



Assessment of groundwater quality and the controlling factors (Case study: Zanjan Aquifer)

Zahra Abdollahi *¹, Ghobad Rostamizad², Parviz Abdinezhad³

- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran, Email: abdollahi.zhr.65@gmail.com
- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran, Email: rostamizad60@gmail.com
- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran, Email: prz_abdi@yahoo.com

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Research Paper	Rapid population growth and the continuous rise of quality standards have made planning and investment in access to clean water one of the country's main priorities. In line with efforts to optimize the use of water resources, the need to investigate the factors controlling the quality of water resources for providing efficient management programs is more than ever felt. Considering the location of Zanjan Plain and the concentration of the province's industrial, agricultural and residential units, preserving and improving the quality of Zanjan Aquifer is essential. Therefore, this study aimed to investigate the quality status of the Zanjan Aquifer and its spatial and temporal changes, as well as to identify and understand the main factors controlling the quality of the aquifer in the mentioned plain. In this regard, the information collected from 47 wells with appropriate distribution throughout the plain during 18 years (2003-2021) was analyzed. The results of this study showed that sodium and bicarbonate ions were the dominant cation and anion in the groundwater of the Zanjan Plain, respectively. According to the Piper diagram, the major part of the Zanjan Aquifer falls into the calcium bicarbonate type. Principal component analysis was also performed for 14 variables under study. The results indicated that the quality parameters investigated in this study were explained by two main factors P1 and P2 with a variance percentage of 85.78%. According to the factor scores of the studied wells, most of the wells showed a stronger correlation with the second factor and the parameters pH, SAR and SSP in the dry season, indicating an increase in salinity concentration in groundwater during low-rainfall months. The results of this study can be used as a basis for future research and focused on industrial estates and sustainable management to reduce environmental problems in the study area.
Article history	
Received: 14 July 2024	
Revised: 12 August 2024	
Accepted: 23 August 2024	
Published online: 31 December 2024	
Keywords: Principal components analysis, Zanjan Plain, ground water quality, piper diagram.	
Citation: Abdollahi, Z., Rostamizad, Gh., & Abdinezhad, P. (2024). Assessment of groundwater quality and the controlling factors (Case study: Zanjan Aquifer). <i>Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems</i> , 12(4), 31-50.	
DOI:	
Publisher: Iranian Rainwater Catchment Systems Association	© Author(s)



*Corresponding author: Zahra Abdollahi

Address: Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran

Tel: +989124420240

Email: abdollahi.zhr.65@gmail.com



Assessment of groundwater quality and the controlling factors (Case study: Zanjan Aquifer)

Zahra Abdollahi^{1*}, Ghobad Rostamizad², Parviz Abdinezhad³

1. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran, Email: abdollahi.zhr.65@gmail.com
2. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran, Email: rostamizad60@gmail.com
3. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran, Email: prz_abdi@yahoo.com

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Planning and investments in water security are increasingly becoming a priority policy issue at the national level due to the rapid population growth and development of water quality regulations and standards. Understanding the main controls of aquifers is essential for effective management and optimal allocation of groundwater. The Zanjan alluvial plain is one of the major agricultural regions in Zanjan, and its water resources originate mainly from the alluvial aquifer, which supports the local domestic and agricultural water supply. So, monitoring groundwater is essential to gain an understanding of Zanjan Aquifer quality and adjusting appropriate policies accordingly. This study aims to investigate the status of the Zanjan Aquifer, where groundwater is an important water resource. Also, this paper highlighted the spatial and temporal variations in groundwater quality in the alluvial agricultural plain and evaluated the suitability of groundwater for irrigation and drinking purposes for sustainable agriculture and basic human needs. Besides, the main factors controlling the groundwater quality in the Zanjan Aquifer were identified.

Methodology: Zanjan Plain, with an eastern longitude of 47°51'–49°00' and a northern latitude of 36°20'–37°00' and a total area of 4705 km², is located in the northern part of Zanjan Province. The aquifer of the plain is recharged by precipitation, the melting of snow, and surface runoff in rainy seasons. More than 70% of the area is occupied by agricultural land which mostly uses pumped groundwater from beneath the plain for irrigation. Physicochemical parameters including pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), total hardness (TH), major cations (K⁺, Na⁺, Mg²⁺, and Ca²⁺) and major anions (Cl⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻, and SO₄²⁻) from 47 bore wells in Zanjan Plain collected by the Zanjan Regional Water Company were analyzed during wet and dry seasons over 18 years (2003-2021). The ionic charge balance (ICB) between cations and anions was computed to confirm the reliability of the analytical results. A piper diagram was also used to determine the water type, hydrochemical facies and ion exchange. As well, the Spearman correlation was calculated to determine the inter-relationship between various hydro-chemical solutes. At last, the analysis of PCA was performed to reduce the number of variables in a data set and also to mark out the major factors responsible for the origin and release of geochemical solutes into the groundwater.

Results and Discussion: The results revealed that sodium and bicarbonate were the dominant ions in the groundwater samples. The total average of dissolved solids and electrical conductivity were 774.523 mg/l and 106.811 mS/cm, respectively, which did not have any restriction for irrigation purposes according to the permitted limit announced by FAO. However, most of the wells, based on WHO standards and Schuler's classification, were not suitable for drinking in terms of solute concentration and electrical conductivity. In terms of total hardness, most of the aquifer had hard water. We observed a high positive correlation between K⁺ and SO₄²⁻ in the Zanjan Aquifer. It can indicate rock interaction and the frequent use of wastewater for irrigation. The correlation matrix also showed a high positive correlation between Ca²⁺ and HCO₃²⁻, which can be an indication of the weathering of calcite minerals. The variation in concentration of anions in the collected data

*Corresponding author: Zahra Abdollahi

Address: Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran

Tel: +989124420240

Email: abdollahi.zhr.65@gmail.com

varied in the sequence as, $\text{HCO}_3^{2-} < \text{SO}_4^{2-} < \text{Cl}^- < \text{CO}_3^{2-}$, while in contrast, the sequence of cations in the groundwater was $\text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{K}^+$. Moreover, based on the Piper diagram, the groundwater was mostly determined to be calcium-bicarbonate-type water. The plot of the Schoeller diagram confirmed that the major cations were Na^+ and Ca^{2+} ions, while the major anions were HCO_3^{2-} and SO_4^{2-} . Principal component analysis was also performed for 14 investigated variables. The results indicated that the parameters examined in this study were explained by the first two main factors, with a variance percentage of 78.85. According to the factor scores, most of the wells in the dry season showed a stronger correlation with the second factor and the parameters of pH, SAR and SSP, which indicated an increase in the concentration of salinity in the groundwater in dry seasons. The outcomes of the study will be helpful for the regulatory boards and policymakers in defining the actual impact and remediation goals.

Conclusion: The present study has been performed to evaluate the groundwater quality of the Zanjan Aquifer in the city of Zanjan, Iran, where groundwater is an important water resource. This study confirms that the majority of the groundwater samples in the study aquifer were mostly bicarbonate-type in nature. Elevated values of electrical conductivity, total dissolved solids and total hardness in groundwater samples were mainly due to rock-water interaction. The hydrochemistry of groundwater confirms that most of the collected groundwater samples in the study area were comparatively saltier than freshwater. Therefore, it is recommended that the water of the Zanjan Aquifer be treated properly before use as potable water. Since the indiscriminate withdrawal of groundwater and reuse of industrial and agricultural effluents directly affect the quality of groundwater, optimal treatment of the effluents returned to the agricultural farm and making people aware of the problem should be prioritized in provincial planning. Also, the use of adapted crops and varieties is suggested for risk reduction, soil and water conservation, and efficient water management. Last but not least, farmers' participation in agricultural planning is regarded as an important tool for successful sustainable management.

Ethical Considerations

Data Availability Statement: The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Funding: Financial support: This research has presented a part of the results of a research project granted by the Iran National Science Foundation (INSF).

Authors' contribution: Zahra Abdollahi: Conceptualization, Formal analysis and investigation, writing - original draft preparation, Ghobad Rostamizad: Data preparation, writing the initial draft, Parviz Abdinezhad: Data preparation, manuscript editing.

Conflicts of interest: The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Acknowledgment: The authors would like thank the Iran National Science Foundation (INSF) for their financial support and the Zanjan Regional Water Authority for their cooperation for providing the data.



ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن (مطالعه موردی: دشت زنجان)

زهرا عبدالله‌ی^{۱*}، قباد رستمی‌زاد^۲، پرویز عبدی‌نژاد^۳

۱. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران، Abdollahi.zhr.65@gmail.com

۲. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران، rostamizad60@gmail.com

۳. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران، prz_abdi@yahoo.com

مشخصات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	رشد روز افزون جمعیت و ارتقا مستمر سطح استانداردهای کیفی، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری در جهت برخورداری از آب‌های سالم را به عنوان یکی از اولویت‌های اصلی کشور مطرح می‌سازد. همگام با تلاش در جهت استفاده بهینه از منابع آب، نیاز به بررسی عوامل کنترل کننده کیفیت منابع آب جهت رانه برنامه‌های کارآمد مدیریتی بیش از گذشته احساس می‌شود. با توجه به موقعیت دشت زنجان و تمرکز واحدهای صنعتی، زراعی و سکونتی استان در این دشت، حفظ و بهبود کیفیت آبخوان دشت زنجان ضرورت دارد. لذا، هدف از مطالعه حاضر، بررسی وضعیت کیفی آبخوان دشت زنجان و تغییرات مکانی و زمانی آن و همچین شاخت و آگاهی از عوامل اصلی کنترل کننده کیفیت آبخوان دشت مذکور بود. در این راستا، اطلاعات جمع‌آوری شده از ۴۷ چاه با پراکنش مناسب در کل دشت در طی ۱۸ سال (۱۳۸۲-۱۴۰۰) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که یون‌های سدیم و بی‌کربنات به ترتیب کائینون و آئیون غالب در آبخوان دشت زنجان بودند. بر اساس دیاگرام پایپر عمده آبخوان دشت زنجان در تیپ کلسیم بی‌کربناته قرار گرفت. تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز برای ۱۴ متغیر مورد بررسی انجام شد. نتایج حاکی از این بود که پارامترهای کیفی مورد بررسی در این مطالعه توسط دو عامل اصلی P1 و P2 با درصد واریانس ۷۸/۸۵ تبیین شدند. با توجه به نمرات عاملی چاههای مورد مطالعه، عムده چاهها در فصل خشک با عامل دوام و پارامترهای pH و SSP همیستگی قوی‌تری نشان دادند که حاکی از افزایش غلطت شوری در آب‌های زیرزمینی در ماههای کم باران بود. نتیجه این مطالعه می‌تواند مبنای برای تحقیقات آینده و به‌طور متمرک در شهرک‌های صنعتی و مدیریت پایدار در راستای کاهش مشکلات محیط زیستی در حوضه مورد مطالعه قرار گیرد.
تاریخچه مقاله	دریافت: ۲۴ تیر ۱۴۰۳ بازنگری: ۲۲ مرداد ۱۴۰۳ پذیرش: ۰۲ شهریور ۱۴۰۳ انتشار برخط: ۱۱ دی ۱۴۰۳
واژه‌های کلیدی:	استناد: عبدالله‌ی، زهرا، رستمی‌زاد، قباد، و عبدی‌نژاد، پرویز. (۱۴۰۳). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن (مطالعه موردی: دشت زنجان). سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۱۲(۴)، ۳۱-۵۰. DOR:
ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران	نویسنده مسئول: زهرا عبدالله‌ی نشانی: بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران تلفن: ۰۹۱۲۴۴۲۰۲۴۰ پست الکترونیکی: Abdollahi.zhr.65@gmail.com



