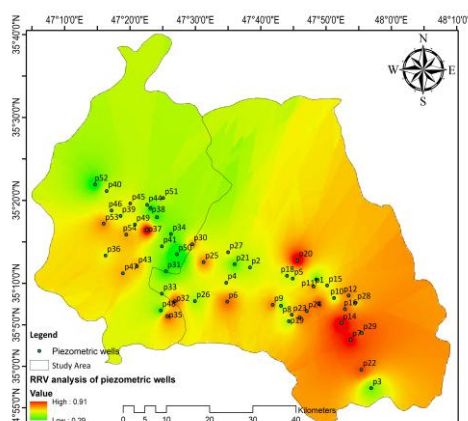
نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله در صورت درخواست به نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشد.

### مشارکت نویسندگان

**مهديه مرادنيا:** روش شناسی، تحلیل داده‌ها، نگارش، پیش‌نویس؛ **محسن اینثاری:** مفهوم سازی، روش شناسی، نگارش، بازبینی و ویرایش؛ **داوود مشیرپناهی:** مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نگارش، بازبینی و ویرایش؛ **حامد فاروقی:** نگارش، بازبینی و ویرایش؛ **سید دانا پریزادی:** نگارش، بازبینی و ویرایش.



شکل ۱۰- RRV چاه‌های پیزومتری دشت قروه-دهگلان در دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۲.

Figure 10. RRV analysis of piezometric wells across the Qorveh-Dehghan Plain over the 1377-1402

طبق شکل ۱۰، شاخص RRV طی ۲۶ سال در دشت قروه-دهگلان از ۰/۲۹ تا ۰/۹۱ متفاوت بود، به این معنی که پایداری در برخی مناطق دشت پایین، در برخی مناطق متوسط و در برخی مناطق بالا است. RRV به طور متوسط برای کل دشت عدد ۰/۶۸ بود. بیش‌ترین RRV مربوط به پیزومترهای دهگلان، سریش آباد و روستای شکوه آباد و کم‌ترین مقدار RRV مربوط به پیزومترهای طهماسب قلی، ده رشی و عالی آباد بود. این پراکندگی در شاخص RRV احتمالاً ناشی از تفاوت‌های مکانی در پایداری زمین و میزان تأثیر عوامل هیدروژئولوژیکی و برداشت آب زیرزمینی در نقاط مختلف دشت است.

### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از شاخص‌های SPI، GRI، ویژگی‌های خشکسالی و شاخص RRV و راهکارهایی جهت افزایش تاب‌آوری در دشت قروه-دهگلان به صورت خلاصه ارائه می‌شود.

- کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر SPI در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۷ به ترتیب ۱/۵۵- و ۱/۸ بوده است و نشان می‌دهد، وقایع متعدد خشکسالی با دوره‌ها و شدت‌های مختلف در طول دوره آماری روی داده است و می‌تواند منابع آب را تحت تأثیر قرار دهد.

- حدود ۶/۵٪ از پیزومترها در خشکسالی متوسط، ۳/۲٪ در خشکسالی شدید و حدود ۱/۹٪ در خشکسالی بسیار شدید قرار داشته‌اند، که بیانگر پراکندگی و شدت متفاوت خشکسالی در بخش‌های مختلف دشت است.

- بر اساس شاخص SPI، تمام منطقه سطح بالایی از قابلیت اطمینان را نشان می‌دهد بین ۰/۹۱ تا ۰/۹۴ و میانگین آن برای کل دشت ۰/۹۳