© نویسنده‌گان

* نویسنده مسئول: زهرا عبدالله‌ی

نشانی: بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و
ترویج کشاورزی، زنجان، ایران

تلفن: ۰۹۱۲۴۴۲۰۲۴۰

پست الکترونیکی: Abdollahi.zhr.65@gmail.com

مقدمه

با توسعه جمعیت، تقاضا برای برداشت آب زیرزمینی بهویژه در کشورهای در حال توسعه، بهسrustت در حال افزایش است و این درحالی است که با تغییر اقلیم و خشکسالی‌های پیاپی فشار بیشتری بر منابع آبی وارد شده است. ۶۵ درصد از منابع آب زیرزمینی در جهان به مصارف آشامیدنی، ۲۰ درصد جهت کشاورزی و تقدیمه حیات وحش و ۱۵ درصد برای مصارف صنعتی و معدنی اختصاص یافته است (Yousefi et al., 2021). استفاده بدون برنامه‌ریزی و ناپایدار از آب‌های زیرزمینی، آبخوان را با مشکلات جدی از جمله افت تراز آب و کاهش کیفیت مواجه می‌سازد. کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از ذخایر مهم آب شیرین جهت تأمین آب مورد نیاز برای مصارف مسکونی، کشاورزی و صنعتی به یک بحران جدی اکولوژیکی در جهان تبدیل شده است (Nayak et al., 2023). حدود ۳۰ درصد از جمعیت جهان از منابع آب زیرزمینی برای مصارف خانگی استفاده می‌کنند (Subba Rao et al., 2020). وجود آلاینده‌های همچون فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و آلاینده‌های آلی و معدنی در آب، سلامت انسان را به طور جدی تهدید نموده و باعث بروز بیماری‌هایی مانند فشارخون، هیپوکلسما، سنگ کلیه، ناراحتی گوارشی-کلیه، کلسيفکاسيون شرياني و ترومبوز می‌شود. همچنین مقادير بالاي نيتروژن در آب نيز به عنوان يك تهديد بالقوه برای کييفيت آب آشاميدنی به اثبات رسيده است (Ali et al., 2024). در اهداف توسعه پايدار سازمان ملل متحد^۱ (SDGs) به طور مشخص به نقش حياتي منابع آب زيرزميني در توسعه پايدار، حفظ تعادل های اکولوژيکي و آب و هواي پرداخته شده است (Nayak et al., 2023). به علاوه، کنترل کييفيت آب يكی از موارد ضروري و مهم در برنامه‌ریزی آبیاري اراضي کشاورزی بوده و توسعه پايدار کشاورزی بدون لحظه کييفيت شيميايي آب غير ممکن است. با توجه به ارتباط تنگانگ کييفيت سفره آب زيرزميني با سلامت جمعیت، توسعه اقتصادي و رفاه اجتماعی، ارزیابی کييفيت سفره‌های آب زيرزميني و تغييرات مكانی و زمانی آن برای مدیریت و برداشت پايدار از اين منابع آبی تحت شرایط تغيير اقلیم و فشارهای محیط‌زیستی حاکم، باید به طور ویژه مورد توجه قرار گيرد (Tlili et al., 2018). (Zrelli et al., 2018).

استان زنجان با مساحتی بالغ بر ۲/۲ میلیون هکتار که ۱/۱ میلیون هکتار آن را مراتع و جنگل‌ها تشکیل می‌دهد و ۸۵۰ هزار هکتار آن به حوزه کشاورزی اختصاص دارد، یکی از قطب‌های کشاورزی کشور محسوب می‌شود (Kavian et al., 2016). میزان مصرف آب در این استان یک میلیارد و ۵۰۰ میلیون متر مکعب بوده که از این میزان یک میلیارد و ۲۰۰ میلیون متر مکعب آن، معادل ۷۸ درصد، در بخش کشاورزی به مصرف می‌رسد (Abdollahi et al., 2017). با توجه به افزایش قابل توجه تقاضا در دشت زنجان به سبب توسعه صنعت به ویژه در مرکز دشت زنجان و توسعه شهری و همچنین افزایش فعالیت‌های کشاورزی، تقاضا برای مصرف آب در حال افزایش است. گزارش شده است که ۶۵ درصد کل آب مصرفی استان از سفره‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. سازمان آب منطقه‌ای استان اعلام کرد که حفر چاه‌های غیرمجاز و برداشت بیش از حد مورد اشاره در پروانه بهره‌برداری از چاه‌های مجاز سبب وخیم شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی هم به لحاظ کمی و هم به لحاظ کیفی در این استان شده است. در این راستا، آبخوان آبرفتی دشت زنجان، متأثر از تداوم تغییر اقلیم جهانی و توزیع غیر یکنواخت فصلی و چهارفیابی نزولالات جوی، در معرض بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی و بدترع آن افت تراز سفره، کاهش کیفیت آب، فرونژاست زمین، ایجاد فروچاله‌ها، شور شدن آب چاه‌ها و از بین‌رفتن خاک و محیط‌زیست قرار دارد (اعظمی و همکاران، ۱۳۹۸). لذا، برنامه‌های پایش منظم و ارزیابی تغییرات مكانی و زمانی کیفیت آب‌های زیرزمینی در این دشت به چند دلیل حیاتی است. در وهله اول نتایج بررسی و پایش کیفی آبخوان در بازه‌های منظم زمانی می‌تواند جهت ارزیابی سلامت و پايداری سفره زیرزمینی به عنوان اصلی ترین منبع آبی ایمن و پايدار در شهر زنجان و شناسایی هرگونه منابع بالقوه آلودگی استفاده شود. همچنین پایش مستمر کیفیت آب زیرزمینی در دشت مذکور جهت تنظیم سیاست‌های مناسب مدیریتی، آمایش سرزمین، رعایت مقررات و استانداردهای مربوط به آشامیدن، کشاورزی و محیط‌زیست می‌تواند سودمند باشد. علاوه‌برآن، با توجه به پراکنش شهرک‌های صنعتی و زمین‌های زراعی در دشت زنجان، مطالعه کیفیت آب زیرزمینی جهت درک تغییرات فصلی، تغییرات مربوط به کاربری زمین و اثرات بالقوه عملیات صنعتی و کشاورزی ضرورت دارد و امکان تشخیص زودهنگام هرگونه تغییر در کیفیت آب و اقدامات بهموقوع کاهشی را فراهم می‌کند.

استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA) به منظور تحلیل داده‌های کیفی آب‌های زیرزمینی جهت درک بهتر وضعیت فعلی سیستم و شناخت عوامل و مؤلفه‌های مسئول و اثرگذار در کیفیت سفره توسط محققان بسیاری موردن توجه قرار گرفته است. همچنین از آن به عنوان ابزاری ارزشمند برای مدیریت مطمئن و مؤثر منابع آب و مشکلات آلودگی آن یاد می‌شود (Singh et al., 2009). مطالعات زیادی کارآمدی و سودمندی این روش را در تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های پیچیده و بزرگ (Jolliffe, 2002)، و همچنین در برنامه‌ریزی و کنترل کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی تأیید می‌کنند (Pashaeifar et al., 2023; Singh et al., 2009; Vega et al., 1998).

^۱-Sustainable Development Goals

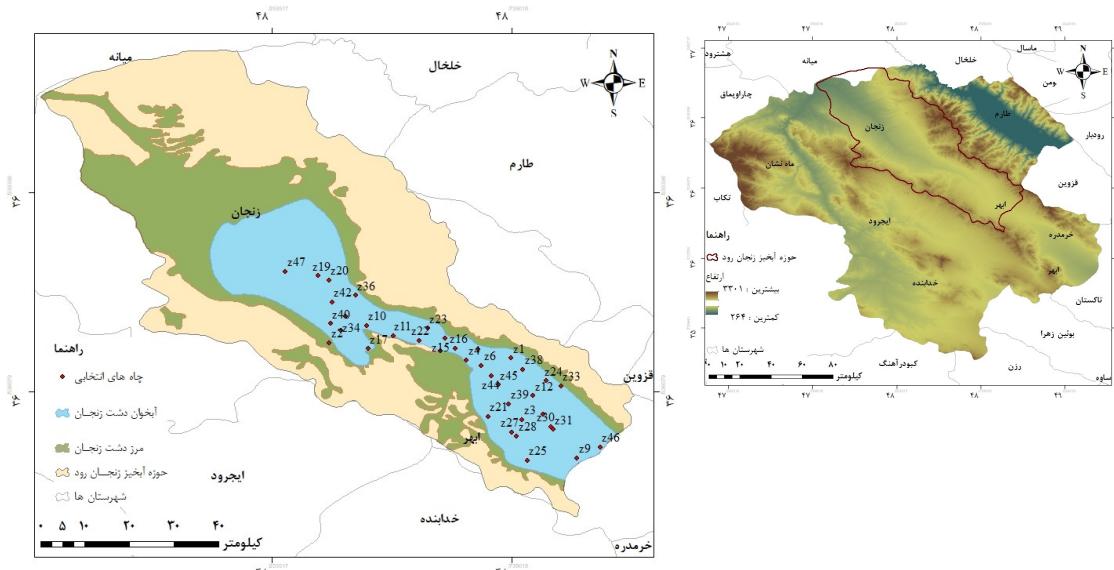
^۲-Principal Component Analysis

Mehdi et al., 2023; Pashaeifar et al., 2023; Feizizadeh et al., 2022; Ma et al., 2016 مروری بر سوابق مطالعاتی (Ali et al., 2024; Gautam et al., 2024). حاکی از کاربرد گسترده این روش در تفسیر داده‌های فیزیکوشیمیایی است. تکنیک PCA به منظور ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی Uttar Pradesh هند مورد استفاده قرار گرفت که به ترتیب عوامل طبیعی و هرزآب‌های صنعتی و مسکونی، هرزآب‌های کشاورزی و عوامل انسانی در تعیین کیفیت منابع آبی منطقه مورد مطالعه اثرگذار بودند (Singh et al., 2009).

Tlili-Zrelli و همکاران (۲۰۲۰) خصوصیات هیدروشیمیایی آبخوان شمال شرقی تونس را با استفاده از PCA بررسی و بیان کردند که قسمت اعظم آبخوان به لحاظ شوری برای مصارف آبیاری مناسب نیست. Gautam و همکاران (۲۰۲۴) از PCA جهت بررسی خصوصیات کیفی آبخوان استفاده نموده و آن را ابزار مناسبی برای ساده‌سازی فرآیند ارزیابی در تحلیل کیفیت آب دانستند. Ghaffari و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی شمال غرب ایران با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی پرداختند. نتایج ایشان حاکی از کاهش کیفیت آبخوان در طول دوره مطالعاتی بود. مصطفی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) جهت بررسی کیفیت آب رودخانه گرگان رود از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوش‌های استفاده کردند. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی تا حد نسبتاً زیاد با نتایج تحلیل خوش‌های در یک راستا بود. فضایخش و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی و تحلیل کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان دشت اردبیل پرداختند. تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت مذکور تحت تأثیر چهار عامل اصلی با مجموع ۷۷/۳۱ درصد از واریانس کل داده‌ها قرار گرفت. نتایج تحلیل عاملی نشان داد که عامل اول زمین‌زاد، عامل دوم و سوم زمین‌زاد و انسان‌زاد و عامل چهارم فقط انسان‌زاد بود. شیخی المان آباد (۱۴۰۲) در بررسی هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، نفوذ آب‌شور دریاچه ارومیه، تبادل یونی و هوازدگی کانی‌های کلسیت و دولومیت را منشأ عناصر در دشت آبرفتی ارومیه دانستند. مرور سوابق مطالعاتی حاکی از تأثیر عوامل طبیعی از جمله برهم‌کنش خاک-سنگ-آب، فرآیند فرسایش، رسوب و انحلال، تبادل یونی و تبخیر به عنوان فرآیندهای کنترل‌کننده اولیه و تأثیر فعالیت‌های انسانی شامل نفوذ هرزآب‌های خانگی، کشاورزی و صنعتی به عنوان تنظیم‌کننده‌های ثانویه بر شیمی آب‌های زیرزمینی است. همچنین مرور منابع نشان داد که مطالعات جامعی در خصوص تحلیل آводگی و نظارت منظم بر کیفیت آب زیرزمینی در دشت انجام نگرفته است. از طرفی تجزیه و تحلیل حجم زیادی از داده‌های کیفی آب زیرزمینی جمع‌آوری شده از چندین سایت نظارتی در بازه زمانی بلندمدت بسیار پیچیده بوده و نیاز به روش‌های مناسب جهت مدیریت داده‌ای و تجزیه و تحلیل قابل فهم دارد. بنابراین هدف از مطالعه حاضر استفاده از یک رویکرد آماری چند متغیره با استفاده از داده‌های هیدروشیمیایی در بررسی منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت زنجان برای (۱) درک وضعیت فعلی کیفیت آبخوان دشت زنجان (۲) بررسی ماتریس همیستگی بین متغیرهای هیدروشیمیایی (۳) شناخت اصلی‌ترین مؤلفه‌های تعیین کیفیت آب زیرزمینی در دشت مذکور (۴) و درک تغییرات زمانی و مکانی و نوسانات متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی دشت زنجان است.

مواد و روش تحقیق منطقه مورد مطالعه

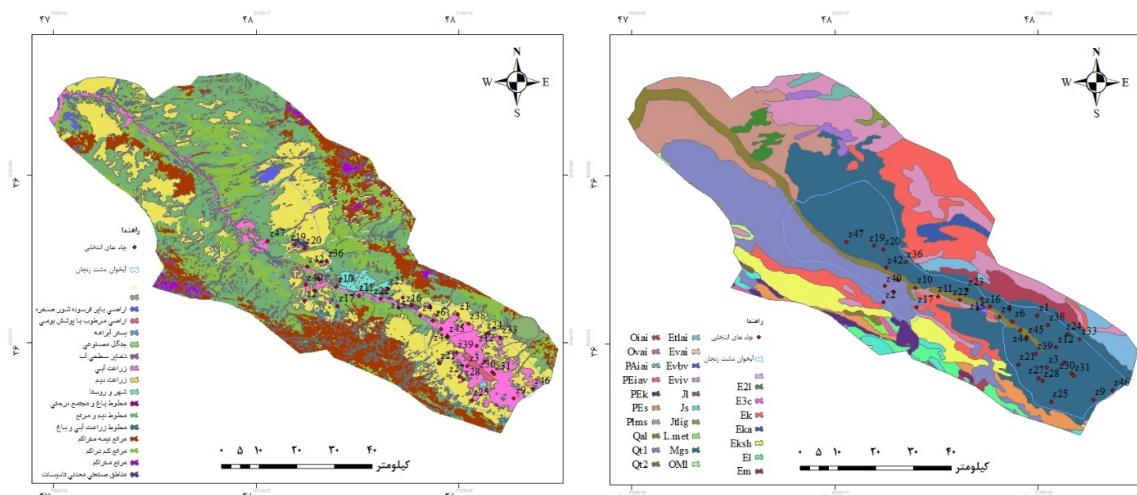
حوزه‌ی آبخیز زنجان رود با مساحت ۴۶۶۴ کیلومترمربع در شمال شرقی - جنوب‌شرقی استان زنجان و در محدوده‌ی جغرافیایی با عرض ۱۵° ۳۶' شمالي تا ۱۴° ۳۷' جنوبی و طول ۶۶' ۴۷° شرقی تا ۵۹' ۴۸° غربی در حوزه سفیدرود واقع است (Kavian et al., ۲۰۱۶). موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه و حوزه‌ی آبخیز زنجان رود در شکل (۱) نشان داده شده است. منطقه‌ی مورد مطالعه دارای اقلیم مدیترانه‌ای بوده و به دلیل موقعیت جغرافیایی و دارا بودن ارتفاعات گوناگون در مرز خود، در مقایسه با استان‌های غرب کشور سهم کمتری از ریزش‌ها را دریافت می‌کند (جانی‌سرناوی و شاهرخی، ۱۴۰۱). حدود ۷۳ درصد از بارندگی‌های سالانه‌ی این منطقه طی بازه‌ی زمانی ۴ تا ۸ ماه، به طور متوسط از اوایل ماه آبان تا اواخر ماه اردیبهشت، با حداکثر مقدار بارش در ماه بهمن و اسفند به وقوع می‌پیوندد (Abdollahi et al., 2017) متوسط ریزش جوی سالانه در حوزه مورد مطالعه برابر ۲۹۷/۱ میلی‌متر در سال ۱۳۹۵ گزارش شده است (اداره‌ی کل هواشناسی استان زنجان، ۱۳۹۶). متوسط جریان بیست ساله آب پایه و دی اوج جریان در ایستگاه هیدرومتری سرچم (واقع در طول جغرافیایی ۵۳° ۴۷' شرقی و عرض جغرافیایی ۷° ۳۷' شمالي) به ترتیب ۱/۳۶ و ۱۷۱ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان زنجان، ۱۴۰۲).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش چاههای مطالعاتی
Figure 1- Location of the study area and the distribution of the study wells

زمین‌شناسی منطقه

از نگاه زمین‌شناسی ساختمانی و پهنه‌های ساختاری رسبوی، بخش بالادست رودخانه قسمت کوچکی از دامنه‌های جنوبی البرز باختی است. بخش اعظم رخمنون‌های حوزه‌ی آبخیز، مجموعه‌های پیروکلاستیک ائوسن (سازند کرج) بوده و لیتولوژی غالب ردیفهای آذربین آواری، همانند سایر نواحی البرز، از نوع توفهای سبز بهمهار میان لایه‌های شیلی و آهکی است. به‌جز ردیفهای آذربین آواری، در این مجموعه همراهانی از گدازه‌های آندزیتی، آندزی بازلتی، ریوداسیت پورفیری و غیر پورفیری وجود دارد که هم به صورت زیردریایی و هم در سطح خشکی تشکیل شده‌اند (آقانباتی، ۱۳۸۳). در محدوده غربی دشت توالی‌های سنگ آهک نازک تا ضخیم لایه از سازند قم رخمنون دارد. همچنین، در محدوده‌هایی از غرب و جنوب زنجان توالی‌های منظمی از رسوبات کواترنری، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک‌های متعلق به سازندهای درود و روته، سنگ‌آهک‌های ورمیکوله و دولومیت‌های نازک‌لایه متعلق به سازند الیکا، سنگ‌آهک‌های متعلق به سازندهای لار و تیزکوه قابل شناسایی هستند (ربانی و زهدی، ۱۳۹۹). در امتداد رودخانه، ردیفی از نهشته‌های مارنی، کنگلومراتی و ماسه‌سنگی موجود است. این نهشته‌ها عدسی‌هایی از گج داشته و به طور دگرگشیب پیروکلاستیک‌های ائوسن را می‌پوشانند. همچنین در امتداد پایین دست رودخانه فرو نشسته‌های تکتونیکی دشت کم‌عرض زنجان-ایهر با پوشش آبرفتی کواترنری پوشیده شده است (Afrasiabian et al., 2021). همچنین نقشه زمین‌شناسی و کاربری اراضی حوزه آبخیز زنجان رود با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی و کاربری اراضی حوزه آبخیز زنجان‌رود
Figure 2- Geology and landuse maps of Zanjanrud basin

وضعیت آبخوان

دشت زنجان حالت گرانبی داشته و به صورت یک دشت باریک از شمال غرب به جنوب شرق کشیده شده است. بررسی‌های اکتشافی (ژئوفیزیک و حفاری) توانسته تا اندازه‌ای ابعاد هندسی آبخوان را روش‌ن کند و به خصوص ارتباط این دشت را با دشت ابهر، شهرین و قزوین مشخص ساخته است. متوسط مقدار افت سطح آب زیرزمینی در دشت زنجان بر اساس آخرین آمار و اطلاعات تأیید شده وزارت نیرو طی دوره آماری ۱۳ ساله (۱۳۸۵-۱۳۹۷)، ۱۲/۳۹ متر و به طور سالانه در حدود ۹۵/۰ متر بوده است (سازمان آب منطقه‌ای استان زنجان، ۱۴۰۱).

روش تحقیق

جهت بررسی وضعیت کیفی آبخوان دشت زنجان و تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی، چاه مشاهداتی با پراکنش مناسب در کل دشت مذکور انتخاب شده و اطلاعات ۱۴ مشخصه کیفی آب شامل Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , EC , pH , سختی^۱، TDS با دوره آماری مشترک ۱۸ ساله (۱۳۸۲-۱۴۰۰)^۲ با درصد سدیم (SAR) و جذب سدیم (SSP) ۱ درصد محلول (Papadaki et al., 2023; Rodrigues de Souza et al., 2023) تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. موقعیت و پراکنش چاه‌های انتخابی در شکل (۱) ارائه شده است. بهمنظور بررسی اثرات فعلی روی متغیرهای آب زیرزمینی، کل دوره مشاهداتی با توجه به مقادیر متوسط بارش ۱۵ سال اخیر ثبت‌شده در ایستگاه‌های باران‌سنگی محدوده حوزه آبخیز زنجان‌رود، به دو فصل خشک و بارانی تقسیم‌بندی شد. جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌های مورد بررسی، در گام اول از آزمون شاپیرو-ویلک برای برازش توزیع نرمال مشخصه‌های کیفی آب زیرزمینی استفاده شد (Mandel, 2012).

بررسی همبستگی بین متغیرهای فیزیکوشیمیایی

با توجه به نرمال نبودن داده‌های مورد بررسی از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن جهت بررسی همبستگی و ارتباط درونی بین جفت متغیرهای کیفی استفاده شد. این آزمون برای متغیرهایی که از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند قوی و کارآمد است و انحرافات برای همبستگی بین متغیرها را به حداقل می‌رسد (Muangthong, 2015). همچنین، با استفاده از روش خطای واکنش، کیفیت داده‌های مورد استفاده در این مطالعه مورد صحبت‌سنگی قرار گرفت. در این مطالعه خطای قابل قبول $< \pm 5$ در نظر گرفته شد (Mandel, 2012).

**طبقه‌بندی کیفی آب
تیپ و رخساره**

به‌منظور تعیین تیپ و رخساره سفره آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه از دیاگرام پایپر استفاده شد. نمودار پایپر از ترکیب سه میدان مجزا با درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها و موقعیت ترکیبی آن‌ها جهت تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شهیکی و خراسانی‌پور، ۱۴۰۳). این دیاگرام یک روش مناسب برای طبقه‌بندی و مقایسه انواع آب بر اساس ترکیب یونی نمونه‌های مختلف آب ارائه می‌دهد. در این مطالعه دیاگرام پایپر در محیط نرم‌افزار RockWare AqQA تهیه شد.