## References

- Abbasi, F., Farzadmehr, J., Chapi, K., Bashiri, M. & Azarakhshi, M. (2016). Spatial and Temporal Variations of Groundwater Quality Parameters in Qorveh- Dehgolan Plain and Its Relationship with Drought. *Hydrogeology*, 1(2), 11-23. [In persian]. doi: 10.22034/hydro.2016.5002.
- Babaousmail, H., Ayugi, B. O., Hammad, Z., Alupot, D., Posset, K. R., Mumo, R., & Rajasekar, A. (2024). Quantifying drought impacts based on the reliability-resiliency-vulnerability framework over East Africa. *Climate*, 12(7), 92. doi: 10.3390/cli12070092.
- Behboudian, M., Anamaghi, S., Mahjouri, N., & Kerachian, R. (2023). Enhancing the resilience of ecosystem services under extreme events in socio-hydrological systems: a spatio-temporal analysis. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136437. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136437.
- Booyesen, F. (2002). An overview and evaluation of composite indices of development. *Social indicators research*, 59(2), 115-151. doi: 10.1023/A:1016275505152.
- Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global environmental change*, 18(4), 598-606. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013.
- Faragher, T. P., & Carden, K. (2023). Groundwater governance for improving city water resilience in Cape Town, South Africa. *Frontiers in Sustainable Cities*, 5, 1062661. doi: 10.3389/frsc.2023.1062661.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1), 14-20. doi: 10.1029/WR018i001p00014.
- Ismayilov, R., & Suleymanov, F. (2024). Water Resilience Under Climate Change in Azerbaijan. *Geo Journal of Tourism and Geosites*, 53(2), 677-686. doi: 10.30892/gtg.53231-1243.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Moghaddam Nia, A., Ziaei, A. N., & Hasheminia, S. M. (2013). Application of NN-ARX model to predict groundwater levels in the Neishaboor Plain, Iran. *Water Resources Management*, 27(14), 4773-4794. doi: 10.1007/s11269-013-0432-y.
- Keys, P. W., Porkka, M., Wang-Erlandsson, L., Fetzer, I., Gleeson, T., & Gordon, L. J. (2019). Invisible water security: Moisture recycling and water resilience. *Water Security*, 8, 100046. doi: 10.1016/j.wasec.2019.100046.
- Lu, Y., Cai, H., Jiang, T., Sun, S., Wang, Y., Zhao, J., ... & Sun, J. (2019). Assessment of global drought propensity and its impacts on agricultural water use in future climate scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107623. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107623.
- Mafakheri, O., Sh, K., Shamsipour, A. A., & Kermani, A. (2015). Drought analysis using NDVI index in Qorveh and Dehgolan plains. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 41(16), 94-77. [In Persian]. doi: 20.1001.1.22287736.1395.16.41.4.7.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). URL: [https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipof\\_droughtfrequency.pdf](https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipof_droughtfrequency.pdf).
- 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.005.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- Nasrnia, F., & Ashktorab, N. (2021). Sustainable livelihood framework-based assessment of drought resilience patterns of rural households of Bakhtegan basin, Iran. *Ecological Indicators*, 128, 107817. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107817.
- Peters, E., Torfs, P. J. J. F., Van Lanen, H. A., & Bier, G. (2003). Propagation of drought through groundwater—A new approach using linear reservoir theory. *Hydrological processes*, 17(15), 3023-3040. doi: 10.1002/hyp.1274.
- World Water Assessment Programme (United Nations). (2009). The United Nations world water development report (No. 3). UNESCO Pub. ISBN: 978-92-3-104095-5, 978-1-84407-840-0, 978-89-8225-791-9.

- Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019). Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthropogenic activities on watershed health. *Science of the Total Environment*, 648, 880-893. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.004.
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., ... & Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87-101. doi: 10.1038/s43017-022-00378-6.
- Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2023). Analysis of different types of droughts and their characteristics in Iran using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Water and Soil*, 37(3), 473-486. doi: 10.22067/jsw.2023.81322.1257.
- Vrba, J., & Verhagen, B. T. (2011). Groundwater for emergency situations: a methodological guide. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000192182>.
- Yousefi, M. E., & Zandifar, S. (2023). Zoning of changes in the decreasing groundwater table and temporal monitoring of drought in the Ghorove-Dehgolan plain. doi: 20.1001.1.24235970.1402.11.1.2.8.