طبقه‌بندی کیفی آب برای مصارف کشاورزی

معیار اساسی در طبقه‌بندی کیفی آب برای مصارف کشاورزی، مقدار شوری و سدیم است. کیفیت آب زیرزمینی بر اساس نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی با روش ویلکاکس قابل ردبهندی است. نقاط حاصل از تقاطع دو متغیر مذکور در نمودار ویلکاکس بیانگر کلاس نمونه‌ی آب است. روش طبقه‌بندی ویلکاکس یکی از روش‌های پرکاربرد در طبقه‌بندی آب از منظر کشاورزی در مطالعات هیدرولوژی شناخته می‌شود (Abou Zakhem et al., 2017). کیفیت آبخوان دشت زنجان جهت استفاده در مصارف آبیاری با استفاده از نمودار ویلکاکس بررسی و نتایج آن در جدول (۳) گزارش شد.

طبقه‌بندی کیفی آب برای مصارف آشامیدن

همچنین کیفیت سفره آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه از نظر مصارف شرب نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از نمودار نیمه‌لگاریتمی شولر استفاده شد. جهت ترسیم این نمودار سه کاتیون اصلی (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^{2-}) و شاخص‌های مقدار کل جامدات محلول (TDS) و سختی کل (TH) مورد استفاده قرار گرفت. در این نمودار، کیفیت آب در شش طبقه خوب، قابل قبول، متوسط و دارای مزه، نامناسب، کاملاً نامطبوع و غیر قابل شرب قابل تقسیم است (Schöller, 1962).

¹ Sodium Adsorption Ratio

² Soluble Sodium Percentage

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

سپس تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای ۱۴ متغیر مورد بررسی انجام شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) یک روش آماری برای تشخیص الگوی رفتاری جامعه مورد مطالعه و کاهش ابعاد یک مجموعه داده‌هاست که امکان تحلیل و تفسیر مجموع داده‌های بزرگ با تعداد بالای بعد با حفظ حداقل مقدار اطلاعات و تجسم داده‌های چند بعدی را فراهم می‌سازد (کلاتری و همکاران، ۱۳۹۷). مؤلفه اصلی اول (PC_1) در این روش مؤلفه‌ای است که دارای بزرگ‌ترین جهت واریانس در ماتریس داده‌هاست. در حالی که مؤلفه اصلی دوم (PC_2) عمود بر PC_1 ، بهنحوی تعریف می‌شود که حداقل واریانس موجود در داده‌ها که توسط PC_1 محاسبه نشده است، را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های اصلی دیگر نیز به همین نحو انتخاب می‌شوند تا حداقل واریانس موجود در داده‌ها را توجیه نمایند. عمود بودن مؤلفه‌های اصلی بر هم به معنای عدم همبستگی بین آن‌هاست. اساس محاسبات روش PCA تجزیه ماتریس اولیه (X) به دو ماتریس کوچک‌تر، ماتریس امتیاز (S) و ماتریس بار (L)، طبق رابطه (۱) است. در این رابطه E نیز به ماتریس باقی مانده یا خطای اشاره دارد.

$$X = SL + E \quad (1)$$

رسم بهترین خط برآش شده از میان داده‌های اولیه در سیستم مختصات فرضی، جهت حداقل واریانس تصویرسازی شده روی خط را نشان می‌دهد. این خط همان مؤلفه اصلی است که ترکیب خطی از تمام متغیرهای اولیه بوده و می‌توان آن را به صورت رابطه (۲) نوشت. در این رابطه PC مؤلفه اصلی، n شماره مؤلفه اصلی و a ضرایب متغیرها در مؤلفه‌های اصلی هستند به‌گونه‌ای که مؤلفه اصلی اول (PC_1) بیشترین واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد و مؤلفه‌های اصلی بعدی، به ترتیب واریانس‌های کمتری که در مؤلفه‌های اصلی قبلی لحاظ نشده، را نشان می‌دهند.

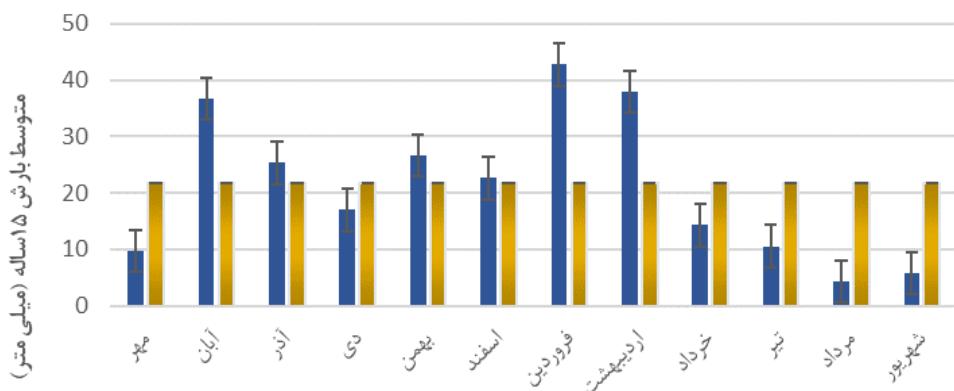
$$PC_n = a_{1n}X_1 + a_{2n}X_2 + \dots + a_{pn}X_p \quad (2)$$

در این مطالعه بارهای عاملی برابر و یا بیشتر از 40% برای تفسیر نتایج انتخاب شدند (Abdollahi et al., 2019). همچنین برای آگاهی از مناسب بودن این روش در تحلیل داده‌های کیفی آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه از آزمون کرویت بارتلت استفاده شد.

نتایج و بحث

با توجه به شکل (۳)، در حوزه آبخیز زنجان رود متوسط بارش ماهانه ۱۵ سال اخیر (۱۳۸۲–۱۳۹۷) طی ماههای آبان، آذر، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت از متوسط بارش سالانه ۱۵ ساله بیشتر بود. بنابراین ماههای مذکور در رده بارانی و باقی ماههای در فصل خشک طبقه‌بندی شدند (Abdollahi et al., 2019). جدول (۱) مقادیر متوسط، کمینه، بیشینه و انحراف از استاندارد متغیرهای فیزیکوژئیمیایی در آبخوان دشت زنجان در دوره آماری ۱۸ سال (۱۳۸۲–۱۴۰۰) را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، یون‌های اصلی در نمونه‌های آب زیرزمینی دشت زنجان دارای ترتیب غلظت $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > HCO_3^{2-} > SO_4^{2-} > Cl^- > CO_3^{2-}$ برای کاتیون‌ها و Na^+ برای آنیون‌ها است. لذا، یون‌های سدیم و بی‌کربنات به ترتیب کاتیون و آنیون غالب در دشت مذکور هستند. مقادیر کل جامدات محلول (TDS) در آبخوان دشت زنجان به ترتیب بین $136/896$ تا $1639/078$ میلی‌گرم در لیتر با میانگین و انحراف از استاندارد به ترتیب $811/106$ و $523/774$ میکروگرم‌منس بر سانتی‌متر در آبخوان دشت زنجان بوده است. مقدار متوسط و بیشینه هدایت الکتریکی به ترتیب برابر $2539/556$ و $295/787$ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است. لذا با توجه به جدول (۱)، عده چاههای محدود مطالعاتی به لحاظ غلظت املأ و هدایت الکتریکی برای مصارف شرب مناسب نیست. در حالی که با آگاهی از حد تحمل محصولات زراعی در مقابل غلظت املأ و شوری و اقدامات مدیریتی مناسب برای مصارف آبیاری و کشاورزی قابل استفاده است. جلالیان و همکاران (۱۳۹۶) نیز در مطالعه خود بر روی دشت زنجان، آب زیرزمینی این دشت را به لحاظ مقادیر هدایت الکتریکی برای مصارف کشاورزی بدون مشکل گزارش نمودند. این در حالی است که مقادیر هدایت الکتریکی در پی افزایش برداشت آب زیرزمینی در سال‌های اخیر روند افزایشی نشان می‌دهد. پاک و همکاران (۱۳۹۶) نیز برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی را عامل افت کیفی آبخوان دشت ساوه دانستند. لذا، با تداوم شرایط حاضر و افزایش هدایت الکتریکی منابع آب و خاک و تولید پایدار در محدوده دشت زنجان با خطر جدی مواجه می‌شود. مقادیر کلسیم بین $13/352$ تا $173/969$ میلی‌گرم در لیتر در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت زنجان بوده است. همچنین مقادیر منیزیوم بین $5/786$ تا $123/762$ میلی‌گرم در لیتر در نمونه‌های آب زیرزمینی گزارش شد. غلظت پتاسیم نیز بین $0/538$ و $5/735$ میلی‌گرم در لیتر بود. مقادیر سولفات در دامنه بین $13/609$ تا $553/777$ میلی‌گرم در لیتر در آبخوان متغیر بود. با توجه به حد محاز غلظت سولفات برای مصارف آشامیدن بر اساس استاندارد WHO، در برخی از چاههای غلظت سولفات از حد محاز بالاتر بوده است. Celestino و همکاران (۲۰۱۹) افزایش غلظت سولفات در آب‌های زیرزمینی را ناشی از انحلال موادمعدنی و استفاده از پساب برای آبیاری دانسته‌اند (Marín Celestino et al., 2019). دامنه تغییرات یون کلر نیز بین $8/067$ تا $355/940$ میلی‌گرم در لیتر در آبخوان دشت زنجان گزارش شده است. گرچه غلظت کلر در بیشتر چاههای مورد مطالعه از حد استاندارد آبیاری و آشامیدن (جدول ۱) در طول دوره آماری عبور نکرده است، ولی در برخی از چاههای بخش میانی دشت مقادیر بالای آن مشاهده شد. از آن جایی که تجمع بالای یون کلر در پساب‌ها و

هر آب‌های کشاورزی گزارش شده است و با توجه به تجمع اراضی زراعی در اطراف رودخانه زنجان رود در بخش میانی دشت، استفاده از پساب جهت آبیاری اراضی زراعی را می‌توان دلیل بالا رفتن قابل توجه مقادیر کلر در نمونه‌های آب این چاهها دانست.



شکل ۳- بارش متوسط ماهانه و سالانه بلندمدت ۱۵ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۷) در حوزه آبخیز زنجان رود

Figure 3- Average monthly and annual rainfall over a long-term period of 15 years (2003-2018) in Zanjanrud basin

جدول ۱- خلاصه خصوصیات آماری متغیرهای کیفی آب زیرزمینی در آبخوان دشت زنجان (میلی‌گرم در لیتر)

Table 1- Statistical characteristics of qualitative variables of groundwater in Zanjan Aquifer (mg/l)

Variable	Observation N.	Min	Max	Mean	Standard Deviation	WHO Standard	Irrigation limit ^r
SO ₄ ²⁻	76	13.609	553.737	145.241	126.3381	500	960
Cl ⁻	76	8.067	355.93	53.541	55.172	250	170-700
HCO ₃ ²⁻	76	94.123	334.876	207.711	50.605	-	500
CO ₃ ²⁻	76	0	7.452	1.018	1.408	-	-
Mg ²⁺	76	5.786	123.762	27.747	19.505	50	-
Ca ²⁺	76	13.352	173.969	55.643	32.237	200	400
K ⁺	76	0.538	5.735	2.888	1.175	12	-
Na ⁺	76	9.41	175.81	65.18	38.28	200	46-460
pH	76	7.357	8.034	7.719	0.149	8.5	6.5-8.4
TDS	76	136.896	1639.078	523.774	295.787	1000	2000
EC ²	76	215.75	2539.556	811.106	449.618	400	2500
TH	76	87.611	943.681	253.119	149.204	500	-
SAR	76	0.074	1.108	0.495	0.256	-	<9
SSP	76	13.954	49.205	30.496	7.97	-	66

^۱(Ali et al., 2024; Organization, 2002)

^۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر

^۳(Drechsel et al., 2023)

همبستگی بین متغیرهای فیزیکوشیمیایی

نتایج به دست آمده از آزمون شاپیرو-ولک نشان داد که متغیرهای فیزیکوشیمیایی مورد بررسی در این تحقیق به جز pH از توزیع نرمال تعیین نمی‌کنند. لذا، جهت بررسی همبستگی و ارتباط درونی بین جفت متغیرهای کیفی از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن استفاده شد. ماتریس همبستگی ۱۴ متغیر کیفی بررسی شده در جدول (۲) ارائه شده است. در این مطالعه مقادیر $r > 0.7$ بیان گر همبستگی بالا هستند. همچنین مقادیر $0.5 < r < 0.7$ همبستگی متوسط را نشان می‌دهند (El-Rawy et al., 2023)، در آبخوان دشت زنجان بین SO₄²⁻ و TDS با EC و HCO₃²⁻ همبستگی بالایی را نشان داد ($r = 0.95$). همبستگی مثبت بالای 0.76 بین K⁺ و SO₄²⁻ در آبخوان دشت زنجان مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده تبادل پتاسیم و نمک سولفات در فرآیند هوایزدگی سنگ و استفاده مکرر از پساب در مصارف آبیاری باشد. Abou Zakhem و همکاران (۲۰۱۷) نیز همبستگی مثبت 0.77 را بین K⁺ و SO₄²⁻ در آبخوان دشت Jezireh در سوریه گزارش نمودند. El-Rawy و همکاران

(۲۰۲۳) نیز با توجه به همبستگی قوی بین کاتیون‌ها و SO_4^{2-} وجود منابع مشابه در کانی‌زایی را دلیل این همبستگی بالا دانستند. یون پتانسیم در این آبخوان منشأ طبیعی و انسانی دارد. از یک سو این یون در اثر هوازدگی و انحلال سنگ‌های کربناته و فلدوپات‌پتانسیم‌دار در آبخوان آزاد شده است. از طرف دیگر استفاده از کودهای شیمیایی و نفوذ فاضلاب به داخل آبخوان نیز می‌تواند منابع حضور پتانسیم در نمونه‌های آب زیرزمینی باشد (Chandran et al., 2017; Zghibi et al., 2014). پتانسیم یک فلز قلایای است و در منابع آبی از انحلال مواد معدنی خاک رس و سنگ‌های کربناته منشأ می‌گیرد. همچنین کودهای کشاورزی و نفوذ پساب از فاضلاب‌های خانگی می‌تواند منشاء پتانسیم در آب زیرزمینی باشد (Nematollahi et al., 2018). بیشینه مجاز تعیین شده برای غلظت پتانسیم در آب آشامیدنی در استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است. تعییرات جزئی این یون در بدن منجر به مشکلات عصبی و قلبی می‌شود. این ماده بر تعادل مایعات در بدن تأثیر گذاشته و با توجه به این که با افزایش سن کلیه‌ها کمتر قادر به حذف پتانسیم از خون خواهد بود، باعث بروز مشکلاتی در بدن می‌شود. همبستگی مثبت متوسطی ($r = 0.42$) بین Ca^{+} و HCO_3^{-} مشاهده شد که حاکی از انحلال کلسیت در منطقه مورد مطالعه است. Tiwari and De Maio (۲۰۱۷) و Taoufik و همکاران (۲۰۱۷) به نتایج مشابهی دست یافتند. در حالی که Abou Zakhem و همکاران (۲۰۱۷) همبستگی منفی -0.56 را بین Ca^{+} و HCO_3^{-} گزارش نمودند. کلسیم به طور طبیعی در آب وجود دارد. یکی از دلایل اصلی فراوانی کلسیم در نمونه‌های آب وجود طبیعی آن در ساختار لیتولوژی منطقه است که از طریق هوازدگی سنگ بهویشه سنگ آهک و شست شوی خاک وارد منابع آبی می‌شود. کلسیم اکسید (سنگ آهک) که لیتولوژی غالب منطقه است، به طور گسترده در صنعت (شهرک‌های صنعتی مستقر در بخش میانی دشت) و تصفیه شیمیایی فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد (خاندوزی و همکاران, ۱۳۹۴). لازم به ذکر است که مطابق استانداردهای بین‌المللی و استاندارد تحقیقاتی ایران حد مجاز کلسیم برای آب آشامیدنی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است. همبستگی بالای EC با یون‌ها ($r > 0.6$) حاکی از انحلال نمکها و مینرال‌ها در آب زیرزمینی است (Li et al., 2016). همبستگی مجاز تعیین شده توسط WHO برای سدیم در آب آشامیدنی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است (Organization, 2002). از دیاد سدیم در بدن موجب ایجاد بیماری‌های کلیوی و گوارشی می‌شود.

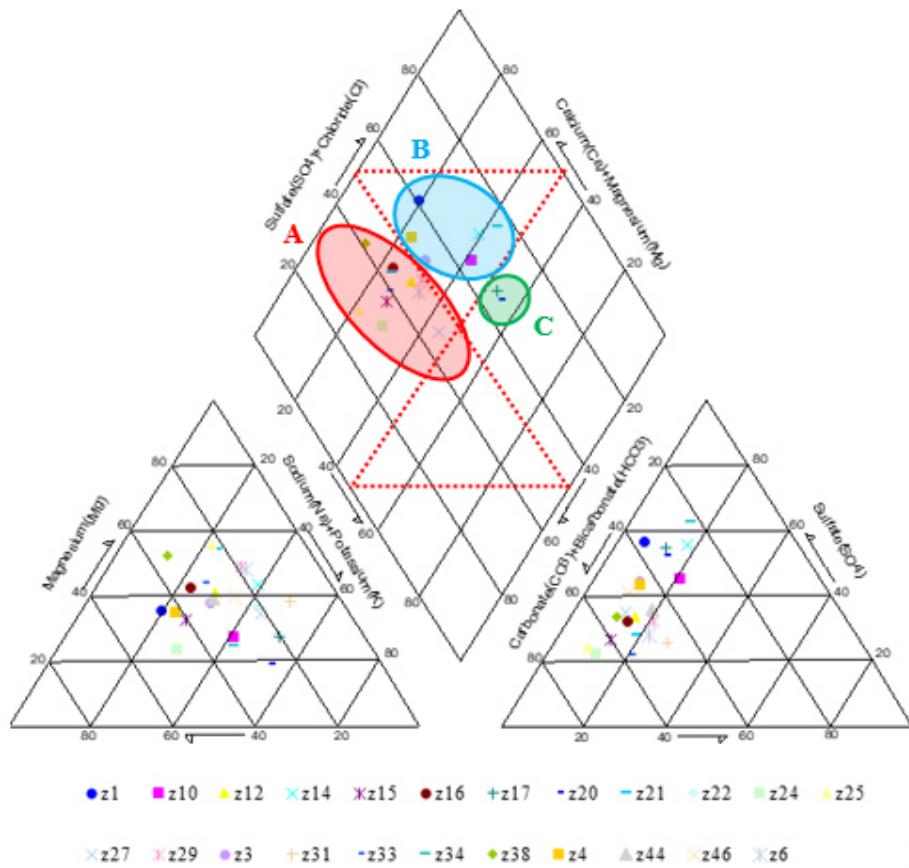
جدول ۲- همبستگی بین مقادیر کیفی آب زیرزمینی در آبخوان دشت زنجان

Table 2- Correlation between variables of groundwater quality in Zanjan Aquifer

Variable	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^{2-}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+	Na^+	pH	TDS	EC	TH	SAR	SSP
SO42-	1												
Cl-	0.81	1											
HCO32-	0.53	0.54	1										
Mg2+	0.66	0.73	0.81	1									
Ca2+	0.84	0.65	0.42	0.45	1								
K+	0.76	0.71	0.52	0.59	0.54	1							
Na+	0.64	0.62	0.43	0.54	0.4	0.48	1						
pH	-0.35	-0.22	-0.32	-0.16	-0.61	-0.19	0.08	1					
TDS	0.95	0.89	0.7	0.8	0.77	0.79	0.66	-0.31	1				
EC	0.95	0.89	0.7	0.81	0.77	0.79	0.66	-0.31	1	1			
TH	0.82	0.81	0.78	0.92	0.7	0.65	0.53	-0.34	0.91	0.92	1		
SAR	0.39	0.38	0.2	0.24	0.15	0.27	0.92	0.26	0.39	0.39	0.21	1	
SSP	0.3	0.29	0.08	0.03	0.02	0.31	0.68	0.26	0.29	0.29	0.01	0.83	1

مقادیر پر رنگ در سطح اطمینان آلفا = ۰/۰۵ با مقدار صفر تفاوت معنادار دارند.

بر اساس نمونه‌های چاههای انتخابی دشت زنجان و با توجه به نتایج ارائه شده در دیاگرام پاپیر (شکل ۴)، سه تیپ و رخساره برای نمونه‌های آب زیرزمینی مورد بررسی شناسایی شد. عمدۀ چاههای در دشت زنجان در زون A قرار می‌گیرند. جلالیان و همکاران (۱۳۹۹) نیز این نتایج را تأیید می‌نمایند. زون A، تیپ کلسیم بی‌کربناته (Ca HCO_3) را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، در ساختار زمین‌شناسی آبخوان دشت زنجان میان‌لایه‌های آهکی برآکنش قابل توجهی دارند. از آنجایی که با کاهش دما، حلالیت CO_2 در آب افزایش می‌باید، مناطق کوهستانی با آب و هوای سرد معمولاً در CO_2 بسیار اشباع می‌شوند (Clow & Striegl, 2023). طبق نظر Klimchouk (۱۹۹۶)، حلالیت کربنات کلسیم در حضور گاز CO_2 ($\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$) افزایش می‌باید. از این رو، برهمکنش بین آب اشباع شده با دی‌اکسید کربن و سنگ آهک، احتمال حل شدن کلسیم و بی‌کربنات بیشتر را در آبخوان مورد مطالعه افزایش می‌دهد. مابقی چاههای بهترتیپ در زون B، تیپ کلسیم سولفاته (Ca SO_4) با شوری متوسط و زون C، تیپ سدیم کلراید (Na Cl) طبقه‌بندی می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از نمودار ویلکاکس نشان می‌دهد که ۶۴/۲۹ درصد چاههای از نظر مصارف کشاورزی، در کلاس C2S1 و مناسب برای مصارف کشاورزی بوده و ۳۵/۷۱ درصد آن‌ها در کلاس C3S1 قرار دارند که جهت مصارف کشاورزی دارای کیفیت قابل قبول هستند (جدول ۳).



شکل ۴- نمودار پاپیر نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از آبخوان دشت زنجان

Figure 4- Piper-diagram of groundwater samples taken from Zanjan Aquifer

جدول ۳- کیفیت چاههای انتخابی در آبخوان زنجان از نظر مصارف کشاورزی و سختی

Table 3- The quality of selected wells samples in Zanjan Aquifer in terms of agricultural uses and hardness

Well	Na%	SAR	EC	Class	Water quality for agriculture	Water quality based on TH
z1	20.86	0.82	622	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z10	42.31	2.38	927	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z12	31.2	1.11	444	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z14	40.29	2.9	1570	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Total Hard
z15	28.11	1.06	517	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z16	24.46	0.84	448	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z17	53.49	3.71	1137	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z20	55.56	3.18	744	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z21	25.14	1.14	779	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z22	43.25	2.16	728	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z24	30.75	1.07	432	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Rather Hard
z25	23.07	0.94	655	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z27	45.77	2.2	634	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z29	33.71	1.63	788	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z3	31.48	1.55	845	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z31	51.08	2.67	678	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z33	26.9	0.92	438	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z34	43.65	2.51	946	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z38	14.1	0.5	542	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z4	24.59	1.1	776	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z44	31.66	1.54	824	C3-S1	Salty- Permissible to Doubtful	Hard
z46	36.68	1.58	600	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard
z6	34.87	1.61	700	C2-S1	A little salty-Good to Permissible	Hard

همچنین با بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که از نظر میزان سختی کل عده آبخوان دشت زنجان دارای آبهای زیرزمینی سخت است. تنها ۴/۳۴ درصد آن در کلاس کاملاً سخت قرار می‌گیرند (جدول ۳). خلاصه نتایج بدست آمده از کیفیت نمونه‌های برداشت شده دشت زنجان از نظر مصارف آشامیدن به تکیک متغیرهای کیفی آبر اساس روش طبقه‌بندی شولر نیز در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- کیفیت آبخوان زنجان از نظر مصارف آشامیدن بر اساس طبقه‌بندی شولر (%)

Table 4- The quality of Zanjan Aquifer in terms of drinking purposes based on Schuler's classification (%)

Water Quality	TDS	TH	Na	Cl	SO ₄
Good	82.61	56.52	91.3	100	65.22
Acceptable	13.04	43.48	8.7	0	26.09
Average	4.35	0	0	0	8.7
Inappropriate	0	0	0	0	0
Completely Inappropriate	0	0	0	0	0
Non Potable	0	0	0	0	0

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

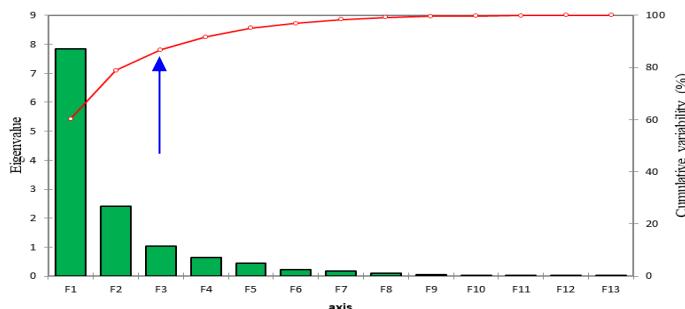
تحلیل مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های پرکاربرد برای تجسم و خلاصه نمودن مجموعه داده‌های پیچیده است که عوامل اصلی را از مجموعه بزرگی از متغیرهای موجود در یک مجموعه داده استخراج می‌کند. با توجه به نتایج آزمون کرویت بارتلت $P\text{-Value} < 0.05$ بوده و بنابراین فرض صفر مبنی بر عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین متغیرها و صفر رد شد. لذا ماتریس همبستگی مورد تحلیل در جامعه با صفر تفاوت داشته و حاکی از مناسب بودن سری داده‌های موجود جهت انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی است (جدول ۵). بنابراین، تحلیل مؤلفه‌های اصلی

برای ۱۴ متغیر کیفی در ۴۷ چاه انتخابی در آبخوان دشت زنجان انجام گرفت. با توجه به نمودار سنگریزهای شکل (۵)، سه مؤلفه اصلی با مقدار ویژه بزرگ‌تر از ۱ برای آبخوان دشت زنجان با درصد واریانس تجمعی ۸۶/۸۱ استخراج شد.

جدول ۵- نتایج آزمون کرویت بارتلت برای متغیرهای کیفی آبخوان دشت زنجان

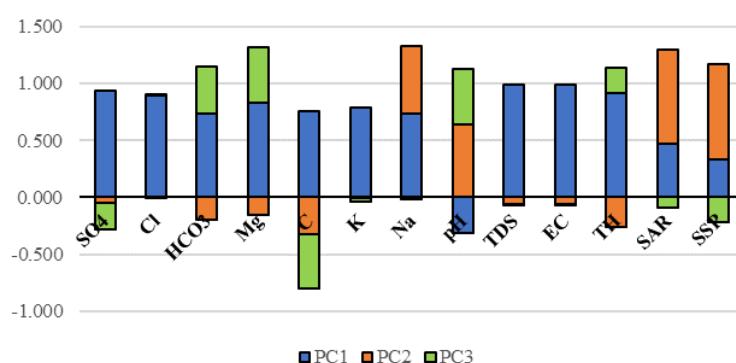
Table 5- Bartlett's sphericity test for qualitative variables of Zanjan Aquifer

Chi-square (Observed value)	1964.172
Chi-square (Critical value)	113.145
Degrees of Freedom (DF)	90
p-value	< 0.0001
alpha	0.05



شکل ۵- نمودار سنگریزهای مقدار واریانس تبیین شده و مقادیر ویژه ۱۳ مؤلفه استخراج شده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی در آبخوان دشت زنجان
Figure 5- The scree plot for explained variance and eigenvalues for the 13 components (PCs) from the PCA analysis in Zanjan Aquifer

بارهای عاملی اصلی محاسبه شده برای هر یک از مؤلفه‌های مورد نظر آبخوان مورد مطالعه در شکل (۶) ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که پارامترهای SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , TDS , K^+ , Na^+ , pH و TH در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت زنجان سهم بیشتری در توزیع عامل اول ($\text{PC}_1 = 60/27\%$) داشته‌اند. همچنین پارامترهای pH , SAR و SSP در عامل دوم ($\text{PC}_2 = 18/57\%$) بهتر تبیین شده‌اند. شکل (۷) پراکنش متغیرهای کیفی را نسبت به دو عامل اصلی اول و دوم نشان می‌دهد.



شکل ۶- بار عامل‌های اصلی در آبخوان دشت زنجان طی دوره مطالعاتی ۱۸ ساله (۱۳۸۲-۱۴۰۰)

Figure 6- Factor loadings for principle components in Zanjan Aquifer during the 18-year study period (2003-2021)

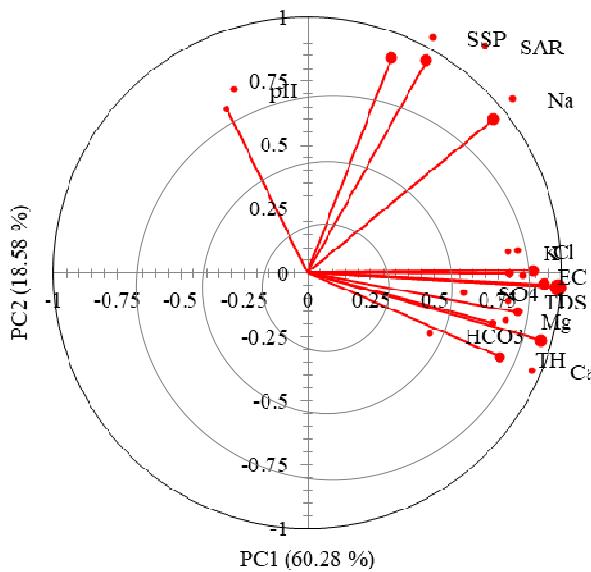
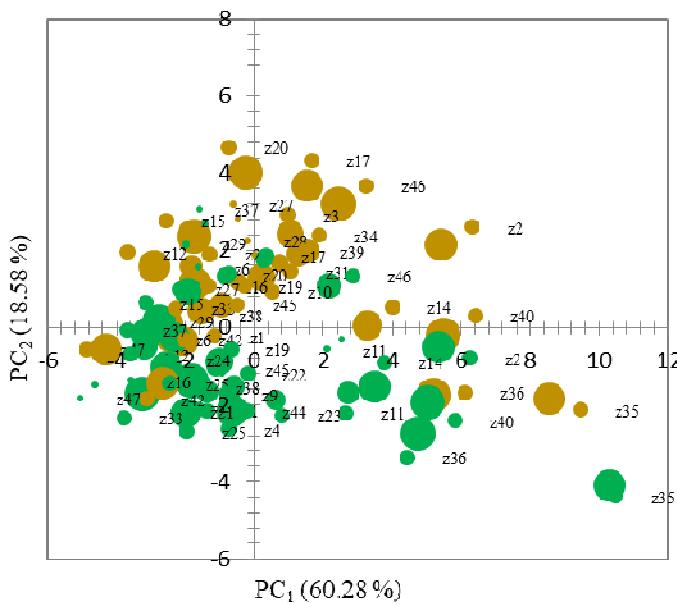
شکل ۷- بار عاملی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی در آبخوان دشت زنجان نسبت به دو عامل اصلی PC₁ و PC₂ (۷۸/۸۵ درصد)

Figure 7- The loading of the first two principal components of groundwater quality variables (78.85%) in Zanjan Aquifer

علاوه بر آن، پراکنش نمرات عاملی مربوط به چاههای انتخابی در آبخوان دشت زنجان در دو فصل خشک و بارانی نیز نشان داده است. اندازه‌ی دوازیر در چاههای مشاهداتی بر اساس مقادیر مربع کسینوس (\cos^2) آن‌ها نسبت به PC₁, PC₂, ... متفاوت بوده و دوازیر بزرگتر گویای \cos^2 بیش‌تر و برابر با ارتباط قوی‌تر مشاهدات و عوامل اصلی با یکدیگر است. در این مطالعه مشاهدات با $\cos^2 > 0.4$ بدلیل همبستگی بالا با عوامل اصلی در تفسیر و تحلیل نتایج مدنظر قرار گرفتند. با توجه به نمودار پراکنش نمرات عاملی مشاهده شد که ۴۷ چاه انتخابی در آبخوان دشت زنجان طی دو فصل خشک و بارانی (شکل ۷) نسبت به دو عامل PC₁ و PC₂ در دو گروه قابل بررسی هستند. گروه دوم که ارتباط مثبت با PC₁ دارند و بیش‌تر با متغیرهای pH, EC, TDS, K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, HCO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ دارند. این گروه بیش‌تر با متغیرهای pH, SAR و SSP و کمتر با متغیرهای SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃²⁻ هستند. نتایج همچنین نشان داد که چاههای z10, z14, z17, z20 و z25 در هر دو فصل خشک و بارانی با PC₂ و به عبارت دیگر با متغیرهای pH, SAR و SSP ارتباط قوی نشان دادند. این در حالی است که با توجه به نتایج رخساره چاههای مشاهداتی (شکل ۴)، چاههای z17 و z20 دارای تیپ NaCl بودند که تأییدی بر نتایج بدست آمده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی است. با توجه به بررسی زمین‌شناسی منطقه مشخص شد که چاههای مذکور با نمرات عاملی بالا در ارتباط با عامل دوم، بر روی سازند گچساران با لایه‌های نمک، انیدریت و مارن‌های دگرسان شده که با نهشته‌های سیالابی پوشیده شده‌اند، قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که کاربری غالب اطراف چاههای مذکور زراعت دیم بوده است. ولی زراعت آبی و باغی نیز بخش وسیعی از محدوده مطالعاتی را به خود اختصاص می‌دهد. لذا شورای این چاهها را می‌توان در وهله اول به عوامل طبیعی و ماهیت زمین‌شناسی منطقه نسبت داد. همچنین، نحوه مدیریت آبیاری و برداشت بی‌رویه از آبهای زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی در میزان آب‌شویی املاح خاک و تشديد شوری اثرگذار هستند. از طرفی، ۶۳/۸ درصد از کل چاههای مورد مطالعه تنها در فصل خشک با عامل دوم و متغیرهای شوری ارتباط قوی‌تری نشان دادند (شکل ۸). کاهش تراز سفره آب زیرزمینی ناشی از کاهش نزولات جوی در ماههای کم‌باران (خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر) و ادامه برداشت از آبخوان در فصل زراعی که در منطقه مورد مطالعه با ماههای کم بارش و خشک همزمان است، را می‌توان به افزایش غلظت شوری در آبخوان در فصل خشک نسبت داد. همچنین، تجمع مقادیر بالای سدیم در نمونه‌های آب زیرزمینی می‌تواند بدلیل استفاده طولانی‌مدت از پساب تصفیه‌نشده در مصارف آبیاری اتفاق بیفت. Celestino و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعات خود، مقادیر بالای سدیم را در پساب استفاده شده برای مصارف کشاورزی گزارش نمودند.



شکل ۸- نمرات عاملی چاههای مشاهده‌ای در آبخوان دشت زنجان نسبت به دو عامل اصلی PC₁ و PC₂ (درصد ۷۸/۸۵)

Figure 2–The scores of the first two principal components of groundwater quality variables (78.85%) in Zanjan Aquifer

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، وضعیت کیفی آبخوان دشت زنجان و تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از ۴۷ چاه با پراکنش مناسب در کل دشت طی ۱۸ سال (۱۴۰۰-۱۳۸۲) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین برای بررسی ترکیب یونی نسبی نمونه‌های آب زیرزمینی، تیپ و رخساره و یون‌های غالب آبخوان از داده‌های سال ۱۴۰۰ استفاده شد. نتایج نشان داد که یون‌های سدیم و بی‌کربنات بهترین کاتیون و آئیون غالب در آبخوان دشت زنجان بودند. مقادیر بالای بی‌کربنات در منطقه مورد مطالعه را می‌توان با انحلال سازنده‌ای کربناته در ارتباط داشت. میانگین کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی بهترین ۵۲۳/۷۷۴ میلی‌گرم در لیتر و ۸۱۱/۱۰۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود که با توجه به حد مجاز اعلام شده توسط FAO، برای مصارف آبیاری محدودیت ایجاد نکرده ولی عمدۀ چاههای محدوده مطالعاتی به لحاظ غلظت املأ و هدایت الکتریکی با توجه به استاندارد WHO و طبقه‌بندی شولر برای مصارف شرب از کیفیت مناسبی برخوردار نیست. بالا بودن مقادیر هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و سختی کل در نمونه‌های آب زیرزمینی مورد بررسی عمده‌ای می‌تواند به دلیل برهم‌کنش سنگ و آب زیرزمینی باشد. لذا، توصیه می‌شود که آب چاههای دشت زنجان قبل از استفاده به عنوان آب آشامیدنی به درستی تصفیه شود. همبستگی مثبت بالا بین K⁺ و SO₄²⁻ در آبخوان دشت زنجان مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده تبادل پتانسیم و نمک سولفات در فرآیند هوازدگی سنگ و استفاده مکرر از پساب در مصارف آبیاری باشد. همبستگی مثبت بین Ca⁺ و HCO₃²⁻ نیز حاکی از انحلال کلسیت در منطقه مورد مطالعه بود. بر اساس دیاگرام پایپر عده آبخوان دشت زنجان در تیپ کلسیم بی‌کربناته قرار گرفت. از نظر میزان سختی کل نیز عده آبخوان دشت زنجان دارای آب‌های زیرزمینی سخت است. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ۱۴ پارامتر مورد بررسی در این مطالعه توسط دو عامل اصلی اول با درصد واریانس ۷۸/۸۵ تبیین شدند. پارامترهای HCO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, pH, SAR و SSP در عامل دوم بهتر تبیین شدند. با توجه به نمرات عاملی چاههای مورد مطالعه، عده چاهها در فصل خشک با پارامترهای Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, EC, TDS, K⁺ و TH در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت زنجان سهم بیشتری در توزیع عامل اول داشته و عامل دوم همبستگی قوی‌تری نشان دادند که حاکی از افزایش غلظت شوری در آب‌های زیرزمینی در ماههای کم بارش بود. لذا با توجه به موقعیت دشت زنجان و تمرکز واحدهای صنعتی، زراعی و مسکونی استان در این دشت، حفظ و بهبود کیفیت آبخوان دشت زنجان ضرورت دارد. از آن جایی که برداشت بی‌رویه از آبخوان و استفاده از پساب‌های صنعتی و زراعی به طور مستقیم بر کیفیت آب‌های زیرزمینی اثرگذار است، تصفیه بهینه پساب‌های برگشتی به بخش کشاورزی، آگاهی‌بخشی در خصوص استفاده آگاهانه و پایدار از منابع مناسب با ظرفیت آبخوان، کثست گونه‌های مناسب با اقلیم و ظرفیت منطقه و آموزش و ترویج در جهت جلب و مشارکت هر چه بیش تر کشاورزان و بهره‌برداران آب‌های زیرزمینی باید در اولویت برنامه‌ریزی استانی قرار گیرد. با آگاهسازی کشاورزان از تأثیرات اقدامات حفاظتی آب و تقویت دانش آن‌ها در این خصوص، استفاده از ظرفیت مراجع رسمی و توسعه رفتارهای حفاظتی همچون به کارگیری فناوری‌های مدرن آبیاری تحت فشار (قطرهای

و بارانی)، پوشش دار کردن کanal های انتقال آب از منبع تا مزرعه، کشت ارقام بذور با نیازهای آبی کم، ایجاد استخر یا حوضچه های آبی برای جمع آوری هرز آبها یا ذخیره های آبی و نشر ارزش های اخلاقی، می توان حفاظت از منابع آب را در میان کشاورزان گسترش داد. از طرفی، نظارت منظم بر کیفیت آب زیرزمینی جهت شناسایی آلاینده های نوظهور و ارزیابی اثربخشی اقدامات مدیریتی با هدف بهبود کیفیت آب در دشت مذکور توصیه می شود. استفاده از رویکردها و فناوری های جدید مثل سنجش از دور برای نظارت بر کیفیت آب های زیرزمینی نیز می تواند بیش از زشنمندی را در مورد تغییرات و روندهای فضایی ارائه دهد. با استمرار مطالعات و استفاده از فناوری های نوظهور و سرمایه گذاری در برنامه های نظارتی قوی، می توانیم منابع ارزشمند آب زیرزمینی خود را برای نسل های آینده بهتر محافظت و مدیریت کنیم.

ملاحظات اخلاقی

دسترسی به داده ها: داده ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

حمایت مالی: این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی انجام شده و از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور حمایت مالی دریافت نموده است.

مشارکت نویسنده گان: زهرا عبدالله، قباد رستمی زاد و پرویز عبدی نژاد: بخش های مختلف مقاله توسط نامبردها انجام و نگاشته شده است.

تضاد منافع نویسنده گان: نویسنده گان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

سپاس گزاری: نویسنده گان این مقاله مرتب قدردانی خود را از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور جهت حمایت مالی طرح تحقیقاتی حاضر اعلام می دارند. همچنین از حسن همکاری صمیمانه سازمان آب منطقه ای استان زنجان و جناب آقای مهندس خالقی در تهیه و کنترل داده ها و اطلاعات مورد نیاز سپاس گزاری می شود.

منابع

- اعظمی، جابر، کیانی مهر، ناصر، زمانی، عباسعلی، عبدالله، زهرا، زارعین، محمد و جعفری، ناصر. (۱۳۹۸). ارزیابی سلامت کیفی آب رودخانه قزل اوزن در محدوده استان زنجان با استفاده از شاخص های NSFWQI و IRWQISC. *Mهندسی بهداشت محیط*, ۶(۴)، ۳۸۵-۴۰۰.
- آقانباتی، سید علی. (۱۳۸۳). زمین شناسی ایران. سازمان زمین شناسی کشور، ۶۴۰ صفحه.
- پاشایی فر، محمد رضا، دهقان زاده، رضا، رمضانی، محمد ابراهیم، رفیعیان، امید، و نجایی، آزو. (۱۴۰۲). ارزیابی وضعیت، فرآیندها و منابع ژئوشیمیایی آبخوان با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی، روش های گرافیکی و تحلیل های آماری چند متغیره - مطالعه موردی: دشت شبستر. *مهندسی منابع آب*, ۱۶(۵۶)، ۱۵-۳۰.
- پاک، زهرا، و محسنی موحد، سید اسدالله. (۱۳۹۶). اثرات اضافه برداشت و خشکسالی های اخیر بر کیفیت و کمیت آبخوان دشت ساوه (یادداشت فنی). *تحقیقات منابع آب ایران*, ۱۳(۴)، ۱۵۴-۱۶۰.
- جانی سرناوی، طاهره، و شاهرخی، سید وحید. (۱۴۰۱). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی به کمک پارامترهای هیدرژئوشیمیایی (مطالعه موردی: ناحیه قیدار-استان زنجان). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*, ۲۴(۳)، ۲۸۹-۳۰۵.
- جلالیان، عسگر، سمیعی، حمیده، شکری خوبستانی، مصصومه، و کریمی، محمد رضا. (۱۳۹۹). بررسی اثرات خشکسالی و شوری بر کیفیت شیمیایی آبخوان دشت زنجان. *ارتقای اینسی و پیشگیری از مصدومیت*, ۵(۲)، ۱۱۹-۱۲۹.
- خانلوزی، فهیمه، پریز نگنه، عبدالحسین، زمانی، عباسعلی، و دادبان شهامت، یوسف. (۱۳۹۴). بررسی کیفیت هیدرژئوشیمیایی و بهداشتی آب زیرزمینی شهرستان رامیان، استان گلستان. *تحقیقات سلامت در جامعه*, ۱(۳)، ۴۱-۵۲.
- ربانی، جواد، و زهدی، افشین. (۱۳۹۹). ریزدیرینه شناسی و محیط رسوی سازند قم در شمال غرب زنجان. *رساره های رسوی*, ۱۳(۲)، ۱۷۳-۱۸۹.
- شهیکی، حدیث، و خراسانی پور، مهدی. (۱۴۰۲). هیدرژئوشیمی و کیفیت منابع آب منطقه تهرود، به، شرق استان کرمان. *محیط زیست طبیعی*, ۴(۷۶)، ۷۳-۷۴۶.
- شیخی آلمان آیاد، زهرا، پیر خاطری، حسین، و رحمانپور، حسن. (۱۴۰۲). بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه با بکارگیری روش های آماری چند متغیره و فرآیندهای هیدرژئوشیمیایی. *یافته های نوین زمین شناسی کاربردی*, ۱۵۵۴(۱۰.27810).
- فضابخش، شاهین، رسول زاده، علی، رمضانی مقام، جواد، و اسماعیلیان، مهدی. (۱۴۰۱). بررسی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش های آماری چند متغیره در آبخوان دشت اردبیل. *مهندسی آبیاری و آب ایران*, ۵۰(۱۳)، ۳۵۳-۳۳۳.

۱۲. کلاتری، نصرالله، عنبری، ابوالحسن، و محمدی، هادی. (۱۳۹۷). بررسی هیدروشیمیابی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بستان با استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره. *تحقیقات منابع آب ایران*, ۱۴(۲)، ۲۴۲-۲۵۳. https://www.iwrr.ir/article_55943.html

References

1. Aazami, J., KianiMehr, N., Zamani, A., Abdollahi, Z., Zarein, M., & Jafari, N. (2019). Water quality assessment of Ghezelozan River in Zanjan Province using NSFWQI, IRWQI and Liou. *Journal of Environmental Health Engineering*, 6(4), 385–400. <https://doi.org/10.29252/jehe.6.4.385> [In Persian]
2. Abdollahi, Z., Kavian, A., & Sadeghi, S. H. R. (2017). Spatio-temporal changes of water quality variables in a highly disturbed river. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3(3), 243–256. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2017.03.03.002>
3. Abdollahi, Z., Kavian, A., Sadeghi, S. H. R., Khosrovyan, A., & DelValls, A. (2019). Identifying environmental risk associated with anthropogenic activities in Zanjanrud River, Iran, using an integrated approach. *Catena*, 183, 104156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104156>
4. Abou Zakhem, B., Al-Charideh, A., & Kattaa, B. (2017). Using principal component analysis in the investigation of groundwater hydrochemistry of Upper Jezireh Basin, Syria. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14), 2266-2279. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.09.004>
5. Afrasiabian, A., Sivand, S. M., Dogančić, D., Plantak, L., & Đurin, B. (2021). Geological features for geotourism in the Zanjan and Hamadan area, northern Iran. *Sustainability (Switzerland)*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/su13126587>
6. Aghanabati, S. A. (2011). Geological Survey of Iran. *Quarterly Journal of Geological Education Growth*, 67(17), 18–25. <https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/868912>. [In Persian]
7. Ali, S., Verma, S., Agarwal, M. B., Islam, R., Mehrotra, M., Deolia, R. K., Kumar, J., Singh, S., Mohammadi, A. A., Raj, D., Gupta, M. K., Dang, P., & Fattahi, M. (2024). Groundwater quality assessment using water quality index and principal component analysis in the Achnera block, Agra district, Uttar Pradesh, Northern India. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56056-8>
8. Chandran, S., Karmegam, M., Kumar, V., & Dhanasekarapandian, M. (2017). Evaluation of groundwater quality in an untreated wastewater irrigated region and mapping—a case study of Avaniyapuram sewage farm, Madurai. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2900-9>
9. Drechsel, P., Marjani Zadeh, S., & Salcedo, F. P. (2023). Water quality in agriculture: risks and risk mitigation. Published by: The Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Water Management Institute, Rome. <https://doi.org/10.4060/cc7340en>
10. El-Rawy, M., Fathi, H., Abdalla, F., Alsrehri, F., & Eldeeb, H. (2023). An Integrated Principal Component and Hierarchical Cluster Analysis Approach for Groundwater Quality Assessment in Jazan, Saudi Arabia. *Water (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/w15081466>
11. Fazabakhsh, S., Rasoulzadeh, A., Ramezani moghadamMahdy Esmailian, J., & Ramezani moghadam Mahdy Esmailian, J. (2022). Investigation of Groundwater Quality Using Multivariate Statistical Methods in Ardabil Plain Aquifer. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 13(2), 333-353. <https://doi.org/10.22125/IWE.2022.162670>. [In Persian]
12. Feizizadeh, B., Abdollahi, Z., & Shokati, B. (2022). A GIS-Based Spatiotemporal Impact Assessment of Droughts in the Hyper-Saline Urmia Lake Basin on the Hydro-Geochemical Quality of Nearby Aquifers. *Remote Sensing*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/rs14112516>
13. Gautam, V. K., Kothari, M., Al-Ramadan, B., Singh, P. K., Upadhyay, H., Pande, C. B., Alsrehri, F., & Yaseen, Z. M. (2024). Groundwater quality characterization using an integrated water quality index and multivariate statistical techniques. *PLoS ONE*, 19(2 February). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294533>
14. Ghaffari, M., Chavoshbashi, A. A., Eslami, A., Hatami, H., Pourakbar, M., & Hashemi, M. (2021). Spatial and temporal variation of groundwater quality around a volcanic mountain in northwest of Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100627>
15. JaniSarnavi, T., & Shahrokh, S. (2022). Assess groundwater quality with help of Hydrochemical parameters (Case study: in Gheydar area, Zanjan Province). *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(3), 289–305. [In Persian]
16. Jalalian, A., Samiee, H., Shokri Khoubestani, M., & Karimi, M.R. (2020). Investigation Of The Effects Of Drought And Salinity On The Chemical Quality Of The Water Resources In The Zanjans' Plain Aquifers. *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention*, 8(2), 119-129. <Https://Sid.Ir/Paper/961982/En>. [In Persian]
17. Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis for special types of data. Springer.

18. Kalantari, N., Anbari, A., & Mohammadi, H. (2018). Hydrochemical assessment of surface and groundwater resources of the Bostan Plain using multivariate statistical techniques. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 242–253. https://www.iwrr.ir/article_55943.html. [In Persian]
19. Kavian, A., Dodangeh, S., & Abdollahi, Z. (2016). Annual suspended sediment concentration frequency analysis in Sefidroud basin, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 48. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0101-2>
20. Khanduzi F, Pari Zanganeh A, Aamani A, & Dadban Shahamat Y. (2015). Survey of Hydrogeochemical Quality and Health of Groundwater in Ramian, Golestan Province, Iran. *Journal of Health Research in Community*, 1(3), 41–52. 20.1001.1.24236772.1394.1.3.6.4. [In Persian]
21. Li, P., Li, X., Meng, X., Li, M., & Zhang, Y. (2016). Appraising groundwater quality and health risks from contamination in a semiarid region of northwest China. *Exposure and Health*, 8, 361–379. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0205-y>
22. Ma, L., Qian, J., Zhao, W., Curtis, Z., & Zhang, R. (2016). Hydrogeochemical analysis of multiple aquifers in a coal mine based on nonlinear PCA and GIS. *Environmental Earth Sciences*, 75(8). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5532-6>
23. Mandel, S. (2012). Groundwater resources: investigation and development. Elsevier.
24. Marín Celestino, A. E., Ramos Leal, J. A., Martínez Cruz, D. A., Tuxpan Vargas, J., De Lara Bashulto, J., & Morán Ramírez, J. (2019). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality, using multivariate statistical approaches and water quality index in a wastewater irrigated region. *Water*, 11(8), 1702. <https://doi.org/10.3390/w11081702>
25. Mehdi, M., Hakim, D. K., Amina, A., & Nourredine, G. (2023). Multivariate Statistical Analysis of Groundwater Quality of Hassi R'mel, Algeria. *Journal of Ecological Engineering*, 24(5), 22–31. <https://doi.org/10.12911/22998993/161140>
26. Meride, Y., & Ayenew, B. (2016). Drinking water quality assessment and its effects on residents health in Wondo genet campus, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40068-016-0053-6>
27. Mostafazadeh, R., Haji, K., Azarmdel, H., & Ghasemi, A. (2022). Determining the Important stations and Physicochemical Parameters of Surface water Quality Measurement in Gorgan-Rud Basin (Iran) Using Multivariate Statistical Techniques. *Irrigation and Water Engineering*, 13(49), 421–439. <https://www.magiran.com/paper/2489414> [In Persian]
28. Muangthong S, S. S. (2015). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: case study of the Nampong River and Songkhram River, Thailand. *Environ Monit Assess.*, 187(9), 548. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4774-1>
29. Nayak, A., Matta, G., & Uniyal, D. P. (2023). Hydrochemical characterization of groundwater quality using chemometric analysis and water quality indices in the foothills of Himalayas. *Environment, Development and Sustainability*, 25(12), 14229–14260. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02661-4>
30. Nematollahi, M. J., Clark, M. J. R., Ebrahimi, P., & Ebrahimi, M. (2018). Preliminary assessment of groundwater hydrogeochemistry within Gilan, a northern province of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6543-4>
31. Organization, W. H. (2002). Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization.
32. Papadaki, C., Lagogiannis, S., & Dimitriou, E. (2023). Preliminary Analysis of the Water Quality Status in an Urban Mediterranean River. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/app13116698>
33. Pashaeifar, M., Dehghanzadeh, R., Ramazani, M. E., Rafieyan, O., & Nejaei, A. (2023). Research paper assessment of status, processes, and geochemical sources of aquifer using water quality index, graphical approaches, and multivariate statistical analyses-a case study: Shabestar Plain. *Water Resources Engineering Journal*, 16(56), 1–16. <https://doi.org/10.30495/wej.2023.28012.2315>. [In Persian]
34. Pak, Z., & Mohseni Movahhed, S. A. (2018). The effects of excessive withdrawal and recent droughts on Saveh Plain Aquifer (Technical Note). *Iran-Water Resources Research*, 13(4), 154-160. <Https://Sid.Ir/Paper/100321/En>. [In Persian]
35. Rabbani, J., & Zohdi, A. (2022). Micropaleontology and sedimentary environment of the Qom Formation in the northwest of Zanjan. *Sedimentray Facies*, 13(2), 173-189. <https://civilica.com/doc/1403637>. [In Persian]
36. Rodrigues de Souza, R., Toebe, M., Chuquel Mello, A., & Chertok, K. (2023). Sample size and Shapiro-Wilk test: an analysis for soybean grain yield. *European Journal of Agronomy*, 142:126666. <https://ssrn.com/abstract=4082791>
37. Schöller, P. (1962). Über die Raumgebundenheit politischen Geschehens: Antwort an Adolf Grabowsky. *Erdkunde*, 16(3), 219–220.

38. Shahiki, H., & Khorasanipour, M. (2024). Hydrogeochemistry and quality of water resources in the Tahroud Region of Bam, east of Kerman Province. *Journal of Natural Environment*, 76(4), 731–746. <https://doi.org/10.22059/jne.2023.345360.2451>. [In Persian]
39. Sheikhi Alman Abad, Z., Pirkharrati, H., & Rahmanpour, H. (2023). Investigating the quality of underground water in the alluvial plain of Urmia by using multivariate statistical methods and hydrogeochemical processes. *New Findings in Applied Geology*. [In Persian]
40. Singh, S. K., Singh, C. K., Kumar, K. S., Gupta, R., & Mukherjee, S. (2009). Monitorování podzemní vody v čase a v prostoru pomocí multivariačních statistických metod v oblasti Bareilly, Uttar Pradesh, Indie. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 57(1), 45–54. <https://doi.org/10.2478/v10098-009-0005-1>
41. Subba Rao, N., Ravindra, B., & Wu, J. (2020). Geochemical and health risk evaluation of fluoride rich groundwater in Sattenapalle Region, Guntur district, Andhra Pradesh, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(9), 2316–2348. <https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1741338>
42. Taoufik, G., Khouni, I., & Ghrabi, A. (2017). Assessment of physico-chemical and microbiological surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Wadi El-Bey River, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(7), 181. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2898-z>
43. Tiwari, A., & De Maio, M. (2017). Assessment of hydrogeochemical characterization and groundwater quality using geostatistical and gis techniques: A case in the north part of Italy. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17, 51–58. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/31>
44. Tlili-Zrelli, B., Gueddari, M., & Bouhlila, R. (2018). Spatial and temporal variations of water quality of mateur aquifer (Northeastern Tunisia): Suitability for irrigation and drinking purposes. *Journal of Chemistry*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2408632>
45. Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., & Debán, L. (1998). Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Research*, 32(12), 3581–3592. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00138-9)
46. Yousefi, S. R., Ghanbari, M., Amiri, O., Marzhoseyni, Z., Mehdizadeh, P., Hajizadeh-Oghaz, M., & Salavati-Niasari, M. (2021). Dy₂BaCuO₅/Ba₄DyCu₃O_{9.09} S-scheme heterojunction nanocomposite with enhanced photocatalytic and antibacterial activities. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(7), 2952–2965. <https://doi.org/10.1111/jace.17696>
47. Zghibi, A., Merzougui, A., Zouhri, L., & Tarhouni, J. (2014). Understanding groundwater chemistry using multivariate statistics techniques to the study of contamination in the Korba unconfined aquifer system of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 89, 1–15.